

Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue  
ÉCOLE DE GÉNIE

**ANALYSE DU COMPORTEMENT  
ÉLECTRIQUE D'UNE ÉLECTRODE DE MISE À  
LA TERRE DE FORME GÉOMÉTRIQUE  
COMPLEXE**

Mémoire

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

**ZOUHAIR BEN ZAIED**

Juin 2019



# BIBLIOTHÈQUE

Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue  
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

## **Mise en garde**

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

## **Warning**

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue obtained the permission of the author to use a copy of this document for non-profit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all.

The author retains ownership of the copyright on this document. Neither the whole document, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

## REMERCIEMENTS

Je désire remercier en général, toutes les personnes qui directement ou indirectement, par leurs encouragements, conseils et aides, m'ont soutenu pendant la durée de mes études.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de recherche, M. Fouad Slaoui Hasnaoui, pour sa disponibilité, sa patience, ses conseils, ainsi que son encouragement dans les moments difficiles.

Je voudrais également remercier en particulier Madame la Vice-rectrice Manon Champagne, pour son encouragement et de m'avoir donné la chance et l'opportunité d'achever ma maîtrise.

Je remercie aussi, le président des jurys, le professeur Mourad Nedil et le membre des jurys le professeur Nahi Kandil pour temps consacré à l'évaluation de ce travail.

Je dédie ce travail à l'âme de ma grand-mère Wahida, qui nous a quitté pour un monde meilleur seulement quelques jours avant que je commence ma maîtrise. J'exprime ma reconnaissance la plus profonde à ma femme Abir qui, par sa patience et surtout par son soutien moral, m'a permis de mener bien cette tâche. Je remercie du fond du cœur mon père Nejib et ma mère Malika pour tous les sacrifices qu'ils ont dû faire et subir pour me voir réussir dans mes études. Je remercie ma sœur Rania et mon petit frère Yessine pour leur encouragement et soutien moral. Je remercie tous les membres de ma famille qui ont participé, de près ou de loin, à la réussite de ce projet.

Enfin je tiens à remercier tous mes collègues et amis qui m'ont apporté leur soutien moral et leur encouragement au cours de ce travail. Des remerciements particuliers à mon ami Thamer Sahbani.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	i
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	iv
<b>NOMENCLATURE</b> .....	vi
<b>RÉSUMÉ</b> .....	vii
<b>Abstract</b> .....	viii
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....	1
<b>Revue de littérature</b> .....	3
<b>Problématique</b> .....	5
<b>Objectifs</b> .....	6
<b>Méthodologie</b> .....	6
<b>CHAPITRE I</b> .....	8
<b>1. INTRODUCTION AUX MISES À LA TERRE</b> .....	8
<b>1.1. Rôle des mises à la terre</b> .....	8
<b>1.2. Tension de contact</b> .....	10
1.2.1. La tension de pas .....	10
1.2.2. La tension de touche.....	12
<b>1.3. Éléments de mise à la terre</b> .....	13
<b>1.4. Paramètres influençant sur les systèmes MALT</b> .....	14
1.4.1. Structure du sol .....	14
1.4.2. La résistivité .....	15
<b>1.5. Résistance de terre des MALTs dans un sol homogène</b> .....	17
1.5.1. La résistance de prise de terre d'une sphère.....	18
1.5.2. La résistance de prise de terre d'un hémisphère .....	19

1.5.3. La résistance de prise de terre d'un cylindre.....	20
<b>1.6. Résistance de terre des MALTs dans un sol hétérogène .....</b>	<b>21</b>
<b>1.7. Conclusion .....</b>	<b>22</b>
<b>CHAPITRE II.....</b>	<b>23</b>
<b>2. Modélisation et simulation par éléments finis .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1. Introduction.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2. La méthode des éléments finis (EF).....</b>	<b>23</b>
2.2.1. Principe général.....	23
<b>2.3 Répartition du potentiel électrique et calcul de la résistance d'une prise de terre .....</b>	<b>24</b>
2.3.1. Électrode cylindrique verticale .....	24
2.3.2. Formulation du problème.....	25
2.3.3. Résultat et validation.....	27
2.3.3.1. Calcul de la résistance de prise de terre dans un sol homogène	27
<b>2.3.3.1.1. Électrode cylindrique verticale .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.3.1.2. Deux électrodes cylindriques verticales .....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.3.1.3. Trois électrodes cylindriques verticales formant un triangle équilatéral.....</b>	<b>37</b>
<b>2.3.3.1.4. Quatre électrodes cylindriques verticales formant un carré .....</b>	<b>41</b>
2.3.3.2. Interprétation des résultats.....	44
2.3.3.3. Calcul de la résistance de prise de terre dans un sol hétérogène	45
<b>2.3.3.3.1. Sol à deux couches .....</b>	<b>46</b>
<b>2.3.3.3.2. Sol à trois couches .....</b>	<b>50</b>
2.3.3.4. Interprétation des résultats.....	54
<b>2.4. Conclusion .....</b>	<b>55</b>

<b>CHAPITRE III</b> .....	56
<b>3. ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE L'ÉLECTRODE PROPOSÉE</b> .....	56
<b>3.1. Introduction</b> .....	56
<b>3.2. Caractéristique de l'électrode</b> .....	56
<b>3.3. Description du produit</b> .....	57
<b>3.4. Installation de l'électrode</b> .....	58
<b>3.4. Calcul analytique de la résistance de mise à la terre</b> .....	59
<b>3.5. Résultat des simulations</b> .....	64
3.5.1. Comportement de l'électrode dans un sol homogène .....	64
3.5.2. Comportement de l'électrode dans un sol hétérogène .....	69
3.5.2.1. Sol à deux couches .....	69
3.5.2.2. Sol à trois couches.....	73
<b>3.6. Interprétation des résultats et comparaison</b> .....	76
<b>3.7. Conclusion</b> .....	77
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b> .....	79
<b>RECOMMANDATIONS</b> .....	80
<b>Références</b> .....	81

## LISTE DES FIGURES

Figure 1	Synoptique de la méthodologie suivie .....	7
Figure 1. 1	Tension de pas [16].....	11
Figure 1. 2	Tension de pas .....	12
Figure 1. 3	Tension de touche [16] .....	13
Figure 1. 4	Prise de terre sphérique dans un sol homogène de résistivité $\rho$ .....	19
Figure 1. 5	Prise de terre hémisphérique dans un sol homogène de résistivité $\rho$	20
Figure 1. 6	Tige cylindrique verticale .....	21
Figure 2. 1	Modèle électrocinétique d'une électrode cylindrique verticale.....	25
Figure 2. 2	Maillage du modèle .....	28
Figure 2. 3	Tige cylindrique verticale dans un sol homogène avec l'apparition du potentiel électrique.....	28
Figure 2. 4	Distribution surfacique du potentiel autour de la tige .....	29
Figure 2. 5	Répartition du potentiel sur la surface du sol autour de l'électrode .	29
Figure 2. 6	Résistance de l'électrode par rapport à sa longueur .....	30
Figure 2. 7	Erreur relative .....	31
Figure 2. 8	Résistance de l'électrode par rapport à la résistivité du sol.....	32
Figure 2. 9	Erreur relative .....	32
Figure 2. 10	Maillage du modèle .....	34
Figure 2. 11	Deux tiges cylindriques verticales dans un sol homogène avec l'apparition du potentiel électrique .....	34
Figure 2. 12	Distribution surfacique du potentiel autour des deux tiges .....	35
Figure 2. 13	Répartition du potentiel sur la surface du sol autour des deux tiges	35
Figure 2. 14	Résistance de l'ensemble des deux tiges par rapport à leurs longueurs .....	36
Figure 2. 15	Erreur relative .....	37
Figure 2. 16	Maillage du modèle .....	38

Figure 2. 17	Trois tiges cylindriques verticales dans un sol homogène avec l'apparition du potentiel électrique .....	38
Figure 2. 18	Répartition du potentiel sur la surface du sol autour des trois tiges	39
Figure 2. 19	Résistance de l'ensemble des trois tiges par rapport à leurs longueurs .....	40
Figure 2. 20	Erreur relative .....	40
Figure 2. 21	Maillage du modèle .....	41
Figure 2. 22	Quatre tiges cylindriques verticales dans un sol homogène avec l'apparition du potentiel électrique .....	42
Figure 2. 23	Répartition du potentiel sur la surface du sol autour des quatre tiges .....	42
Figure 2. 24	Résistance de l'ensemble des quatre tiges par rapport à leurs longueurs.....	43
Figure 2. 25	Erreur relative .....	44
Figure 2. 26	Répartition surfacique du potentiel dans le premier modèle du sol lorsque l'électrode est dans la première couche .....	47
Figure 2. 27	Répartition surfacique du potentiel dans le deuxième modèle du sol lorsque l'électrode est dans la première couche .....	47
Figure 2. 28	Répartition surfacique du potentiel dans le modèle 3 du sol lorsque l'électrode est pénétrée dans les deux couches .....	49
Figure 2. 29	Répartition surfacique du potentiel dans le sol 4 lorsque l'électrode est pénétrée dans les deux couches .....	49
Figure 2. 30	Répartition du potentiel dans le modèle 10 du sol.....	51
Figure 2. 31	Répartition du potentiel dans le modèle 16 du sol.....	52
Figure 2. 32	Répartition du potentiel dans le modèle 22 du sol.....	53
Figure 3. 1	L'électrode avec ses dimensions en pouce.....	56
Figure 3. 2	L'électrode en dessous de la base du poteau.....	58
Figure 3. 3	L'électrode installée à proximité du poteau .....	59
Figure 3. 4	Évolution de la résistance de l'électrode proposée vs des tiges standard .....	61

Figure 3. 5	Évolution de la résistance de deux électrodes proposées en parallèle vs des tiges standard .....	62
Figure 3. 6	Évolution de la résistance de trois électrodes proposées en triangle vs des tiges standard .....	63
Figure 3. 7	Évolution de la résistance de quatre électrodes proposées en carré vs des tiges standard .....	63
Figure 3. 8	Maillage du modèle .....	64
Figure 3. 9	l'électrode proposée dans un sol homogène avec l'apparition du potentiel électrique.....	65
Figure 3. 10	Répartition surfacique du potentiel électrique dans le sol.....	65
Figure 3. 11	Évolution de la résistance de l'électrode proposée vs des tiges standard.....	67
Figure 3. 12	Évolution de la résistance de deux électrodes proposées en parallèle vs des tiges standard .....	67
Figure 3. 13	Évolution de la résistance de trois électrodes proposées en triangle vs des tiges standard .....	68
Figure 3. 14	Évolution de la résistance de quatre électrodes proposées en carré vs des tiges standard .....	69
Figure 3. 15	Répartition surfacique du potentiel dans le premier modèle du sol lorsque l'électrode est dans la première couche .....	70
Figure 3. 16	Répartition surfacique du potentiel dans le deuxième modèle du sol lorsque l'électrode est dans la première couche .....	71
Figure 3. 17	Répartition surfacique du potentiel dans le modèle 3 du sol lorsque l'électrode est pénétrée dans les deux couches.....	72
Figure 3. 18	Répartition surfacique du potentiel dans le sol 4 lorsque l'électrode est pénétrée dans les deux couches .....	72
Figure 3. 19	Répartition du potentiel dans le modèle 10 du sol.....	73
Figure 3. 20	Répartition du potentiel dans le modèle 16 du sol.....	74
Figure 3. 21	Répartition du potentiel dans le modèle 22 du sol.....	75

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. 1	Classification générale des résistivités [17] .....	16
Tableau 1. 2	Résistivité des divers types de sols [23].....	16
Tableau 2. 1	Valeurs de la résistance ( $\Omega$ ) par rapport à la longueur de la tige (m) .....	30
Tableau 2. 2	Valeurs de la résistance ( $\Omega$ ) par rapport à la résistivité du sol ( $\Omega.m$ ) .....	32
Tableau 2. 3	Valeurs de la résistance ( $\Omega$ ) de l'ensemble des deux tiges par rapport à leur longueur (m).....	36
Tableau 2. 4	Valeurs de la résistance ( $\Omega$ ) de l'ensemble des trois tiges par rapport à leur longueurs (m).....	39
Tableau 2. 5	Valeurs de la résistance ( $\Omega$ ) de l'ensemble des quatre tiges par rapport à leur longueur (m).....	43
Tableau 2. 6	Valeurs de la résistance ( $\Omega$ ) dans un sol à deux couches lorsque l'électrode est dans la première couche.....	48
Tableau 2. 7	Valeurs de la résistance ( $\Omega$ ) dans un sol à deux couches lorsque l'électrode est pénétrée dans les deux couches.....	50
Tableau 2. 8	Valeurs de la résistance pour différentes valeurs de résistivité des couches lorsque l'électrode est dans la première couche du sol ....	51
Tableau 2. 9	Valeurs de la résistance pour différentes valeurs de la résistivité des couches lorsque l'électrode atteint la deuxième couche du sol .....	52
Tableau 2. 10	Valeurs de la résistance pour différentes valeurs de la résistivité des couches lorsque l'électrode atteint la troisième couche du sol .....	53
Tableau 3. 1	Résultat analytique de la résistance de prise de terre .....	60
Tableau 3. 2	Valeurs de la résistance obtenue par la méthode 3DEF .....	66
Tableau 3. 3	Valeurs de la résistance ( $\Omega$ ) dans un sol à deux couches lorsque l'électrode est dans la première couche.....	70

Tableau 3. 4	Valeurs de la résistance ( $\Omega$ ) dans un sol à deux couches lorsque l'électrode est pénétrée dans les deux couches.....	71
Tableau 3. 5	Valeurs de la résistance pour différentes valeurs de résistivité des couches lorsque l'électrode est dans la première couche du sol ....	73
Tableau 3. 6	Valeurs de la résistance pour différentes valeurs de la résistivité des couches lorsque l'électrode atteint la deuxième couche du sol .....	74
Tableau 3. 7	Valeurs de la résistance pour différentes valeurs de la résistivité des couches lorsque l'électrode atteint la troisième couche du sol .....	75
Tableau 3. 8	Tableau comparatif des performances.....	77

## NOMENCLATURE

Symbole	Grandeur physique	Unité
$J$	Densité du courant	$A.m^{-2}$
$E$	Champ électrique	$V/m$
$U$	Potentiel électrique	$V$
$U_P$	Tension de pas	$V$
$U_T$	Tension de touche	$V$
$\rho$	Résistivité du sol	$\Omega.m$
$T$	Température	$^{\circ}C$
$R$	Résistance de terre	$\Omega$
$I$	Courant électrique	$A$
$R$	Rayon	$m$
$L$	Longueur de l'électrode	$m$
$d$	Diamètre de l'électrode	$m$
$A$	Distance entre les électrodes	$m$
$\sigma$	conductivité électrique	$S/m$
$\mu$	Perméabilité	$H/m$
$\varepsilon$	Permittivité	$F/m$
$h$	Hauteur de la couche du sol	$m$

### Abréviation

MALT	Mise à la terre
EF	Élément finis

## RÉSUMÉ

Le travail présenté porte sur l'étude de l'analyse du comportement électrique d'une électrode de mise à la terre où sa particularité dépend de sa forme géométrique.

L'étude se focalise sur la répartition du potentiel électrique ainsi que la détermination de la résistance de mise à la terre dans un sol avec différents paramètres (résistivités, nombre de couches...).

Plusieurs configurations d'électrodes de système de mise à la terre ont été reproduites afin d'étudier leurs comportements dans un sol homogène et hétérogène. Le calcul analytique de la résistance de certaines configurations avec certains paramètres du sol a été fait grâce aux relations trouvées dans la littérature et ce qui a permis de valider le modèle utilisé par les simulations. Le calcul le plus complexe, qui s'explique par les paramètres du sol hétérogène et par la forme géométrique comme celle de l'électrode proposée, a été effectué par le traitement numérique basé sur la méthode des éléments finis vu qu'elle est bien adaptée pour résoudre ce type de problème.

Cette approche a pour but de comparer l'électrode proposée à ceux de forme standard de manière à connaître laquelle qui dissipe mieux le courant de défaut dans le sol pour éviter les perturbations dans les réseaux de télécommunication et assurer la sécurité du matériel et les personnes aux alentours.

## **Abstract**

The presented work concerns the study of the analysis of the electrical behaviour of a grounding electrode where the particularity depends on its geometric shape.

The study focuses on the distribution of the electrical potential as well as on the determination of the grounding resistance in a soil with different parameters (resistivity, number of layers...).

Several configurations of grounding system electrodes have been reproduced to study their behaviour in a homogeneous and heterogeneous soil. The analytical calculation of the resistance for certain configurations within certain soil parameters was done using the relationships found in the literature and the results allowed to validate the model used for the simulations. The most complex calculation, which is explained by the parameters of the heterogeneous soil and by the geometric shape like that of the proposed electrode, was made by numerical processing based on the finite element method since it is well adapted to solve this type of problem.

The purpose of this approach is to compare the proposed electrode with those of standard shape to know which one dissipates better the fault current in the ground to avoid disturbances on the telecommunication network and ensure the safety of the equipment and people in the vicinity.

