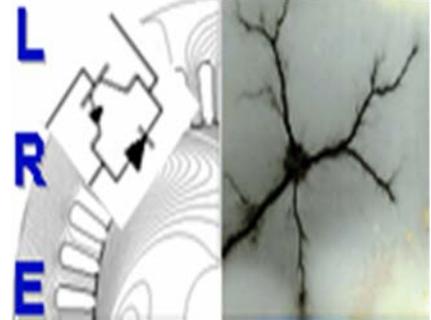


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'ELECTROTECHNIQUE
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire
pour l'obtention du diplôme de
Master en Electrotechnique

Intitulé

**Application de l'approche des lignes de transmission en vue de modéliser
des électrodes de terre horizontale et verticale enfouies dans un sol
homogène ou stratifié en deux couches**

Présenté par
Smail AHMIM

Sous la direction de Pr. M. Tegar
soutenu publiquement le 20 juin 2016

Membres du Jury

Président : A. BOUBAKEUR, Professeur à l'ENP
Rapporteur : M. TEGUAR, Professeur à l'ENP
Examineur : A. MEKHALDI, Professeur à l'ENP

ENP 2016

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

Remerciements

Je remercie Dieu de m'avoir prêté vie, santé et volonté pour achever ce travail.

Je tiens à remercier en premier lieu le Pr. Tegar Madjid, mon promoteur, qui a su m'orienter durant ce projet de par sa large connaissance dans le domaine de la haute tension, de ses conseils, son suivi constant, sa disponibilité, de sa bonne humeur et surtout de sa confiance envers mes capacités, il a toujours veillé à ce que je puisse réaliser un bon travail qui sera digne d'être une référence bibliographique.

Qu'il me soit aussi permis de remercier le Pr. Abdelouhab Mekhaldi pour son aide, son appui moral et pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Je prends aussi un réel plaisir de remercier chaleureusement le Pr. Ahmed Boubakeur, pour avoir accepté de présider la soutenance de notre mémoire et être l'un des membres du jury.

Je désire aussi exprimer mes vives remerciements à tous mes camarades et amis de la promotion de génie électrique, et plus particulièrement celle d'électrotechnique pour nos trois années d'étude, de travail et de rigueur passées en leur compagnie.

Je souhaite, en particulier, exprimer ma profonde gratitude envers mes proches, et surtout mes parents qui n'ont jamais cessé de croire en moi et à ma volonté d'étudier, et surtout pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de mon cursus universitaire.

Enfin, c'est pour moi un réel plaisir de remercier toutes les personnes qui m'ont, de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre, permis, par leur collaboration, leur soutien et leur avis judicieux, de mener à bien ce travail.

ملخص قد تم الاعتماد على نهج خطوط النقل لنموذج أسس من الأقطاب الكهربائية مدفونة أفقياً وعمودياً في تربة ذات بنية مختلفة (متجانسة ومصفحة أفقياً إلى طبقتين). يتمثل الهدف في تحديد الاستجابة الانتقالية للتيار والجهد الكهربائيين في مجال الزمن ومطال الممانعة بدلالة التردد، تحت تأثير تيار انتقالي. تم دراسة الأقطاب الكهربائية في حضور وغياب ظاهرة اعتماد المعلمات الكهربائية للأرض على التردد. قد وضعت العديد من الخوارزميات تحت بيئة MATLAB. تمت مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع تلك التي وجدت من قبل باحثين آخرين حيث وجد توافق جيد بينهما.

كلمات مفتاحية أسس من الأقطاب الكهربائية -الاستجابة الانتقالية -مطال الممانعة -تيار انتقالي -نهج خطوط النقل - اعتماد المعلمات على التردد.

Abstract The transmission lines approach have been adopted to model the grounding electrodes horizontally and vertically buried in different soil structures (homogeneous and horizontally stratified into two layers). The objective is to determine the electrical current and potential transient responses in the time domain and the impedance magnitude as function of the frequency, following an injection of a lightning current. The electrodes have been studied in the presence and absence of the soil electrical parameters frequency dependence phenomenon. Many algorithms have been developed under MATLAB environment. The results we obtained were confronted with those found by other researchers and show good agreement.

Key-words grounding electrodes - transient behavior - impedance magnitude - lightning current - transmission lines approach - frequency dependence.

Résumé L'approche des lignes de transmission a été adoptée pour modéliser les électrodes de mise à la terre enfouies horizontalement et verticalement dans différentes structures de sols (homogène et stratifié horizontalement en deux couches). L'objectif est de déterminer les réponses transitoires en courant et en potentiel électriques dans le domaine temporel et l'amplitude de l'impédance en fonction de la fréquence, suite à une injection d'un courant de foudre. Les électrodes ont été étudiées en présence et en absence du phénomène de la dépendance des paramètres électriques du sol en fréquence. De nombreux algorithmes ont été établis sous environnement MATLAB. Les résultats que nous avons obtenus, ont été confrontés à ceux trouvés par d'autres chercheurs, et montrent une bonne concordance.

Mots-clés électrode de terre -réponse transitoire - impédance d'entrée -courant de foudre - approche des lignes de transmission -dépendance en fréquence.

Table des matières

Remerciements	ii
Résumé	iii
Table des matières	iv
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Introduction Générale.....	1
I. Généralités sur la foudre, les Systèmes de mise à la terre, le calcul de résistance et sur les méthodes de Simulation numérique des SMALT	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Généralités sur la foudre	3
I.2.1. Effets de la foudre	4
I.2.1.1. Effets électriques.....	4
I.2.1.2. Effets thermiques	4
I.2.1.3. Effets électrodynamiques	4
I.2.1.4. Effets électromagnétiques	4
I.2.1.5. Effets électrochimiques	4
I.2.1.6. Effets acoustiques	4
I.2.1.7. Effets physiologiques	4
I.2.3. Modélisation de la foudre.....	4
I.2.3.1. Représentation mathématique d'un courant de foudre.....	5
I.3. Généralités sur les systèmes de mise à la terre (SMALT)	6
I.3.1. Définitions.....	6
I.3.1.2. Electrode de terre	6
I.3.1.4. Prise de terre.....	6
I.3.1.5. Masse	6
I.3.1.7. Grille	6
I.3.1.8. Mise à la terre.....	6
I.3.1.9. Conducteur de terre.....	6
I.3.1.10. Tension de pas.....	7
I.3.3. Classification des SMALT.....	7
I.3.3.1. SMALT de fonctionnement	7
I.3.3.2. SMALT de protection	7
I.3.3.3. SMALT de protection contre la foudre	7
I.3.3.4. SMALT de référence	7
I.4. Résistivité des sols	8

I.4.1. Réseaux de terre	8
I.4.2. Caractéristiques électriques du sol	8
I.4.2.1. Mesure de la résistivité du sol	8
I.4.2.1.1. Méthode de Wenner	8
I.4.2.1.2. Méthode de Schlumberger	8
I.5. Méthodes de calcul de résistance de différentes électrodes	9
I.5.1. Electrode verticale de forme cylindrique	9
I.5.2. Electrode horizontale de forme cylindrique	10
I.5.3. n électrodes verticales	11
I.5.4. Electrodes horizontales enfouies dans un même plan	11
I.6. Simulation numérique des SMALT	12
I.6.1. Approche des circuits	12
I.6.2. Approche du flux électromagnétique	13
I.6.2.1. Méthode des moments	13
I.6.2.2. Méthode des éléments finis	14
I.6.3. Approche hybride	15
I.6.4. Approche des lignes de transmission	16
I.6.5. Méthode des antennes	18
I.7. Conclusion	19
II. Application de la Méthode des lignes de transmission	20
II.1. Introduction	20
II.2. Présentation de la méthode des lignes de transmission	20
II.3. Dépendance en Fréquence des paramètres du sol	23
II.3.2. Etudes des modèles des paramètres électriques des sols	25
II.4. Etude des SMALT dans le domaine temporel	26
II.4.1. Simulation d'une électrode horizontale	27
II.4.1.1. Validation	29
II.4.1.2. Application	29
II.5. Etude des SMALT dans le domaine fréquentiel	32
II.5.1. Modélisation	32
II.5.2. Simulation des électrodes horizontale et verticale dans un sol homogène	33
II.5.2.1. Electrode horizontale	38
II.5.2.1.1. Validation	38
II.5.2.1.2. Exploitation des résultats	39
II.5.2.1.2.1. Effet de la résistivité du sol	39
II.5.2.1.2.2. Effet de la longueur de l'électrode	40

II.5.2.2. Electrode Verticale	41
II.5.2.2.1. Effet de la dépendance en fréquence et de la résistivité	42
II.5.2.2.2. Effet de la longueur de l'électrode.....	44
II.5.3. Etude de l'impédance d'un SMALT Horizontal dans un sol stratifié horizontalement.....	45
II.5.3.1. Modèle du système	46
II.5.3.2. Application	49
II.5.3.2.1. Etude de l'influence de la longueur	50
II.6. Conclusion.....	53
Conclusion Générale	54
Bibliographie	56

Liste des Figures

Figure I. 1 : Circuits basiques de modélisation d'un coup de foudre [KUF00].....	5
Figure I. 2 : Tension de pas [LEG07].....	7
Figure I. 3 : Méthode de Wenner [CLA84].....	8
Figure I. 4 : Méthode de Schlumberger [KHE15].....	9
Figure I. 5 : Electrode verticale de forme cylindrique [FLA10]	10
Figure I. 6 : Electrode horizontale de forme cylindrique [FLA10]	10
Figure I. 7 : n électrodes verticales en ligne droite.....	11
Figure I. 8 : Electrodes horizontales enfouies dans un même plan	11
Figure I. 9 : Circuit équivalent à chaque segment selon Meliopoulos et al. [YAG04]	13
Figure I. 10 : Circuit équivalent selon Meliopoulos et al. [YAG04].....	13
Figure I. 11 : Circuit π d'une électrode à plusieurs segments [ABI12].....	17
Figure II.1 : Différentes représentations d'un segment de la ligne de transmission	22
Figure II. 2 : Dépendance en fréquence de la permittivité et de la résistivité selon les modèles (S), (VA), (VP) et (P), (a) $\rho_{BF} = 93,46 \Omega.m$ et (b) $\rho_{BF} = 343 \Omega.m$	26
Figure II.3 : Organigramme du programme de simulation d'une électrode horizontale avec la méthode des lignes de transmission	28
Figure II.4.a : Nos résultats de simulation.....	29
Figure II.5.a : Ondes de tension avec et sans dépendance en fréquence avec $\alpha = 0,00364 \mu s - 1$, $\beta = 0,65221 \mu s - 1$ $f = 5,27kHz$	30
Figure II.6.a : Ondes de tension avec et sans dépendance en fréquence avec $\alpha = 0,00184\mu s - 1$ et $\beta = 2,4665 \mu s - 1$, $f = 2,67 kHz$	31
Figure II.7 : Résistance d'une électrode verticale	32
Figure II.8 : Amplitude de l'impédance en fonction de la fréquence [GRC05].....	33
Figure II.9 : Représentation élémentaire d'une ligne de transmission [WEN06].....	34
Figure II.10 : Représentation d'une ligne bifilaire [WEN06]	36
Figure II.11 : Notre impédance d'entrée utilisant LT.....	38
Figure II.12 : Impédance d'entrée d'Alipio et al. utilisant l'approche hybride [ALI12].....	38
Figure II.13 : Impédance d'entrée d'une électrode horizontale pour $\rho = 30 \Omega m$	39
Figure II.14 : Impédance d'entrée d'une électrode horizontale pour $\rho = 1000 \Omega m$	39
Figure II.15 : Impédance d'entrée d'une électrode Horizontale pour $l = 3m$	40
Figure II.16 : Impédance d'entrée d'une électrode Horizontale pour $l = 10m$	40
Figure II.17 : Impédance d'entrée d'une électrode Horizontale pour $l = 100m$	41
Figure II.18 : Impédance d'entrée, simulée pour $l = 3m$	42
Figure II.19 : Amplitude d'impédance d'entrée pour $l = 3m$ [GRC05]	42
Figure II.20 : Impédance d'entrée, simulée pour $l=30m$	42
Figure II.21 : Amplitude d'impédance d'entrée pour $l=30m$ [GRC05]	42
Figure II.22 : Impédance d'entrée d'une électrode Verticale pour $\rho = 30 \Omega m$	43
Figure II.23 : Impédance d'entrée d'une électrode Verticale pour $\rho = 300 \Omega m$	43
Figure II.24 : Impédance d'entrée d'une électrode Verticale pour $\rho = 1000 \Omega m$	43
Figure II.25 : Impédance d'entrée d'une électrode Verticale pour $l=3m$	44
Figure II.26 : Impédance d'entrée d'une électrode Verticale pour $l=15m$	44
Figure II.27 : Impédance d'entrée d'une électrode Verticale pour $l=100m$	44
Figure II. 28 : Electrode horizontale de mise à la terre enterrée dans un sol amagnétique stratifié horizontalement [KHE15]	46
Figure II.29 : Impédances d'entrée de l'électrode horizontale de terre enfouie à une profondeur $e=0.6m$ dans un sol stratifié verticalement	49

Figure II.30 : Impédances d'entrée de l'électrode horizontale pour différents point d'injection en présence et en absence de la dépendance de fréquence.....	50
Figure II.31 : Impédances d'entrée de l'électrode horizontale de longueur de 6m et 20m	51
Figure II.32 : Impédances d'entrée de l'électrode horizontale d'une longueur totale de 15m et 40m (a) : Z_{1in} (b) : Z_{2in}	52
Figure II.33 : Impédances d'entrée Z_{mil} de l'électrode horizontale lors de la variation de (a) l_2 , (b) l_1 ..	52

Liste des Tableaux

Tableau I. 1: Valeurs du coefficient $N(n)$	12
Tableau II. 1: Modèles des paramètres.....	24
Tableau II.2 : Valeurs du coefficient α_i [DAM14].....	25

Introduction Générale

L'importance de la conception de la mise à la terre d'équipements électriques et ouvrages de haute tension, tient de la nécessité de protéger les personnes contre d'éventuels défauts d'isolement, de protéger le matériel, d'améliorer la qualité du service et de limiter les surtensions nuisibles aux appareils avoisinants et potentiellement dangereuses pour les individus. Les équipements électriques doivent être mis à la terre afin d'éviter les risques de détérioration et les dangers d'électrocution dus à un défaut d'isolement. En effet, les systèmes non reliés à la terre produisent des surtensions plus importantes en cas de défaut, notamment en cas de foudre.

Afin de pouvoir réaliser une conception de mise à la terre, plusieurs études ont été déployées pour s'approcher le plus possible des conditions réelles de l'installation, et de façon à prévoir le comportement de la mise à la terre, sous différentes charges rencontrées lors d'un défaut du réseau électrique [BER11]. Ces recherches visaient, dans leur grande majorité, les comportements, transitoire et en régime établi, de ces systèmes de terre à basse et/ou haute fréquences [NZU09], car la réponse des systèmes de mise à la terre soumis à des courants de foudre est différente de celles obtenues suite à l'injection des courants à basse fréquence (BF), tels que des court-circuits [LEG07].

Les premiers travaux ont été entrepris par Tagg [TAG64], Sunde [SUN68] et Meliopoulos [MEL88]. Leurs systèmes ont été modélisés en basse fréquence par une résistance pure. En fait, diverses formules analytiques et empiriques ont été développées pour le calcul de la résistance de terre [CLA84, MHD87, IEEE00, LIE74]. En hautes fréquences, suite à l'injection d'un courant de foudre par exemple, le modèle de résistance n'est plus valable. De ce fait, plusieurs méthodes numériques ont été élaborées pour simuler les systèmes de terre. Nous citons, entre autres, l'approche des circuits qui a été mise en œuvre par Meliopoulos et al. en 1983 [MEL83, PAP87, RAM89], l'approche électromagnétique développée par Grcev [GRC90], l'approche hybride introduite par Dawalibi en 1986 [DAW86], l'approche des antennes déduite à partir de celle électromagnétique [GRC90,POL06,POL14] et finalement l'approche des lignes de transmission créée par Verma et al. [VER80], Mazzetti et al. [MAZ83] et enfin par Velazquez et al. [VEL84].

La présent mémoire porte sur l'analyse transitoire des électrodes horizontale et verticale de terre enfouies dans un sol homogène de différents paramètres électriques. Pour cela, des programmes, sous environnement MATLAB, ont été développés en se basant sur l'approche des lignes de transmission. Nous nous sommes intéressés à déterminer les réponses transitoires dans le domaine temporel consistant en les courant et les potentiels le long des électrodes.

L'approche des lignes de transmission a été appliquée dans le but de déterminer les réponses transitoires en courant et en tension dans le domaine temporel ainsi que les impédances d'entrée dans le domaine fréquentiel des électrodes horizontale et verticale entrées dans un sol homogène de différents paramètres électriques.

Ainsi, notre manuscrit est structuré en deux chapitres distincts. Nous commencerons le premier chapitre par des généralités sur la foudre. Nous présenterons par la suite des généralités sur les systèmes de mise à la terre, les principales méthodes de mesure de la résistivité des sols, les différentes relations exprimant la résistance des électrodes de différentes géométries et enfin les différentes méthodes de modélisation des systèmes de mise à la terre en hautes et très hautes fréquences.

Le deuxième et dernier chapitre traitera les systèmes de mise à la terre en utilisant la méthode des lignes de transmission (LT) en tenant compte de la dépendance en fréquence des paramètres électriques du sol. Dans le domaine temporel, nous examinerons la réponse transitoire d'une électrode horizontale enfouies dans un sol homogène. Dans le domaine fréquentiel, nous étudierons l'impédance d'entrée des électrodes horizontale et verticale entrées dans un sol homogène ou stratifié en deux couches.

Nous terminerons par une conclusion générale représentant une synthèse globale de notre travail.

Chapitre I

Généralités sur la foudre, les Systèmes de mise à la terre, le calcul de résistance et sur les méthodes de Simulation numérique des SMALT

I.1. Introduction

Les systèmes de mise à la terre ont pour rôle d'assurer à la fois la sécurité des personnes à proximité des installations électriques et de l'équipement utilisé, pour le bon fonctionnement de ceux-ci en évacuant le courant de défaut vers la terre. Le système de mise à la terre soumis à des courants à hautes fréquences ; courants de foudre et de manœuvre par exemple, présente un comportement différent de celui obtenu lors de l'injection des courants à basses fréquences tels que les courants de court-circuit.

Ce chapitre comporte, en fait, deux parties distinctes. Dans la première partie, nous présentons des généralités sur la foudre et sur les systèmes de mise à la terre (SMALT). Nous nous intéressons plus particulièrement à la classification de la foudre et celle des SMALT, les effets et la modélisation de la foudre et en fin cette partie comporte quelques définitions concernant les SMALT. Les caractéristiques électro-géologiques des sols, les principales méthodes de mesure de la résistivité des sols y sont également dévoilées. Dans la deuxième partie, nous nous sommes focalisés sur les relations les plus populaires exprimant la résistance des électrodes, de différentes formes et configurations, de mise à la terre. Dans la même partie nous nous sommes également intéressés aux différentes méthodes de modélisation et de simulation des SMALT en hautes et très hautes fréquences.

Partie I : La Foudre, les Systèmes de mise à la Terre et la Résistivité du sol

I.2. Généralités sur la foudre

La foudre est un phénomène naturel dû à d'autres phénomènes physiques et électriques complexes [OLI04].

Les coups de foudre sont d'abord classés selon le sens de développement du leader, à savoir ascendant ou bien descendant, puis un classement selon le sens d'écoulement du courant, à savoir, une décharge positive lorsque c'est la partie positive du nuage qui se décharge et inversement [OLI04, GAR84].

I.2.1. Effets de la foudre

I.2.1.1. Effets électriques

Lorsque le courant de foudre est écoulé dans le sol, une variation de tension de terre sur des faibles distances aura lieu. Cette variation peut engendrer des claquages locaux qui pourraient endommager les installations électriques à proximité du lieu de choc et constituer un danger pour les êtres vivants [BOU04].

I.2.1.2. Effets thermiques

En produisant une grande énergie, un coup de foudre peut faire fondre le métal, enflammer du bois et provoquer des incendies [BOU04].

I.2.1.3. Effets électrodynamiques

Les effets électrodynamiques consistent en les forces d'attraction entre deux conducteurs en parallèles parcourus par un courant de même sens [BOU04].

I.2.1.4. Effets électromagnétiques

Les effets électromagnétiques se manifestent par différents processus de couplages sur une structure : il s'agit des couplages capacitif et inductif [BOU04].

- Couplage inductif : c'est l'effet d'un champ magnétique, produit par un courant électrique circulant dans un conducteur, sur une victime voisine [TAH15].
- Couplage capacitif : c'est l'effet d'une différence de potentiel variable aux bornes d'un conducteur sur les autres conducteurs voisins ; c'est l'effet d'antenne [TAH15].

I.2.1.5. Effets électrochimiques

Les conducteurs, plus particulièrement ceux enterrés, se rangent par la corrosion à cause des courants qui s'écoulent dans le sol [BOU04].

I.2.1.6. Effets acoustiques

La foudre génère des pressions importantes à courtes distances, celles-ci peuvent provoquer des bris de vitres à proximité du point d'impact [BOU04].

I.2.1.7. Effets physiologiques

Les effets physiologiques vont de l'éblouissement au foudroiement [BOU04].