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'électricité, la source de notre civilisation, est une des formes d'énergie la plus courante de notre époque. Essentiels pour le fonctionnement de notre société, plusieurs recherches et travaux ont été menés afin de la produire, la contrôler et la gérer, mais surtout la distribuer. Pour effectuer son transport d'un point à un autre, des gigantesques réseaux de câbles et de lignes, qui s'étendent sur toute la surface émergée du globe, ont été construits. Des milliers de kilomètres d'autoroute où l'électricité se déplace à la vitesse de la lumière ou presque.

Au moment du transport, plusieurs facteurs peuvent engendrer des problèmes que ce soit sur le réseau de transport ou de télécommunication. Elles peuvent aussi être un danger sur le matériel et sur la sécurité du personnel et du public. Parmi les facteurs qui peuvent être confrontés, le courant de défaut qui apparaît lorsqu'un court-circuit a lieu ou même le phénomène de la foudre qui peut se manifester avec des intensités de courant très élevées.

D'une manière générale, on a tendance à sous-estimer les dégâts qui peuvent être occasionnés par ces défauts donc il est parfaitement logique d'anticiper le risque afin de protéger le système. Gérer cet impact direct va assurer le bon fonctionnement du réseau de transport et de télécommunication.

Introduit par le célèbre inventeur des parafoudres, Benjamin Franklin, le système de mise à la terre (MALT) est l'une des solutions qui a été élaborée afin de se protéger de ces problèmes. Le principe de ce système consiste à dissiper ces énergies supplémentaires considérées comme un défaut dans le sol grâce à un équipement conducteur appelé électrode ou un ensemble d'électrodes représentant un circuit électrique.

Plusieurs études théoriques et expérimentales ont été faites afin de trouver les bons paramètres nécessaires pour une meilleure dissipation du courant. Malgré les divers facteurs qui entrent en jeu de façon directe ou indirecte dans la mise à la terre à savoir la résistivité du sol, la longueur et la géométrie de la mise à la terre,

l'ionisation du sol...etc., elle reste cependant le meilleur moyen de protection et la solution la plus utilisée.

L'étude présentée dans ce mémoire est basée sur l'analyse du comportement électrique d'une électrode de mise à la terre, utilisée par l'entreprise de télécommunication où sa particularité dépend de sa forme géométrique. L'étude se focalise sur la répartition du potentiel électrique ainsi que la détermination de la résistance de mise à la terre dans un sol avec différentes structures et résistivités. Cette approche a pour but de confirmer l'efficacité de l'électrode, avec sa forme géométrique complexe, en la comparant à d'autres, de forme standard de manière à connaître laquelle dissipe mieux le courant de défaut dans le sol pour éviter les perturbations sur le réseau et assurer la sécurité du matériel et les personnes aux alentours.

Après la présentation de la problématique, la méthodologie, les objectifs et la recherche bibliographique effectuée dans le cadre de ce mémoire, une introduction à la mise à la terre est présentée au chapitre 1. Dans ce chapitre, l'importance de la mise à la terre des installations électriques est discutée, quelques définitions des paramètres qui sont considérés très importants ainsi que les formes les plus simples d'électrodes avec les relations analytiques pour le calcul de leur résistance sont exposées.

Dans certaine conception de mise à la terre, on est poussé à s'approcher le plus possible des conditions réelles de l'installation. En effet, ceci permet de prévoir le comportement de la mise à la terre sous différentes charges rencontrées lors d'un défaut du réseau électrique. C'est pourquoi, l'étude du comportement des électrodes dans la répartition du potentiel ainsi que le calcul de la résistance devient difficile à réaliser. Dans ce cas, des outils d'analyse numérique sont nécessaires basés sur des méthodes de calculs comme celle des éléments finis qui rend les choses bénéfiques en termes de temps et de ressources. Un bref aperçu de cette méthode est présenté dans le chapitre 2 avec le résultat des simulations en 3D par éléments finis de la répartition du potentiel pour plusieurs configurations d'électrodes dans

un sol homogène et hétérogène. La valeur de la résistance est aussi déterminée et comparée avec celle calculée analytiquement avec les relations trouvées dans la littérature afin de valider le modèle utilisé par les simulations.

Dans le chapitre 3, un descriptif de l'électrode proposée est présenté avec le principe d'installation ainsi que les résultats des simulations de son comportement avec les mêmes paramètres considérés dans le chapitre 2. La valeur de sa résistance est déterminée et comparée avec celle des électrodes standards utilisées par l'entreprise de télécommunication pour connaître laquelle qui dissipe mieux le courant de défaut dans le sol.

## **Revue de littérature**

La recherche bibliographique effectuée dans le cadre de ce mémoire montre plusieurs études qui se sont basées sur différents paramètres qui jouent un rôle important dans la conception d'un bon système de mise à la terre.

Parmi les différents paramètres considérés pour ces études, on trouve les types de sols avec leur différente structure. En effet, l'évaluation des paramètres électriques d'un système MALT dépend des modèles du sol considéré d'où le choix des différentes couches et résistivité.

L'effet d'un sol hétérogène composé de deux couches sur la résistance du système MALT a été considéré, où des expressions ont été produites, de la conception de MALT dans des sols dont le rapport de résistivité varie entre 1 à 100 [1]. Une méthode générale a été développée pour déterminer les propriétés électriques d'un système complexe de MALT dans un sol à deux couches. Cette méthode propose une simple approximation d'une formule qui sert à calculer la résistance de MALT [2]. Un sol à plusieurs couches a été considéré pour effectuer une analyse paramétrique sur le comportement des systèmes MALT où plusieurs cas illustrant des situations pratiques comme un sol totalement ou partiellement gelé [3]. Un modèle théorique a été présenté pour analyser les systèmes de mise à la terre qui se

trouvent dans le voisinage ou à l'intérieur d'un sol hémisphérique et hétérogène. Les résultats numériques obtenus montrent l'influence de la forme et de l'hétérogénéité du sol sur le comportement des systèmes de MALT [4].

D'autres paramètres à tenir compte lors d'une conception de système MALT sont la géométrie des électrodes où plusieurs relations ont été développées pour calculer la résistance pour chaque type d'électrode dans un sol homogène et hétérogène.

Parmi ces relations, pour un sol homogène, on trouve celle de Tagg qui permet de calculer la résistance d'une électrode hémisphérique [5] et de plusieurs tiges cylindriques verticales [6]. Pour un système MALT composé d'une tige cylindrique, on trouve plusieurs relations comme celle dans [7-10]. Pour les systèmes composés d'électrodes horizontales (grille) et verticales, le chercheur S.J. Schwarz a développé des formules pour le calcul de la résistance de l'ensemble de ces électrodes [11].

Pour un sol à deux couches, Tagg [6] a développé deux relations pour le calcul de la résistance dont la première considère que la tige est dans la couche supérieure du sol et la deuxième lorsque la tige est pénétrée dans les deux couches.

Dans certains cas, pour évaluer les performances d'un système MALT, on est confronté à des configurations d'électrodes ou structure du sol complexes qui rendent les calculs plus difficiles à réaliser. La méthode numérique est la solution à ce problème, car elle est bénéfique en termes de temps et de ressources et permet de se rapprocher le plus de la réalité physique. Pour ce faire, les simulations numériques se basent sur plusieurs méthodes de calculs comme la méthode des éléments finis.

Une méthode a été décrite pour le traitement des quantités globales, dans le cadre de la méthode des éléments finis, où elle a été appliquée à l'électrostatique, à la magnétostatique et à la magnétodynamique pour définir naturellement les charges électriques, les potentiels flottants, les flux magnétiques, les forces magnétomotrices, les courants et les tensions [12]. La méthode des éléments finis a

été utilisée aussi dans [13] pour des simulations afin d'analyser le comportement d'un système MALT en calculant la résistance d'électrode horizontale et verticale. Les performances des électrodes de mise à la terre dans un sol hétérogène ont été étudiées en utilisant la modélisation 2D et 3D par éléments finis. Les modèles utilisés ont été comparés aux méthodes standard utilisées pour l'analyse des systèmes de mise à la terre, y compris les hétérogénéités du sol et les structures complexes des électrodes [14].

## **Problématique**

Les systèmes de mise à la terre ont été depuis longtemps la préoccupation de beaucoup de chercheurs et électriciens vu leur importance dans les installations électriques. Plusieurs recherches ont été accentuées là-dessus où une grande partie a été consacrée sur leurs comportements lors de l'apparition du défaut, que ce soit sur le réseau de haute tension ou basse tension. En effet, au moment du passage du courant de défaut dans le sol, un gradient de potentiel va naître qui ne peut être négligé et qui peut engendrer :

- Un danger sur le corps humain
- Des dommages considérables sur le matériel causant l'interruption du réseau
- Des dommages sur le système de mise à la terre
- Une élévation de température du sol

Donc pour avoir un bon système de mise à la terre qui va éviter ces inconvénients, il faut que l'interaction sol-réseau soit directement proportionnelle. C'est pour cela que les caractéristiques du sol sont prises en considération.

Lors de la dissipation du courant de défaut dans le sol, ce dernier peut être constitué d'une ou plusieurs couches avec différentes résistivités qui influencent sur la répartition du potentiel électrique. En effet, Plus que cette résistivité est grande, plus que la propagation est mauvaise et plus que les risques sont majeurs.

Autre point à tenir compte, pour avoir un bon système de mise à la terre, est le type d'électrode utilisé. Plusieurs choix s'offrent à nous où cette variété est basée sur le matériau utilisé et la géométrie. Comme tout élément de ce système, exposé à des facteurs qui peuvent nuire à leurs fonctions, l'électrode est confrontée à un problème majeur qui est la corrosion. En effet, en contact direct avec le sol qui est un milieu très riche en oxydant, la réaction d'oxydation peut être accélérée à la surface de l'électrode causant une détérioration de sa conductivité. C'est pour cela que le choix du matériau s'impose.

## **Objectifs**

L'objectif principal de cette étude est de confirmer l'efficacité de l'électrode de forme géométrique complexe par l'analyse des résultats de son comportement et les comparer avec ceux de forme standard.

Dans le but d'aboutir à cet objectif, certains objectifs spécifiques vont être fixés :

- Modélisation et simulation de plusieurs configurations d'électrodes et détermination de leur résistance
- Calcul de la résistance de mise à la terre analytiquement pour les formes simples afin de valider le modèle utilisé
- Modélisation et simulation de l'électrode proposée et détermination de sa résistance en tenant compte des mêmes paramètres du sol utilisé pour les autres formes
- Comparaison des résultats

## **Méthodologie**

Lors de ce projet de recherche, on sera amené à étudier le comportement d'une électrode de forme géométrique complexe ainsi que celui des autres formes afin de faire une comparaison. Les simulations sont basées sur la modélisation numérique

3D où le calcul est fait par la méthode des éléments finis. En intégrant plusieurs cas et configurations possibles, ça nous permet de nous rapprocher le plus possible de la réalité physique.

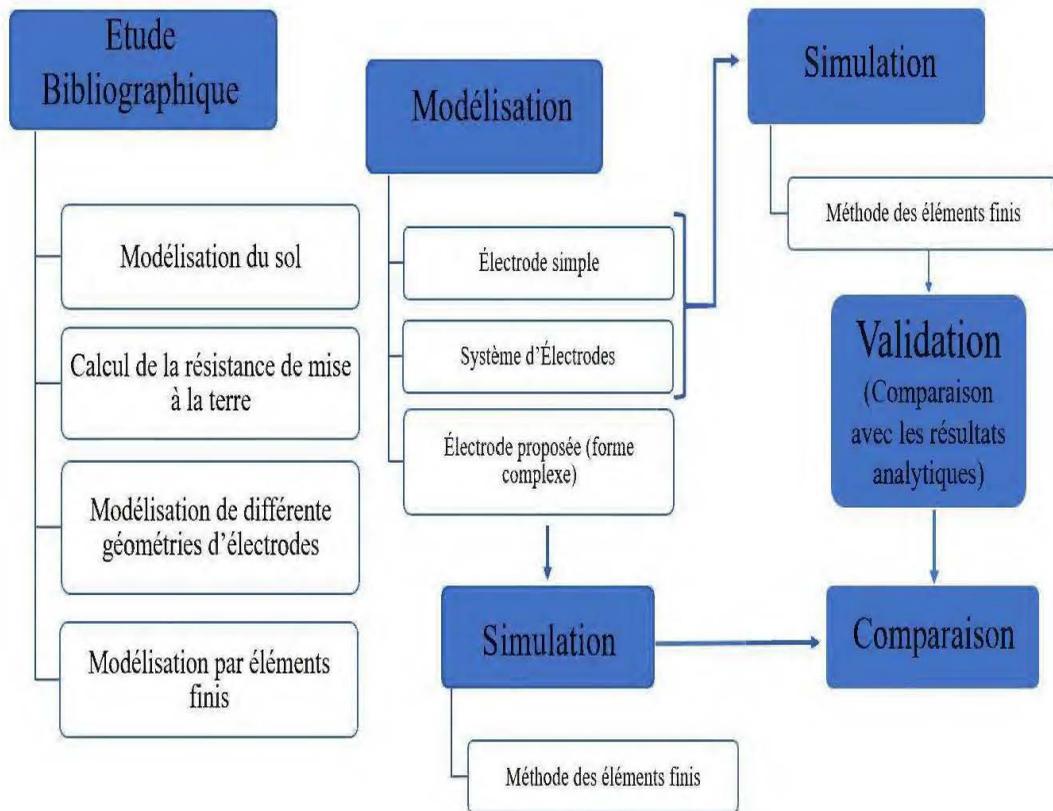


Figure 1 Synoptique de la méthodologie suivie

# CHAPITRE I

## 1. INTRODUCTION AUX MISES À LA TERRE

Les mises à la terre (MALT) sont des éléments vitaux des circuits électriques et jouent un rôle essentiel dans la protection contre les accidents électriques. Elles ont été introduites dans le domaine de l'électrotechnique par Benjamin Franklin, célèbre inventeur des parafoudres.

Les MALTs étaient jugés indispensables dans les systèmes électriques, qui commençaient à être développés vers la fin du XIXe siècle, pour assurer la protection des individus et pour permettre le fonctionnement adéquat des installations.

À présent, plusieurs des éléments des centrales, des postes et des lignes électriques doivent être mis à la terre. Cela assure un chemin de retour au courant en cas de défaut, une protection contre la foudre et les surtensions ainsi qu'une protection des individus contre les chocs électriques.

Dans les réseaux à courant continu (cc), les MALTs assurent le passage du courant par la terre pour de longues durées.

### 1.1. Rôle des mises à la terre

Une MALT est une connexion entre un objet et la terre. En pratique, il s'agit d'une connexion conductrice entre un équipement et une électrode. Cette électrode est située dans le sol et possède un contact privilégié avec celui-ci. Les objectifs de cette connexion sont de maintenir le potentiel du bâti d'un équipement et, s'il y a lieu, le point neutre d'un circuit à une valeur très proche de celle du sol environnant ainsi que de faciliter le passage du courant électrique vers le sol ou inversement.

D'une façon générale, les MALTs assurent d'une part la protection des individus et des équipements et d'autre part la qualité du service. Les exemples suivants en illustrent différentes applications.

Certaines pièces métalliques peuvent devenir accidentelles à un potentiel électrique inacceptable du point de vue de la sécurité des individus. Par exemple, lors du passage d'un courant de défaut dans une installation électrique ou à la suite de l'apparition momentanée d'un champ électrique ou magnétique intense, une tension de contact se développe entre différentes pièces métalliques et la terre. Ces tensions apparaissent généralement aux endroits suivants :

- Le bâti des équipements
- Les structures dans les postes et centrales
- Les pylônes
- Les clôtures

La connexion de ces objets à la MALT permet de réduire tant l'amplitude que le temps d'apparition de la tension de choc. Les risques d'un accident en sont d'autant diminués.

Une telle connexion au point neutre de certains équipements, par exemple un transformateur, peut limiter le potentiel des phases saines pendant un défaut monophasé. Cela protège les matériaux isolants des équipements.

L'installation d'un parafoudre ayant une résistance non linéaire peut être très utile pour limiter davantage les surtensions de manœuvre.

Pour protéger les équipements contre la foudre, des installations de MALT doivent pouvoir évacuer, vers la terre, le courant engendré par celle-ci et limiter le potentiel électrique des objets protégés. L'intensité et la rapidité du front d'onde d'une décharge provoquée par la foudre peut amener l'apparition d'un potentiel de l'ordre du méga volt sans la présence de ces installations.

Les parafoudres, les éclateurs et les fils de garde des lignes à haute tension sont des exemples d'appareillages raccordés à une MALT assurant ainsi la protection contre la foudre. La charge de la foudre est drainée au sol, ce qui limite la tension des objets protégés. La tension développée est causée par la grande amplitude du courant et par la raideur du front d'onde.

Certaines installations de MALT font partie intégrante du circuit électrique et eu assurent un fonctionnement efficace. Le raccordement de la MALT au point neutre des transformateurs de puissance, des condensateurs servant au support de la tension, des réactances servant à compenser les lignes de transport et des transformateurs de mesure de la haute tension sont des exemples d'utilisation dans les réseaux à courant alternatif (ca). L'électrode de MALT d'un système de transport à courant continu (cc) est un autre exemple. Il en est ainsi pour les générateurs de choc dans les laboratoires haute tension qui doivent être connectés à une MALT. La connexion de la MALT au point neutre des transformateurs et des alternateurs est aussi utilisée par les systèmes de protection qui doivent détecter un courant de défaut.