I.2.3. Modélisation de la foudre

La modélisation la plus basique d'un coup de foudre est faite à l'aide de deux circuits (a) et (b) de la figure I.1 suivante [KUF00] :

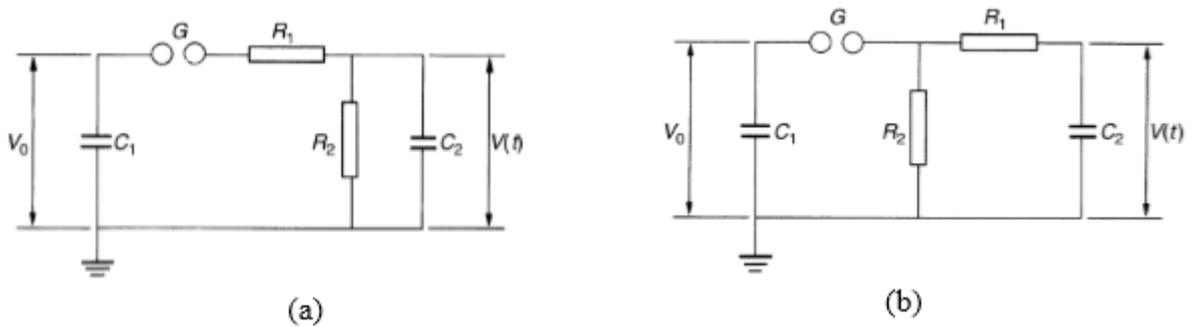


Figure I. 1 : Circuits basiques de modélisation d'un coup de foudre [KUF00]

Dans les deux configurations précédentes, le principe de fonctionnement est le même. Le condensateur d'impulsion \$C_1\$ est lentement chargé par une source de courant continu à une tension \$V_0\$, l'éclateur à sphère s'amorce. La résistance \$R_1\$ d'amortissement, amortit le courant et contrôle le temps de montée et \$R_2\$ est la résistance de décharge aux bornes de laquelle \$C_1\$ se décharge. Le condensateur \$C_2\$, d'une valeur très inférieure à \$C_1\$, modélisant la charge est rapidement chargé jusqu'à la valeur \$V\$ qui ensuite se décharge lentement, ceci est accompli en choisissant \$R_2\$ très supérieure devant \$R_1\$ (\$R_2 \gg R_1\$) [KUF00, KIN87].

I.2.3.1. Représentation mathématique d'un courant de foudre

Mathématiquement, le courant de foudre est représenté par deux formules analytiques. La première est la bi-exponentielle [NUC95, ZED90] et la deuxième est la formule de Heidler [HEI85] :

- Fonction bi-exponentielle :

$$I(0, t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (\text{I. 1})$$

- Formule de Heidler :

$$I(0, t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (\text{I. 2})$$

avec

$$\eta = e^{-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^n \sqrt{n \frac{\tau_2}{\tau_1}}} \quad (\text{I. 3})$$

Ou :

I_0 : Amplitude du courant à la base du canal ;

τ_1 : Constante de temps de front ;

τ_2 : Constante de décroissance ;

η : Facteur de correction d'amplitude ;

$n = 2 \div 10$.

I.3. Généralités sur les systèmes de mise à la terre (SMALT)

Le rôle principal d'un SMALT est d'écouler le courant électrique vers la terre. Il est utilisé afin de protéger les équipements et installations électriques ainsi que les personnes contre les éventuels coups de foudre ou les autres défauts comme les surtensions. Un SMALT reste donc un système très important et primordial dans n'importe quel schéma électrique.

I.3.1. Définitions

Pour bien introduire les lecteurs dans les SMALT, nous nous proposons d'énoncer, dans ce qui suit, quelques définitions.

I.3.1.2. Electrode de terre

Pièce conductrice enfouie dans le sol qui assure une liaison électrique avec la terre [VEN14].

I.3.1.4. Prise de terre

Une ou plusieurs électrodes de terre qui sont interconnectées en permanence.

I.3.1.5. Masse

Enveloppe conductrice d'un matériel électrique, qui n'est pas normalement sous tension, mais qui peut le devenir en cas de défaut d'isolement des parties actives de ce matériel [EDF97].

I.3.1.7. Grille

Elle est constituée d'un treillis de cuivre déployé dans le plan horizontal et se termine par une câblette [EDF97].

I.3.1.8. Mise à la terre

Mettre un équipement à la terre c'est relier son enveloppe métallique à une prise de terre, à condition que cette enveloppe soit considérée comme une masse [EDF97].

I.3.1.9. Conducteur de terre

C'est un conducteur qui relie à la prise de terre, une partie d'installation électrique, une partie conductrice accessible ou une partie métallique conductrice situées dans l'environnement électrique. Un conducteur peut être également utilisé pour relier les différentes prises de terre [NZU09].

I.3.1.10. Tension de pas

L'électrocution par 'tension de pas' peut se produire si une personne se situe à proximité du support qui diffuse un courant dans le sol ; une tension apparaît alors entre ses deux pieds, ce qui entraîne la circulation d'un courant I_{corps} [LEG07].

On définit ainsi la tension de pas par : $U_{\text{pas}} = |V_{M1} - V_{M2}|$, avec M1 et M2 deux points au sol distant d'un mètre (distance d'entrejambes par convention) (Figure I.2).

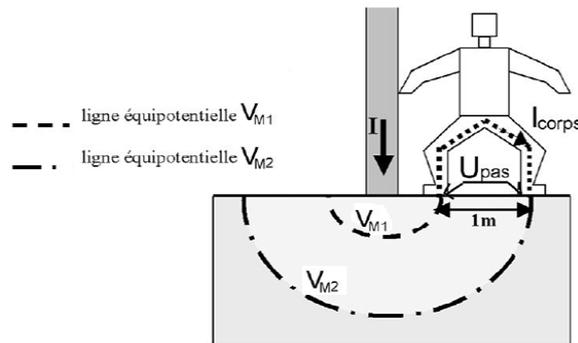


Figure I. 2 : Tension de pas [LEG07]

I.3.3. Classification des SMALT

Les SMALT d'un équipement électrique peuvent être classifiés selon quatre catégories dépendamment de leur fonction : SMALT de protection, SMALT de protection contre la foudre, SMALT de fonctionnement ainsi que les SMALT de référence [JIN13].

I.3.3.1. SMALT de fonctionnement

Ce sont les SMALT utilisés pour mettre à la terre le neutre des systèmes électriques, et ce dans le but de réduire la tension aux bornes de leurs isolations ; les neutres des systèmes électriques fonctionnant à plus de 110 kV sont solidement mis à la terre [JIN13].

I.3.3.2. SMALT de protection

Dans le cas où l'isolation d'un système électrique rompe, la partie isolée sera sous tension et risque de provoquer une électrocution à toute personne qui y entrera en contact. Pour pallier à ce danger, cette partie de l'équipement électrique est mise à la terre. Ce type de SMALT est dit de protection [JIN13].

I.3.3.3. SMALT de protection contre la foudre

Dans le but de prévenir contre les coups de foudre s'abattant sur les équipements électriques, plusieurs protections sont utilisées telles que les câbles de garde ou bien les parafoudres. De telles protections sont mises à la terre et ce genre de SMALT est dit de protection contre la foudre [JIN13].

I.3.3.4. SMALT de référence

De nombreux instruments de mesure et de contrôle sont des dispositifs électroniques robustes. De tels dispositifs ont besoin d'un signal de référence durant leur fonctionnement. La terre est choisie comme un bon signal de référence, pour que les dispositifs de mesure et les systèmes

de contrôle fonctionnent convenablement. Ce genre de mise à la terre est appelé SMALT de référence [KIN87].

I.4. Résistivité des sols

I.4.1. Réseaux de terre

Un réseau de terre est constitué d'un ensemble de conducteurs enterrés, en contact direct avec le sol et reliés électriquement entre eux. A basse fréquence, le réseau de terre peut être modélisé par une résistance pure [KHE15, CLA84].

I.4.2. Caractéristiques électriques du sol

Les caractéristiques électriques de tout milieu peuvent être exprimées par les trois paramètres suivants : la conductivité σ , la perméabilité μ et la permittivité ϵ .

I.4.2.1. Mesure de la résistivité du sol

La résistivité du sol est une quantité variable et la seule manière de la connaître avec précision est de la mesurer. Elle varie en fonction de plusieurs facteurs : la nature des sols, le taux d'impuretés, la salinité, le taux d'humidité, la température, ... [FLA10]

Afin de mesurer la résistivité du sol, plusieurs méthodes ont été mises au point [KHE15, CLA84, LAY01, VIJ04].

I.4.2.1.1. Méthode de Wenner

Cette méthode, universellement reconnue, a été développée en 1915 par Frank Wenner [KHE15]. Elle est la plus utilisée pour mesurer la résistivité d'un sol, dans laquelle quatre électrodes A, C, D et B sont disposées en ligne équidistantes [KHE15, CLA84, LAY01, VIJ04] comme montré sur la figure I.3 :

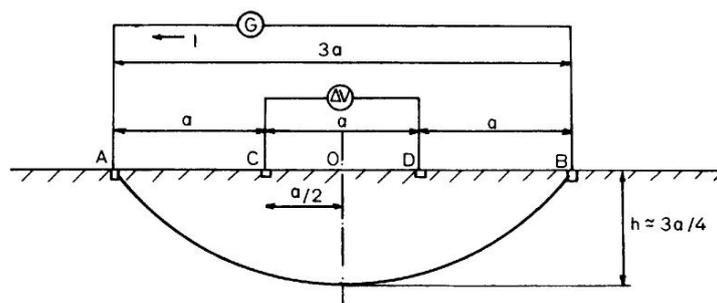


Figure I. 3 : Méthode de Wenner [CLA84]

Entre les deux électrodes extrêmes A et B, on injecte un courant I, et entre les deux électrodes centrales C et D, on mesure le potentiel ΔV . Le terme V/I est la résistance R qui est mesurée avec un telluromètre à quatre bornes.

La valeur de la résistance R indiquée par l'ohmmètre permet de calculer la résistivité (ρ) au point situé sous le point O, à une profondeur de $h = 3/4a$, par l'expression simplifiée suivante obtenue dans le cas d'un sol homogène [KHE15, CLA84, VIJ04] :

$$\rho = 2\pi aR \quad (I.4)$$

avec :

ρ : résistivité apparente en $\Omega.m$;

a : distance entre deux électrodes adjacentes, elle est appelée « base de mesure ».

I.4.2.1.2. Méthode de Schlumberger

La méthode de Schlumberger permet de réduire considérablement le temps de mesure sur le terrain, notamment si on désire réaliser plusieurs mesures de résistivité. Elle n'est pas très différente de la méthode de Wenner puisque elle se base sur le même principe, la seule différence est le positionnement des électrodes ; la distance entre les deux piquets extérieurs est de $2D$ et celle entre les deux piquets intérieurs est de D (Figure I.4).

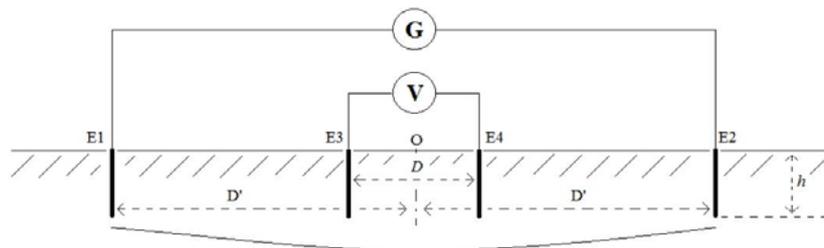


Figure I. 4 : Méthode de Schlumberger [KHE15]

La valeur de résistance R lue sur l'ohmmètre permet de calculer la résistivité par la formule suivante [KHE15, CLA84, VIJ04]:

$$\rho = \frac{\pi R}{4} \left(D'^2 - \frac{D'^2}{2} \right) \quad (I.6)$$

Partie II : Méthodes de calcul de résistance et de Simulation numérique des SMALT

I.5. Méthodes de calcul de résistance de différentes électrodes

Le calcul de la résistance de prise de terre est très important et indispensable pour les réseaux électriques, spécialement, pour la protection des équipements, la protection des utilisateurs, les régimes de neutre, la tension de pas et la tension de contact.

Excepté le cas d'une électrode hémisphérique enfouie dans un sol homogène, la détermination de la résistance d'une prise de terre est extrêmement complexe pour les autres formes ; le calcul est non seulement approximatif, mais en plus on trouve plusieurs formules. De plus, le calcul devient très complexe si la terre est non homogène [FLA10].

I.5.1. Electrode verticale de forme cylindrique

Trois relations ont été développées dans la littérature pour la détermination de la résistance d'un piquet de terre vertical, de forme cylindrique de rayon r et de longueur l (Figure II.2). II

s'agit de la relation (I.5) de Rudenberg, de celle (I.6) de Dwight-Sunde et celle (I.7) de Liew-Darveniza [KHE15, CLA84, FLA10] :

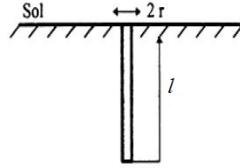


Figure I. 5 : Electrode verticale de forme cylindrique [FLA10]

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{4l}{d}\right) \quad (\text{I. 5})$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln\left(\frac{4l}{r}\right) - 1 \right) \quad (\text{I. 6})$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{r+l}{r}\right) \quad (\text{I. 7})$$

Le rayon équivalent d'une électrode hémisphérique ayant la même résistance qu'un piquet de terre est exprimé par [KHE15]:

$$r_{eq} = \frac{\rho}{2\pi R} \quad (\text{I. 8})$$

I.5.2. Electrode horizontale de forme cylindrique

La résistance d'un câble de longueur l et de rayon r , enterré horizontalement à une profondeur e (Figure I.6) est donnée par [CLA84, FLA10] :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln\left(\frac{2l}{\sqrt{2re}}\right) - 1 \right) \quad (\text{I. 9})$$

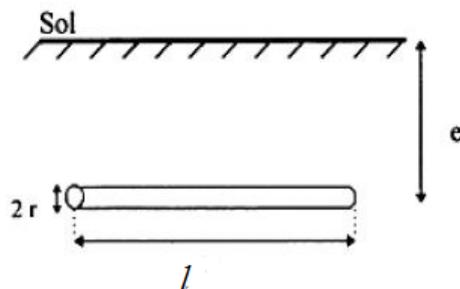


Figure I. 6 : Electrode horizontale de forme cylindrique [FLA10]

Tagg a proposé une relation analytique dont les approximations tiennent compte du rapport entre la longueur du conducteur enterré et la profondeur d'enfouissement [FLA10] :

$$R = \frac{\rho}{4\pi l'} \left(\ln\left(\frac{4l'}{r}\right) - 1 + \ln\left(\frac{2l' + \sqrt{(S^2 + 4l'^2)}}{S}\right) + \frac{S}{2l'} - \frac{\sqrt{(S^2 + 4l'^2)}}{2l'} \right) \quad (\text{I. 10})$$

$$l' = l/2 \text{ et } S = 2^e$$

Pour des valeurs du rapport S/l' élevées, la relation (II.14) devient [FLA10]:

$$R = \frac{\rho}{4\pi l'} \left(\ln \left(\frac{4l'}{r} \right) - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi S} \left(1 - \frac{l'^2}{3S^2} + \frac{2l'^4}{5S^4} \right) \quad (\text{I. 12})$$

Pour des valeurs du rapport S/L' faibles, la relation (14) devient [FLA10]:

$$R = \frac{\rho}{4\pi l'} \left(\ln \left(\frac{4l}{r} \right) + \ln \left(\frac{4l}{S} \right) - 2 + \frac{S}{2l'} - \frac{S^2}{16l'^2} + \frac{S^4}{512l'^4} \right) \quad (\text{I. 13})$$

I.5.3. n électrodes verticales

La formule donnant la résistance de n électrodes identiques en ligne droite (dans un même plan) séparées entre elles par la même distance D (Figure I.7) est [KHE15]:

$$R_n = \frac{1}{n} \left(\frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{4l}{r} \right) + \frac{\rho}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} \right) \right) \quad (\text{I. 14})$$

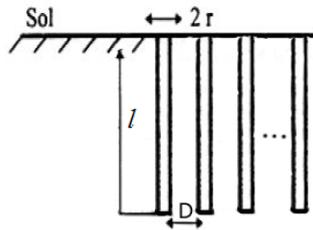


Figure I. 7 : n électrodes verticales en ligne droite

I.5.4. Electrodes horizontales enfouies dans un même plan

Soit n électrodes horizontales identiques de rayon r et de longueur l reliées entre elles et enfouies à une profondeur e dans un même plan (Figure I.8).

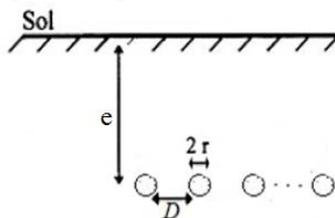


Figure I. 8 : Electrodes horizontales enfouies dans un même plan

La résistance de ce système est [KHE15] :

$$R = \frac{\rho}{\pi n l} \left(\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2re}} \right) - 1 + N(n) \right) \quad (\text{I.15})$$

$N(n)$ est un coefficient dépendant du nombre d'électrodes. Ces valeurs sont inscrites dans le tableau I.1 suivant [KHE15] :

Tableau I. 1: Valeurs du coefficient $N(n)$

Nombre d'électrodes n	2	3	4	6	8	12
$N(n)$	0,7	1,53	2,45	4,42	6,5	11

I.6. Simulation numérique des SMALT

Le comportement des SMALT dépend fortement de la fréquence du courant auquel ils sont soumis. Différentes techniques sont utilisées pour simuler le comportement transitoire des SMALT, plus particulièrement sous l'effet d'un coup de foudre. Les techniques plus populaires sont [YAG04] :

- L'approche des circuits.
- L'approche du flux électromagnétique utilisant la méthode des moments ou celle des éléments finis.
- L'approche hybride.
- L'approche des lignes de transmission.
- La théorie des antennes

I.6.1. Approche des circuits

Cette méthode est utilisée afin de simuler un SMALT d'une géométrie complexe. Cette approche transforme en fait le comportement transitoire complexe d'un SMALT en une simple analyse transitoire d'un circuit équivalent. Elle s'effectue suivant les étapes suivantes [YAG04] :

- Diviser le SMALT en segments finis ;
- Attribuer à chaque segment un circuit électrique équivalent, et calculer ses paramètres, à savoir, l'inductance (ΔL), la capacitance (ΔC), la conductance (ΔG) et la résistance interne (Δr_e) ;
- Résoudre les équations nodales du circuit électrique équivalent en utilisant les lois de Kirchhoff.

L'approche des circuits pour l'étude des comportements transitoires des systèmes de mise à la terre a été développée pour la première fois par Meliopoulos et al. [MEL83, YAG04] en 1983. Les paramètres (ΔL , ΔC , ΔG , Δr_e) de chaque segment dépendent de la fréquence. En fait, chaque segment a été remplacé par une ligne de transmission sans dissipation et deux conductances de fuite shuntées à la terre, comme le montre la figure I.9 suivante :

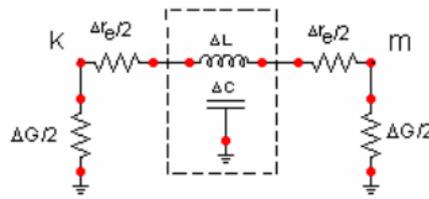


Figure I. 9 : Circuit équivalent à chaque segment selon Meliopoulos et al. [YAG04]

Meliopoulos et al. ont transformé le circuit précédent à celui illustré sur la figure I.10.

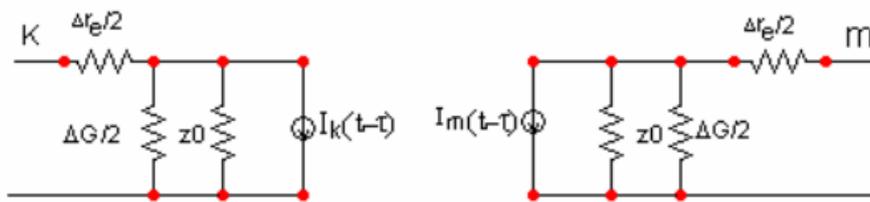


Figure I. 10 : Circuit équivalent selon Meliopoulos et al. [YAG04]

L'équation nodale du circuit équivalent est donnée par :

$$[Y][V(t)] = [I(t)] + [b(t - \Delta t), \dots] \quad (I.16)$$

$[Y]$: la matrice admittance des circuits équivalents, V : le vecteur des tensions dans tous les nœuds, I : le vecteur des courants sortant de tous les nœuds et b : le vecteur des courants initiaux.

I.6.2. Approche du flux électromagnétique

Cette méthode permet de résoudre les équations de Maxwell avec le minimum d'approximations. Cette approche peut être mise en œuvre par l'utilisation de la méthode des moments (MoM) ou bien la méthode des éléments finis (FEM).

I.6.2.1. Méthode des moments

Cette méthode consiste à transformer l'équation intégrale à résoudre, en un système linéaire matriciel à N inconnues. Si on considère l'équation suivante :

$$\theta(f) = g \quad (I.17)$$

θ est un opérateur linéaire, g est connu et f est à déterminer.

On écrit f sous la forme d'une série de fonctions :

$$f = \sum_n \alpha_n f_n \quad (I.18)$$

α_n sont des constantes et f_n les fonctions de base.