## **1.2. Tension de contact**

Lorsqu'un courant s'écoule au sol par une prise de terre, la densité du courant  $J$  diminue avec l'éloignement. Il en va de même du champ électrique  $E$  et du potentiel  $V$ .

La tension de contact est la différence de potentiel entre deux points susceptibles d'être touchés simultanément par les extrémités d'un individu. Cette différence de potentiel est causée par le passage d'un courant vers le sol à travers une MALT, ce qui élimine le cas d'un contact avec un objet normalement sous tension. Un individu peut être impliqué dans un accident électrique selon différentes situations.

### **1.2.1. La tension de pas**

Comme représenté à la figure 1.2 ci-dessous, la tension de pas  $U_p$  est la tension de contact entre deux points, à la surface du sol, espacés d'un pas. La distance conventionnelle choisie est de  $1m$  dans la direction du gradient du potentiel maximal (ou du champ électrique maximal) [15].

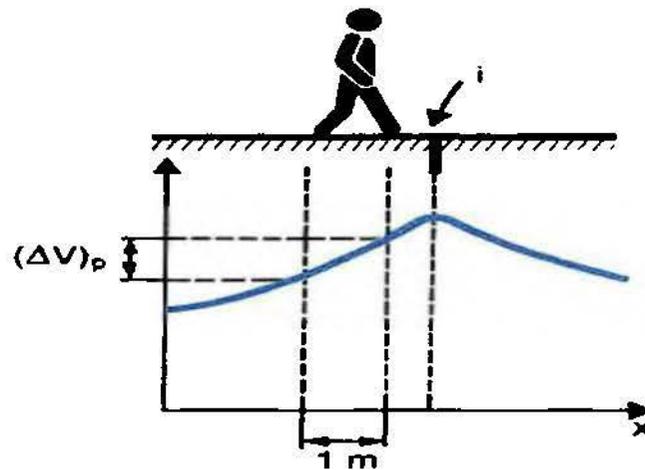


Figure 1. 1 Tension de pas [16]

Dans un sol supposé homogène, la tension de pas est directement proportionnelle à la résistivité du sol. En général, elle dépend de la distribution de potentiel dans le sol.

A une distance  $d$  de l'injection du courant par la prise de terre ou bien de l'impact d'un courant de foudre au sol, en considérant un sol homogène de résistivité  $\rho$  et une répartition purement résistive de potentiel, la tension de pas est donnée par la relation :

$$U_p = \frac{\rho I}{2\pi d} \times \frac{1}{(d+1)} \quad (1.1)$$

Si on considère le sol avec une résistivité  $\rho = 100 \Omega.m$  et un courant de foudre de valeur crête 75 kA, la valeur de la tension de pas pour différente distance à l'impact est représentée dans la figure 1.3.

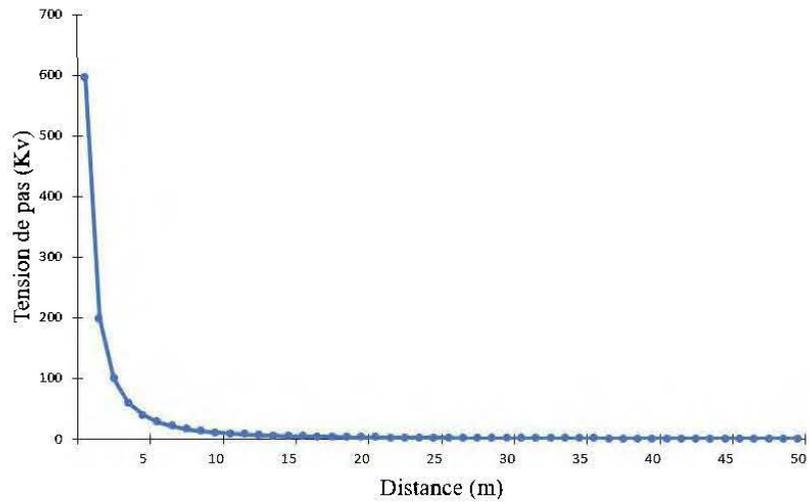


Figure 1. 2 Tension de pas

D'après la courbe représentée dans la figure 1.2, on remarque clairement que la tension de pas diminue en s'éloignant du point d'injection du courant. En effet, à une distance d'un mètre de ce dernier, elle valait 597 kV puis 1836 V à 25m et continue à baisser jusqu'à ce qu'elle atteigne 468 V à 50m.

### 1.2.2. La tension de touche

La tension de touche  $U_t$ , représentée à la figure 1.3, est la tension de contact pouvant être appliquée entre une main et les pieds d'un individu. La distance conventionnelle est de 1m entre l'objet touché et le point central entre les pieds. Les pieds sont distancés de 0.5m entre eux et placé sur un axe perpendiculaire à une droite reliant le point central à l'objet touché.

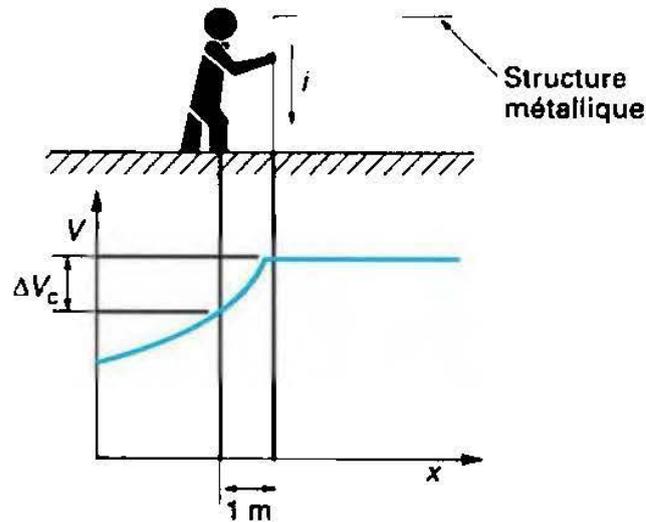


Figure 1. 3 Tension de touche [16]

La tension transférée est la plus grande tension de contact. Le potentiel de la MALT peut être transféré à une certaine distance par une pièce métallique en contact avec le treillis du poste. Par exemple, une ligne téléphonique pourrait transférer le potentiel de la MALT à une terre lointaine. La tension de touche ainsi transférée peut-être très importante.

### 1.3. Éléments de mise à la terre

Chaque installation de MALT se compose d'une prise de terre et d'un conducteur de terre. La prise de terre est entièrement enfoncée dans le sol pour avoir un contact privilégié avec celui-ci. Le conducteur de terre relie la pièce métallique ou le neutre électrique de l'équipement à la prise de terre. Il arrive que le conducteur de terre soit muni d'une borne de terre, ce qui permet de séparer le matériel de la MALT pour la vérification de l'état des prises de terre. Souvent, la MALT d'un équipement est faite en utilisant deux conducteurs connectés de part et d'autre à la prise de terre.

Une prise de terre est habituellement composée d'une ou de plusieurs électrodes verticales ou horizontales telles que des tiges, des conducteurs ou autres pièces

métalliques. La disposition physique des appareils et des structures métalliques à mettre à la terre dans un poste commande en pratique la forme de la prise de terre.

Elle sera généralement constituée d'un réseau maillé de conducteurs enfouis dans le sol et forme le treillis du poste.

La MALT d'une ligne de transport est habituellement constituée des fondations du pylône ou des ancrages en contact avec le sol. Une électrode horizontale est souvent ajoutée entre les pylônes. Cette électrode est constituée d'un conducteur, nommé contrepoids, enfoui à une faible profondeur et pouvant relier les pylônes entre eux sur une grande distance. Des fils de garde, ayant pour objectif la protection contre la foudre, relient les sommets des pylônes les uns aux autres. Il peut arriver qu'un éclateur les isole des structures en régime non perturbé. Des tiges et/ou des conducteurs enroulés aux pieds des structures des réseaux à moyenne ou à basse tension peuvent aussi être ajoutés lorsque la résistivité du sol est élevée.

Les électrodes d'une prise de terre sont, le plus souvent, fabriquées en cuivre ou en acier recouvert d'une couche de zinc, ce qui assure une protection contre la corrosion. L'aluminium n'est pas utilisé dans la fabrication d'électrodes à cause de la formation en surface d'une couche oxydée, de faible conductivité. Dans le cas d'une électrode à courant continu, le conducteur métallique est entouré d'une bonne épaisseur de poussière ou de granules de carbone.

Parfois des objets métalliques installés dans le sol pour différentes fonctions peuvent servir d'électrodes additionnelles. Par exemple, les fondations en béton armé, les canalisations d'eau, les conduites forcées des centrales ou toute autre installation métallique peuvent être mises à profit. Ces objets constituent des prises de terre naturelles.

#### **1.4. Paramètres influençant sur les systèmes MALT**

##### **1.4.1. Structure du sol**

Les sols forment la partie superficielle de la croûte terrestre et on y trouve des matières à faible conductivité qui influencent sur la dissipation du courant. En effet,

tout courant passant à travers le sol subit une grande chute de tension, ce qui revient à affirmer que le potentiel de la terre n'est pas uniforme.

Plusieurs études faites considèrent que le sol se compose de multiples couches et chacune d'elle se caractérise par une permittivité  $\epsilon$ , une perméabilité  $\mu$ , et une résistivité  $\rho$ .

Dans cette étude, la permittivité et la perméabilité sont égales à 1, car dans la majorité des cas il est justifié de les considérer comme les paramètres du vide [17].

#### **1.4.2. La résistivité**

La résistivité du sol, notée  $\rho$ , est un paramètre très important dans la détermination de la résistance d'une prise de terre. Elle est déterminée par la capacité du matériau qui compose le sol à conduire le courant électrique. En effet, la circulation des électrons se fait principalement par conduction électrolytique. Ce qui veut dire que ce n'est pas le sol lui-même qui conduit le courant, mais bien les ions dissous dans l'eau présente dans les espaces interstitiels [18]. Pour cela, la résistivité du sol dépend de plusieurs facteurs et les plus influents sont :

- Le taux d'humidité : La présence d'eau aide fortement le mouvement ionique et plus qu'y a de l'eau plus que la conductivité est grande [19, 20]
- La porosité
- La température : Une diminution de la température à 0°C transforme l'eau de l'état liquide à l'état solide, ce qui bloque le mouvement ionique, diminue la conductivité et augmente la résistivité. Et une augmentation de température à 100°C, évapore l'eau présente dans le sol, diminue la conductivité et augmente la résistivité. D'une manière générale, tant que le sol est humide meilleure est la conductivité [21]
- La dimension des grains
- Le pourcentage d'acide et de base : Plus qu'il y a la présence de produits chimiques plus que le risque de corrosion de l'électrode est élevé [22]

- Le type du sol : Comme on peut le voir dans le tableau 1.2, la résistivité du sol diffère d'un type à un autre. Par exemple on peut voir que l'argile possède une faible résistivité tant dite que celle des sols rocheux est très élevée.

La résistivité du sol est une quantité variable et sa valeur peut aller de  $10^{-3}$  à  $10^{17}$  comme on peut le voir dans le tableau 1.1. Afin de la déterminer exactement, il est préférable d'effectuer une mesure électrique directe à l'emplacement de l'installation.

Tableau 1. 1 Classification générale des résistivités [17]

Description	Résistivité ( $\Omega.m$ )
Bon conducteur	$10^{-3} - 10$
conducteur de qualité moyenne	$10^2 - 10^9$
conducteur de qualité médiocre	$10^{10} - 10^{17}$

Tableau 1. 2 Résistivités des divers types de sols [23]

Type de sol	Résistivité $\rho(\Omega / m)$	
	Plage	Valeur moyenne
Marne, argile, sol tourbeux, Sol organique, sol végétal, humus, sol marécageux	2 à 200	40
Argile sablonneuse, argile poussiéreuse, marne sablonneuse, sol blanc composé d'argile	30 à 260	100
Sable argileux et poussiéreux, sol blanc composé d'argile sablonneuse	50 à 600	200
Sable, gravier, sol blanc composé de sable et de gravier	50 à 3000	400
Sable et gravier sec au-dessous de 3m de profondeur	50 à 50000	1000
Sol pierreux	100 à 8000	2000
Sol rocheux	1000 à 20000	10000

### 1.5. Résistance de terre des MALTs dans un sol homogène

La résistance de terre est une notion de base qui caractérise une mise à la terre (MALT). C'est la résistance des couches successives du sol à travers lesquelles le courant circule entre la surface de la prise de terre et une terre lointaine. Une terre lointaine se définit comme un endroit où le potentiel du sol est nul ou négligeable ou encore non affecté par le passage du courant.

Le passage du courant engendre une élévation du potentiel sur les différentes couches du sol. Il en résulte une élévation du potentiel de la prise de terre par rapport à la terre lointaine. La résistance de terre d'une MALT est définie par :

$$R = \frac{V}{I} \quad (1.2)$$

Où

V : élévation du potentiel de la prise de terre provoquée par la circulation d'un courant I

I : courant dissipé au sol à travers la prise de terre

Le sol, permettant la circulation d'un courant, est un conducteur spatial pour lequel la loi d'Ohm prend la forme :

$$E = \rho J \quad (1.3)$$

Où

E : intensité du champ électrique (V/m)

$\rho$  : résistivité du sol ( $\Omega.m$ )

J : densité du courant ( $A.m^2$ )

Un courant circulant dans la terre provoque l'apparition d'une tension entre deux points a et b donné par :

- Si le courant est injecté entre deux points suffisamment éloignés, le potentiel d'un point situé à une distance  $x$  d'un point d'injection est :

$$V_{ab} = V_a - V_b = \int_a^b E \cdot dl \quad (1.4)$$

- Si le courant est injecté entre deux points suffisamment éloignés, le potentiel d'un point situé à une distance  $x$  d'un point d'injection est :

$$V_x = \int_x^\infty E \cdot dl \quad (1.5)$$

Et à l'aide de (2.2) :

$$V_x = \int_x^\infty \rho J \cdot dl \quad (1.6)$$

### 1.5.1. La résistance de prise de terre d'une sphère

La figure 1.5 montre une prise de terre sphérique de rayon  $r$  située dans un milieu conducteur isotrope de résistivité  $\rho$ . Cette prise de terre dissipe un courant  $I$ . Dans l'analyse qui suit, le potentiel  $V_\infty$  est nul.

Le champ électrique développé est symétrique et les points situés à une distance  $x$  sont tous au même potentiel.

La densité du courant à une distance  $l$  du centre de la sphère est :

$$J = \frac{I}{4\pi l^2} \quad (1.7)$$

Et le potentiel à une distance  $x$  est selon l'équation (2.5) :

$$V_r = \frac{\rho I}{4\pi} \int_x^\infty \frac{dl}{l^2} = \frac{\rho I}{4\pi x} \quad (1.8)$$

Le potentiel à la surface de la sphère est donc :

$$V_r = \frac{\rho I}{4\pi r} \quad (1.9)$$

La résistance de terre de la sphère de rayon  $r$ , située profondément dans un sol de résistivité  $\rho$  est alors :

$$R = \frac{\rho}{4\pi r} \quad (1.10)$$

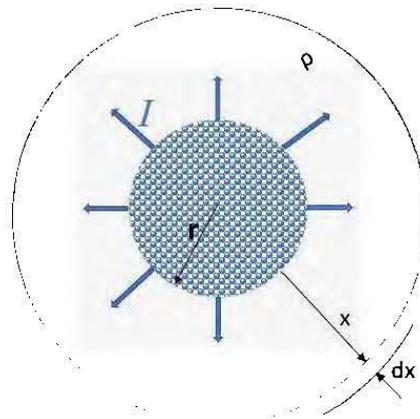


Figure 1. 4 Prise de terre sphérique dans un sol homogène de résistivité  $\rho$

### 1.5.2. La résistance de prise de terre d'un hémisphère

La figure 1.6 montre une prise de terre hémisphérique de rayon  $r$  placée à la frontière sol-air dissipant le même courant  $I$  dans un sol de même résistivité  $\rho$ . La surface en contact avec le sol étant deux fois plus petite que dans le cas de la sphère, la densité du courant est doublée. Le potentiel à un point  $x$ , le potentiel de la surface d'un hémisphère de rayon  $r$  et sa résistance de terre deviennent :

$$V_x = \frac{\rho I}{2\pi x} \quad (1.11)$$

$$V_r = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (1.12)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (1.13)$$

La résistance de terre peut aussi être déterminée en sommant la résistance des couches successives du sol par lesquelles le courant circule :

$$R = \int_r^\infty dR = \rho \int_r^\infty \frac{dl}{dA} = \frac{\rho}{2\pi} \int_r^\infty \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (1.14)$$

Où

A : surface dans laquelle le courant circule, à une distance  $l$

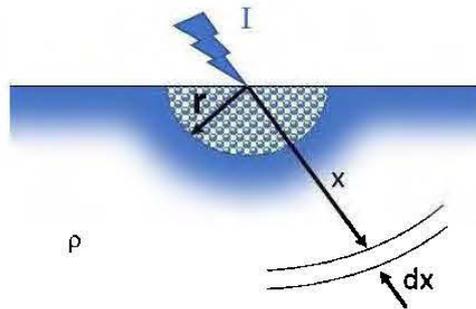


Figure 1. 5 Prise de terre hémisphérique dans un sol homogène de résistivité  $\rho$

### 1.5.3. La résistance de prise de terre d'un cylindre

Il existe dans la littérature plusieurs relations développées afin de calculer la résistance de prise de terre d'un cylindre. La plus utilisée est celle présentée dans [7, 10] et donnée dans l'équation (1.15), où on se base sur la théorie du potentiel moyen développé dans [24]. D'autres relations sont présentes dans la littérature comme celle dans [9] et donnée dans l'équation (1.16), où on suppose une autre méthode dont le modèle d'équipotentialité est différent de celui de .