A cette étape, on fait introduire les fonctions de poids ' $w_1, w_2, w_3, \dots, w_N$ ', avec :

$$\sum_n \alpha_n \langle w_m, \theta f_n \rangle = \langle w_m, g \rangle \quad (I.19)$$

A ce niveau, on peut écrire notre système sous la forme matricielle suivante :

$$[A_{mn}][\alpha_n] = [g_m] \quad (I.20)$$

avec

$$[A_{mn}] = \begin{bmatrix} \langle w_1, \theta f_1 \rangle \langle w_1, \theta f_2 \rangle \dots \dots \dots \\ \langle w_2, \theta f_1 \rangle \langle w_2, \theta f_2 \rangle \dots \dots \dots \\ \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \dots \dots \dots \\ \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \dots \dots \dots \end{bmatrix} \quad (I.21)$$

$$[\alpha_n] = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (I.22)$$

$$[g_m] = \begin{bmatrix} \langle w_1, g \rangle \\ \langle w_2, g \rangle \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (I.23)$$

Si la matrice $[A_{mn}]$ n'est pas singulière, les inconnus α_n sont données par :

$$[\alpha_n] = [A_{mn}]^{-1}[g_m] \quad (I.24)$$

I.6.2.2. Méthode des éléments finis

Cette méthode est utilisée pour analyser la dépendance en fréquence des caractéristiques du SMALT. Le calcul des émissions électromagnétiques des systèmes de mise à la terre a été approché par Dawalibi et al. [DAW86b]. La solution proposée consiste à résoudre numériquement les équations de Maxwell sous leurs formes intégrales.

Cette méthode est basée sur le principe de minimiser l'énergie dans le système à étudier. Afin de résoudre numériquement les problèmes, les équations sont transformées en équations linéaires en divisant l'ensemble du système en n petits segments ou éléments [YAG04]. De telles équations prennent différentes formes selon l'environnement :

- ✓ Dans le sol, on a :

$$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu} (\overrightarrow{rot}(\overrightarrow{W})) (\overrightarrow{rot}(\overrightarrow{A})) + \frac{1}{\mu} (\overrightarrow{div}(\overrightarrow{W})) (\overrightarrow{div}(\overrightarrow{A})) + \sigma jw \overrightarrow{W} \overrightarrow{A} \overrightarrow{grad}(V) \right) d\Omega = 0 \quad (I.25)$$

$$\int_{\Omega} (\sigma \overrightarrow{grad}(w) (jw \overrightarrow{A} + \overrightarrow{grad}(V))) d\Omega = 0 \quad (I.26)$$

✓ Dans l'air :

$$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu} (\overrightarrow{rot}(\overrightarrow{W})) (\overrightarrow{rot}(\overrightarrow{A})) + (\overrightarrow{div}(\overrightarrow{W})) (\overrightarrow{div}(\overrightarrow{A})) \right) d\Omega = 0 \quad (I.27)$$

w : une fonction de pondération d'un potentiel scalaire pour un élément de volume ;
W : une fonction de pondération de potentiel vectoriel pour un élément de volume.

La difficulté de cette approche est de transformer les frontières ouvertes de l'air et l'environnement terrestre en un problème de frontière fermée en utilisant une transformation spatiale, ce qui va réduire la taille du problème [BRU92].

L'avantage principal de cette approche est que la discrétisation du domaine (géométrie, milieu) du problème peut être très flexible, des éléments non-uniformes peuvent facilement décrire des formes complexes. Son autre avantage est qu'elle ne nécessite pas plusieurs étapes de calcul.

I.6.3. Approche hybride

L'approche hybride dans l'analyse transitoire d'un SMALT a été utilisée pour la première fois par Dawalibi en 1986 [DAW86a, DAW86b] et modifiée en 2000 par Andolfato et al. [AND00]. L'approche hybride est une combinaison de l'approche électromagnétique et celle des circuits. Le système de mise à la terre doit être divisé en n petit segments. Le champ électrique en chaque point est donné par la relation suivante déduite des équations de Maxwell :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad}(V) - j\omega \vec{A} \quad (I.28)$$

\vec{A} est le vecteur potentiel et V le potentiel scalaire.

Pour chaque segment (n_i), l'équation (I.28) peut être écrite comme suit [AND00] :

$$Z_{sn_i} I_{n_i} + \sum_{i=1}^n (V_{-ave_{n_i}} - V_{-ave_i}) + jw \sum_{i=1}^n \int_{l_{n_i}} \vec{A}_{in_i} dl = 0 \quad (I.29)$$

Z_{sn_i} est l'impédance série interne du segment n_i ;

$V_{-ave_{n_i}}$ et V_{-ave_i} sont les potentiels des segments n_i et i .

On pose :

$$V_{in_i} = (V_{-ave_{n_i}} - V_{-ave_i}) \quad (I.30)$$

V_{in_i} est due au couplage capacitif et $jw \int_{l_{n_i}} \vec{A}_{in_i} dl$ est due au couplage inductif [AND00]

Pour chaque segment n_i , l'équation (I.29) peut se mettre sous la forme suivante [AND00]:

$$Z_{sn_i} I_{n_i} + \sum_{i=1}^n (C - G)_{in_i} I_{in_i} + jw \sum_{i=1}^n L_{in_i} I_i = 0 \quad (I.31)$$

où

$$jw L_{in_i} = \frac{jw}{l_i} \int_{l_{n_i}} A_{in_i} dl \quad (I.32)$$

$$(C - G)_{in_i} = \frac{V_{in_i}}{l_{-in_i}} = \frac{1}{4\pi\sigma_{soil}} \int_{l_i} \frac{e^{-\gamma Rr}}{Rr} dl + \xi \frac{1}{4\pi\sigma_{soil}} \int_{l_i} \frac{e^{-\gamma Rr'}}{Rr'} dl \quad (I.33)$$

A_{in_i} est le vecteur potentiel au segment n_i dû au courant de source au segment i ;

l_{n_i} et l_{-n_i} sont respectivement les longueurs du segment n_i et de son image n_i ;

Rr est la distance entre la source de courant et le point où le champ est calculé ;

Rr' est la distance entre l'image de source de courant et le point où le champ est calculé ;

σ' est la conductivité complexe de terre ;

γ est la constante de propagation ;

ξ est le coefficient de réflexion capacitif-conductif ;

I_i est le courant qui circule le long du segment (i) ;

I_{-in_i} est le courant de dissipation de segment (i) vers le segment (n_i) à travers la terre.

La valeur ajoutée de l'approche hybride est l'inclusion de l'influence de la fréquence sur l'impédance interne ainsi que sur les composantes inductives et capacitive-conductive.

I.6.4. Approche des lignes de transmission

Cette approche est la première à être utilisée pour analyser le comportement transitoire des systèmes de mise à la terre. Mais c'est aussi l'approche dont le développement était le moins rapide [ABI12]. Dans cette approche, on simule l'électrode par une ligne électrique ouverte à l'une des extrémités. Une électrode est divisée en plusieurs segments. Chaque segment de cette électrode est modélisé par un circuit équivalent (Figure I.11).

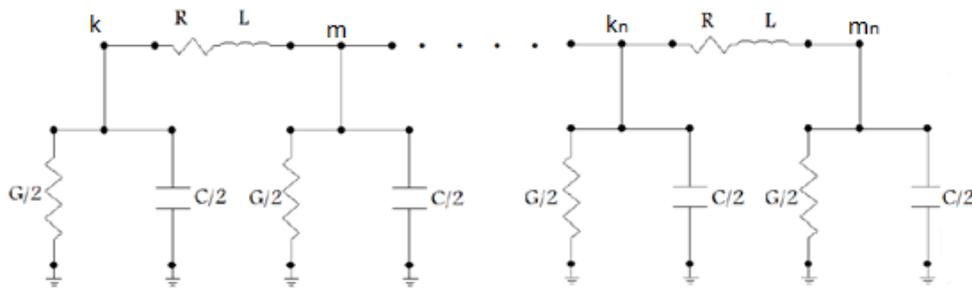


Figure I. 11 : Circuit π d'une électrode à plusieurs segments [ABI12]

Verma et Mukhedkar [VER80] ont appliqué le concept des lignes de transmission une sur l'électrode horizontale de terre ; ce qui a été décrit par les équations des télégraphistes [CEL03] suivantes :

$$\frac{dV}{dx} + L \frac{dI}{dx} + RI = 0 \quad (\text{I. 37})$$

$$\frac{dI}{dx} + C \frac{dV}{dx} + GV = 0 \quad (\text{I. 38})$$

R est la résistance ;
L est l'inductance ;
C est la capacité ;
G est la conductance.

Les composantes R, L, C et G peuvent être exprimées en utilisant les éléments linéiques :

$R = R' dx$; R' est la résistance linéique (Ω/m) ;
 $L = L' dx$; L' est l'inductance linéique (H/m) ;
 $C = C' dx$; C' est la capacité linéique (F/m) ;
 $G = G' dx$; G' est conductance linéique (S/m).

dx étant la longueur des segments.

Dans cette approche, les paramètres R, L, C et G sont souvent remplacés par les paramètres linéiques R' , L' , C' et G' . En utilisant ces paramètres linéiques, on obtient :

$$\frac{dV}{dx} + L' \frac{dI}{dx} + R'I = 0 \quad (\text{I. 39})$$

$$\frac{dI}{dx} + C' \frac{dV}{dx} + G'V = 0 \quad (\text{I. 40})$$

En utilisant la transformée de Laplace, les équations précédentes deviennent :

$$\frac{dV(x, p)}{dx} = Z'I(x, p) \quad (I. 41)$$

$$\frac{dI(x, p)}{dx} = Y'V(x, p) \quad (I. 42)$$

$Z' = R' + pL'$ et $Y' = G' + pC'$.

En dérivant les deux équations précédentes par rapport à 'x', on aura :

$$\frac{dV^2(x, p)}{dx^2} = Z' \frac{dI(x, p)}{dx} \quad (I. 43)$$

$$\frac{dI^2(x, p)}{dx^2} = Y' \frac{dV(x, p)}{dx} \quad (I. 44)$$

En remplaçant les expressions des dérivées de I et V, on trouve :

$$\frac{dV^2(x, p)}{dx^2} = Z'Y'V(x, p) \quad (I. 45)$$

$$\frac{dI^2(x, p)}{dx^2} = Y'Z'I(x, p) \quad (I. 46)$$

$\gamma^2 = Y'Z'$:

γ est la constante de propagation donnée par :

$$\gamma = \sqrt{(R' + pL')(G' + pC')} \quad (I. 47)$$

La solution générale des deux équations est donnée par :

$$V(x, p) = Ae^{-\gamma x} + Be^{\gamma x} \quad (I. 48)$$

$$I(x, p) = \sqrt{\frac{Y'}{Z'}} [Ae^{-\gamma x} + Be^{\gamma x}] \quad (I. 49)$$

Les constantes A et B sont retrouvées en appliquant les conditions aux limites suivantes.

$$\begin{aligned} V(x = 0) &= V_k \text{ et } V(x = l) = V_m \\ I(x = 0) &= I_k \text{ et } I(x = l) = I_m \end{aligned}$$

I.6.5. Méthode des antennes

La théorie des antennes est le formalisme le plus rigoureux pour étudier les phénomènes de rayonnement électromagnétique. Elle est basée sur une formulation intégrale dans le domaine fréquentiel, et sur le traitement des équations par la méthode des moments. Le passage en temporel se fait à l'aide de la transformée de Fourier inverse [ABI12].

I.7. Conclusion

Le rôle principal d'un système de mise à la terre est d'écouler des courants de défaut vers la terre. De tels courants peuvent être à haute fréquence, courants de foudre et de manœuvre par exemple, ou à basse fréquence tels que les courants de court-circuit.

La conception d'un système de mise à la terre appropriée est l'un des paramètres les plus déterminants pour assurer la sécurité des personnes, des appareils et des équipements, et d'améliorer la qualité du service électrique.

Une prise de terre est caractérisée, à basse fréquence, par une résistance. Afin d'être sûr qu'un système de mise à la terre est placé dans un bon endroit, il est nécessaire de maintenir une faible résistance de toutes les électrodes, et une faible résistivité du sol local. Autrement dit, la mesure de la résistance des sols permet de choisir le meilleur emplacement pour les prises de terre. Or, la valeur de la résistance de mise à la terre repose sur les propriétés du sol, la forme géométrique de l'électrode de terre et le nombre d'électrodes connectées. Les propriétés du sol sont caractérisées par la résistivité de la terre, qui dépend du type de sol et de sa structure, ainsi que de son humidité.

Dans le but de déterminer la réponse transitoire des SMALT, diverses techniques ont été proposées à savoir l'approche des circuits, l'approche du flux électromagnétique avec ces deux variantes méthode des moments et celle des éléments finis, l'approche hybride circuits-flux électromagnétique et finalement l'approche des lignes de transmission et l'approche des antennes.

Chapitre II

Application de la Méthode des lignes de transmission

II.1. Introduction

Le présent chapitre traite les SMALT en utilisant la méthode des lignes de transmission (LT). Cette étude est effectuée dans les domaines temporel et fréquentiel. La fréquence affecte en fait les paramètres électriques du sol, à savoir la résistivité et la permittivité relative. Outre la considération des paramètres électriques du sol constants, plusieurs modèles décrivent leur dépendance en fréquence [DAM13, DAM14].

Nous avons traité dans ce chapitre les principaux points suivants :

- Etude comparative entre différents modèles décrivant la dépendance en fréquence des paramètres électriques du sol.
- Détermination de la réponse transitoire d'une électrode horizontale dans le domaine temporel tenant compte de la dépendance en fréquence dans le cas d'un sol homogène.
- Détermination de l'impédance d'entrée d'une électrode dans le domaine fréquentiel. Deux types d'électrodes ont été étudiés : horizontale et verticale. Deux sols ont été considérés à savoir homogène et stratifié horizontalement en deux couches.

II.2. Présentation de la méthode des lignes de transmission

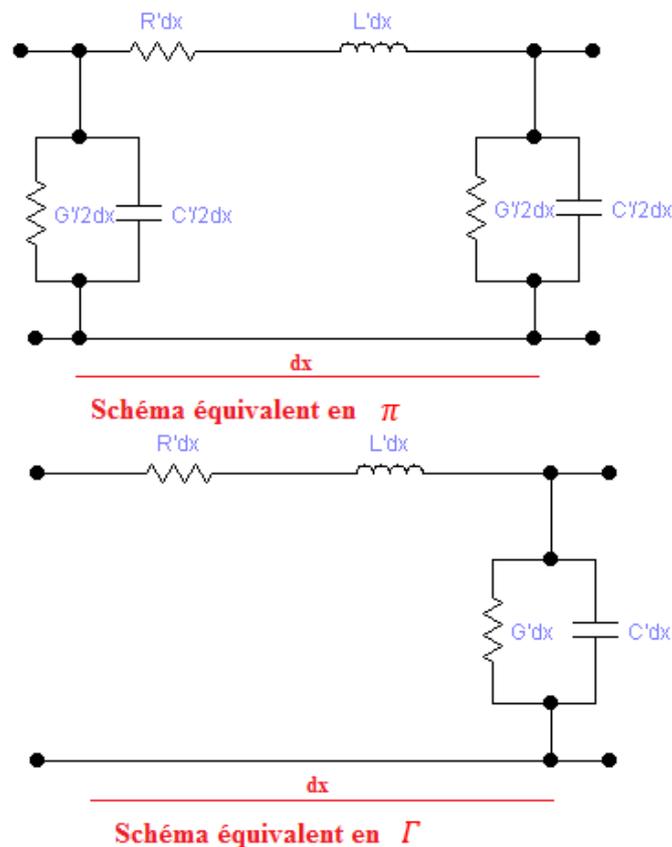
Lorsqu'un système de mise à la terre est parcouru par un courant, ce dernier provoque un échauffement aussi bien dans le conducteur que dans le sol. Cet échauffement pourrait être assimilé à des pertes par effet joule. Entre temps, ce courant engendre l'apparition d'un champ magnétique et un champ électrique. Ce système peut être modélisé en utilisant la théorie des lignes de transmission. En effet, le modèle correspondant est une ligne de transmission avec des pertes. Cette ligne est caractérisée par des paramètres linéiques distribués R' , L' , C' et G' [GEL03, KHE15, SUN68] (Figure IV.1), tels que :

- R' (Ω/m) : la résistance linéique ou distribuée liée aux pertes par effet joule ;
- L' (H/m) : l'inductance linéique ou distribuée, modélisant l'effet du champ magnétique généré par l'électrode ;
- C' (F/m) : la capacitance linéique ou distribuée modélisant l'effet du champ électrostatique généré par l'électrode ;
- G' (S/m) : la conductance linéique ou distribuée représentant les pertes par le courant de fuite dans le diélectrique.

Les paramètres R' , L' liés aux propriétés magnétiques et électriques du conducteur de mise à la terre s'interfèrent avec le courant injecté. Par ailleurs, les paramètres C' et G' qui dépendent des propriétés électriques et diélectriques du sol s'interfèrent avec le potentiel du conducteur.

Dans la théorie des lignes courtes et longues, la fréquence, ou encore la longueur d'onde, joue un rôle très important dans la modélisation des systèmes électriques. Lorsque la longueur de la ligne est très supérieure devant la longueur d'onde, les lois classiques de l'électricité ne s'appliquent plus [KHE15]. La tension ou le courant à la sortie d'une source directement connectée à une charge est supposée identique à celle aux bornes de la charge, malgré l'atténuation possible et/ou le délai de propagation le long de la ligne qui joint les deux éléments. Tant que la ligne est électriquement courte, la supposition n'a pas de conséquences importantes [GRE05].

En hautes fréquences, considérer une électrode enfouie dans un sol comme étant une ligne de transmission n'est valable que dans le cas de petites dimensions. A cet effet, l'électrode est divisée en plusieurs segments ; c'est le modèle distribué d'une ligne. Chaque segment de longueur dx peut-être modélisé par l'un des schémas suivants figure (II.1). Une telle considération, nous permet d'analyser le comportement transitoire d'un segment au lieu de la ligne entière. Sachant que les paramètres distribués de la ligne de transmission demeurent constants dans chaque segment [ABI12, KHE15].



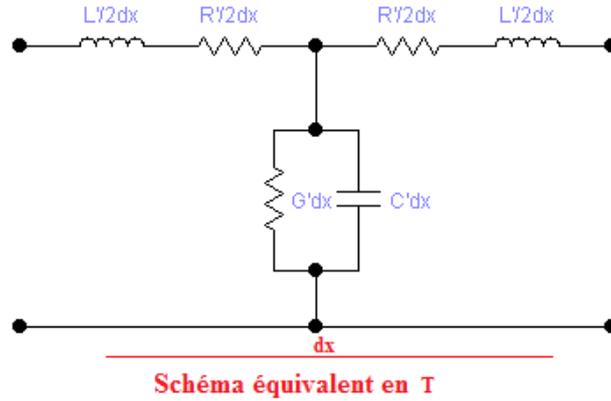


Figure II.1 : Différentes représentations d'un segment de la ligne de transmission

Nous avons opté pour le schéma équivalent en π dans l'étude de la réponse transitoire dans le domaine temporel et celui en Γ pour la détermination de l'impédance d'entrée dans le domaine fréquentiel.

Pour l'étude de l'électrode horizontale, nous avons adopté les expressions de Cattaneo et al. [CAT92], données comme suit :

$$R' = \rho_{electrode} \frac{4}{\pi d^2} \quad (\text{II. 1})$$

$$L' = \frac{\mu}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{2l}{d} \right) + \ln \left(\frac{l}{2e} \right) \right) \quad (\text{II. 2})$$

$$G' = \frac{2\pi}{\rho_g} \frac{1}{\ln \left(\frac{2l}{d} \right) + \ln \left(\frac{l}{2e} \right)} \quad (\text{II. 3})$$

$$C' = 2\pi\epsilon \frac{1}{\ln \left(\frac{2l}{d} \right) + \ln \left(\frac{l}{2e} \right)} \quad (\text{II. 4})$$

Par ailleurs, les paramètres de l'électrode verticale ont été déterminés conformément aux expressions suivantes [GRC05] :

$$R' = \frac{\rho_{electrode}}{2\pi l^2} \ln \left(\frac{2l}{r} \right) \quad (\text{II. 5})$$

$$L' = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{2l}{r} \right) \quad (\text{II. 6})$$

$$C' = 2\pi\epsilon \left(\ln \left(\frac{2l}{r} \right) \right)^{-1} \quad (\text{II. 7})$$

$$G' = \frac{1}{R'^2} \quad (\text{II. 8})$$

où

l : représente la longueur de l'électrode ;

d : représente le diamètre de l'électrode ;

e : représente la profondeur d'enfouissement de l'électrode ;

ρ_g et $\rho_{electrode}$ représentent respectivement la résistivité du sol et celle de l'électrode.

A noter que les expressions précédentes sont valables sous les conditions suivantes : $2r \ll 4l$ et $4e \ll l$.