La figure 1.7 représente une tige verticale cylindrique de longueur  $l$  et de rayon  $r$  où une des extrémités est au niveau de la surface du sol et sa résistance de prise de terre est donnée par les formules suivantes :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (1.15)$$

Avec  $d$  le diamètre de l'électrode

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{r+1}{r} \right) \quad (1.16)$$

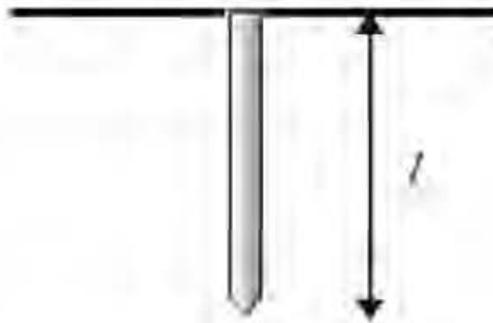


Figure 1. 6 Tige cylindrique verticale

#### 1.6. Résistance de terre des MALTs dans un sol hétérogène

Considérer le sol avec plusieurs couches de résistivités différentes dans l'étude du comportement d'un système MALT est plus juste si on veut se rapprocher le plus de la réalité physique. Mais le calcul de la résistance dans ce cas-ci est beaucoup plus difficile que celui dans un sol homogène vu qu'il faut utiliser d'autres hypothèses.

Dans la littérature, on trouve plusieurs études qui ont pris en compte l'hétérogénéité du sol où plusieurs méthodes ont été utilisées pour le calcul de la résistance d'une prise de terre, comme par exemple dans [5, 25].

Les formules analytiques pour la détermination de la résistance d'une prise de terre dans un sol hétérogène donnent des bons résultats dans certains contextes simples comme par exemple dans [26], mais dans d'autres contextes plus complexes, ces approximations ne sont pas valables.

De ce fait, il est souvent nécessaire d'avoir recours à des méthodes numériques, comme celle considérée dans cette étude, basée sur la méthode de calcul par éléments finis qu'on présente dans le prochain chapitre.

## **1.7. Conclusion**

Dans ce chapitre, une introduction sur les systèmes de mises à la terre a été présentée basée sur une étude bibliographique. L'importance et le rôle de ce système a été expliqué et les paramètres qui jouent un rôle très important dans sa conception. On parle des caractéristiques électriques du sol comme la résistivité et les facteurs qui influencent sur elle ainsi que la résistance d'une prise de terre. Quelques formes simples d'électrodes et le calcul de leur résistance ont été présentés dans un sol homogène. Pour les formes les plus complexes, en termes de configuration des électrodes et structure du sol, elles sont considérées dans le prochain chapitre.

## CHAPITRE II

### 2. Modélisation et simulation par éléments finis

#### 2.1. Introduction

Le système MALT est très important dans le réseau de transport et de télécommunication, car il assure la sécurité du réseau, du matériel et des personnes aux alentours. Pour avoir un bon système MALT, l'étude de certaines caractéristiques est indispensable. Parmi les plus importantes, la résistance des prises de terre qui influence sur la dissipation du courant de défaut dans le sol. Dans la littérature, les relations analytiques pour calculer sa valeur sont données pour les formes simples (hémisphérique, cylindrique verticale...) et celles dérivées des formes simples (deux tiges cylindriques verticales, trois tiges en triangle, quatre tiges en carré...). Pour les formes les plus complexes, il est souvent nécessaire d'avoir recours à la méthode numérique.

Dans ce chapitre, nous allons évaluer la résistance de plusieurs formes d'électrodes dans un sol homogène et hétérogène. Les valeurs déterminées par simulation sont basées sur la méthode de calcul par éléments finis. La démarche à suivre consiste à calculer la valeur de la résistance analytiquement et la comparer avec celle déterminée par simulation afin de valider le modèle utilisé.

#### 2.2. La méthode des éléments finis (EF)

##### 2.2.1. Principe général

On considère le domaine  $\Omega$  délimité par la frontière  $F$ . Le problème consiste à déterminer un champ  $u(M,t)$  définie sur  $\Omega$ , qui est une solution d'équations aux dérivées partielles et d'équations ordinaires en tout point  $M$  et à tout instant  $t$  en respectant les conditions aux limites sur  $F$ . La variable  $t$  représente le temps et si elle est présente, on parle d'un problème d'évolution sinon le problème est dit stationnaire.

La méthode des éléments finis (EF) permet de résoudre de manière discrète et approchée ce problème en cherchant une solution approchée et suffisamment fiable sous la forme d'un champ  $F(M,t)$  défini par morceaux sur les  $n$  sous domaines  $\Omega_i$  de  $\Omega$  qui doivent être une partition de  $\Omega$ , c'est-à-dire  $\bigcup_{i=1}^n \Omega_i = \Omega$  et  $\tilde{\Omega}_i \cap \tilde{\Omega}_j = \emptyset$   $\forall i \neq j$ ,  $\tilde{\Omega}_i$  désignant l'intérieur de  $\Omega_i$ .

Pour résoudre ce problème par la méthode des EF, on procède par les étapes suivantes :

- Choisir une formulation intégrale du système différentiel à résoudre et de ses conditions aux limites : Formulation faible
- Le maillage qui consiste à diviser le domaine  $\Omega$  en  $n$  sous domaine  $\Omega_i$
- La discrétisation qui consiste à trouver des valeurs à attribuer aux entités géométriques pour décrire la solution approchée
- La résolution
- Le post-traitement où la solution approchée va être construite à partir des valeurs trouvées aux nœuds et déduire d'autres grandeurs

## **2.3 Répartition du potentiel électrique et calcul de la résistance d'une prise de terre**

### **2.3.1. Électrode cylindrique verticale**

Soit une électrode cylindrique verticale dans un sol homogène. Le problème électrocinétique définie dans le domaine  $\Omega = \Omega_c \cup \Omega_c^c$  avec une partie conductrice  $\Omega_c$  et une partie non conductrice  $\Omega_c^c$  délimité par la frontière  $F = F_e + F_j$ , d'une électrode verticale, est représenté dans la figure 2.1 où tout le domaine  $\Omega$  est conducteur.

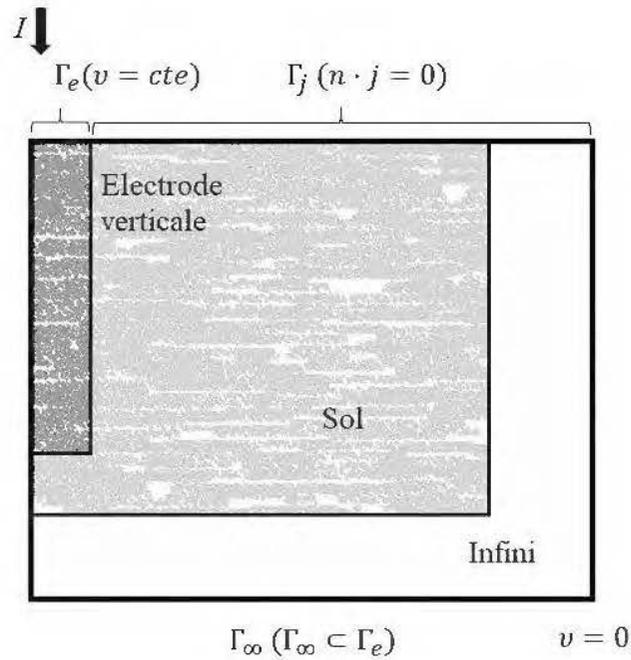


Figure 2. 1 Modèle électrocinétique d'une électrode cylindrique verticale

### 2.3.2. Formulation du problème

Les équations du modèle électrocinétique dans  $\Omega$  sont définies comme suit [27]:

- Les équations de Maxwell en régime stationnaire :

$$\text{rot } e = 0 \quad (2.1)$$

$$\text{div } j = 0 \quad (2.2)$$

$$j = \sigma e \quad (2.3)$$

- Les conditions aux limites :

$$n \times e|_{\Gamma_e} = 0 \quad (2.4)$$

$$n \times j|_{\Gamma_j} = 0 \quad (2.5)$$

- Le champ électrique :

$$e = -\text{grad } v \quad (2.6)$$

Avec  $j$  la densité du courant électrique,  $\sigma$  la conductivité électrique et  $n$  la normale unitaire extérieure à  $\Omega$ .

La condition aux limites (2.4) et la relation (2.6) impliquent que le potentiel scalaire à la frontière  $\Gamma_e$  est défini comme constant et d'après la condition aux limites de Dirichlet, le potentiel de référence imposé à la frontière infinie  $\Gamma_\infty$  est nul. Ce qui veut dire que le courant traversant la terre depuis l'électrode sort du domaine par la frontière infinie.

La condition aux limites (2.5) s'applique à la frontière  $\Gamma_j$  (frontière entre la terre et l'air) signifie que la composante normale de la densité de courant  $y$  est nulle. Ce qui veut dire qu'il n'y a pas de courant qui s'écoulerait du sol vers l'air.

Pour définir la source, on peut imposer un courant entrant par la surface supérieure de l'électrode ou bien comme notre cas, on impose un potentiel donné non nul dans tout le volume de l'électrode.

### Formulation faible

Dans le domaine  $\Omega$  la propriété de l'opérateur  $div$  est appliqué aux champs vectoriel  $u$  scalaire  $v$

$$div(v \cdot u) = u \cdot grad v + v \cdot div u \quad (2.7)$$

Après intégration dans le volume  $\Omega$  délimité par la frontière  $\partial\Omega$ , on obtient

$$\int_{\Omega} div(v \cdot u) \, d\Omega = \int_{\Omega} (u \cdot grad v) \, d\Omega + \int_{\Omega} (v \cdot div u) \, d\Omega \quad (2.8)$$

Le théorème de la divergence est appliqué et le membre gauche de la relation devient

$$\int_{\partial\Omega} ((n \cdot u) \cdot v) \, d\partial\Omega = \int_{\Omega} (u \cdot grad v) \, d\Omega + \int_{\Omega} (v \cdot div u) \, d\Omega \quad (2.9)$$

Soit  $v'$  une fonction test. On remplace  $u$  par  $j$  et  $v$  par  $v'$ , on obtient

$$\int_{\Omega} (j \cdot \text{grad } v') d\Omega - \int_{\Gamma} ((n \cdot j) \cdot v') d\Gamma = - \int_{\Omega} (v' \cdot \text{div } j) d\Omega \quad (2.10)$$

En utilisant les relations (3.2), (3.3) et (3.6) on obtient

$$\int_{\Omega} (\sigma \text{ grad } v \cdot \text{grad } v') d\Omega + \int_{\Gamma} ((n \cdot j) \cdot v') d\Gamma = 0 \quad \forall v' \in F(\Omega) \quad (2.11)$$

$F(\Omega)$  est l'espace fonctionnel défini dans  $\Omega$  contenant les fonctions de base  $v$  et la fonction test  $v'$  [12].

La relation (2.11) est la formulation faible du problème électrocinétique.

Grâce à cette relation, le potentiel électrique scalaire  $v$  peut être déterminé en tout point du domaine  $\Omega$ . Le champ électrique  $e$  et la densité du courant  $j$  sont déterminés respectivement par les relations (2.3) et (2.6) en tout point du domaine  $\Omega$ . Quant à la résistance d'une prise de terre, elle est calculée à partir de la relation  $R = \frac{U}{I}$ , avec  $U$  le potentiel et  $I$  le courant a point d'injection.

### 2.3.3. Résultat et validation

#### 2.3.3.1. Calcul de la résistance de prise de terre dans un sol homogène

##### 2.3.3.1.1. Électrode cylindrique verticale

Pour une électrode cylindrique verticale en cuivre, de rayon  $r = 0,0125m$ , dans un sol homogène, la valeur de la résistance pour différentes longueurs a été calculée en 3D et analytiquement en se basant sur les formules (1.15) et (1.16). La résistivité du cuivre est de  $1,6949 \times 10^{-8} \Omega.m$  et sa conductivité est de  $5,998 \times 10^7 S/m$ . Les paramètres électriques pris en compte du sol sont la résistivité de  $100 \Omega.m$ , la conductivité électrique de  $0,01 S/m$  et la permittivité relative de  $1 F/m$ . La température du sol est considérée égale à  $20^{\circ}C$ .

Un maillage extrêmement fin a été considéré comme on peut le voir sur la figure 2.2.

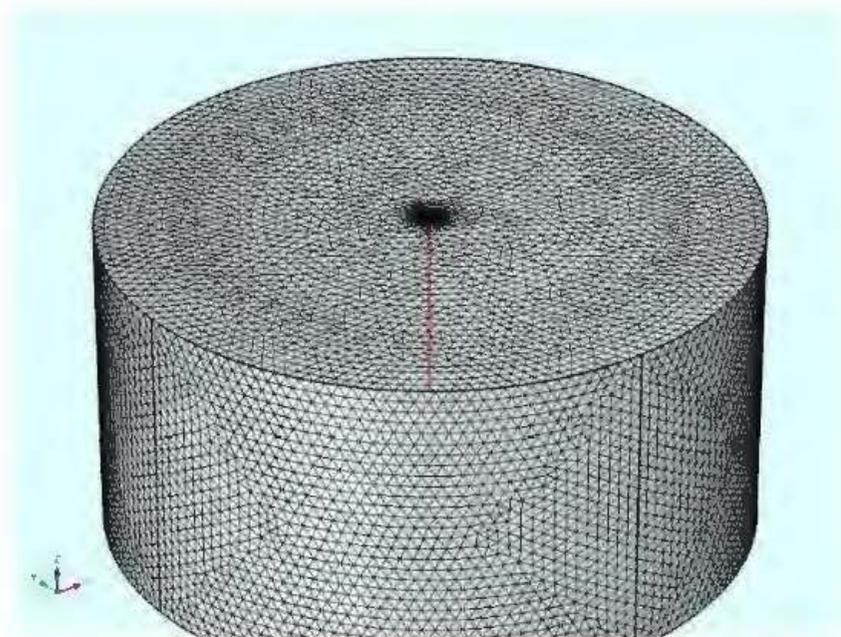


Figure 2. 2 Maillage du modèle

La figure 2.3 montre une tige cylindrique de longueur 3m dans le sol avec l'apparition du potentiel électrique engendré par le courant injecté dans le sol.

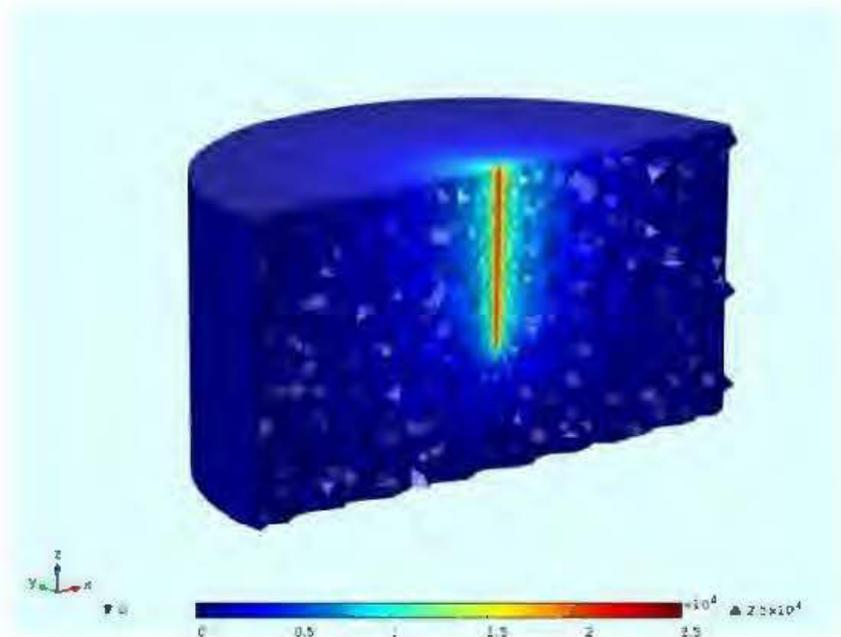


Figure 2. 3 Tige cylindrique verticale dans un sol homogène avec l'apparition du potentiel électrique

Le potentiel électrique appliqué sur toute la surface de la tige est de 25000 V et on peut voir sa distribution surfacique dans la figure 2.4.