II.3. Dépendance en Fréquence des paramètres du sol

Les paramètres électriques du sol (conductivité et permittivité relative) dépendent fortement de la fréquence. A ce jour, six modèles ont été proposés en vue de décrire cette dépendance [DAM13, DAM14]. Ces modèles sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II. 1: Modèles des paramètres

Modèles	Conductivité (S/m)	Permittivité relative	Fréquence
Scott (S) [SCO64,SCO66]	$\sigma(f) = 10^K$	$\epsilon_r(f) = 10^D$	100Hz-1MHz
Smith et Longmire (SL) [LON73,S MI75]	$\sigma(f) = \sigma_{DC} + 2\pi\epsilon_0 \sum_{i=1}^{13} a_i F_i \frac{(\frac{f}{F_i})^2}{1 + (\frac{f}{F_i})^2}$	$\epsilon_r(f) = \epsilon_\infty + \sum_{i=1}^{13} \frac{a_i}{1 + (\frac{f}{F_i})^2}$	100Hz-1MHz
Messier (M) [MES80,MES85]	$\sigma(f) = \sigma_{DC} \left(1 + \sqrt{\frac{4\pi f \epsilon_\infty}{\sigma_{DC}}} \right)$	$\epsilon_r(f) = \frac{\epsilon_\infty}{\epsilon_0} \left(1 + \sqrt{\frac{\sigma_{DC}}{\pi f \epsilon_\infty}} \right)$	100Hz-1MHz
Visacro et Portela (VP) [ALI10]	$\sigma(f) = \sigma_{100Hz} \left(\frac{f}{100} \right)^{0,072}$	$\epsilon_r(f) = 2,34 \cdot 10^6 \left(\frac{1}{\sigma_{100Hz}} \right)^{-0,535} \cdot f^{-0,597}$	40Hz - 2MHz
Visacro et Alipio (VA) [VIS12]	$\sigma(f) = \sigma_{100Hz} \left\{ 1 + \left[1,2 \cdot 10^{-6} \left(\frac{1}{\sigma_{100Hz}} \right)^{0,73} \right] (f - 100)^{0,65} \right\}$	$\epsilon_r(f) = \begin{cases} 192,2 & f < 10kHz \\ 7,6 \cdot 10^3 f^{-0,4} + 1,3 & f \geq 10kHz \end{cases}$	100Hz-4MHz
Portela (P) [POR99]	$\sigma(f) = \text{réel} \left(\sigma_{100Hz} + \Delta_i \left[\cot \left(\frac{\pi}{2} a \right) \pm j \right] \left(\frac{\omega}{2\pi \cdot 10^6} \right)^a \right)$	$\epsilon(f) = \text{imag} \left(\sigma_{100Hz} + \Delta_i \left[\cot \left(\frac{\pi}{2} a \right) \pm j \right] \left(\frac{\omega}{2\pi \cdot 10^6} \right)^a \right)$	100Hz-2MHz

avec :

$$K = 0,028 + 1,098 \log_{10}(\sigma_{100\text{Hz}}) - 0,068 \log_{10}(f) + 0,036 \log_{10}^2(\sigma_{100\text{Hz}}) - 0,046 \log_{10}(f) \log_{10}(\sigma_{100\text{Hz}}) + 0,018 \log_{10}^2(f) \quad (\text{II. 9})$$

$$D = 5,491 + 0,946 \log_{10}(\sigma_{100\text{Hz}}) - 1,097 \log_{10}(f) + 0,069 \log_{10}^2(\sigma_{100\text{Hz}}) - 0,114 \log_{10}(f) \log_{10}(\sigma_{100\text{Hz}}) + 0,067 \log_{10}^2(f) \quad (\text{II. 10})$$

où $\sigma_{100\text{Hz}}$ est la conductivité à une fréquence de 100Hz.

$$F_i = \sum_{i=1}^{13} (125\sigma_{DC})^{0,8321} 10^{i-1} [\text{Hz}] \quad (\text{II. 11})$$

σ_{DC} : est la conductivité du sol en continue ;

ϵ_{∞} : est la valeur limite de la permittivité en haute fréquence.

Le paramètre α_i est donné dans le tableau suivant [DAM14]:

Tableau II.2 : Valeurs du coefficient α_i [DAM14]

i	α_i
1	$3,6 \cdot 10^6$
2	$2,74 \cdot 10^5$
3	$2,58 \cdot 10^4$
4	$3,38 \cdot 10^3$
5	$5,26 \cdot 10^2$
6	$1,33 \cdot 10^2$
7	$2,72 \cdot 10$
8	$1,25 \cdot 10$
9	4,8
10	2,17
11	$9,8 \cdot 10^{-1}$
12	$3,92 \cdot 10^{-1}$
13	$1,73 \cdot 10^{-1}$

Les paramètres a et Δi dépendent du modèle du sol étudié [ALI13].

II.3.2. Etudes des modèles des paramètres électriques des sols

Parmi les six modèles présentés dans le tableau (II.1), nous avons opté pour les quatre plus populaires [BIG72]. Il s'agit des modèles de Scott (S), de Visacro et Portela (VP), de Portela

(P) et enfin de Visacro et Alipio (VA). Les résultats de ces quatre modèles ont été comparés. En outre, l'impact de la fréquence sur la résistivité et la permittivité du sol a été analysé.

Pour cela, nous avons supposé deux sols de résistivité $\rho_{BF} = 93,46 \Omega.m$ et $343 \Omega.m$. Les courbes de la figure (II.2) montrent une dépendance significative en fréquence des paramètres électriques du sol. Les trois modèles S, P, VA donnent approximativement les mêmes ordres de grandeurs de la résistivité et de la permittivité relative, à l'exception du modèle VP qui lui est éloigné des autres modèles étudiés. Les modèles de sols de Scott (S) et Visacro-Alipio (VA) donnent presque les mêmes valeurs. Par ailleurs, la différence entre les modèles considérés est plus prononcée pour les hautes fréquences et la faible résistivité des sols.

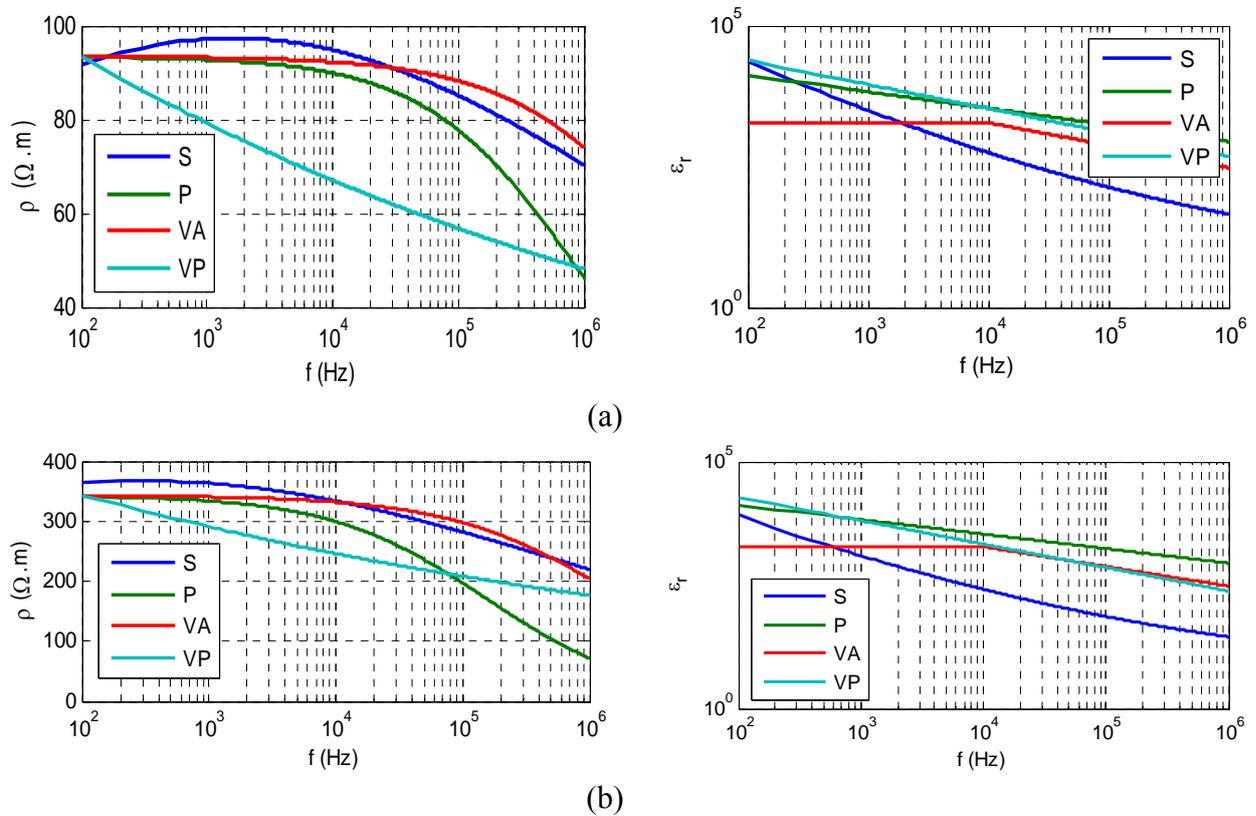


Figure II. 2 : Dépendance en fréquence de la permittivité et de la résistivité selon les modèles (S), (VA), (VP) et (P), (a) $\rho_{BF} = 93,46 \Omega.m$ et (b) $\rho_{BF} = 343 \Omega.m$

II.4. Etude des SMALT dans le domaine temporel

Pour cette étude, nous nous sommes intéressés aux courants impulsionnels donc à hautes fréquences, tels que les courants de foudre. Dans ce domaine, plusieurs travaux ont été effectués.

Cattaneo et al. [CAT92] ont utilisé le code EMTP pour simuler le comportement transitoire des SMALT en tenant compte du phénomène d'ionisation du sol. Les résultats ainsi obtenus

ont été comparés à ceux utilisant le GSSP (Grounding System Simulation Program) qui est basé sur la FDTD (méthode des différences finis).

Nekhoul et al. [NEK14] ont utilisé la méthode des lignes de transmission afin d'analyser le comportement transitoire d'un SMALT. La réponse du système a été obtenue se basant sur la méthode des différences finis (FDTD) pour la résolution des équations des télégraphistes et les équations différentielles de tension, et en utilisant la matrice des équations nodales.

Verma et al. [VER80], Mazzetti et al. [MAZ83] et Velazquez et al. [VEL84] ont appliqué l'approche des lignes de transmission pour modéliser une électrode horizontale. Leurs travaux étaient basés sur les équations des télégraphistes. La solution des équations des télégraphistes a été obtenue en dérivant analytiquement le courant et la tension dans le domaine de Laplace avant de les ramener dans le domaine temporel en utilisant la transformée de Laplace inverse

II.4.1. Simulation d'une électrode horizontale

Ce point est consacré à la simulation d'une électrode enterrée horizontalement, en utilisant la méthode des lignes de transmission. Dans cette simulation, la dépendance en fréquence des paramètres électriques du sol est prise en compte.

Pour ce faire, nous avons élaboré, sous environnement MATLAB, un programme conformément aux étapes suivantes :

- Etape1 : Introduction des données : la longueur, le rayon, la profondeur d'enfouissement de l'électrode, la longueur du segment, l'intervalle du temps et finalement le courant d'injection.
- Etape 2 : Calcul des paramètres du sol (résistivité et permittivité relative) pour une fréquence donnée en utilisant la formule de Scott et actualisation des paramètres distribués calculés selon les formules de Cattaneo et al.
- Etape3 : Ecriture du système sous forme d'équations d'état.
- Etape4 : Résolution du système : calcul des courants et des tensions à chaque instant.

Ce programme peut être récapitulé par l'organigramme suivant :

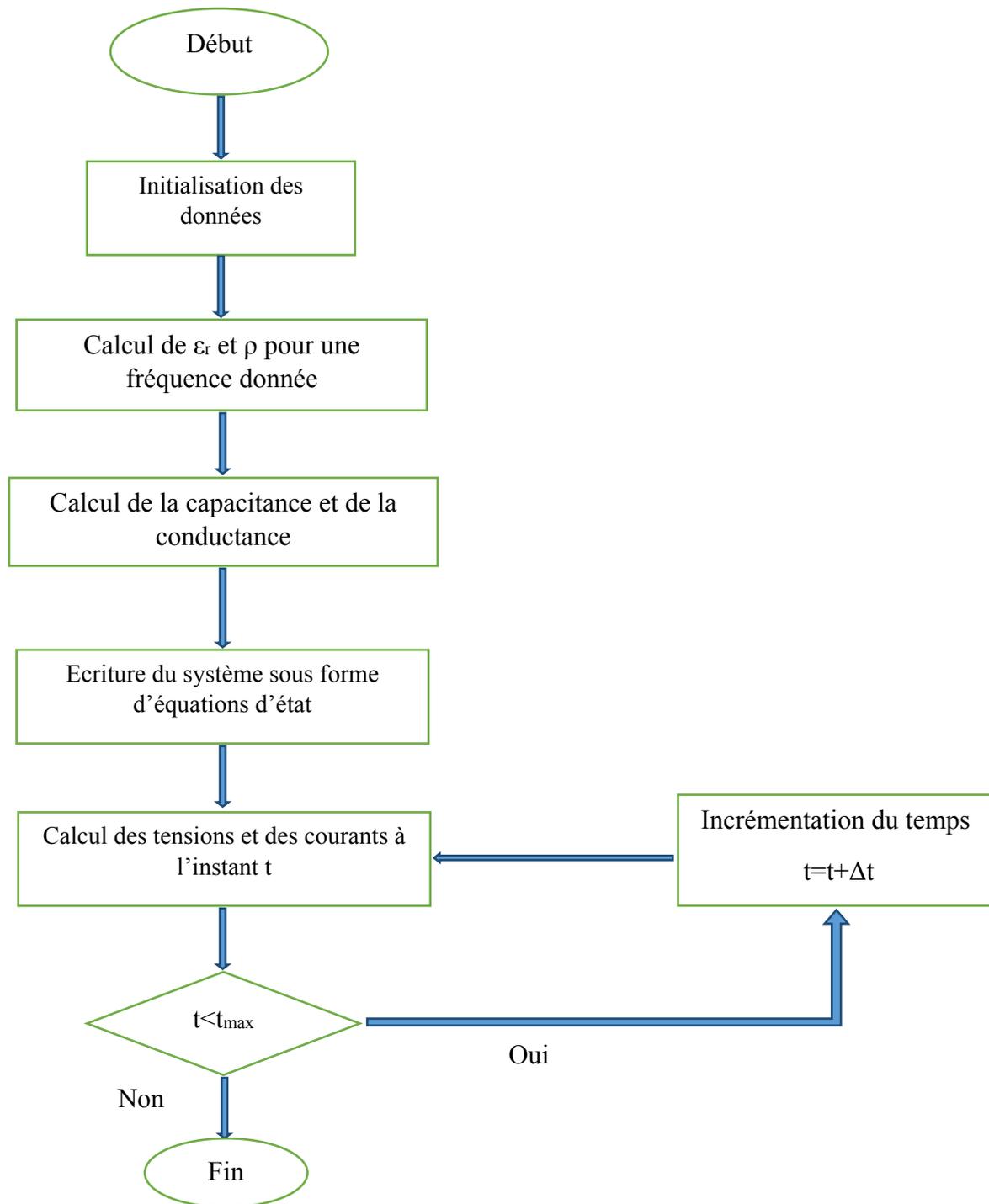


Figure II.3 : Organigramme du programme de simulation d'une électrode horizontale avec la méthode des lignes de transmission

II.4.1.1. Validation

Afin de valider notre programme, nous comparons nos résultats relatif au potentiel aux différents points de l'électrode ($x = 0, 2, 10$ et 34 m), figure (II.4.a) avec ceux numériques (en traits continus) et expérimentaux (en pointillés) rapportés par Cattaneo et al. [CAT92] figure(II.4.b). La dépendance en fréquence n'a pas été prise en compte. Pour ce faire, une électrode horizontale de longueur 100m et de rayon 1,5mm enterrée à une profondeur 0,6m dans un sol de résistivité $20\Omega\text{m}$ et de permittivité relative de 80. Le point d'injection en $x = 0$ de l'électrode a été soumis à un courant bi-exponentiel (impulsionnel) de faible amplitude. Ses caractéristiques sont les suivantes :

$$I(0, t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (IV.12)$$

$$I_0 = 1,55227A, \alpha = 0,00364 \mu\text{s}^{-1}, \beta = 0,65221 \mu\text{s}^{-1}$$

Nous constatons que nos valeurs sont très proches notamment à ceux numériques de Cattaneo et al. La différence ne dépasse pas 2%.

Il est important de noter que le courant injecté ne génère en aucun cas le phénomène d'ionisation du sol, étant donné sa faible amplitude. Par ailleurs, l'effet du couplage mutuel entre les différents éléments de l'électrode pourrait être négligé [KHE15].

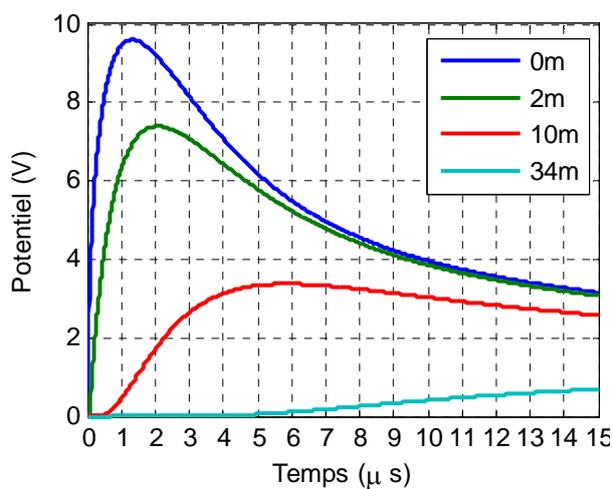


Figure II.4.a : Nos résultats de simulation

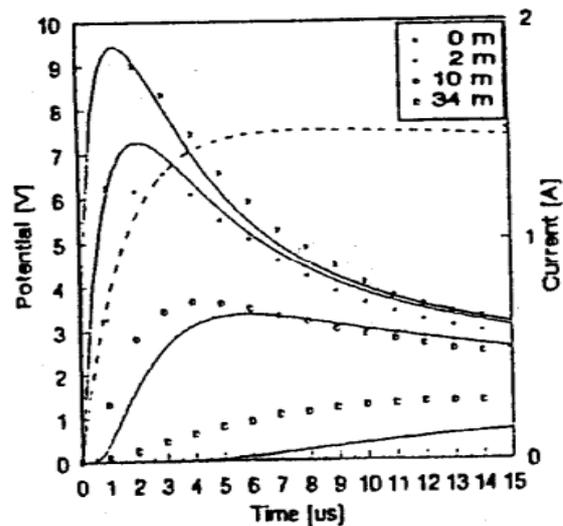


Figure II.4.b : Les résultats obtenus par Cattaneo et al. [CAT92]

II.4.1.2. Application

Nous avons repris la même étude précédente, en tenant compte cette fois-ci de la dépendance en fréquence. Le modèle de Scott reliant les paramètres électriques du sol à la fréquence a été adopté. Pour le courant bi-exponentiel précédent, nous déterminons d'abord la constante de temps de mi- amplitude T_2 . Cette constante de temps (en μs) peut être calculée connaissant α de la façon suivante :

$$T_2 = \frac{0,69}{\alpha} \quad (\text{II.13})$$

La fréquence du courant en question est : $f = \frac{1}{T_2}$

La réponse de l'électrode consiste en les variations temporelles du courant ainsi que du potentiel à différents points de l'électrode. Les figures (II.5.a) et(II.5.b) ont été obtenues pour le courant impulsionnel précédent en tenant compte, cette fois-ci, de la dépendance en fréquence selon le modèle de Scott. Etant donné que, $\alpha = 0,00364 \mu s^{-1}$, $\beta = 0,65221 \mu s^{-1}$, $T_2 = 189,56 \mu s$, ce qui donne $f = 5,27 kHz$.

Dans le but d'examiner l'impact de la fréquence sur les évolutions temporelles du courant et du potentiel, nous avons gardé la même forme bi-exponentielle du courant et nous avons changé les paramètres α et β nous permettant d'obtenir une autre fréquence. En effet, nous avons retracé sur les figures (II.6.a) et (II.6.b) les mêmes réponses temporelles avec $\alpha = 0,00184 \mu s^{-1}$ et $\beta = 2,4665 \mu s^{-1}$; ce qui donne $T_2 = 375 \mu s$ et $f = 2,67 kHz$.

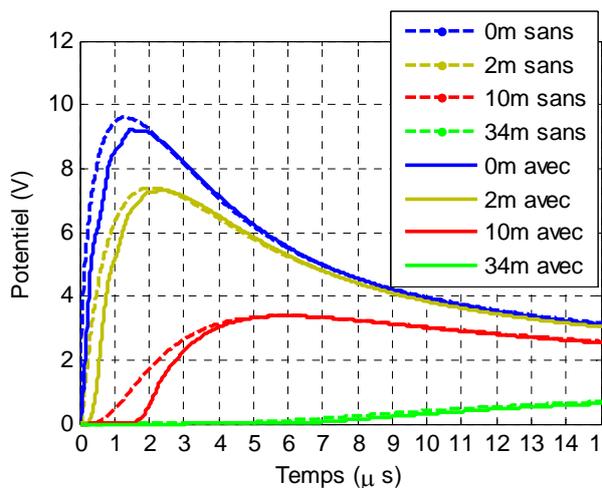


Figure II.5.a : Ondes de tension avec et sans dépendance en fréquence avec $\alpha = 0,00364 \mu s^{-1}$, $\beta = 0,65221 \mu s^{-1}$ $f = 5,27 kHz$.

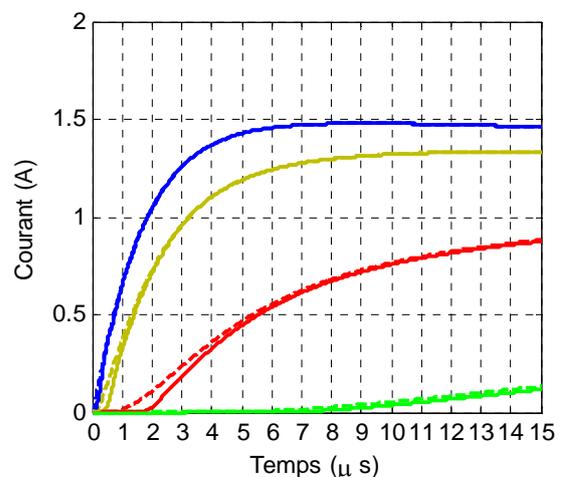


Figure II.5.b : Ondes de courant avec et sans dépendance en fréquence avec $\alpha = 0,00364 \mu s^{-1}$, $\beta = 0,65221 \mu s^{-1}$ $f = 5,27 kHz$

En prenant un courant de même amplitude, et d'une plus petite fréquence nous obtenons les résultats suivants.

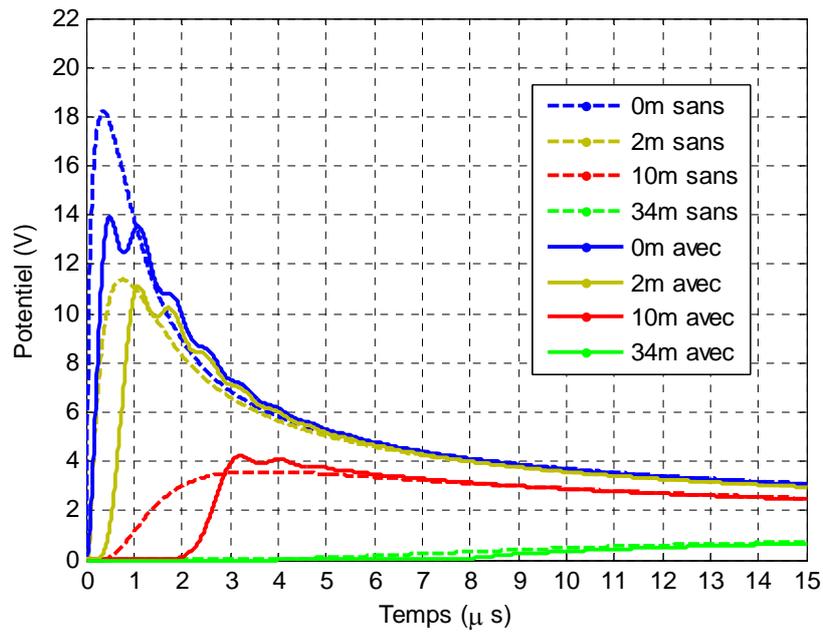


Figure II.6.a : Ondes de tension avec et sans dépendance en fréquence avec $\alpha = 0,00184\mu s^{-1}$ et $\beta = 2,4665 \mu s^{-1}$, $f = 2,67 \text{ kHz}$

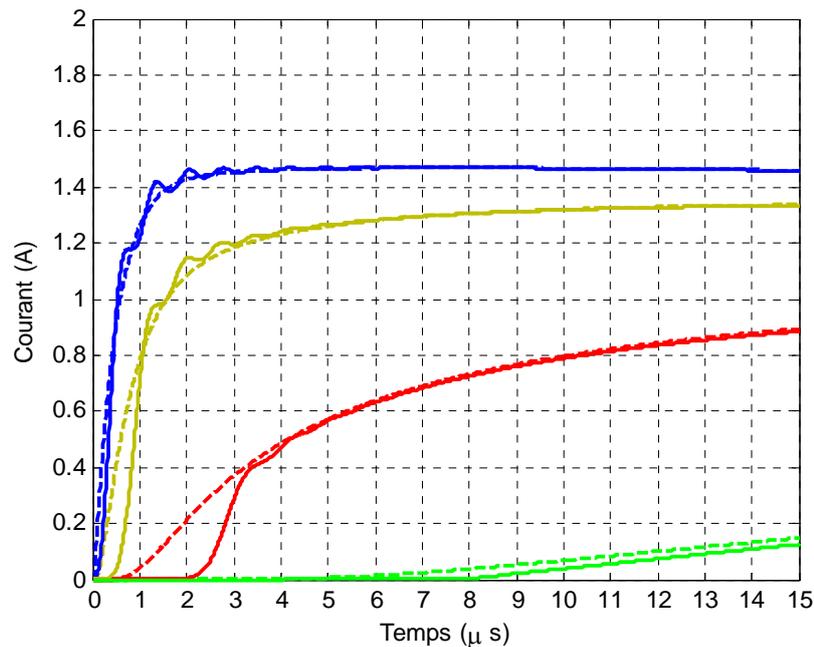


Figure II.6.b : Ondes de courant avec et sans dépendance en fréquence avec $\alpha = 0,00184\mu s^{-1}$ et $\beta = 2,4665 \mu s^{-1}$, $f = 2,67 \text{ kHz}$

Nous constatons que la dépendance en fréquence des paramètres électriques du sol induit une diminution au niveau des amplitudes du courant et du potentiel. Cette diminution s'accroît avec la réduction de la fréquence de l'onde de courant. Par ailleurs, la dépendance en fréquence engendre un retard dans le temps de montée. Ce dernier augmente au fur et à mesure qu'on s'éloigne du point d'injection du courant. Nous constatons également l'apparition des ondulations aussi bien sur l'onde du courant que sur celle du potentiel pour la plus basse fréquence (2,67kHz).

II.5. Etude des SMALT dans le domaine fréquentiel

II.5.1. Modélisation

Le modèle attribué lors de la modélisation d'un SMALT dépend de la fréquence du courant injecté. Pour des faibles fréquences, les SMALT sont modélisés par des résistances. Dans le cas d'une électrode verticale, trois relations exprimant sa résistance ont été proposées [BOU13].

- Relation de Rudenberg :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{d} \right) \quad (\text{II. 14})$$

- Relation de Dwight-Sunde :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \left(\frac{4l}{r} \right) - 1 \right) \quad (\text{II. 15})$$

- Relation de Liew-Darveniza :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{r+l}{r} \right) \quad (\text{II. 16})$$

Nous avons tracé sur la figure (II.7), la résistance calculée en utilisant les trois expressions précédemment citées en fonction de la longueur de l'électrode verticale enterrée dans un sol homogène, de résistivité de 100Ω.m. L'électrode a pour rayon $r = 2,5\text{mm}$. D'après cette figure, les trois formules sont équivalentes puisqu'elles donnent des valeurs très proches. En faibles fréquences, il est recommandé d'utiliser des électrodes verticales relativement longues afin d'avoir de faibles valeurs de résistances.

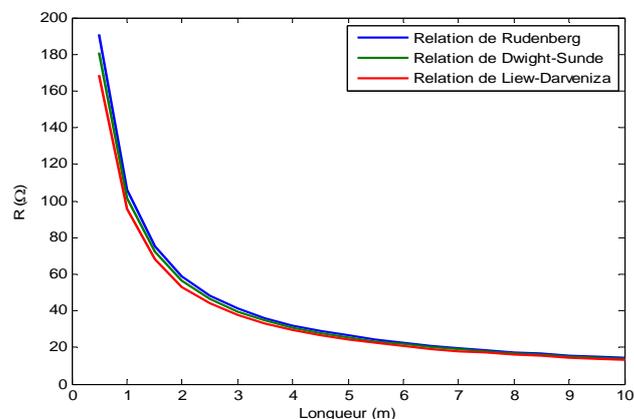


Figure II.7 : Résistance d'une électrode verticale

L'expression de la résistance d'une électrode horizontale est la suivante [BOU13] :

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \left(\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2re}} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.17})$$

avec :

l : Longueur de l'électrode ; r : son rayon ; e : la profondeur d'enfouissement de l'électrode et ρ la résistivité du sol.

Dans d'autres travaux par exemple, les SMALT ont été modélisés par une résistance en parallèle à une capacitance. La capacitance est ajoutée afin de prendre en compte l'effet capacitif qui apparait en hautes fréquences [BOU13]. Outre de la résistance et la capacitance, l'approche des lignes de transmission prend en considération l'effet inductif des SMALT. Ainsi, le comportement global (résistif-capacitif-inductif) est illustré sur la figure (II.8) [GRC05] utilisant trois approches en l'occurrence, RLC, l'approche des lignes de transmission (TL) et l'approche du flux électromagnétique (EMF).

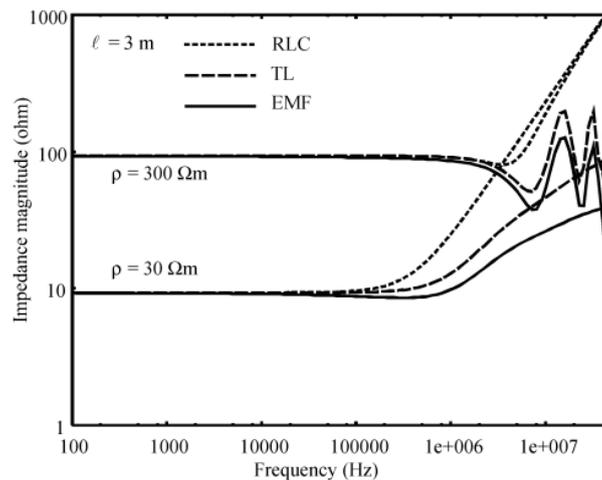


Figure II.8 : Amplitude de l'impédance en fonction de la fréquence [GRC05]

II.5.2. Simulation des électrodes horizontale et verticale dans un sol homogène

En général, étudier un SMALT en fréquentiel en utilisant la méthode des lignes de transmission, revient à déterminer son impédance d'entrée. Pour cela, nous avons choisi le modèle en Γ figure (II.9) lors de notre étude.

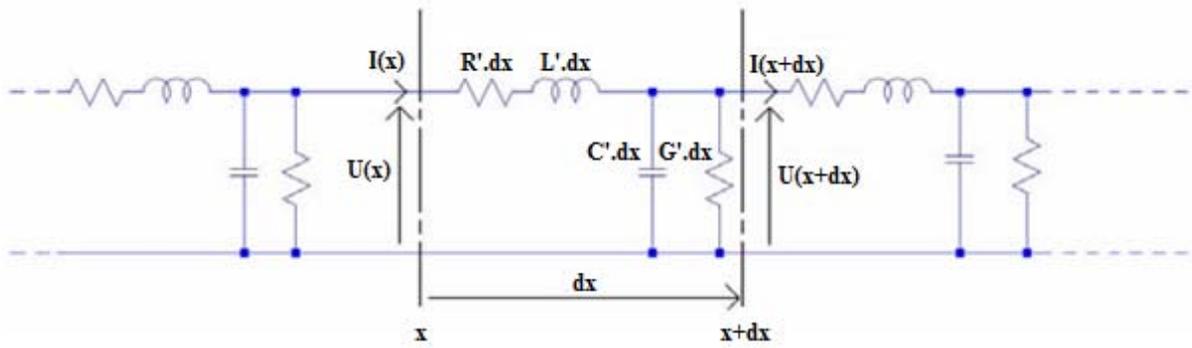


Figure II.9 : Représentation élémentaire d'une ligne de transmission [WEN06]

A partir de ce schéma, nous pouvons écrire les équations suivantes [WEN06] :

➤ Equation des courants :

$$\bar{I}(x) = \bar{I}(x + dx) + (G' + jC'\omega)dx \bar{U}(x + dx) \quad (\text{II. 18})$$

Ce qui donne :

$$\frac{\bar{I}(x + dx) - \bar{I}(x)}{dx} = -(G' + jC'\omega)\bar{U}(x + dx) \quad (\text{II. 19})$$

Si $dx \rightarrow 0$

$$\frac{d\bar{I}(x)}{dx} = -(G' + jC'\omega)\bar{U}(x) \quad (\text{II. 20})$$

➤ Equation des tensions :

$$\bar{U}(x) = \bar{U}(x + dx) + (R' + jL'\omega)dx \bar{I}(x + dx) \quad (\text{II. 21})$$

Ce qui donne :

$$\frac{\bar{U}(x + dx) - \bar{U}(x)}{dx} = -(R' + jL'\omega)\bar{I}(x + dx) \quad (\text{II. 22})$$

Si $dx \rightarrow 0$

$$\frac{d\bar{U}(x)}{dx} = -(R' + jL'\omega)\bar{I}(x) \quad (\text{II. 23})$$

En dérivant la relation (II.23), nous trouvons :

$$\frac{d^2\bar{U}(x)}{dx^2} = -(R' + jL'\omega)\frac{d\bar{I}(x)}{dx} \quad (\text{II. 24})$$

En insérant (II.20)

$$\frac{d^2\bar{U}(x)}{dx^2} = (R' + jL'\omega)(G' + jC'\omega)\bar{U}(x) \quad (\text{II. 25})$$

$\bar{U}(x)$ est solution de :

$$\frac{d^2\bar{U}(x)}{dx^2} - (R' + jL'\omega)(G' + jC'\omega)\bar{U}(x) = 0 \quad (\text{II. 26})$$

Cette relation peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{d^2\bar{U}(x)}{dx^2} - \gamma^2\bar{U}(x) = 0 \quad (\text{II. 27})$$

$$\gamma^2 = (R' + jL'\omega)(G' + jC'\omega) \quad (\text{II. 28})$$

En dérivant la relation (II.18), nous obtenons :

$$\frac{d^2\bar{I}(x)}{dx^2} = -(G' + jC'\omega)\frac{d\bar{U}(x)}{dx} \quad (\text{II. 29})$$

A partir de (II.23) et (II.29) :

$$\frac{d^2\bar{I}(x)}{dx^2} = (G' + jC'\omega)(R' + jL'\omega)\bar{I}(x) \quad (\text{II. 30})$$

Or $\bar{I}(x)$ est une solution de :

$$\frac{d^2\bar{I}(x)}{dx^2} - (G' + jC'\omega)(R' + jL'\omega)\bar{I}(x) = 0 \quad (\text{II. 31})$$

D'où :

$$\frac{d^2\bar{I}(x)}{dx^2} - \gamma^2\bar{I}(x) = 0 \quad (\text{II. 32})$$

$$\gamma^2 = (R' + jL'\omega)(G' + jC'\omega) \quad (\text{II. 33})$$

Les solutions des équations (II.27) et (II.32) sont :

$$U(x) = U^+e^{-\gamma x} + U^-e^{\gamma x} \quad (\text{II. 34})$$

$$I(x) = I^+e^{-\gamma x} + I^-e^{\gamma x} \quad (\text{II. 35})$$

U^+, U^-, I^+ et I^- sont des solutions particulières.

Notre but est de définir la ligne bifilaire à partir de sa matrice de transfert. Pour cela, nous utilisons les notations présentées sur la figure suivante :

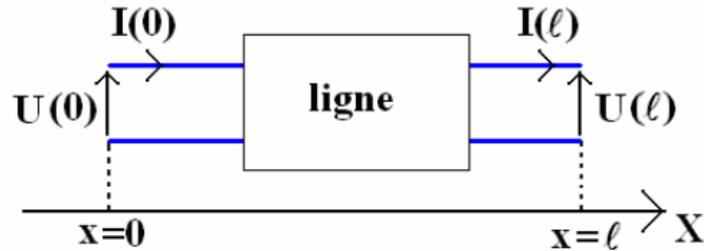


Figure II.10 : Représentation d'une ligne bifilaire [WEN06]

Pour les points d'abscisses, $x = 0$ et $x = l$, nous pouvons écrire :

$$\begin{bmatrix} U(l) \\ I(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\gamma l} & e^{\gamma l} \\ \frac{1}{Z_c} e^{-\gamma l} & -\frac{1}{Z_c} e^{\gamma l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^+ \\ U^- \end{bmatrix} \quad (\text{II. 36})$$

$$\begin{bmatrix} U(0) \\ I(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{1}{Z_c} & -\frac{1}{Z_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^+ \\ U^- \end{bmatrix} \quad (\text{II. 37})$$

Ainsi :

$$\begin{bmatrix} U(l) \\ I(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\gamma l} & e^{\gamma l} \\ \frac{1}{Z_c} e^{-\gamma l} & -\frac{1}{Z_c} e^{\gamma l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{1}{Z_c} & -\frac{1}{Z_c} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U(0) \\ I(0) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 38})$$

Ce qui donne

$$\begin{bmatrix} U(l) \\ I(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & -Z_c \sinh(\gamma l) \\ -\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U(0) \\ I(0) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 39})$$

ou alors :

$$\begin{bmatrix} U(l) \\ I(l) \end{bmatrix} = [Y_l] \begin{bmatrix} U(0) \\ I(0) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 40})$$

avec, $[Y_l]$ la matrice de transfert de la ligne bifilaire.

En inversant (II.39), nous aurons :

$$\begin{bmatrix} U(0) \\ I(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & -Z_c \sinh(\gamma l) \\ -\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U(l) \\ I(l) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 41})$$

En inversant la matrice précédente en utilisant MATLAB, nous pouvons écrire :

$$\begin{bmatrix} U(0) \\ I(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U(l) \\ I(l) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 42})$$

avec :

$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$: est l'impédance caractéristique ;

$\gamma = \sqrt{ZY}$: est le coefficient de propagation ;

$Z = R' + jL'$;

$Y = G' + jC'$.

Pour une électrode de terre, le courant s'annule en son extrémité ; $I(l)=0$. Dans ces conditions :

$$\begin{bmatrix} U(0) \\ I(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U(l) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 43})$$

Ainsi :

$$U(0) = U(l) \cosh(\gamma l) \quad (\text{II. 44})$$

$$I(0) = U(l) \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) \quad (\text{II. 45})$$

Nous définissons l'impédance d'entrée Z_{in} du SMALT par le rapport $U(0)/I(0)$. Cette impédance est obtenue en divisant (II.44) sur (II.45) :

$$Z_{in} = \frac{U(0)}{I(0)} = Z_c \coth(\gamma l) \quad (\text{II. 46})$$

II.5.2.1. Electrode horizontale

II.5.2.1.1. Validation

Une électrode de terre de longueur $l = 30\text{m}$ et de rayon $r = 7\text{mm}$, enterrée horizontalement a été simulée dans deux cas de figures, (i) paramètres du sol considérés constants, et (ii) paramètres dépendant de la fréquence. Le modèle pris dans le cas de la dépendance en fréquence est celui de Visacro et Alipio (VA). Nos résultats relatifs à l'impédance d'entrée ont été confrontés à ceux trouvés par Alipio et al. [ALI12] en utilisant l'approche hybride. Le sol homogène amagnétique est caractérisé par une permittivité relative $\epsilon_r = 10$ et une résistivité $\rho = 300 \Omega.m$.

La figure (II.11) présente l'amplitude de l'impédance, tandis que celle de (II.12) illustre les résultats d'Alipio et al.

Ces figures montrent qu'en basses fréquences, le comportement de l'électrode est purement résistif. Dans cette gamme de fréquences, l'effet de la dépendance en fréquence sur l'impédance d'entrée est quasiment nul. En hautes fréquences, par contre, il y'a apparition d'un comportement inductif se traduisant par l'augmentation de l'impédance d'entrée. La dépendance en fréquence des paramètres du sol engendre la diminution de l'amplitude de l'impédance avec un effet capacitif.

Il est à noter que pour les fréquences ne dépassant pas 400kHz, nos valeurs coïncident parfaitement avec celles de Alipio et al. [ALI12], et sont supérieures ailleurs. Cette différence est due au fait que la méthode des lignes de transmission que nous avons utilisée surestime l'impédance d'entrée en hautes fréquences [GRC05].

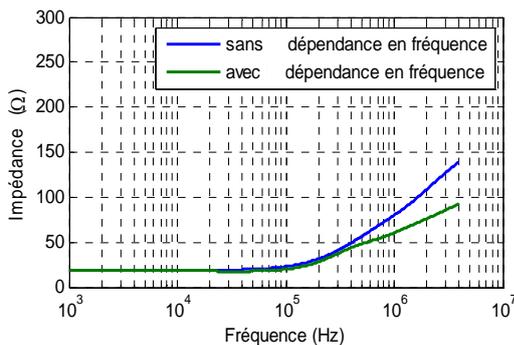


Figure II.11 : Notre impédance d'entrée utilisant LT

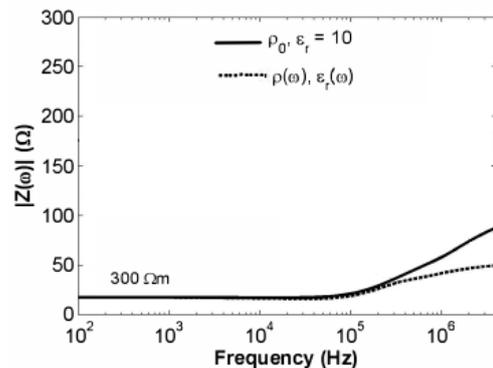


Figure II.12 : Impédance d'entrée d'Alipio et al. utilisant l'approche hybride [ALI12]

II.5.2.1.2. Exploitation des résultats

II.5.2.1.2.1. Effet de la résistivité du sol

La caractéristique d'impédance d'entrée de l'électrode de terre en fonction de la fréquence a été tracée pour deux valeurs de résistivité : $30 \Omega m$ et $1000 \Omega m$ figures (II.13) et (II.14) Cela permet d'étudier l'effet de la variation de la résistivité du sol sur l'impédance d'entrée de l'électrode.

La figure (II.13), montre que pour une résistivité de $30 \Omega m$, l'effet de la dépendance en fréquence est presque nul. Pour les fréquences ne dépassant pas 20kHz, l'électrode possède en fait un comportement purement résistif (correspondant à la valeur constante de l'impédance d'entrée). Le comportement inductif (correspondant à l'augmentation de l'impédance d'entrée) apparaît à partir de 20 kHz ; le comportement capacitif étant inexistant.