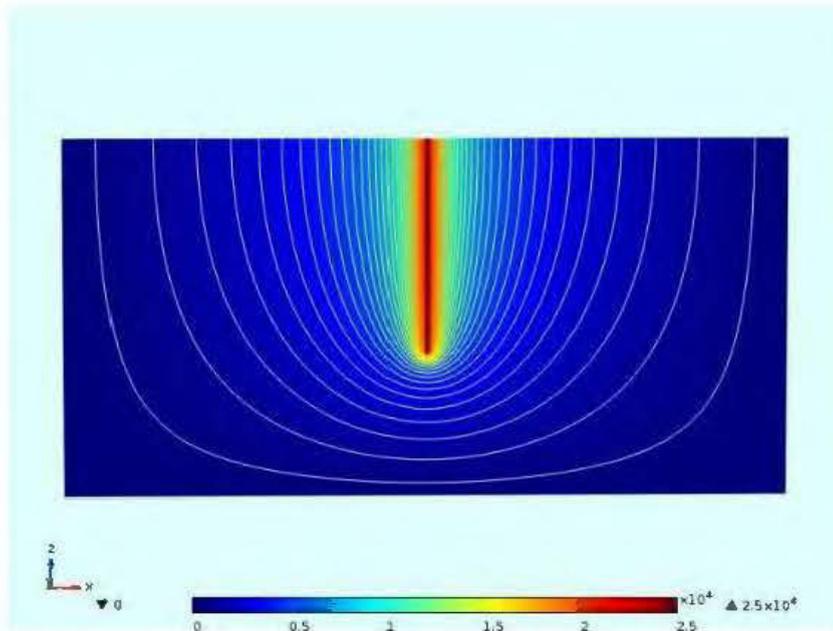


Figure 2. 4 Distribution surfacique du potentiel autour de la tige

Après élévation de la surface sur le plan XY, on peut voir sur la figure 2.5 la répartition du potentiel sur la surface du sol.

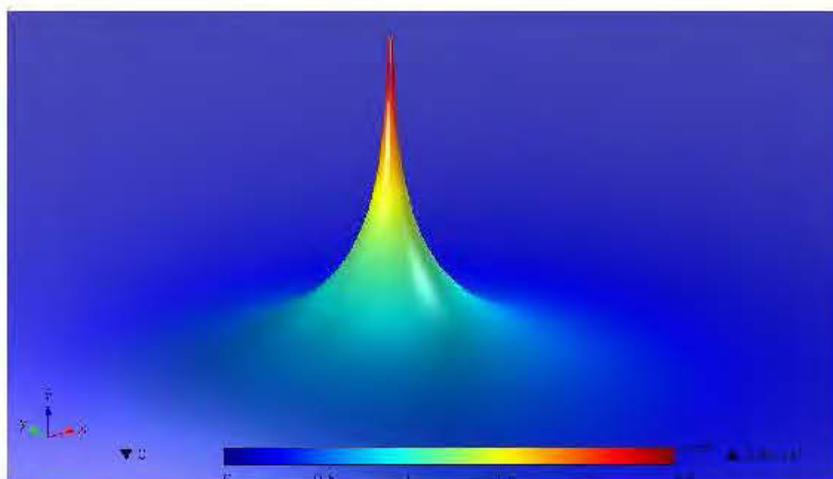


Figure 2. 5 Répartition du potentiel sur la surface du sol autour de l'électrode

Le calcul analytique de la résistance de la prise de terre a été fait afin de le comparer avec les résultats obtenus par simulation. Tout d'abord, on a effectué le calcul pour l'électrode cylindrique verticale dans un sol homogène avec différentes longueurs de la tige. Les valeurs de la résistance calculée avec les deux relations choisies et par simulation sont données dans le tableau 2.1 et par la suite, elles sont représentées sur la figure 2.6. L'erreur relative est représentée dans la figure 2.7.

Tableau 2. 1 Valeur de la résistance ( $\Omega$ ) par rapport à la longueur de la tige (m)

Longueur	Sunde-Dwight	Liew-Darveniza	3D EF
1	75,89	69,93	74,87
2	43,46	40,43	42,97
3	31,12	29,09	30,75
4	24,48	22,96	24,16
5	20,3	19,07	19,99
6	17,4	16,38	17,12
7	15,26	14,39	14,98
8	13,62	12,85	13,35
9	12,31	11,63	12,02
10	11,25	10,64	10,97

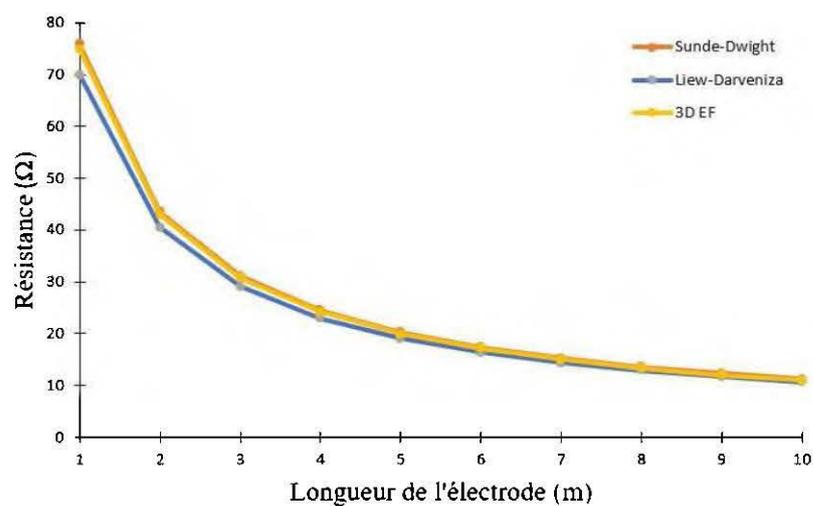


Figure 2. 6 Résistance de l'électrode par rapport à sa longueur

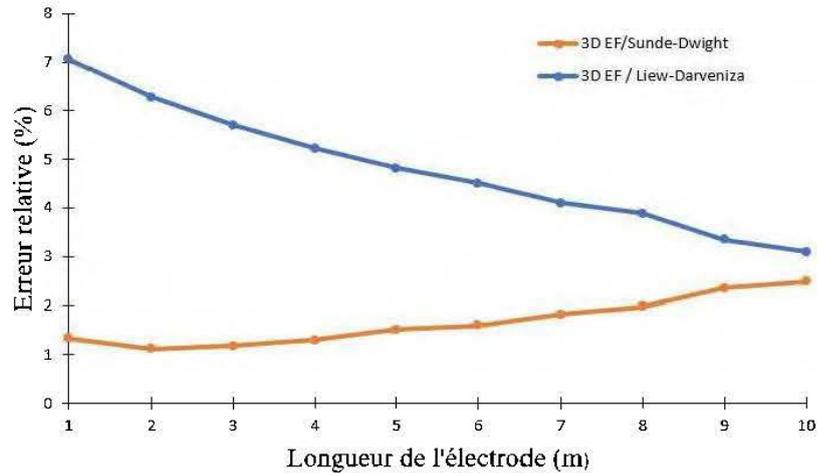


Figure 2. 7 Erreur relative

Les résultats obtenus par la méthode 3D EF sont très proches de ceux obtenus analytiquement. On peut voir que par rapport à la relation de (2.15), l'erreur relative augmente avec l'augmentation de la longueur de la tige, mais ne dépasse pas les 2,5%. Pour celle qui est en rapport avec (2.16), l'erreur relative pour une longueur de 1m est de 7% et diminue avec l'augmentation de la longueur de la tige jusqu'à ce qu'elle atteigne les 3,1%. Étant donné que l'erreur relative est faible, ceci permet de s'assurer de la validité du modèle utilisé.

On effectue un deuxième calcul avec les mêmes paramètres, mais en prenant compte la résistivité du sol comme variable et la longueur de l'électrode égale à 3m. Les valeurs de la résistance sont données dans le tableau 2.2 puis représentées sur la figure 2.8. L'erreur relative est représentée dans la figure 2.9.

Tableau 2. 2 Valeur de la résistance ( $\Omega$ ) par rapport à la résistivité du sol ( $\Omega.m$ )

Résistivité	Sunde-Dwight	Liew-Darveniza	3D EF
30	9,33	8,72	9,21
100	31,12	29,09	30,75
500	155,62	145,48	153,5
1000	311,25	290,97	306,98
1500	466,87	436,46	460,54
2000	622,5	581,95	613,94

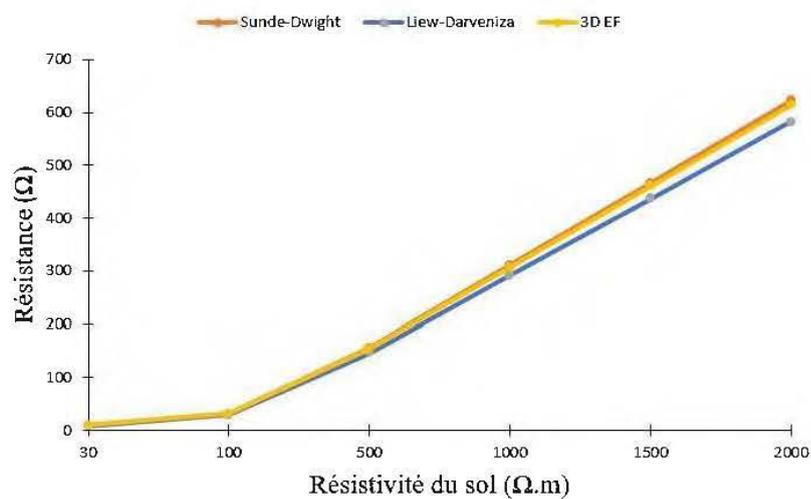


Figure 2. 8 Résistance de l'électrode par rapport à la résistivité du sol

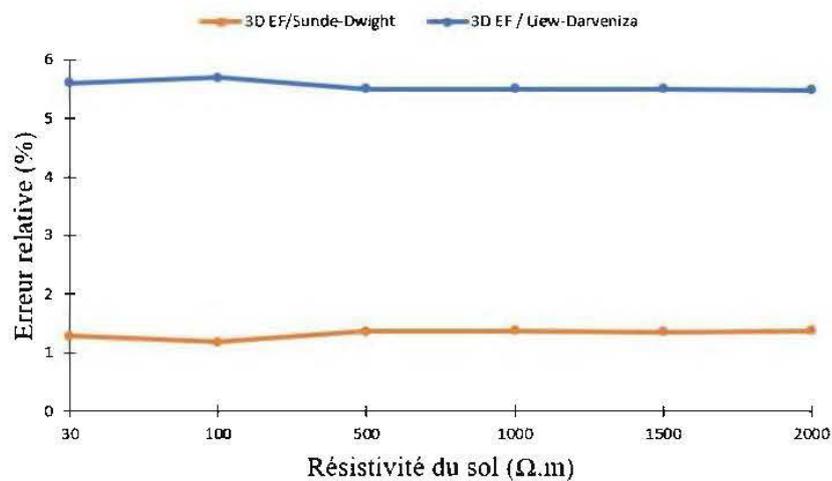


Figure 2. 9 Erreur relative

On remarque d'après la figure 2.8, le rôle de la résistivité du sol sur la résistance d'une prise de terre. En effet, lorsque la résistivité du sol est élevée, la dissipation du courant devient plus difficile et la résistance de l'électrode augmente.

Les courbes représentées sur la figure 2.8 sont très proches avec une infime marge d'erreur. L'erreur relative, représentée sur la figure 2.9, nous montre qu'elle est constante et ne dépasse pas les 1,5% pour le cas qui est en rapport avec la relation (2.15). Pour celle qui est en rapport avec la relation (2.16), l'erreur ne dépasse pas les 5,7%. Encore une fois, les résultats obtenus nous confirment la validité du modèle utilisé.

### **2.3.3.1.2. Deux électrodes cylindriques verticales**

Pour deux électrodes cylindriques verticales, avec une distance  $a$  entre elles étant égale au double de leur longueur, on garde les mêmes paramètres utilisés pour une seule tige dans le cas précédent. La valeur de la résistance de l'ensemble des électrodes pour différentes longueurs a été calculée en 3D et analytiquement en se basant sur la formule suivante [6] :

$$R_2 = R \left( \frac{1+\alpha}{2} \right) \quad (2.12)$$

Avec  $R$  la résistance d'une seule électrode verticale et  $\alpha = \frac{r_{eq}}{a}$  où  $r_{eq} = \frac{\rho}{2\pi R}$

Un maillage extrêmement fin a été considéré comme on peut le voir sur la figure 2.10.

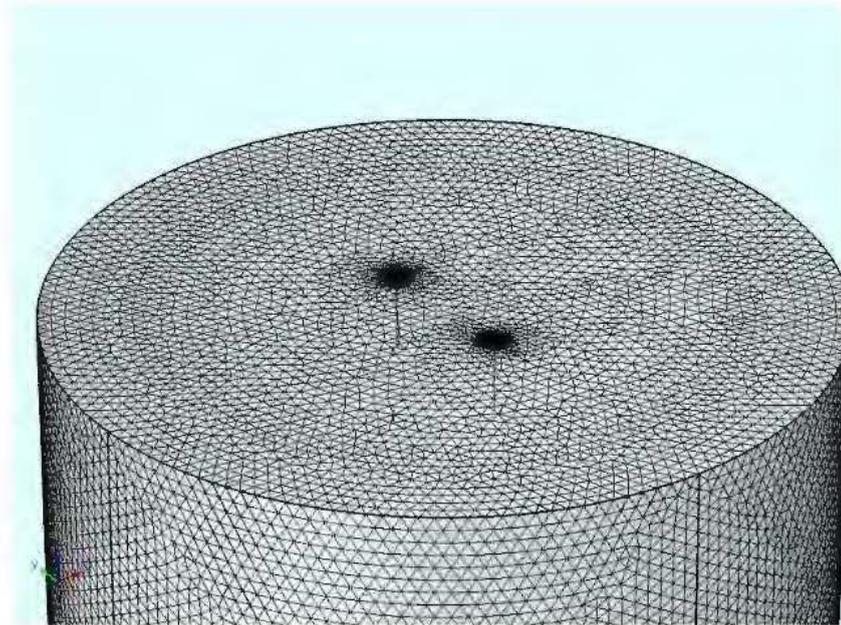


Figure 2. 10 Maillage du modèle

La figure 2.11 montre les deux tiges cylindriques de longueur  $3m$  dans le sol avec l'apparition du potentiel électrique engendré par le courant injecté dans le sol.

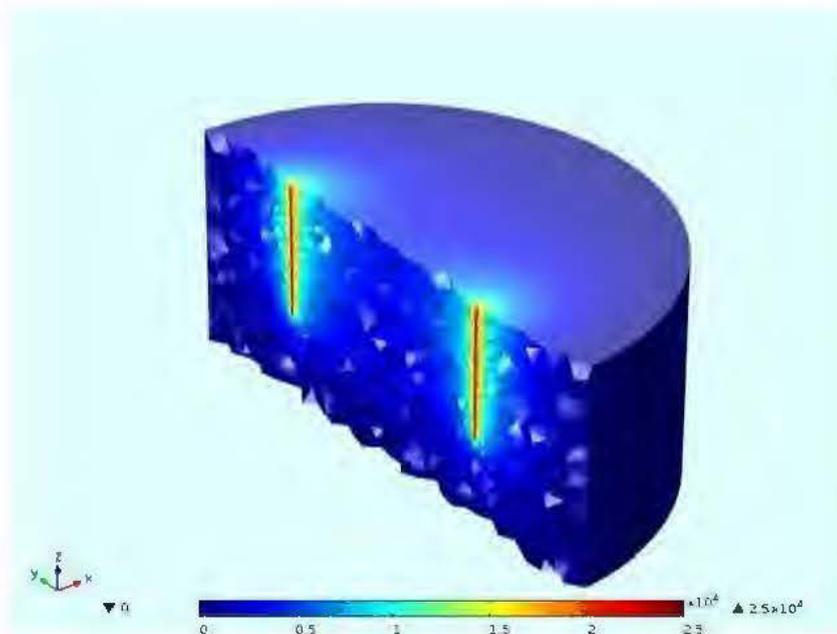


Figure 2. 11 Deux tiges cylindriques verticales dans un sol homogène avec l'apparition du potentiel électrique

La distribution surfacique du potentiel électrique est représentée sur la figure 2.12.

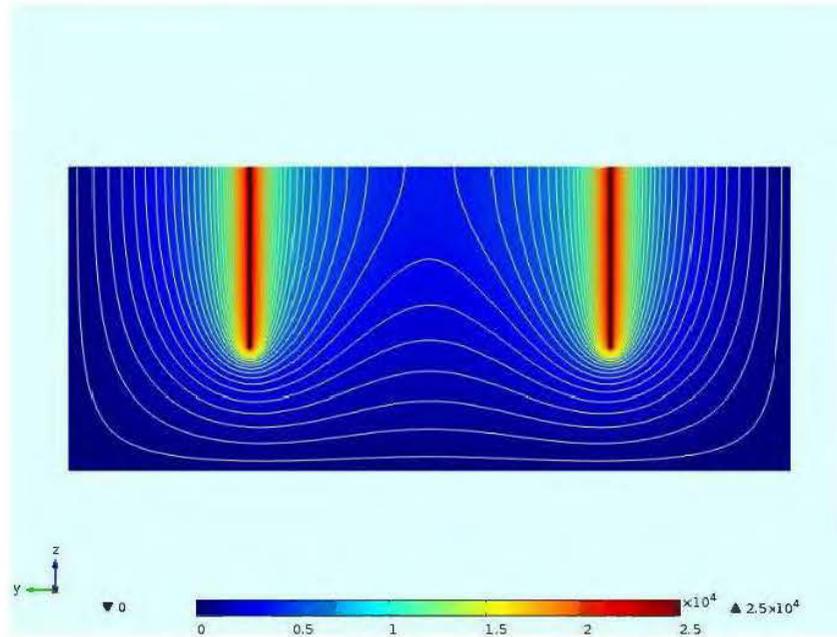


Figure 2. 12 Distribution surfacique du potentiel autour des deux tiges  
Après élévation de la surface sur le plan XY, la répartition du potentiel sur la surface du sol est représentée sur la figure 2.13.