Cependant, pour $1000 \Omega m$ et des fréquences supérieures à 5kHz, l'impédance est moins importante lors de la prise en compte de la dépendance en fréquence des paramètres électriques du sol. L'écart entre les impédances d'entrée avec et sans dépendance augmente avec la fréquence. Lors de la dépendance en fréquence, l'électrode possède en fait un comportement purement résistif pour les fréquences ne dépassant pas 5kHz. Ce comportement résistif est suivi par celui capacitif (correspondant à la diminution de l'impédance). A partir de 300 kHz, le comportement capacitif laisse place au comportement inductif. Sans dépendance en fréquence, le comportement de l'électrode est purement résistif jusqu'à 200 kHz, inductif jusqu'à 1,5MHz et une succession de comportement inductif-capacitif (se manifestant par les ondulations) ailleurs.

Il est à noter que pour les comportements purement résistifs enregistrés pour les deux résistivités du sol, la valeur de la résistance est plus importante pour la résistivité la plus grande ; ceci est évident du moment que la résistance de terre est proportionnelle à la résistivité du sol.

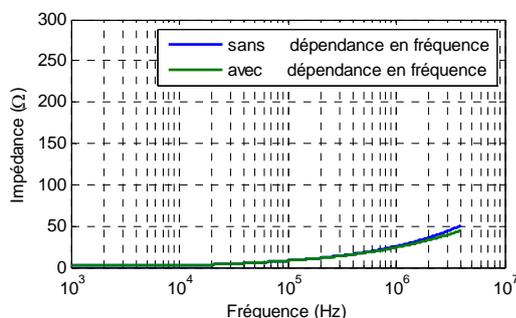


Figure II.13 : Impédance d'entrée d'une électrode horizontale pour $\rho = 30 \Omega m$

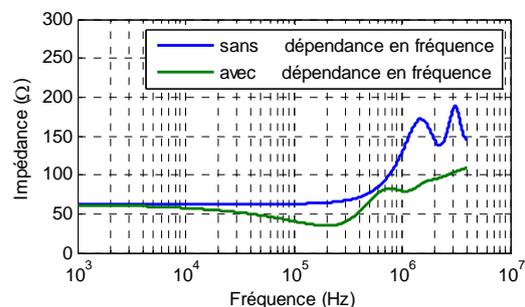


Figure II.14 : Impédance d'entrée d'une électrode horizontale pour $\rho = 1000 \Omega m$

II.5.2.1.2.2. Effet de la longueur de l'électrode

La longueur de l'électrode n'est pas sans effet sur l'amplitude de l'impédance. Afin de mieux comprendre, en quoi consiste cet effet, nous avons varié la longueur de l'électrode et gardé les autres paramètres inchangés.

Pour une longueur $l = 3\text{m}$, nous avons obtenus les résultats illustrés dans la figure (II.15). En hautes fréquences et pour des paramètres du sol constants, le comportement de l'électrode est résistif jusqu'à 400 kHz et laisse place ensuite à celui capacitif ; le comportement inductif étant inexistant. En Tenant compte de la dépendance en fréquence, nous avons enregistré un même effet à savoir, un comportement résistif suivi d'un autre capacitif mais à une fréquence plus basse et qui est de 10kHz.

La figure (II.16), présente la variation de l'amplitude de l'impédance pour $l = 10\text{m}$. En absence de la dépendance en fréquence des paramètres électriques, le comportement est résistif jusqu'à la fréquence 500kHz et est ensuite inductif. Dans le cas de la prise en compte de la dépendance en fréquence, le comportement inductif est précédé par celui capacitif qui débute à la fréquence de 40kHz. Cependant, le comportement capacitif, engendré suite à la dépendance en fréquence, est faible.

Pour $l = 100\text{m}$ figure (II.17), on note que les comportements sont similaire dans les deux cas, le comportement est d'abord résistif jusqu'à une fréquence de 4kHz et laisse place à un comportement inductif qui est plus accentué dans le cas où les paramètres électriques du sol sont considérés constant.

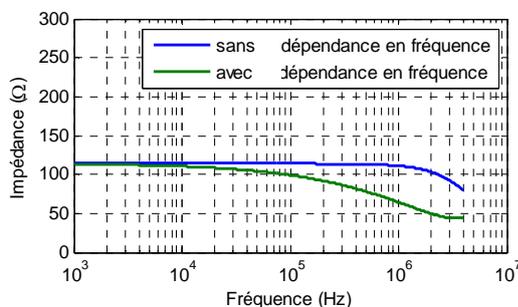


Figure II.15 : Impédance d'entrée d'une électrode Horizontale pour $l = 3\text{m}$

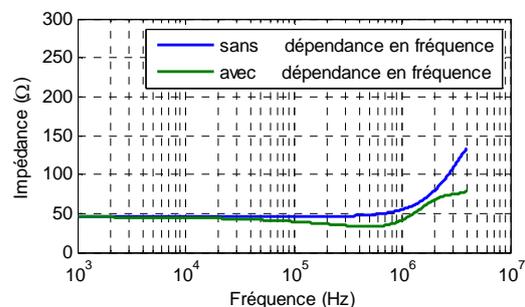


Figure II.16 : Impédance d'entrée d'une électrode Horizontale pour $l = 10\text{m}$

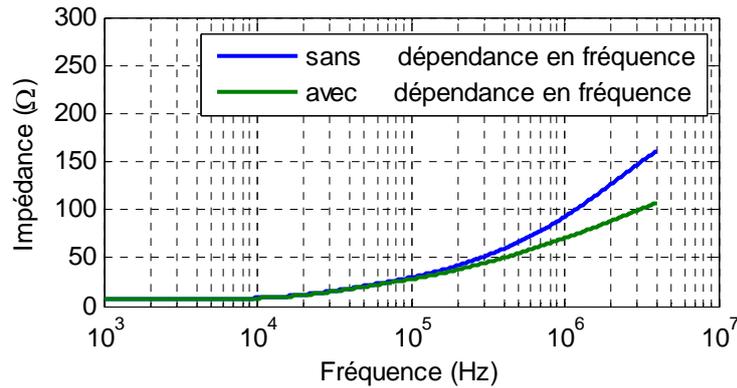


Figure II.17 : Impédance d'entrée d'une électrode Horizontale pour $l = 100\text{m}$

II.5.2.2. Electrode Verticale

Dans cette section, nous nous sommes intéressés à une électrode de terre enterrée verticalement. Nos résultats des figures (II.18) et (II.20) sont comparés à ceux présentés sur les figures (II.19) et (II.21) trouvés par Grcev et al. [GRC05]. Ces derniers ont déterminé la caractéristique impédance d'entrée–fréquence, en utilisant les approches des circuits (RLC), du flux électromagnétique (EMF) et des lignes de transmission (TL). Il est à noter que la méthode EMF a été prise comme référence lors de leur étude.

Nous commençons par une simulation sans prendre en compte la dépendance en fréquence des paramètres du sol. Les données utilisées sont :

- 1/ Sol : $\epsilon_r = 10$, $\mu_r = 1$, $\rho = 30$ et $\rho = 300 \Omega.m$;
- 2/ Electrode : $l = 3\text{m}$ et $l = 30\text{m}$, $r = 12.5\text{mm}$;

Durant la simulation, deux longueurs de l'électrode sont considérées 3m et 30m. Pour chaque longueur, deux valeurs de résistivité du sol ont été utilisés 30 $\Omega.m$ et 300 $\Omega.m$.

Pour la longueur $l = 3\text{m}$, nos résultats sont illustrés sur la figure (II.18). Une parfaite concordance entre nos résultats et ceux trouvés de Grcev et al. [GRC05] trouvés en utilisant la méthode TL figure (II.19) a été obtenue. Relativement aux résultats obtenus par EMF, une surestimation de l'amplitude de l'impédance a été enregistrée sur nos valeurs, ceci étant lié à la méthode des lignes de transmission. Une même observation a été déjà faite par Grcev et al.

De la figure (II.18), nous pouvons voir l'effet de la résistivité du sol sur l'amplitude de l'impédance. En effet, pour $\rho = 30 \Omega.m$, l'impédance d'entrée a un comportement résistif, puis inductif à partir de $f = 300 \text{kHz}$. Pour $\rho = 300\Omega.m$, l'impédance d'entrée a un comportement résistif jusqu'à $f = 1\text{MHz}$, un comportement capacitif jusqu'à $f = 7\text{MHz}$ et un comportement inductif-capacitif pour le reste des fréquences. Il est à noter que l'amplitude de l'impédance pour $\rho = 300 \Omega.m$ est plus importante que celle pour $\rho = 30\Omega.m$, pour l'intervalle de fréquence considéré.

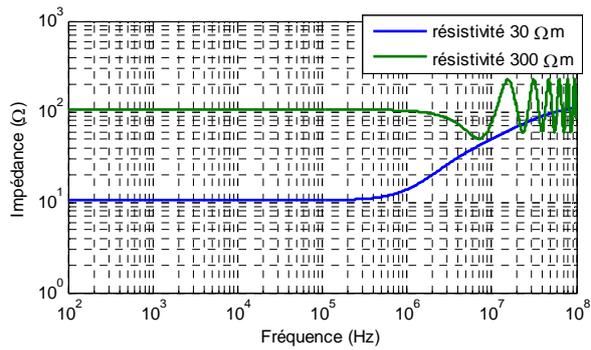


Figure II.18 : Impédance d'entrée, simulée pour $l = 3m$

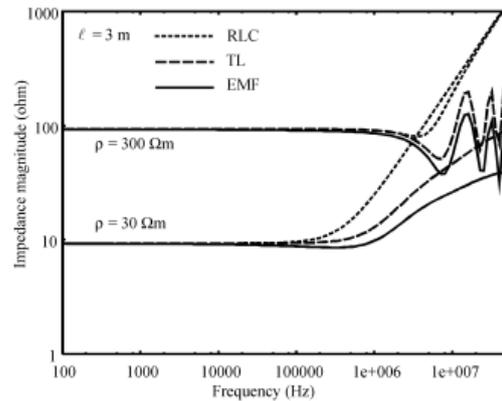


Figure II.19 : Amplitude d'impédance d'entrée pour $l = 3m$ [GRC05]

Pour la longueur de l'électrode $l = 30m$, nos résultats sont représentés sur la figure (II.20) et ceux de Grech et al. sur la figure (II.21). Nos résultats coïncident parfaitement avec ceux trouvés en utilisant TL, et souffrent, toujours, de la surestimation de l'amplitude de l'impédance en hautes fréquences. Pour $\rho = 300 \Omega.m$, le comportement capacitif a disparu, ne laissant que le comportement inductif. L'impédance a un comportement résistif, jusqu'à $f = 10kHz$ pour $\rho = 30 \Omega.m$ et jusqu'à $f = 100kHz$ pour $\rho = 300 \Omega.m$.

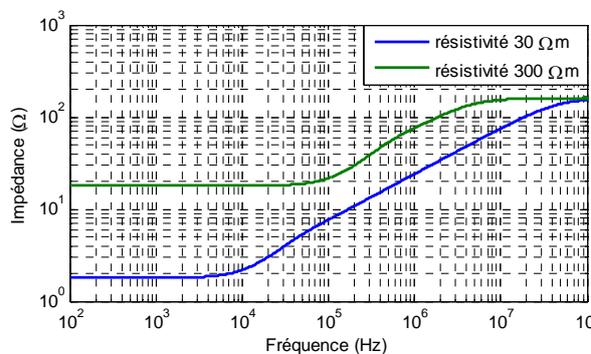


Figure II.20 : Impédance d'entrée, simulée pour $l=30m$

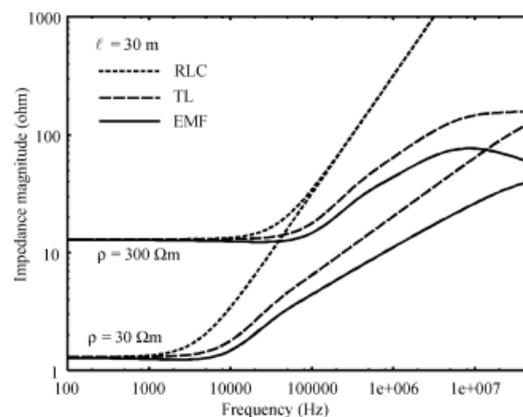


Figure II.21 : Amplitude d'impédance d'entrée pour $l=30m$ [GRC05]

II.5.2.2.1. Effet de la dépendance en fréquence et de la résistivité

Afin d'analyser l'impact de la dépendance en fréquence et de la résistivité du sol, nous introduisons la dépendance en fréquence, et nous traçons l'amplitude de l'impédance en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la résistivité du sol à savoir, $\rho = 30 \Omega.m$ figure (II.22), $\rho = 300 \Omega.m$ figure (II.23) et $\rho = 1000 \Omega.m$ figure (II.24). La longueur de l'électrode considérée $l=30m$.

Pour $\rho = 30 \Omega m$, la prise en compte de la dépendance en fréquence n'a quasiment aucun effet sur l'impédance pour les fréquences inférieures à 1MHz. Pour les deux cas (dépendance ou non en fréquence), le comportement est résistif jusqu'à 10kHz, est ensuite inductif.

Pour $\rho = 300 \Omega m$, dans le cas où les paramètres du sol sont inchangés, le comportement de l'électrode est résistif jusqu'à 60kHz suivi d'un autre inductif. Dans le cas de la prise en compte de la dépendance en fréquence, l'impédance est globalement inférieure à celle obtenue en absence de la dépendance en fréquence et le comportement inductif prend le relais.

Pour $\rho = 1000 \Omega m$, dans le cas où les paramètres du sol ne changent pas en fonction de la fréquence, le comportement est résistif jusqu'à la fréquence 200kHz, est ensuite inductif jusqu'à 1Mhz qui est suivi par un comportement inductif-capacitif se manifestant par des ondulations. Dans le cas de la prise en compte de la dépendance en fréquence, le comportement est résistif jusqu'à 4kHz, capacitif jusqu'à 100kHz et finalement inductif.

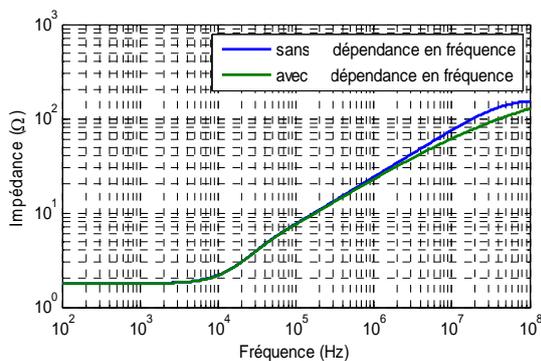


Figure II.22 : Impédance d'entrée d'une électrode Verticale pour $\rho = 30 \Omega m$

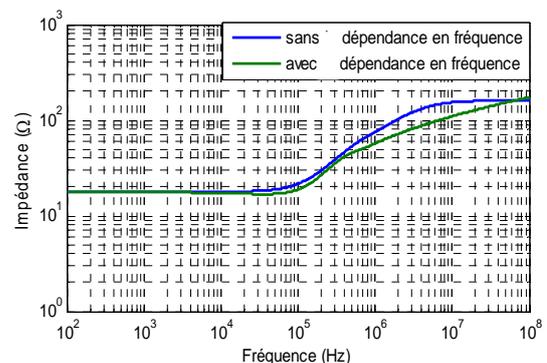


Figure II.23 : Impédance d'entrée d'une électrode Verticale pour $\rho = 300 \Omega m$

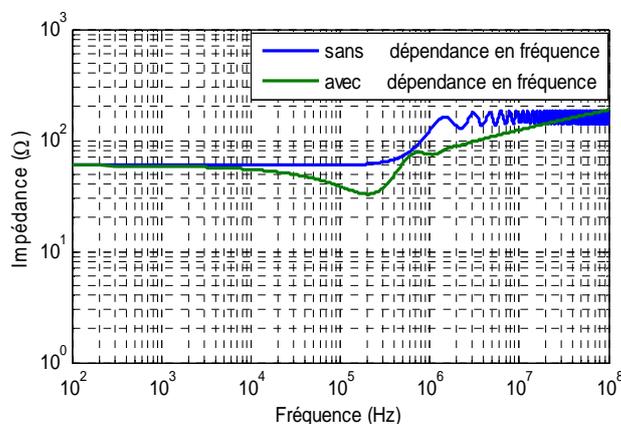


Figure II.24 : Impédance d'entrée d'une électrode Verticale pour $\rho = 1000 \Omega m$

II.5.2.2.2. Effet de la longueur de l'électrode

Pour une résistivité du sol $\rho = 300 \Omega m$, nous faisons varier la longueur de l'électrode verticale. Les longueurs adoptées sont 3, 15 et 100m. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures, (II.25), (II.26), (II.27) respectivement pour $l = 3m$, $l = 15m$ et $l = 100m$.

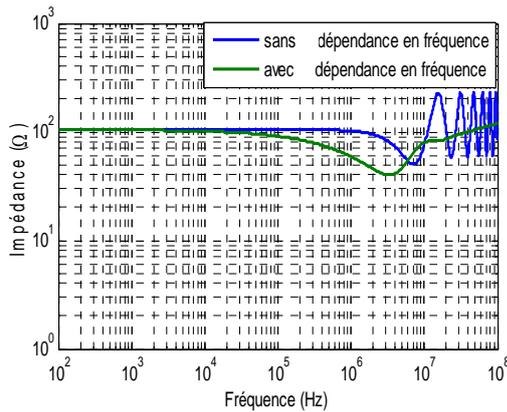


Figure II.25 : Impédance d'entrée d'une électrode Verticale pour $l=3m$

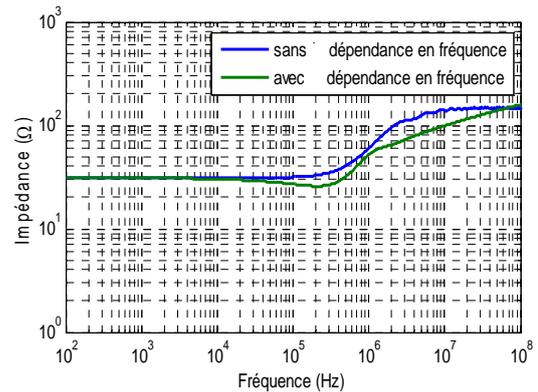


Figure II.26 : Impédance d'entrée d'une électrode Verticale pour $l=15m$

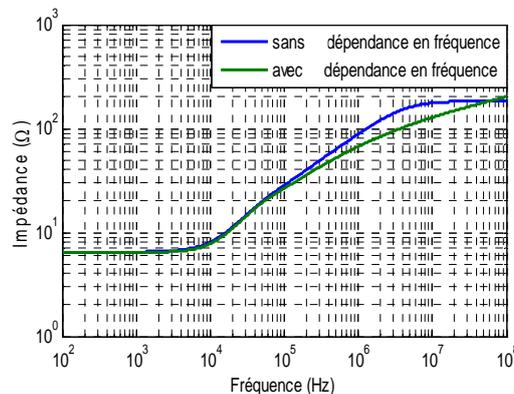


Figure II.27 : Impédance d'entrée d'une électrode Verticale pour $l=100m$

Pour $l = 3m$, dans le cas du modèle ne prenant pas la dépendance en fréquence en compte, le comportement de l'électrode est résistif jusqu'à 1MHz et est ensuite capacitif-inductif. Lors de la considération de la dépendance en fréquence, outre du comportement résistif, ceux capacitif à partir 10kHz et inductif à partir 4MHz apparaissent.

Pour $l = 15m$, en négligeant la dépendance en fréquence, le comportement est résistif jusqu'à 100kHz, inductif ailleurs. Dans le cas de la prise en compte de la dépendance en fréquence, le

comportement résistif est suivi par celui capacitif à la fréquence 70kHz et est ensuite inductif à la fréquence 200kHz.

Pour $l = 100\text{m}$, en absence de la dépendance en fréquence, le comportement est résistif jusqu'à 6kHz et est ensuite inductif. Dans le cas de la prise en compte de la dépendance en fréquence, l'évolution de l'impédance est quasiment la même que celle obtenue en négligeant la dépendance en fréquence. L'effet capacitif induit par la dépendance en fréquence est très minime.

II.5.3. Etude de l'impédance d'un SMALT Horizontal dans un sol stratifié horizontalement

Nous considérons une électrode horizontale de mise à la terre enterrée dans un sol amagnétique stratifié horizontalement en deux couches. Une partie de l'électrode est enfouie dans la première couche (ρ_1 et ϵ_{r1}) et la seconde dans la deuxième couche (ρ_2 et ϵ_{r2}) comme schématisé sur la figure (II.28).

Notre but consiste à déterminer les différentes variations de l'impédance d'entrée de l'électrode en fonction de la fréquence suite à l'injection d'un courant. Pour cela, trois points d'injection ont été choisis, au point de séparation des deux couches et aux deux extrémités de l'électrode. La dépendance en fréquence des paramètres des couches a été prise en compte en se basant sur le modèle de Scott. Les effets de la longueur de l'électrode ainsi que son positionnement relativement aux couches ont été également examinés. Les différents cas étudiés sont :

1. Longueur de l'électrode $l = 6\text{m}$; $l_1 = 3\text{m}$ dans la première couche et $l_2 = 3\text{m}$ dans la deuxième couche.
2. Longueur de l'électrode $l = 20\text{m}$; $l_1 = 10\text{m}$ dans la première couche et $l_2 = 10\text{m}$ dans la deuxième couche.
3. Longueurs de l'électrode $l = 15\text{m}$, $l = 20\text{m}$ et $l = 30\text{m}$; sous différents positionnement.