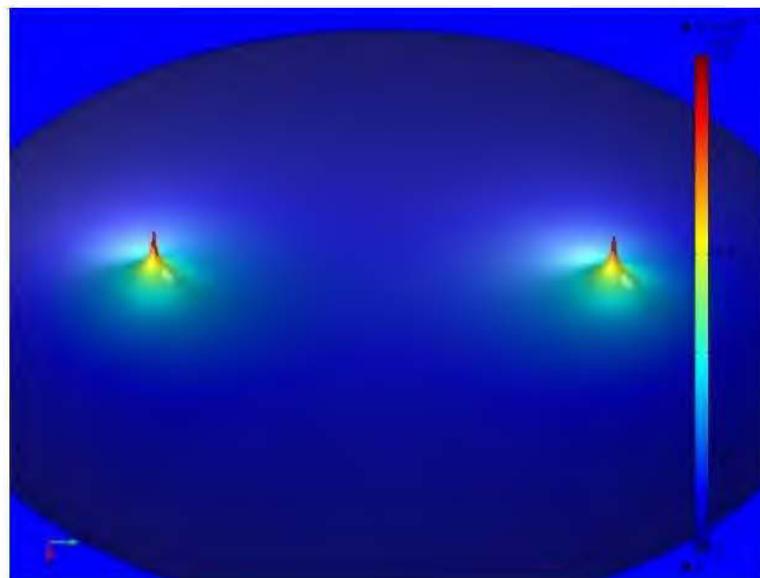


Figure 2. 13 Répartition du potentiel sur la surface du sol autour des deux tiges

Le calcul analytique de la résistance de l'ensemble des tiges pour différentes longueurs et différentes résistivités du sol a été fait et comparé avec les résultats obtenus par simulation. Les valeurs de la résistance calculée analytiquement, avec la relation (2.12) en considérant la résistance  $R$  d'une seule tige calculée avec les relations de (1.15) et (1.16), et par simulation sont données dans le tableau 2.3. Par la suite, ces valeurs sont représentées sur la figure 2.14. L'erreur relative est représentée dans la figure 2.15.

Tableau 2. 3 Valeur de la résistance ( $\Omega$ ) de l'ensemble des deux tiges par rapport à leur longueur (m)

Longueur	Sunde-Dwight	Liew-Darveniza	3D EF
1	41,92	38,94	40,92
2	23,71	22,2	23,15
3	16,88	15,87	16,44
4	13,23	12,47	12,83
5	10,94	10,33	10,57
6	9,36	8,85	9,01
7	8,19	7,76	7,87
8	7,30	6,92	6,97
9	6,59	6,25	6,27
10	6,02	5,71	5,7

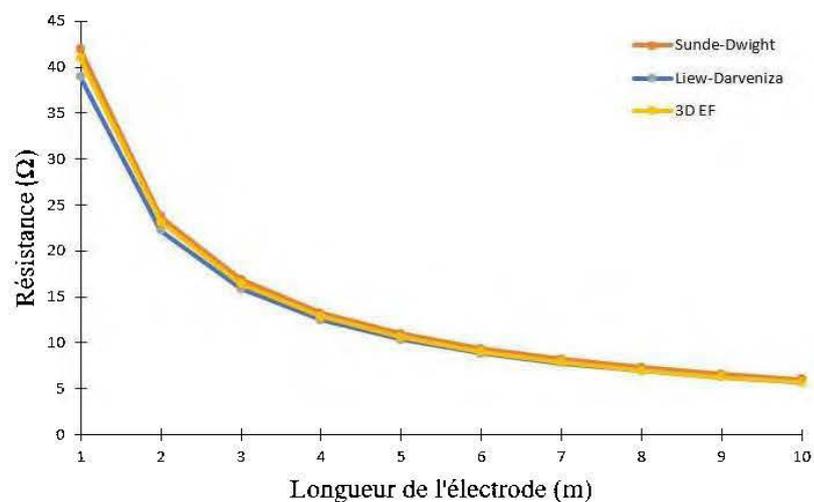


Figure 2. 14 Résistance de l'ensemble des deux tiges par rapport à leurs longueurs

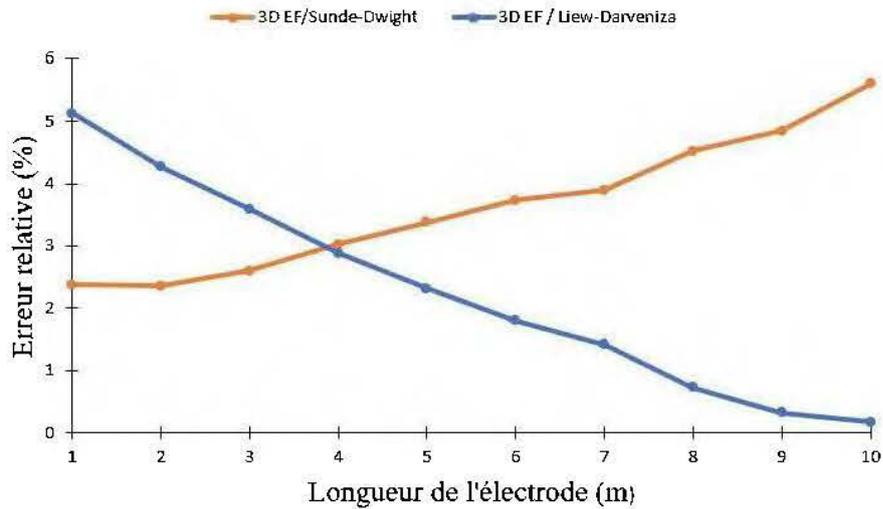


Figure 2. 15 Erreur relative

Les résultats obtenus par la méthode 3D EF sont très proches de ceux obtenus analytiquement. L'erreur relative des résultats de la résistance de l'ensemble des deux électrodes, avec la valeur de la résistance d'une seule tige obtenue par (1.15), augmente avec l'augmentation de la longueur de la tige, mais ne dépasse pas les 5,6%. Pour celle qui est en rapport avec la relation (1.16), l'erreur relative pour une longueur de 1m est de 5% et diminue avec l'augmentation de la longueur de la tige jusqu'à ce qu'elle atteigne les 0,1%. Étant donné que l'erreur relative est faible, ceci permet de s'assurer de la validité du modèle utilisé.

### 2.3.3.1.3. Trois électrodes cylindriques verticales formant un triangle équilatéral

En gardant les mêmes paramètres considérés pour le cas des deux électrodes cylindriques verticales, le calcul de l'ensemble des trois tiges a été fait par la méthode 3D EF et analytiquement grâce à la relation suivante [6] :

$$R_3 = R \left( \frac{1+2\alpha}{3} \right) \quad (2.13)$$

Un maillage extrêmement fin a été considéré comme on peut le voir sur la figure 2.16.

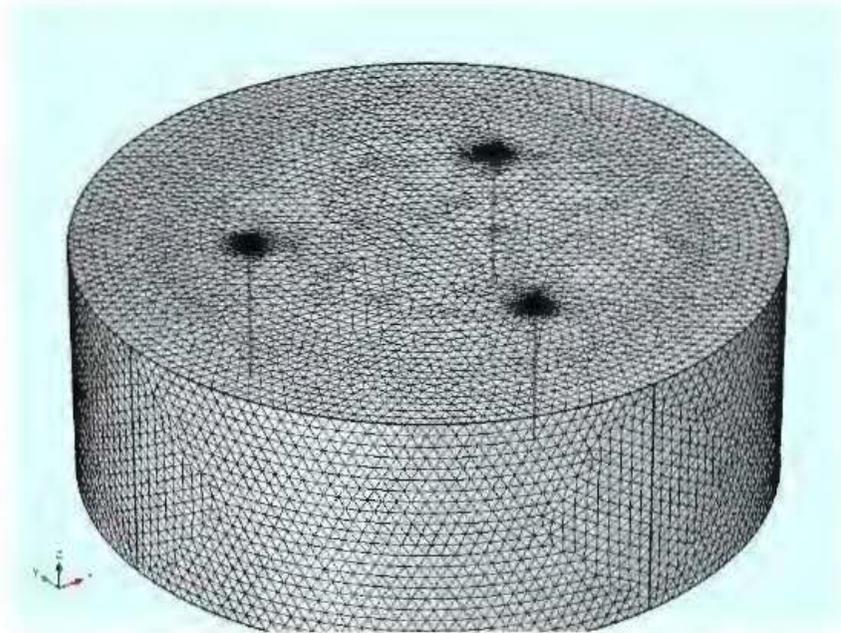


Figure 2. 16 Maillage du modèle

La figure 2.17 montre les trois tiges cylindriques de longueur 3m dans le sol avec l'apparition du potentiel électrique engendré par le courant injecté dans le sol.

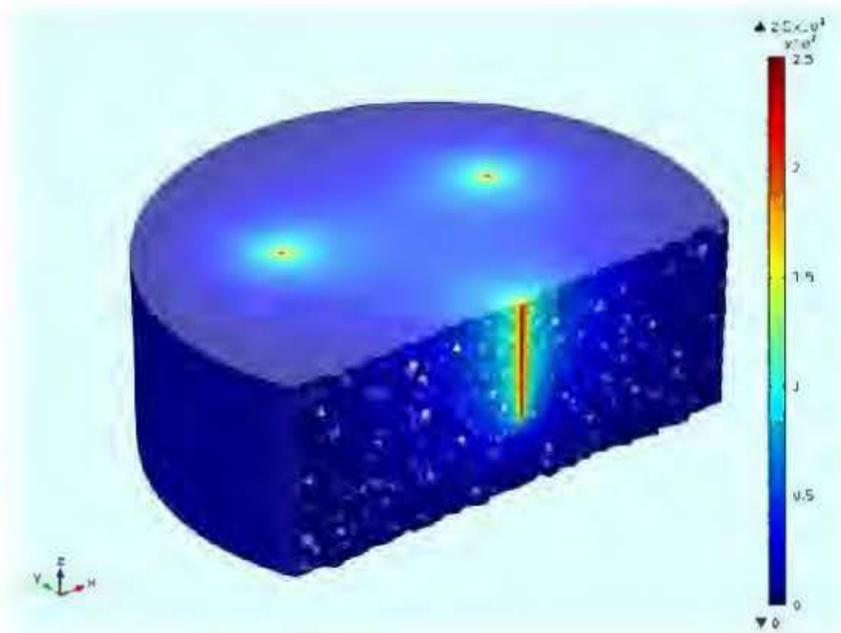


Figure 2. 17 Trois tiges cylindriques verticales dans un sol homogène avec l'apparition du potentiel électrique

Après élévation de la surface sur le plan XY, la répartition du potentiel sur la surface du sol est représentée sur la figure 2.18.

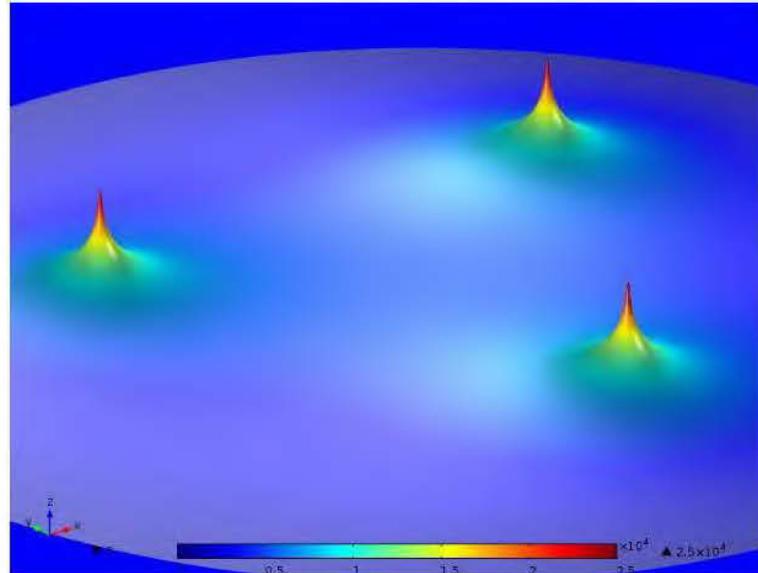


Figure 2. 18 Répartition du potentiel sur la surface du sol autour des trois tiges

Le calcul analytique fait avec la relation (2.13) et les résultats obtenus par simulation des valeurs de la résistance de l'ensemble des trois tiges sont donnés dans le tableau 2.4 puis représentés dans la figure 2.19. L'erreur relative est représentée sur la figure 2.20.

Tableau 2. 4 Valeur de la résistance ( $\Omega$ ) de l'ensemble des trois tiges par rapport à leurs longueurs (m)

Longueur	Sunde-Dwight	Liew-Darveniza	3D EF
1	30,6	28,61	29,68
2	17,13	16,12	16,55
3	12,14	11,46	11,67
4	9,48	8,97	9,07
5	7,82	7,41	7,44
6	6,68	6,34	6,32
7	5,84	5,45	5,49
8	5,2	4,94	4,9
9	4,69	4,46	4,4
10	4,28	4,07	3,99

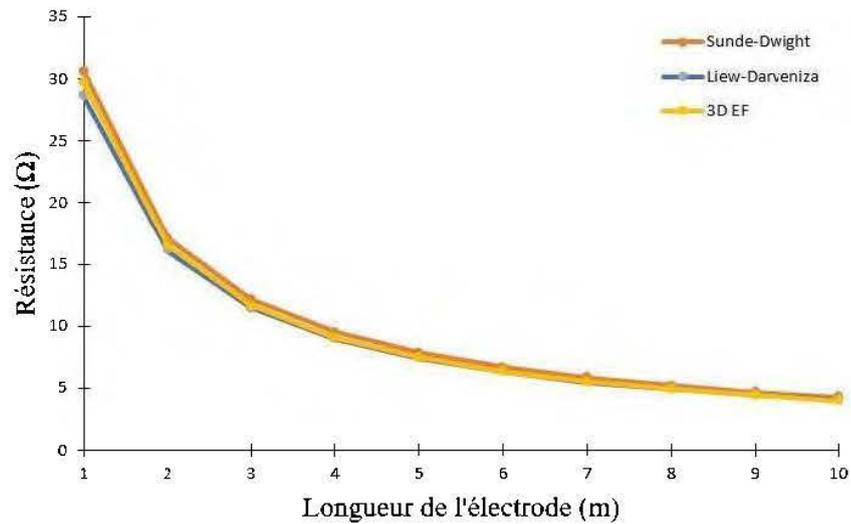


Figure 2. 19 Résistance de l'ensemble des trois tiges par rapport à leurs longueurs

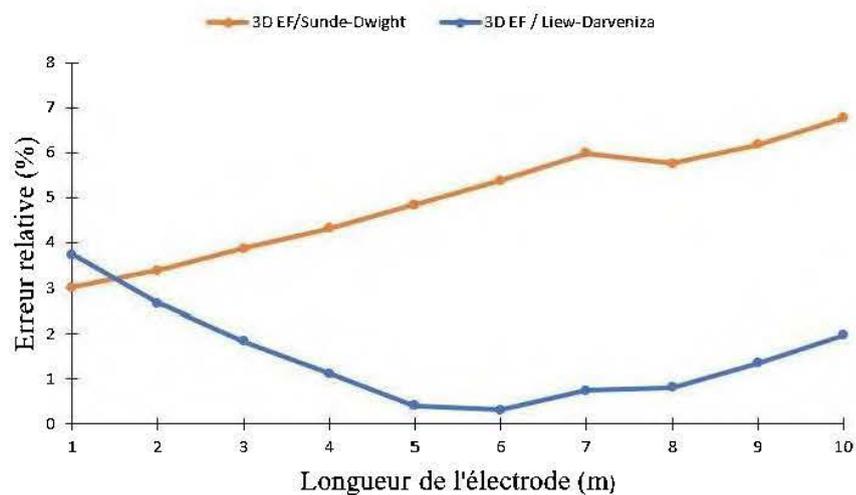


Figure 2. 20 Erreur relative

Les résultats obtenus par la méthode 3D EF sont très proches de ceux obtenus analytiquement, pareil que les autres cas traités. On peut voir que par rapport à la relation (1.15), l'erreur relative augmente aussi avec l'augmentation de la longueur de la tige, mais ne dépasse pas les 6,77%. Pour celle qui est en rapport avec la relation (1.16), l'erreur relative pour une longueur de 1m est de 3,73% et diminue

avec l'augmentation de la longueur de la tige jusqu'à ce qu'elle atteigne les 0,31% pour une longueur de la tige de 6m. À une longueur de 7m l'erreur relative augmente de nouveau jusqu'à ce qu'elle atteigne les 1,96% pour une longueur de la tige de 10m. Étant donné que l'erreur relative est faible, ceci permet de s'assurer de la validité du modèle utilisé.

#### 2.3.3.1.4. Quatre électrodes cylindriques verticales formant un carré

En gardant les mêmes paramètres, on refait le même calcul de la résistance de la prise de terre composée de quatre tiges cylindriques verticales analytiquement et en 3D. La relation analytique de la résistance de l'ensemble des électrodes est donnée comme suit [28] :

$$R = \frac{\rho}{8\pi l} \left( \ln \frac{2l}{r} + 2 \ln \frac{\sqrt{l^2+a^2}+1}{a} + \ln \frac{\sqrt{l^2+2a^2}+1}{a\sqrt{2}} \right) \quad (2.14)$$

Un maillage extrêmement fin a été considéré comme on peut le voir sur la figure 2.21,

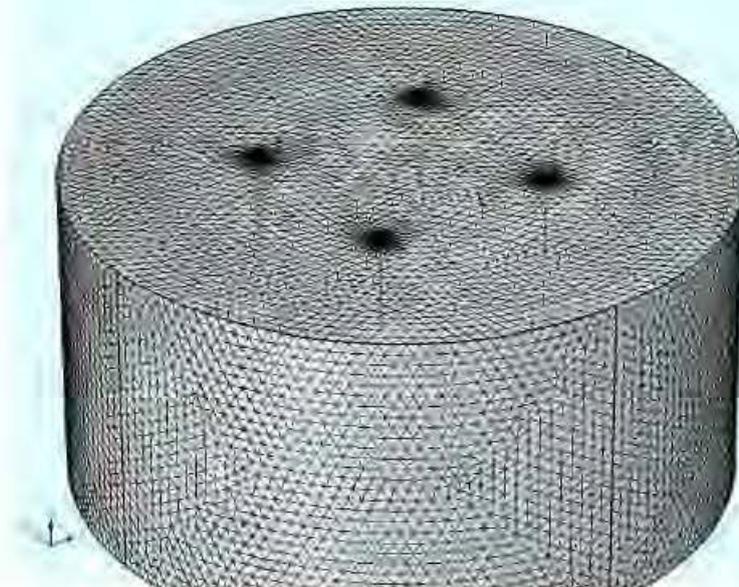


Figure 2. 21 Maillage du modèle

La figure 2.22 montre les quatre tiges cylindriques de longueur 3m dans le sol avec l'apparition du potentiel électrique engendré par le courant injecté dans le sol.

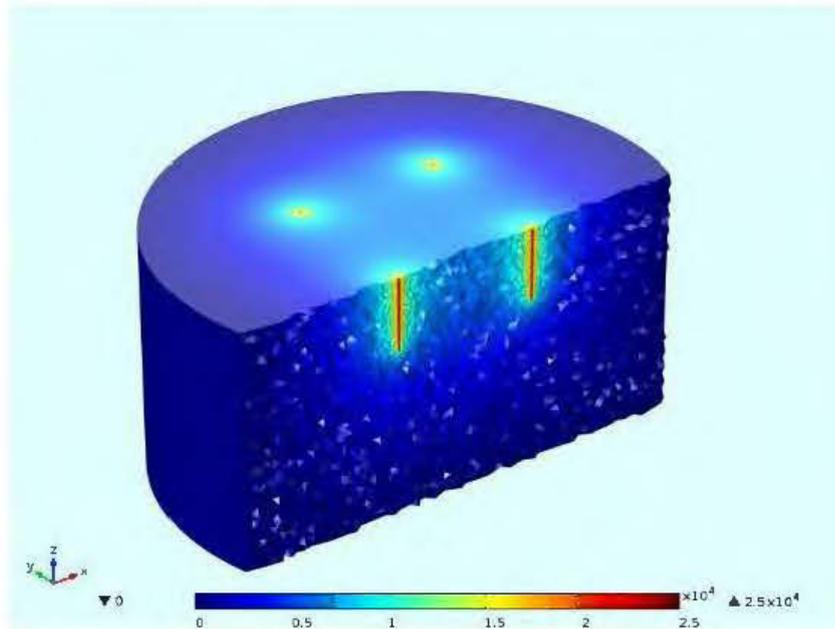


Figure 2. 22 Quatre tiges cylindriques verticales dans un sol homogène avec l'apparition du potentiel électrique

Après élévation de la surface sur le plan XY, la répartition du potentiel sur la surface du sol est représentée sur la figure 2.23.

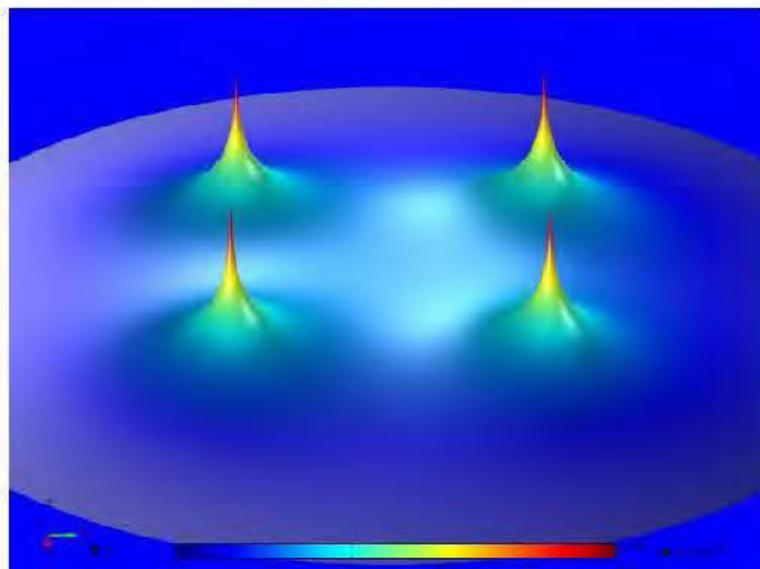


Figure 2. 23 Répartition du potentiel sur la surface du sol autour des quatre tiges

Le calcul analytique fait avec la relation (2.14) et les résultats obtenus par simulation des valeurs de la résistance de l'ensemble des quatre tiges sont donnés dans le tableau 2.5 puis représentés dans la figure 2.24. L'erreur relative est représentée sur la figure 2.25.

Tableau 2. 5 Valeurs de la résistance ( $\Omega$ ) de l'ensemble des quatre tiges par rapport à leur longueur (m)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Analytique</b>	25,4	13,14	9,07	6,99	5,73	4,87	4,24	3,77	3,39	3,09
<b>3D EF</b>	23,58	13,02	9,13	7,07	5,79	4,89	4,24	3,74	3,35	3,03

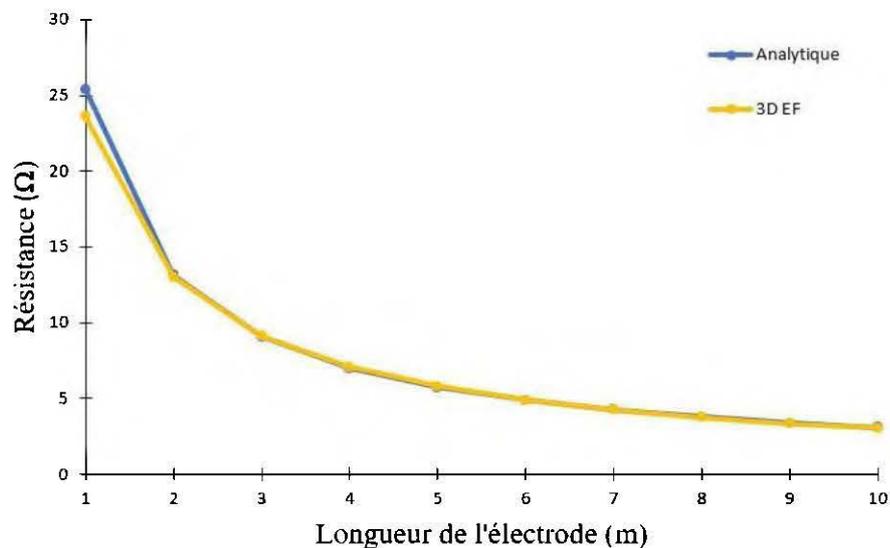


Figure 2. 24 Résistance de l'ensemble des quatre tiges par rapport à leurs longueurs

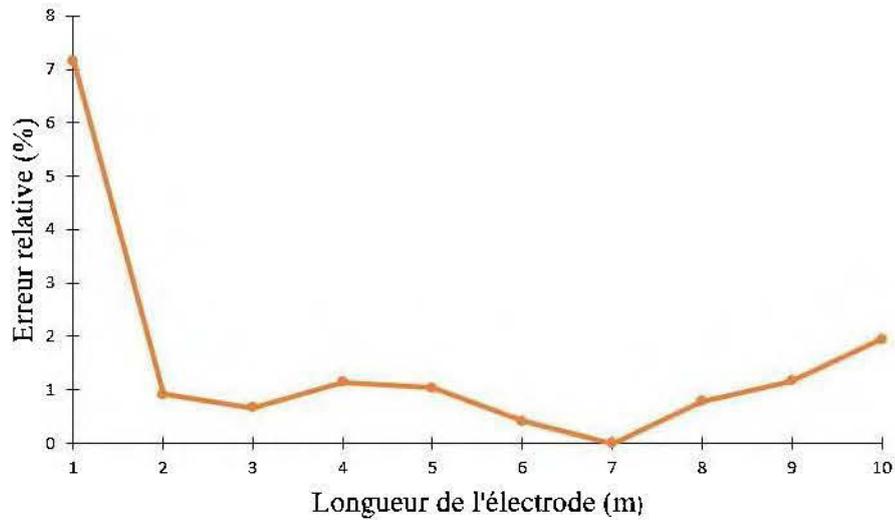


Figure 2. 25 Erreur relative

Nous remarquons que les résultats représentés par les courbes de la figure 2.24 se rapprochent avec une infime marge d'erreur. En effet, l'erreur relative pour une longueur  $1m$  est de 7,16%, mais elle diminue beaucoup par rapport aux autres longueurs de la tige et varie dans l'intervalle de 0,91% à 1,94%. Étant donné que l'erreur relative est faible, ceci permet de s'assurer de la validité du modèle utilisé.

### 2.3.3.2. Interprétation des résultats

Pour un sol homogène et pour le cas d'un système de mise à la terre composé d'une seule électrode, le calcul de la résistance a été effectué pour différentes résistivités du sol. Les résultats obtenus montrent le rôle de la résistivité sur la résistance de prise de terre. En effet, les sols avec une forte résistivité ne permettent pas d'avoir une résistance relativement faible et on peut voir ça sur la figure 2.8 où la valeur de la résistance augmente avec l'élévation de la résistivité du sol. Pour réduire la valeur de la résistance, plusieurs solutions s'offrent à nous comme augmenter la longueur de la tige ou bien le nombre d'électrodes et la distance entre elles.

Après augmentation de la longueur de la tige, les résultats obtenus confirment la réduction de la valeur de la résistance. En effet, pour  $1m$  à  $2m$  de longueur de l'électrode, nous remarquons une baisse de 42% de la valeur de la résistance et pour  $2m$  à  $3m$ , une réduction de 28%. La résistance continue à baisser avec

l'augmentation de la longueur de l'électrode, mais le taux de réduction diminue aussi. Ceci explique que pour des raisons de coût, il n'est pas nécessaire d'augmenter trop la longueur de la tige. Et en plus, d'après la littérature, l'augmentation de la longueur induit à l'augmentation de l'inductance de l'électrode, donc son impédance, ce qui est mauvais pour les courants hautes fréquences. En effet, l'inductance laisse passer les basses fréquences et bloque les hautes fréquences et à la différence de la simple résistance, l'impédance d'une inductance varie avec la fréquence.

Après augmentation du nombre d'électrodes, les résultats obtenus confirment la diminution de la valeur de la résistance. Par exemple, pour une à quatre électrodes, la résistance a baissé de 70%. D'après [22] l'augmentation du nombre d'électrodes diminue la résistance, mais pas d'un facteur inverse. La meilleure réduction observée est celle d'une à deux électrodes et en augmentant le nombre d'électrodes, le taux de réduction de la résistance diminue aussi. Ce moyen est le plus utilisé pour réduire la résistance, mais il nécessite de l'espace et augmente le coût de la mise à la terre.

On remarque aussi, avec l'augmentation du nombre de l'électrode, la distance entre elles augmente aussi vu qu'on a considéré cette distance le double de la longueur de la tige. Néanmoins, cette approche, comme augmenter le nombre d'électrodes, nécessite de l'espace et plus de coûts. D'après [22] la distance de 6m entre les électrodes est économiquement une limite du coût de la mise à la terre.

### **2.3.3.3. Calcul de la résistance de prise de terre dans un sol hétérogène**

Le calcul de la résistance d'une prise de terre nécessite l'utilisation des modèles qui se rapproche le plus de la réalité physique. Les simulations et le calcul de la résistance effectué et présenté dans cette partie se basent sur les modèles du sol composé de plusieurs couches. Dans notre cas, on se limite sur le modèle du sol à trois couches. Avec les simulations basées sur le calcul par EF, le nombre de couches qui peut être considéré n'est pas limité, mais nécessite plus de temps vu la complexité du calcul.

### 2.3.3.3.1. Sol à deux couches

Dans cette configuration du sol, deux cas s'offrent à nous :

**1<sup>er</sup> cas :** On considère un système de mise à la terre composé d'une électrode cylindrique verticale de rayon  $r = 0,0125m$  et de longueur  $l=3m$  dans un sol à deux couches. La première couche avec une résistivité  $\rho_1 = 100 \Omega m$  et une hauteur  $h = 4m$  et la deuxième couche de résistivité  $\rho_2 = 500 \Omega m$ .

En gardant les mêmes paramètres de la tige et on considère un deuxième modèle du sol d'une résistivité  $\rho_1 = 500 \Omega m$  et  $\rho_2 = 100 \Omega m$ .

La relation analytique, développée par Tagg [6], pour le calcul de la résistance d'une tige situé dans la première couche du sol est donnée comme suit :

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left[ \left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{2} \ln \left( \frac{\frac{nh}{l} + 1}{\frac{nh}{l} - 1} \right) \right] \quad (2.15)$$

$$\text{Avec } k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

Les valeurs de la résistance calculées analytiquement et par simulation ainsi que l'erreur relative sont données dans le tableau 2.6. La répartition surfacique du potentiel électrique dans le modèle 1 et 2 du sol est représentée dans la figure 2.26 et 2.27 respectivement.

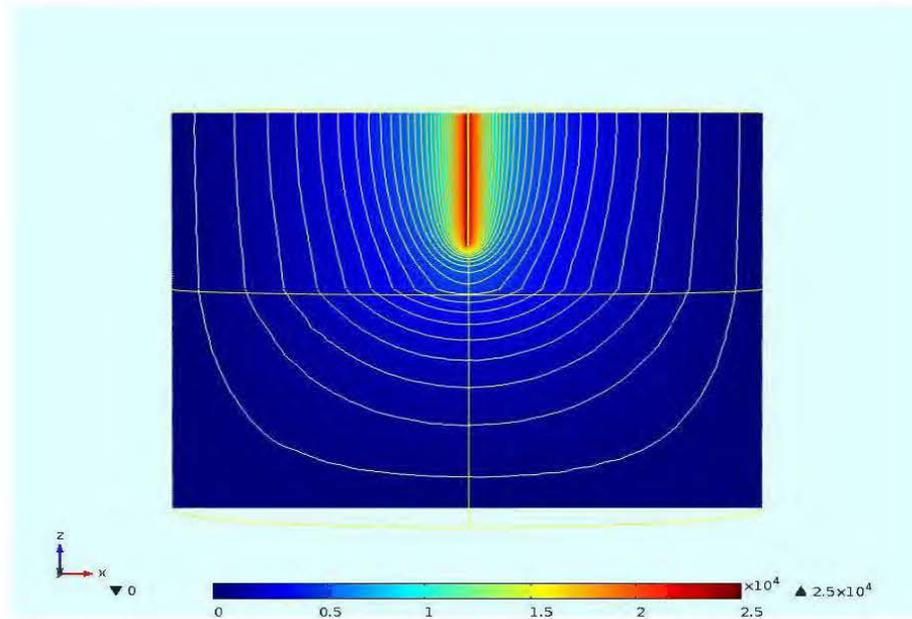


Figure 2. 26 Répartition surfacique du potentiel dans le premier modèle du sol lorsque l'électrode est dans la première couche

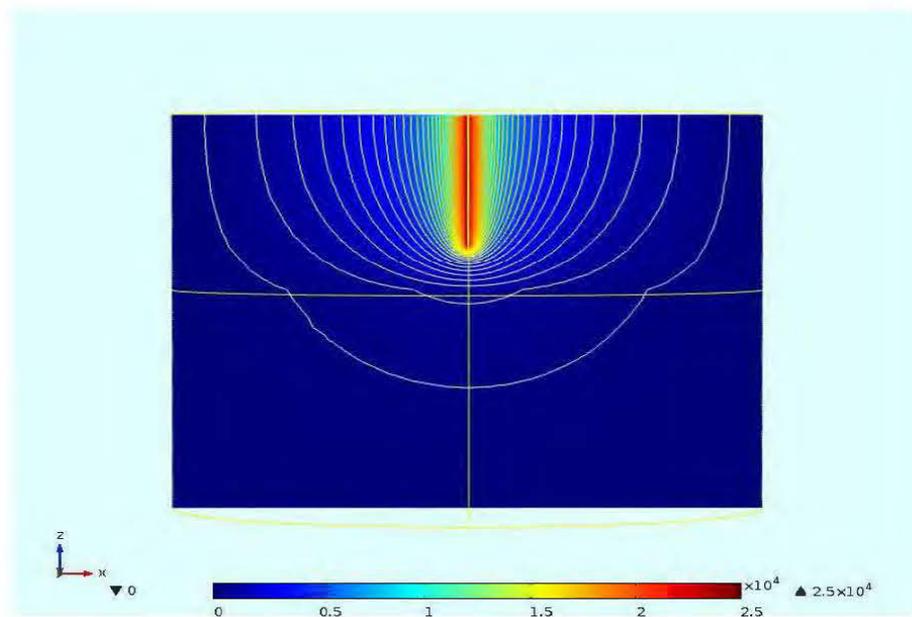


Figure 2. 27 Répartition surfacique du potentiel dans le deuxième modèle du sol lorsque l'électrode est dans la première couche

Tableau 2. 6 Valeurs de la résistance ( $\Omega$ ) dans un sol à deux couches lorsque l'électrode est dans la première couche

	Analytique	3D EF	Erreur relative
<b>Modèle 1</b>	36,33	34,63	4,67%
<b>Modèle 2</b>	141,72	140,51	0,85%

**2<sup>ème</sup> cas :** On garde les mêmes paramètres utilisés dans le cas précédent, mais on considère la hauteur de la première couche égale à  $2m$ . La répartition surfacique du potentiel électrique dans le modèle 3 et 4 du sol est représentée dans la figure 2.28 et 2.29 respectivement.