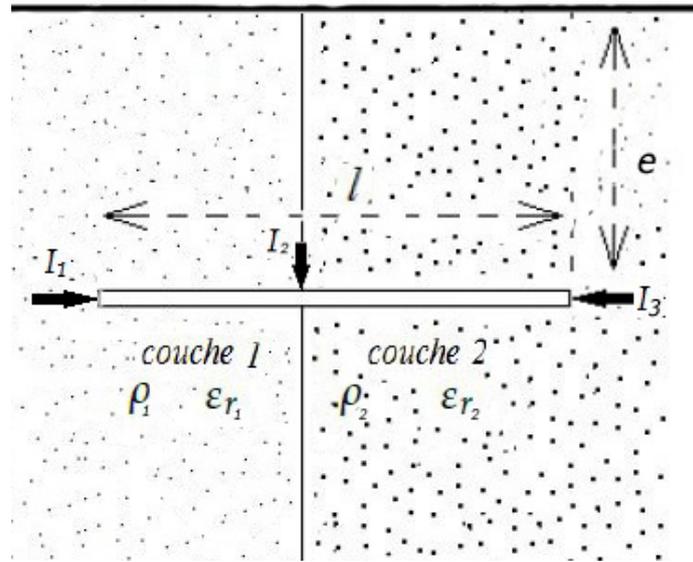


Figure II. 28 : Electrode horizontale de mise à la terre enterrée dans un sol amagnétique stratifié horizontalement [KHE15]

II.5.3.1. Modèle du système

Lors de l'étude précédente, et en se basant sur l'approche des lignes de transmission, nous avons modélisé les électrodes verticale et horizontale enfouies dans un sol homogène. Dans cette partie, nous avons généralisé cette étude sur un sol stratifié en deux couches que nous considérons homogènes. Le modèle de simulation donnant l'impédance d'entrée change en fait en fonction du point d'injection du courant, en fait trois cas ont été considérés conformément au choix du point d'injection.

Cas 1 : Injection du courant I_1 dans l'extrémité de l'électrode appartenant à la couche 1 :

En se basant sur l'expression (II.42), nous pouvons écrire pour la couche 1 :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1 l) & Z_{c1} \sinh(\gamma_1 l) \\ \frac{1}{Z_{c1}} \sinh(\gamma_1 l) & \cosh(\gamma_1 l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 47})$$

et pour la couche 2 :

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_2 l) & Z_{c2} \sinh(\gamma_2 l) \\ \frac{1}{Z_{c2}} \sinh(\gamma_2 l) & \cosh(\gamma_2 l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 48})$$

La combinaison des équations (II.47) et (II.48) donne :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1 l) & Z_{c1} \sinh(\gamma_1 l) \\ \frac{1}{Z_{c1}} \sinh(\gamma_1 l) & \cosh(\gamma_1 l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_2 l) & Z_{c2} \sinh(\gamma_2 l) \\ \frac{1}{Z_{c2}} \sinh(\gamma_2 l) & \cosh(\gamma_2 l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 49})$$

Nous obtenons après développement de l'équation (II.49) :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1 l) \cdot \cosh(\gamma_2 l) + \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \sinh(\gamma_1 l) \cdot \sinh(\gamma_2 l) & Z_{c2} \cosh(\gamma_1 l) \cdot \sinh(\gamma_2 l) + Z_{c1} \cosh(\gamma_2 l) \cdot \sinh(\gamma_1 l) \\ \frac{1}{Z_{c2}} \cosh(\gamma_1 l) \cdot \sinh(\gamma_2 l) + \frac{1}{Z_{c1}} \cosh(\gamma_2 l) \cdot \sinh(\gamma_1 l) & \cosh(\gamma_1 l) \cdot \cosh(\gamma_2 l) + \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \sinh(\gamma_1 l) \cdot \sinh(\gamma_2 l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 50})$$

Pour cette l'électrode de terre, le courant au niveau de la deuxième extrémité doit être nul ($I_3 = 0$ A). Dans ces conditions, l'équation (II.50) permet d'écrire :

$$V_1 = \cosh(\gamma_1 l) \cdot \cosh(\gamma_2 l) + \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \sinh(\gamma_1 l) \cdot \sinh(\gamma_2 l) V_3 \quad (\text{II. 51})$$

$$I_1 = \frac{1}{Z_{c2}} \cosh(\gamma_1 l) \cdot \sinh(\gamma_2 l) + \frac{1}{Z_{c1}} \cosh(\gamma_2 l) \cdot \sinh(\gamma_1 l) V_3 \quad (\text{II. 52})$$

A partir des équations (II.51), (II.52), l'impédance d'entrée de l'électrode peut être exprimée par :

$$Z_{1in} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{\cosh(\gamma_1 l) \cdot \cosh(\gamma_2 l) + \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \sinh(\gamma_1 l) \cdot \sinh(\gamma_2 l)}{\frac{1}{Z_{c2}} \cosh(\gamma_1 l) \cdot \sinh(\gamma_2 l) + \frac{1}{Z_{c1}} \cosh(\gamma_2 l) \cdot \sinh(\gamma_1 l)} \quad (\text{II. 53})$$

Cas 2 : Injection du courant I_3 dans l'extrémité de l'électrode appartenant à la couche 2 :
Par raisonnement analogue, nous avons pour la couche 2 :

$$\begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_2 l) & Z_{c2} \sinh(\gamma_2 l) \\ \frac{1}{Z_{c2}} \sinh(\gamma_2 l) & \cosh(\gamma_2 l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 54})$$

et pour la couche 1:

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1 l) & Z_{c1} \sinh(\gamma_1 l) \\ \frac{1}{Z_{c1}} \sinh(\gamma_1 l) & \cosh(\gamma_1 l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 55})$$

De (II.54) et (II.55) :

$$\begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_2 l) & Z_{c2} \sinh(\gamma_2 l) \\ \frac{1}{Z_{c2}} \sinh(\gamma_2 l) & \cosh(\gamma_2 l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1 l) & Z_{c1} \sinh(\gamma_1 l) \\ \frac{1}{Z_{c1}} \sinh(\gamma_1 l) & \cosh(\gamma_1 l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 56})$$

Ce qui nous donne :

$$\begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1 l) \cdot \cosh(\gamma_2 l) + \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \sinh(\gamma_2 l) \cdot \sinh(\gamma_1 l) & Z_{c2} \cosh(\gamma_1 l) \cdot \sinh(\gamma_2 l) + Z_{c1} \cosh(\gamma_2 l) \cdot \sinh(\gamma_1 l) \\ \frac{1}{Z_{c2}} \cosh(\gamma_1 l) \cdot \sinh(\gamma_2 l) + \frac{1}{Z_{c1}} \cosh(\gamma_2 l) \cdot \sinh(\gamma_1 l) & \cosh(\gamma_1 l) \cdot \cosh(\gamma_2 l) + \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \sinh(\gamma_2 l) \cdot \sinh(\gamma_1 l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 57})$$

Comme le courant au niveau de la deuxième extrémité est nul ($I_1 = 0$ A), nous obtenons :

$$V_3 = \cosh(\gamma_1 l) \cdot \cosh(\gamma_2 l) + \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \sinh(\gamma_1 l) \cdot \sinh(\gamma_2 l) V_1 \quad (II. 58)$$

$$I_3 = \frac{1}{Z_{c2}} \cosh(\gamma_1 l) \cdot \sinh(\gamma_2 l) + \frac{1}{Z_{c1}} \cosh(\gamma_2 l) \cdot \sinh(\gamma_1 l) V_1 \quad (II. 59)$$

Dans ces conditions l'impédance d'entrée est :

$$Z_{2in} = \frac{V_3}{I_3} = \frac{\cosh(\gamma_1 l) \cdot \cosh(\gamma_2 l) + \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \sinh(\gamma_1 l) \cdot \sinh(\gamma_2 l)}{\frac{1}{Z_{c2}} \cosh(\gamma_1 l) \cdot \sinh(\gamma_2 l) + \frac{1}{Z_{c1}} \cosh(\gamma_2 l) \cdot \sinh(\gamma_1 l)} \quad (II. 60)$$

Cas 3 : Injection du courant I_2 au point de séparation des deux couches :

Dans ce cas particulier, le courant I_2 se divise au niveau des deux parties de l'électrode en $I_{2,1}$ circulant dans la partie de l'électrode enfouie dans la couche 1 et $I_{2,2}$ parcourant la partie restante de cette électrode enterrée dans la couche 2. Nous obtenons ainsi :

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_{2,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_2 l) & Z_{c2} \sinh(\gamma_2 l) \\ \frac{1}{Z_{c2}} \sinh(\gamma_2 l) & \cosh(\gamma_2 l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (II. 61)$$

et :

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_{2,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1 l) & Z_{c2} \sinh(\gamma_1 l) \\ \frac{1}{Z_{c1}} \sinh(\gamma_1 l) & \cosh(\gamma_1 l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (II. 62)$$

Etant donné que les courants aux deux extrémités sont nuls ($I_3 = I_1 = 0$ A), nous obtenons les impédances parallèles suivantes :

$$Z_{mil1} = \frac{V_2}{I_{2,1}} = Z_{c1} \frac{\cosh(\gamma_1 l)}{\sinh(\gamma_1 l)} \quad (II. 63)$$

et :

$$Z_{mil2} = \frac{V_2}{I_{2,2}} = Z_{c2} \frac{\cosh(\gamma_2 l)}{\sinh(\gamma_2 l)} \quad (II. 64)$$

Ainsi, l'impédance d'entrée équivalente du système est :

$$Z_{mil} = \frac{Z_{mil1} \cdot Z_{mil2}}{Z_{mil1} + Z_{mil2}} \quad (II. 65)$$

En substituant Z_{mil1} et Z_{mil2} par leurs expressions, Z_{mil} devient :

$$Z_{mil} = \frac{Z_{c1} Z_{c2} \cosh(\gamma_1 l) \cdot \cosh(\gamma_2 l)}{Z_{c1} \cosh(\gamma_1 l) \cdot \sinh(\gamma_2 l) + Z_{c2} \cosh(\gamma_2 l) \cdot \sinh(\gamma_1 l)} \quad (\text{II. 66})$$

II.5.3.2. Application

Pour cette partie, nous considérons une électrode de longueur $l = 6\text{m}$ et de rayon $r = 4\text{mm}$ enterrée horizontalement à une profondeur $e = 0,6\text{m}$ dans un sol amagnétique stratifié horizontalement en deux couches. Les paramètres électriques de la première couche sont $\rho_1 = 300 \Omega \cdot \text{m}$ et $\epsilon_{r1} = 20$, et ceux de la deuxième couche sont $\rho_2 = 10 \Omega \cdot \text{m}$ et $\epsilon_{r1} = 90$. Les parties de l'électrode enterrées dans les deux couches sont identiques ; $l_1 = l_2 = 3\text{m}$.

Les impédances obtenues pour les trois cas précédemment cités sont représentées sur la figure (II.29) ; la dépendance de fréquence n'a pas été prise en considération.

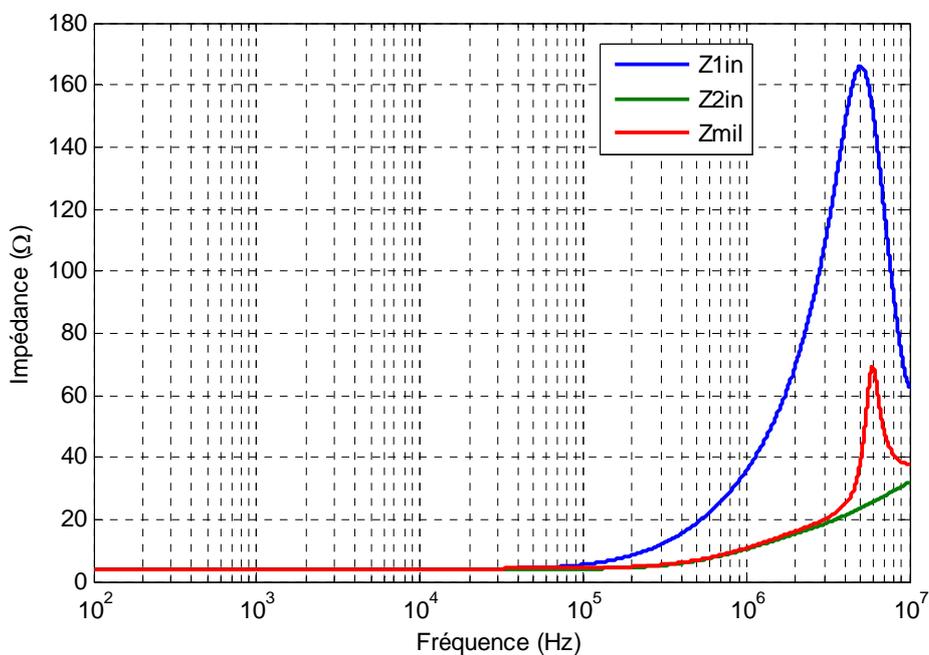


Figure II.29 : Impédances d'entrée de l'électrode horizontale de terre enfouie à une profondeur $e=0.6\text{m}$ dans un sol stratifié verticalement

A partir de cette figure, nous remarquons que, pour les fréquences ne dépassant pas 40kHz, l'électrode possède un même comportement résistif et ce quel que soit le point d'injection. Au de la de cette fréquence, nous observons, lors de l'injection du courant dans la couche 1 ayant la résistivité la plus élevée, une rapide augmentation de l'impédance (comportement fortement inductif) suivi par une diminution brusque (comportement fortement capacitif aussi) à partir de 5MHz. Lors de l'injection du courant dans l'extrémité se trouvant dans la couche 2, ayant la résistivité la plus petite, l'impédance d'entrée montre un comportement inductif à partir de 40kHz. L'impédance d'entrée obtenue dans le cas de l'injection du courant dans le point de séparation, coïncide parfaitement avec celle trouvée lors de l'injection du courant dans l'extrémité appartenant à la couche 2 tant que la fréquence ne dépasse 2MHz, et se détache ailleurs en montrant un comportement plus inductif avant de rencontrer un comportement capacitif à partir de 6MHz.

Les caractéristiques présentant les évolutions des impédances d'entrée obtenues pour les trois points d'injection en tenant compte de la dépendance en fréquence des paramètres électriques des deux couches du sol sont présentées sur la figure (II.30). Nous constatons que la dépendance en fréquence induit un effet capacitif se traduisant par une diminution des valeurs des impédances d'entrée ; les allures sont globalement conservées.

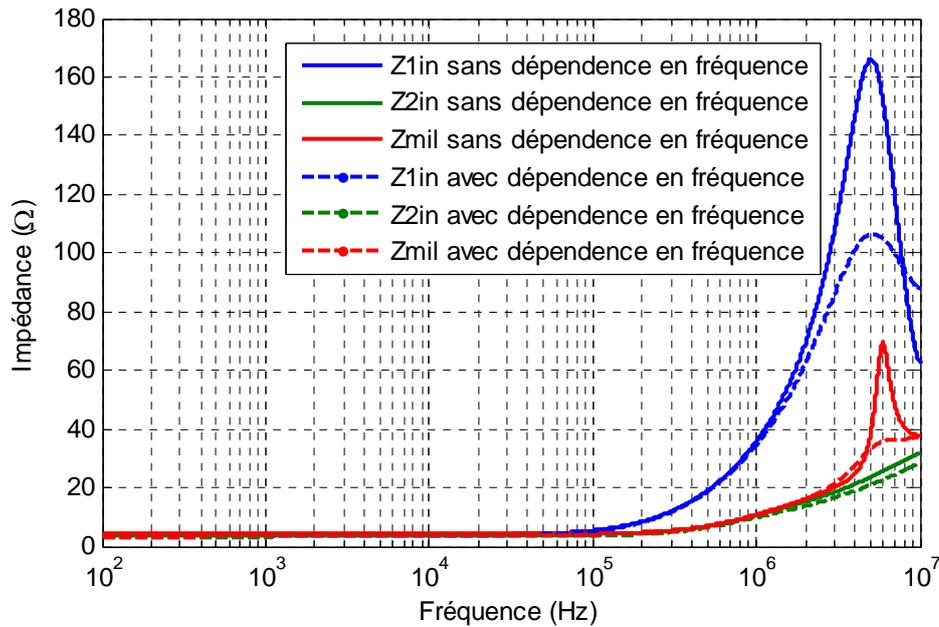


Figure II.30 : Impédances d'entrée de l'électrode horizontale pour différents point d'injection en présence et en absence de la dépendance de fréquence

II.5.3.2.1. Etude de l'influence de la longueur

Pour cette application, nous avons seulement procédé à la variation de la longueur de l'électrode; les autres paramètres ont été maintenus. En fait, nous avons considéré deux longueurs 6 et 20m. La dépendance de fréquence n'a pas été prise en compte. Relatif au positionnement de l'électrode, deux cas ont été traités; par rapport au point de séparation, l'électrode placée (i) symétriquement, (ii) asymétriquement.

Cas 1 : Electrode placée symétriquement par rapport au point de séparation :

Les résultats ainsi obtenus sont présentés sur la figure (II.31).

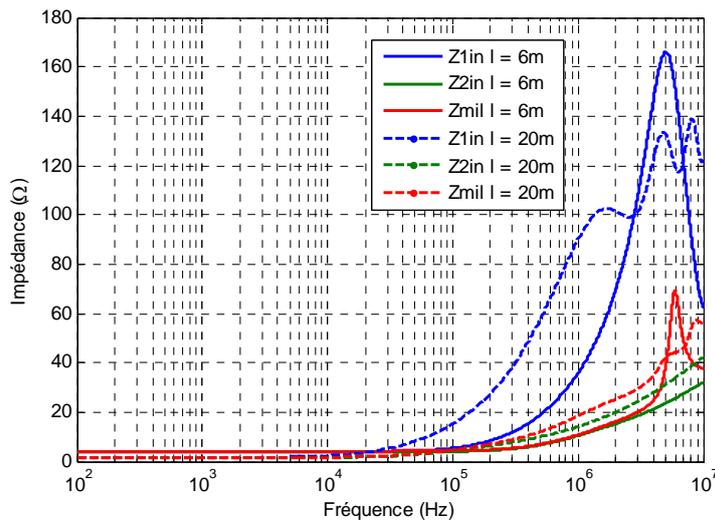


Figure II.31 : Impédances d'entrée de l'électrode horizontale de longueur de 6m et 20m

Nous constatons qu'en augmentant la longueur de l'électrode de terre, le comportement inductif apparaît pour des fréquences plus basses. Pour une même fréquence ne dépassant pas 3MHz, l'impédance obtenue pour 20m est globalement plus importante que celle trouvée pour 6m. Par ailleurs, l'augmentation de la longueur de l'électrode favorise l'apparition des ondulations pour les cas d'injection du courant à l'extrémité se trouvant dans la couche 1 et au point de séparation.

Cas 2 : Electrode placée asymétriquement par rapport au point de séparation :

Pour étudier l'impact du positionnement de l'électrode, nous avons maintenus tous les paramètres inchangés à l'exception de la longueur qui est égale à 15m et 40m pour l'étude de Z_{1in} et Z_{2in} , et 15m, 20m, et 40m pour l'étude de Z_{mil} .

Deux cas ont été traités pour Z_{1in} et Z_{2in} en faisant varier la longueur de la partie de l'électrode ou le courant n'est pas injecté:

Z_{1in} : (i) $l_1 = 10m, l_2 = 5m$ (ii) $l_1 = 10m, l_2 = 30m$

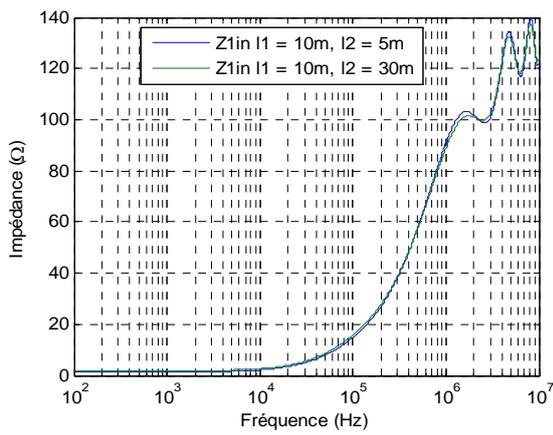
Z_{2in} : (i) $l_1 = 5m, l_2 = 10m$ (ii) $l_1 = 30m, l_2 = 10m$

Par ailleurs, trois cas pour Z_{mil} . Pour chaque cas, une des longueurs l_1 ou l_2 est maintenue constante :

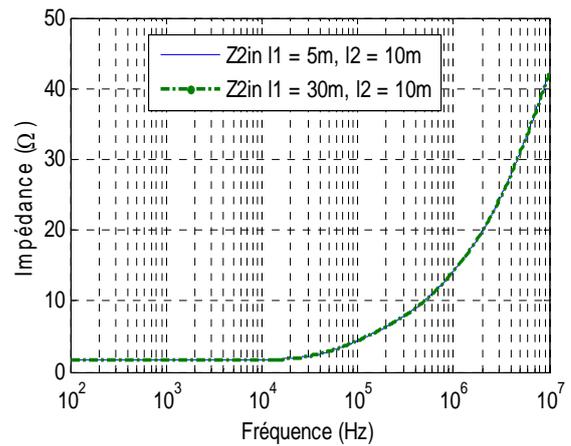
(i) 1) $l_1 = 10m, l_2 = 5m$, 2) $l_1 = 10m, l_2 = 10m$, 3) $l_1 = 10m, l_2 = 30m$

(ii) 1) $l_1 = 5m, l_2 = 10m$, 2) $l_1 = 10m, l_2 = 10m$, 3) $l_1 = 30m, l_2 = 10m$

Les résultats que nous avons obtenus sont illustrés sur la figure (II.32) pour le premier cas et sur la figure (II.33) pour le deuxième cas.

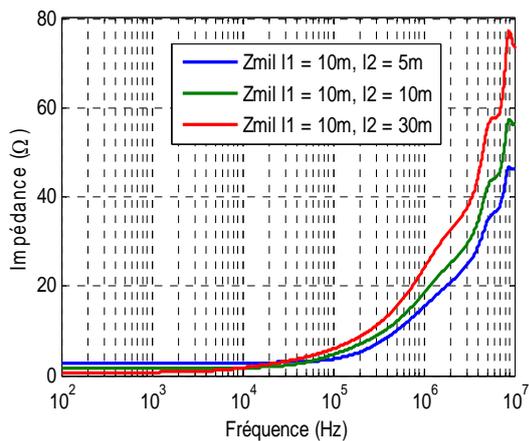


(a)

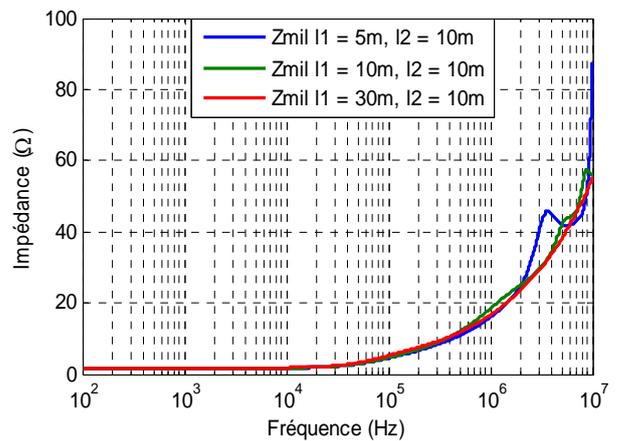


(b)

Figure II.32 : Impédances d'entrée de l'électrode horizontale d'une longueur totale de 15m et 40m
(a) : Z_{1in} (b) : Z_{2in}



(a)



(b)

Figure II.33 : Impédances d'entrée Z_{mil} de l'électrode horizontale lors de la variation de (a) l_2 , (b) l_1

Nous remarquons d'après la figure (II.32) que lors de l'injection du courant dans l'extrémité de l'une des parties se trouvant dans l'une des couches, la variation de la longueur de la partie restante n'a quasiment aucun effet sur l'impédance d'entrée. Par ailleurs, lors de l'injection du courant dans le point de séparation, l'augmentation de la longueur de l'électrode enfouie dans la couche du sol la moins résistive a pour effet d'augmenter l'impédance d'entrée comme illustré sur figure (II.33.a). En revanche, l'augmentation de la longueur de l'électrode enfouie dans la couche la plus résistive engendre des comportements inductif-capacitif qui se manifestent par des ondulations (Figure II.33.b).

II.6. Conclusion

Il ressort de cette étude les principales conclusions suivantes :

- Une très bonne concordance a été enregistrée en confrontant nos caractéristiques potentiel-temps à celles trouvées en utilisant le code GSSP par Cattaneo et al., lors de l'injection d'un courant bi-exponentiel de faible amplitude, à l'extrémité d'une électrode horizontale enfouie dans un sol homogène.
- Une électrode de terre est modélisée par une simple résistance en basses fréquences. Le comportement capacitif et/ou celui inductif peuvent avoir lieu en hautes et très hautes fréquences. A l'inverse du comportement capacitif, celui inductif se manifeste par une augmentation de l'impédance d'entrée de l'électrode.
- L'augmentation de la longueur de l'électrode et la diminution de la résistivité du sol favorisent le comportement inductif de l'impédance d'entrée de l'électrode. Le contraire est vrai ; la diminution de la longueur de l'électrode et l'augmentation de la résistivité du sol privilégient le comportement capacitif.
- La dépendance, favorisée par la diminution de la longueur de l'électrode et l'augmentation de la résistivité du sol, a un effet capacitif. Une telle dépendance cause, en outre, l'apparition d'ondulations sur les réponses transitoires à faibles fréquences.
- Il est recommandé d'injecter le courant à l'extrémité de l'électrode se trouvant dans la partie la moins résistive du sol stratifié horizontalement.
- Si la longueur de la partie où le courant est injecté, est maintenue constante, la variation de la longueur de l'autre partie n'affecte pas l'impédance d'entrée de l'électrode enfouie horizontalement dans un sol stratifié en deux couches.
- Lors de l'injection du courant au point de séparation d'une électrode enfouie dans un sol stratifié horizontalement, l'impédance augmente avec la longueur de l'électrode enfouie dans la couche du sol la moins résistive. Par ailleurs, des ondulations peuvent avoir lieu lors de l'augmentation de la longueur de la partie se trouvant dans la couche la plus résistive.

Conclusion Générale

Cette présente étude porte sur l'analyse transitoire des électrodes horizontale et verticale de terre enfouies dans un sol homogène ou stratifié horizontalement. Pour cela, l'approche des lignes de transmission a été utilisée ; en conséquence des programmes ont été développés, sous environnement MATLAB.

Nous nous sommes concentrés sur l'application de la méthode des lignes de transmission sur des électrodes horizontale et verticale de terre dans le but de déterminer (i) leurs réponses transitoires en courant et en tension dans le domaine temporel en tenant compte ou non de la dépendance en fréquence des paramètres électriques du sol, (ii) leurs impédances d'entrée dans le domaine fréquentiel. Deux sols ont fait l'objet de ce travail : sol homogène et sol stratifié horizontalement en deux couches. Il ressort de cette partie les conclusions suivantes :

- Les modèles relatifs à la dépendance des caractéristiques électriques du sol en fréquence établis par Portela, Scott et Visacro et Alipio donnent approximativement les mêmes ordres de grandeurs et de la résistivité et de la permittivité. Dans nos applications, les deux derniers modèles ont été adoptés.
- A cause de sa faible amplitude, le courant bi-exponentiel choisi ne génère en aucun cas le phénomène d'ionisation du sol. L'effet du couplage mutuel entre les différents éléments de l'électrode est très minime, de ce fait il n'a pas été pris en compte dans notre étude.
- Les ondes de potentiel que nous avons obtenues lors de l'injection d'un courant bi-exponentiel de faible amplitude, à l'extrémité d'une électrode horizontale enfouie dans un sol homogène, coïncident avec celles trouvées numériquement par Cattaneo et al.
- En basses fréquences, une électrode de terre se modélise par une résistance pure. Le comportement capacitif (respectivement inductif) apparaissant en hautes et très hautes fréquences, se manifeste par une diminution (respectivement une augmentation) de l'impédance. De ce fait la capacité se place en parallèle avec la résistance, tandis que l'inductance se met en série.
- Le comportement inductif (respectivement capacitif) de l'impédance d'entrée est favorisé par l'augmentation (respectivement la diminution) de la longueur de l'électrode et la diminution (respectivement l'augmentation) de la résistivité du sol.
- La diminution de la longueur de l'électrode et l'augmentation de la résistivité du sol favorisent l'effet de la dépendance en fréquence des paramètres électriques du sol. Cette dépendance a un effet capacitif engendrant la diminution aussi bien des réponses transitoires que des impédances d'entrée. Pour les faibles fréquences, cette dépendance cause également l'apparition d'ondulations sur les réponses transitoires.

- Dans le cas d'un sol stratifié horizontalement en deux couches de différentes caractéristiques électriques, il est recommandé d'injecter le courant à l'extrémité de l'électrode se trouvant dans la partie du sol la moins résistive.
- L'impédance d'entrée de l'électrode enfouie horizontalement dans un sol stratifié en deux couches ne change pratiquement pas si la longueur de la partie où le courant est injecté, est maintenue constante.
- L'impédance augmente avec la longueur de l'électrode enfouie dans la couche du sol la moins résistive lors de l'injection du courant au point de jonction. Des ondulations peuvent apparaître lors l'augmentation de la longueur de la partie se trouvant dans la couche la plus résistive.
- Le modèle de stratification que nous avons développé peut être généralisé pour modéliser une électrode horizontale enterrée dans un sol stratifié horizontalement en n couches.

Bibliographie

[ABI12] Z. Z. Abiddine, « Modélisation et simulation des prises de terre dans les systèmes électriques », Mémoire de Magister, Département d'Electrotechnique, Université Ferhat Abbas Sétif, Mai, 2012.

[AGU91] M. Aguet and M. Lanoz, « Haute tension », Vol. 22. Traité d'électricité, 2 ed., 1991.

[ALI10] M. A. O. S. A. G. Pedrosa, R. S. Alipio, M. M. Afonso, « Simulation of behavior electrical grounding—comparative analysis for performance in frequency-domain », Proc. Int. Workshop Appl. Model. Simul. , Rio de Janeiro, Brazil, Vol. 1, May 5-7, 2010.

[ALI12] R. Alipio, S. Visacro, «How the frequency dependence of soil parameters affects the lightning response of grounding electrodes », International Conference on Lightning Protection (ICLP), pp. 1-4 , Vienna, Austria, 2-7 Septembre 2012.

[ALI13] R. Alipio, S. Visacro, « Frequency dependence of soil parameters: effect on the lightning response of grounding electrodes », IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 55, No.1, pp. 132 - 139, 13 February 2013.

[BOU15] A.Boubakeur, « Techniques de la haute tension », cours de graduation, Département d'Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, 2015.

[BOU04] C. Bouquegneau, « La foudre : phénomènes, effets et protection », Journée organisée par AIM, JAN 14, 2004, special issue of Revue AIM- Liège n°3, pp.3-22,14 Janvier 2004.

[BOU13] H.Bouchenak, A. Chebbata, « Comportement des systèmes de mise à la terre en fonction de divers paramètres électrogéométriques », Projet de Fin d'Etudes, Département d'Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2013.

[BRU92] X. Brunotte, G. Meunier, J.F. Imhoff, « Finite element solution of undounded problems using transformation: a rigorous powerful and easy solution », IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 25, No. 2 , pp. 1663-1666, March 1992.

[CAT92] S. Cattaneo, A. Geri, F. Mocci, G. M. Veca, «Transient behaviour of grounding systems simulations: Remarks on the emtp's and special code's use» in: proceeding of the 21 st users group meeting, Kolumpari Crete, Greece, pp.1-11, 5-7 June, 1992.

[CEL03] G. Cell, F.Pilo, «A distributed parameter model for grounding systems in the PSCAD/EMTDC environment », IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 3, pp. 1650-1655, 2003.

[CHO94] Y. L. Chow, M. M. A. Salama, « A simplified method for calculating the substation grounding grid resistance », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, pp. 736 - 742 , April 1994.

- [CLA84] B. Claude, « Principes de conception et de réalisation des mises à la terre », Electricité De France (EDF), Centre des Etudes et Recherches, Janvier 1984.
- [DAW86a] F. Dawalibi, «Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductor: part i - signale conductor», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 10, pp. 32-33, October 1986.
- [DAW86b] F. Dawalibi, «Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors: part ii-ground networks», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 10, pp. 33 – 34, October 1986.
- [DEP13] D. Ambelal, « Earthing and grouding for the control of emi in industrial instrumentation and control systems », a Project Report For the Degree of Master of Sience in Engineering, Publisher: University of the Witwatersrand, Faculty of Engineering, Johannesburg, 13 January 1986.
- [DEP87] Department of defense USA, «Gouinding - Bonding – and Shielding», Vol. 2. Electronic equipments and facilities - D.D.U.SA, December 1987.
- [EDF97] EDF (Electricité De France), « Prises de Terre pour Réseaux Electriques de Distribution », Electricité de France, Centre de Normalisation, HN 64-S-55, Avril 1997.
- [ESO14] C.S. Esobinenwu, B.O.H. Akinwole, C.O. Omeje, « Earth mat design for 132/33kv substation in rivers state using ETAP », Department of electrical/electronic engineering University of Port Harcourt, Vol. 15, No. 8 , pp. 389-402, 8 – Septembre 15 Novembre e 2014.
- [FLA10] S. Flazi, A. Benomar, « Calcul analytique et numérique de la résistance de prise de terre », Quatrième Conférence Internationale sur le Génie Electrique CIGE'10, pp. 39-43, 03-04 Novembre 2010, Université de Bechar, Algérie.
- [GAR84] C. Gary, « Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions », Collection de la direction des études et recherches d'électricité de France, éditions Eyrolles, 1984.
- [GER99] A. Geri, «Behaviour of grounding systems excited by high impulse currents: the model and its validation», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, pp. 1008-1017, July 1999.
- [GRC05] L. Grcev, M. Popov, « On high-frequency circuit equivalents of a vertical ground rod», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 1598-1603, April 2005.
- [GRE05] D. Grenier, « Electromagnétisme et transmission des ondes », Université Laval Québec, Département de génie électrique et génie informatique, 2016.
- [GRE90] L.Grecev et F.Dawalibi, « An electromagnetic model for transients in grounding systems », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5. No. 4, pp. 1773-1781, November 1990.
- [HAR08] B. Harrat, «Caractérisation et Optimisation Numérique d'une Mise à la Terre », Thèse de Doctorat en Sciences, Département de Génie Electrique, Université de Jijel, Avril 2008.
- [HEI85]F. Heidler, « Traveling current source model for lemp calculation », Proc. of 6Th Symposium and Technical Exhibition Electromagnetic Compatibility, pp. 157-62, Zurich, Switzerland, 1985.

- [IEEE00] IEEE. Standard. 80-2000, « Ieee guide for safety in ac substation grounding », The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2000.
- [JIN13] J. He, R. Zeng, B. Zhang, « Methodology and technology for power system grounding », Guide of Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, China, January 2013.
- [JOF10] E. B. Joffe, K.S. Lock, « Ground for grounding », Wiley, 2010.
- [KHE15] O. Kherif, H. E. Messaoudi, « Réponse transitoire de systèmes de mise à la terre utilisant l'approche des lignes de transmission », Projet de Fin d'Etudes, Département d'Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2015
- [KIN87] D. Kind, «An introduction to high-voltage experimental technique: text book for electrical engineers», Vol. 1, edition Vieweg, 1987.
- [KUF00] E. Kuffel, W. Zaengl, J. Kuffel, «High voltage engineering », Newnes, Vol. 2 , 2000.
- [LAY01] J. A .Laver, H. Griffiths, « The variability of soils in earthing measurements and earthing system performance », Rev. Energ. Ren.: Power Engineering, pp. 57-61 , 2001.
- [LEG07] X. Legrand, « Modélisation des systèmes de mise à la terre des lignes électriques soumis à des transitoires de foudre », Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale Electronique, Electrotechnique et Automatique de Lyon, Décembre 2007.
- [LIE74] A. C. Liew, M. Darveniza, « Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths », IEEE Proc, Vol. 121, No. 2, pp. 123-135, February 1974.
- [LON73] C. L. Longmire, H. J. Longley, «Time domain treatment of media with frequency dependent parameters », Theoretical Notes 113, Defense Nuclear Agency, Santa Barbara, CA, USA, 1973.
- [LOR02] P. Lorrain, D. R. Corson, F. Lorrain, « Les phénomènes électromagnétique », édition DUNOD, Collection Sciences Sup, 2002.
- [MAC03] F. Maciela, «Parafoudre », Techniques de l'Ingénieur Vol. D 4 755, 2003.
- [MAZ83] C. Mazzetti, G. M. Veca, « Impulse behavior of grounding electrodes », IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 102, No. 9, pp. 3148-3156, No. 9, 1983.
- [MEL83] A. P. S. Meliopoulos, M. G. Moharam, « Transient analysis of grounding systems», IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 102, No. 2, pp. 389-399, February 1983.
- [MEL88] A. P. S. Meliopoulos, « Power system grounding and transients », Book from the School of Electrical Engineering Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA, Marcel Dekker. Inc, 1988.
- [MES80] M. A. Messier, «The propagation of an electromagnetic impulse through soil: influence of frequency dependent parameters », Mission Res. Corp., Vol. Tech. Rep., No. MRC-N-415, Santa Barbara, CA, USA, 1980.
- [MES85] M. A. Messier, «Another soil conductivity model », Internal Rep., Jaycor, Santa Barbara, CA, USA, 1985.

- [NOR95] Norme Française NF C 17-102, « Protection des structures et des zones ouvertes contre la foudre par paratonnerre à dispositif d'amorçage », Juillet 1995.
- [NOR97] Norme Française NF C 17-100, « Protection des structures contre la foudre, installation des paratonnerres », Décembre 1997.
- [NUC95] C. A. Nucci, « Lightning induced over voltages on overhead power lines.part1: return stroke current models with specified channel-base current for the evaluation of return-stroke electromagnetic fil », Cigré paper prepared within the framework of task force 33.01.01 of the CIGRE working group 33.01,1994. Electra No 161, August 1995.
- [NZU09] N. J. P. Nzuru, « Contribution à l'analyse et à la réalisation des mises à la terre des installations électriques dans les régions tropicales », Thèse de Doctorat en Sciences, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgique, Février 2009.
- [OLI04] G. Olivera, « Etude expérimentale du contournement des isolateurs recouverts de glace sous tensions de foudre et de manœuvre », Mémoire Présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle de la Maitrise en Ingénierie, Juillet 2004.
- [OTE99] A. F. Otero, J. Cidrh, J. L. del Alarno, «Frequency-dependent grounding system calculation by means of a conventional nodal analysis technique», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, pp. 873-878, July 1999.
- [PAP87] A. D. Papalexopoulos, A. P. Meliopoulos, « Frequency dependent characteristics of grounding systems», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 2, No. 4, pp. 1073-1081, October 1987.
- [POR99] C. M. Portela, «Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior», IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Vol. 2, pp. 1004-1009, 1999.
- [RAM89] M. Ramamoorthy, M. Narayanan, S. Parameswaran, D. Mukhedkar, «Transient performance of grounding grids», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, pp. 2053-2059, October 1989.
- [ROU00] A. Rousseau, C. Gary, G. Berger, « Foudre et protection des bâtiments », Technique de l'Ingénieur, Vol. c 3, Report 307, 2000.
- [SAU91] F.Sautriau, « Mise à la terre du neutre dans un réseau industriel haute tension », CT 62, édition 1991.
- [JOE99] Joel.L.Schiff, « The Laplace transform: theory and applications », edition Springer, 1999
- [SCH03] Schneider électrique, « Protection des réseaux électriques, guide de la protection », guide 2003.
- [SCH98] Schneider électrique, « Les Schémas de Liaison à la Terre», guide Novembre 1998.

- [SCO64] R. D. C. J. H. Scott and D. R. Cunningham, «Dielectric constant and electrical conductivity of moist rock from laboratory measurements, Sensor and Simulation », theoretical notes, note 116, Vol. Kirtland AFB, august 1964.
- [SCO66] J. H. Scott, «Electrical and magnetic properties of rock and soil», theoretical notes, note 18, U.S. geological survey, May 1966.
- [SMI75] K. S. Smith, C. L. Longmire, «A universal impedance for soils », Defense Nuclear Agency, Alexandria, VA, USA, tropical report for period 1 July-30 September 1975.
- [SUN68] E. D. Sunde, « Earth conduction effects in transmission systems », Bell Telephone Laboratories Incorporated, New York, 1968.
- [TAG64] G. F. Tagg, « Earth resistances», George Newnes, 1964.
- [TAH15] R. Tahmi, «Compatibilité électromagnétique», Cours de graduation, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2015
- [THA91] B. Thapar, V. Gerez, A. Dalakrislman, D. A. Blank, « Evaluation of ground resistance of a grounding grid of any shape », IEEE Transactions on Power Delivery ,Vol. 6, no. 2, pp. 640-647 April 1991.
- [VEL84] R. Velazquez, D. Mukhedkar, « Analytical modeling of grounding electrodes transient behavior», IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 6, pp. 1314-1322, June 1984.
- [VEN14] L.Venazi, « Règlements générale des installations électriques», edi.pro, Belgique, 2014.
- [VER80] R. Verma, D. Mukhedkar, « impulse to impedance of buried ground wires », IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, No. 5, pp. 2003-2007, Septembre-Octobre 1980.
- [VIJ04] G. Vijayaraghavan, M. Brown, M. Barnes, « Practical grounding, bonding, shielding and surge protection », IDC technologies, 2004
- [VIS07] S. Visacro and A. De Conti, «A simplified model to represent typical grounding configurations applied in medium voltage and low distribution lines », 6th international syposium on lightning protection, federal University of minas grais, lightning research center, Brazil, November 2007
- [VIS12] S. Visacro, R. Alipio, «Frequency dependence of soil parameters: experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, No. 2, pp. 927-935, April 2012.
- [WEN06] Y.Weens, «Modélisation des câbles d'énergie soumis aux contraintes générées par les convertisseurs électroniques de puissance », Thèse de Doctorat, Université des Sciences Technologies de Lille, Décembre 2006.
- [WIL05] T.Wildi , G.Sybillie «Électrotechnique »,4^o édition, De Boeck, Canada, pp.1033 ,2005

[YAG04] L.Yaqing, « Transient response of grounding systems caused by lightning: modeling and experiments », Acta Universitatis Upsalisensis, Comprehensive summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology, 2004

[ZED90] A. Zeddani, P. Degauque, « Current and voltage induced on telecommunications cables by a lightning return stroke », lightning electromagnetic, edited by R. L. Gardner, hemisphere publishing corporation, pp. 377-400. 1990.