La relation analytique pour le calcul de la résistance d'une tige situé dans les deux couches du sol est donnée comme suit [6] :

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \frac{(1+K)}{\{(1-K)+2K\frac{h}{l}\}} \left[ \ln \frac{2l}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \ln \left( \frac{2nh+l}{(2n-2)h+l} \right) \right] \quad (2.16)$$

Les valeurs de la résistance calculées analytiquement et par simulation ainsi que l'erreur relative sont données dans le tableau 2.7.

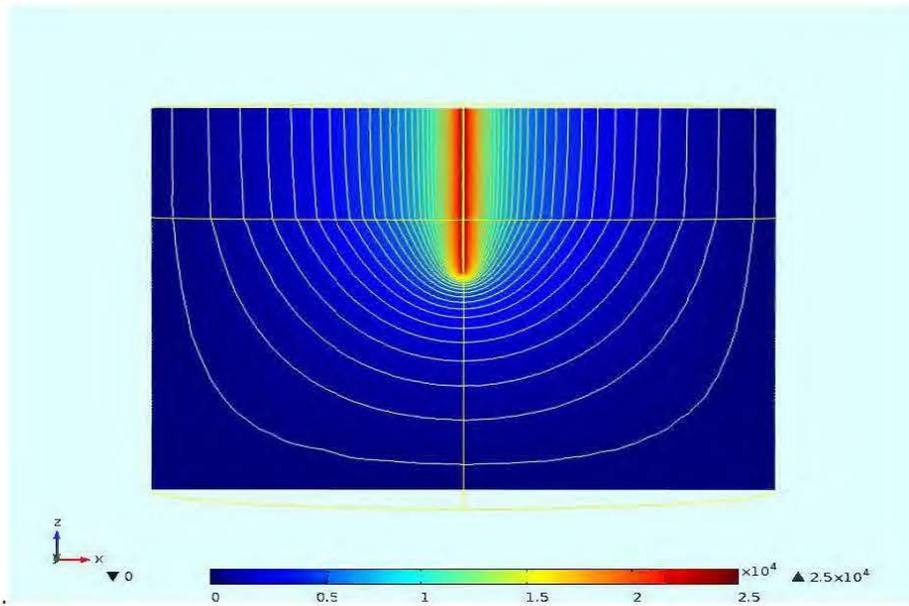


Figure 2. 28 Répartition surfacique du potentiel dans le modèle 3 du sol lorsque l'électrode est pénétrée dans les deux couches

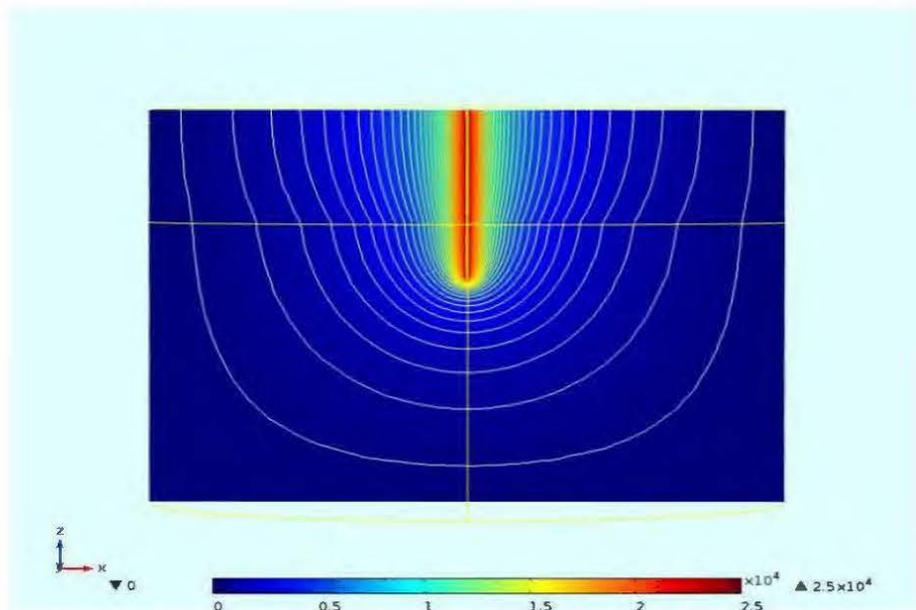


Figure 2. 29 Répartition surfacique du potentiel dans le sol 4 lorsque l'électrode est pénétrée dans les deux couches

Tableau 2. 7 Valeurs de la résistance ( $\Omega$ ) dans un sol à deux couches lorsque l'électrode est pénétrée dans les deux couches

	Analytique	3D EF	Erreur relative
<b>Modèle 3</b>	51,61	49,64	3,6%
<b>Modèle 4</b>	65,35	57,57	11,9%

#### 2.3.3.3.2. Sol à trois couches

Pour le modèle du sol à trois couches, nous allons garder les mêmes paramètres de l'électrode et nous allons voir son comportement en calculant sa résistance par la méthode 3D EF dans plusieurs cas de figure.

**1<sup>er</sup> cas :** Dans ce premier cas, nous considérons l'électrode dans la première couche du sol et nous calculons sa résistance pour différentes résistivités des couches. Le sol est composé d'une première couche de hauteur  $h=4m$  et une deuxième de hauteur  $h=2m$ . Les valeurs de la résistance pour différentes résistivités sont données dans le tableau 2.8 et la répartition du potentiel électrique dans le modèle 10 du sol est représentée dans la figure 2.30.

Tableau 2. 8 Valeurs de la résistance pour différentes valeurs de résistivité des couches lorsque l'électrode est dans la première couche du sol

	Résistivité couche 1 ( $\Omega.m$ )	Résistivité couche 2 ( $\Omega.m$ )	Résistivité couche 3 ( $\Omega.m$ )	Résistance ( $\Omega$ )
<b>Modèle 5</b>	100	500	1000	35,42
<b>Modèle 6</b>	100	1000	500	34,93
<b>Modèle 7</b>	500	1000	100	150,89
<b>Modèle 8</b>	500	100	1000	148,6
<b>Modèle 9</b>	1000	500	100	287,46
<b>Modèle 10</b>	1000	100	500	285,84

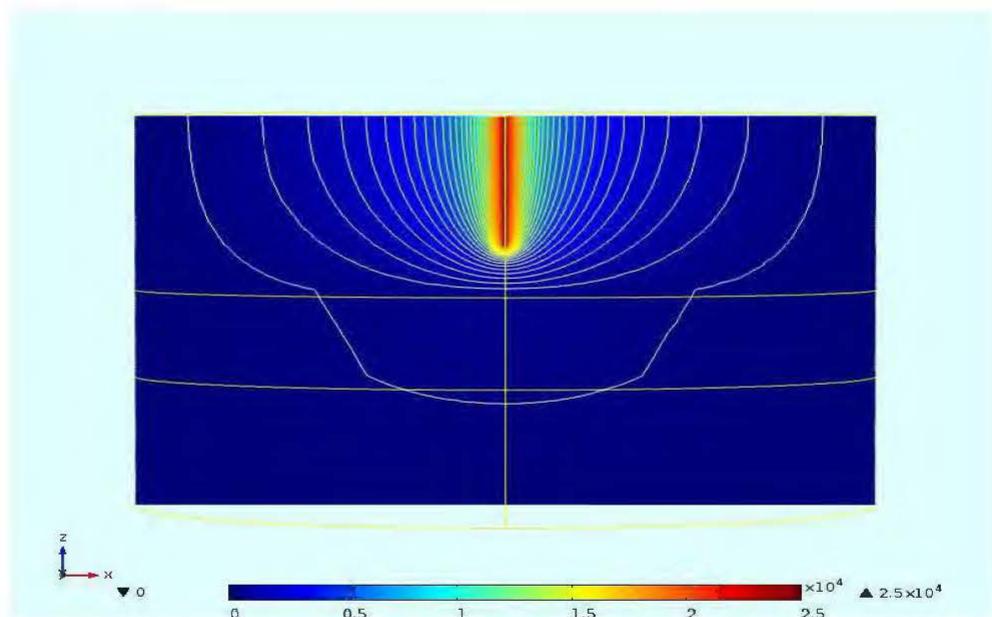


Figure 2. 30 Répartition du potentiel dans le modèle 10 du sol

**2<sup>ème</sup> cas :** Dans ce deuxième cas, nous considérons que l'électrode atteint la deuxième couche du sol et nous calculons sa résistance pour différentes résistivités des couches. Le sol est composé d'une première couche de hauteur  $h=2m$  et une deuxième de hauteur  $h=2m$ . Les valeurs de la résistance sont données dans le

tableau 2.9 et la répartition du potentiel électrique dans le modèle 16 du sol est représentée dans la figure 2.31.

Tableau 2. 9 Valeurs de la résistance pour différentes valeurs de la résistivité des couches lorsque l'électrode atteint la deuxième couche du sol

	Résistivité couche 1 ( $\Omega.m$ )	Résistivité couche 2 ( $\Omega.m$ )	Résistivité couche 3 ( $\Omega.m$ )	Résistance ( $\Omega$ )
<b>Modèle 11</b>	100	500	1000	52,03
<b>Modèle 12</b>	100	1000	500	53,19
<b>Modèle 13</b>	500	1000	100	180,08
<b>Modèle 14</b>	500	100	1000	66,89
<b>Modèle 15</b>	1000	500	100	201,59
<b>Modèle 16</b>	1000	100	500	72,15

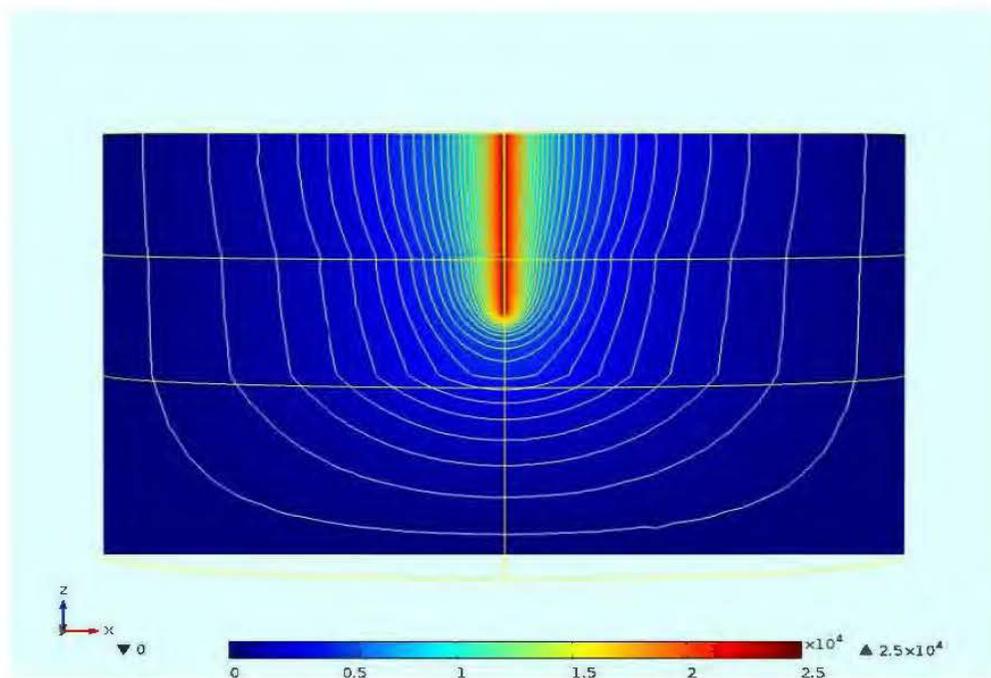


Figure 2. 31 Répartition du potentiel dans le modèle 16 du sol

**3<sup>ème</sup> cas :** Dans ce troisième cas, nous considérons que l'électrode atteint la troisième couche du sol et nous calculons sa résistance pour différentes résistivités des couches. Le sol est composé d'une première couche de hauteur  $h=1m$  et une

deuxième de hauteur  $h=1m$ . Les valeurs de la résistance sont données dans le tableau 2.10 et la répartition du potentiel électrique dans le modèle 22 du sol est représentée dans la figure 2.32.

Tableau 2. 10 Valeurs de la résistance pour différentes valeurs de la résistivité des couches lorsque l'électrode atteint la troisième couche du sol

	Résistivité couche 1 ( $\Omega.m$ )	Résistivité couche 2 ( $\Omega.m$ )	Résistivité couche 3 ( $\Omega.m$ )	Résistance ( $\Omega$ )
<b>Modèle 17</b>	100	500	1000	85,67
<b>Modèle 18</b>	100	1000	500	79,9
<b>Modèle 19</b>	500	1000	100	61,14
<b>Modèle 20</b>	500	100	1000	85,43
<b>Modèle 21</b>	1000	500	100	60,97
<b>Modèle 22</b>	1000	100	500	78,78

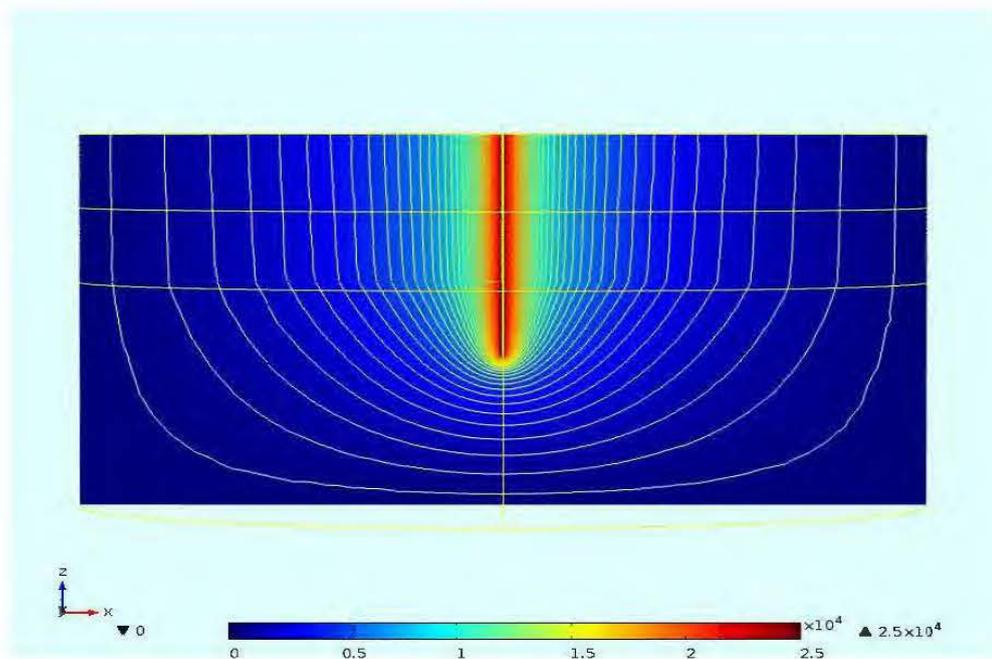


Figure 2. 32 Répartition du potentiel dans le modèle 22 du sol

#### 2.3.3.4. Interprétation des résultats

Pour un sol hétérogène, les résultats obtenus nous ont permis de constater l'influence des différentes résistivités des couches sur la résistance d'une prise de terre ainsi que la répartition du potentiel électrique. En effet, pour un sol à deux couches, nous avons pu observer :

- Une augmentation de la résistance de 12,6% dans le premier modèle par rapport à un sol homogène de résistivité  $100 \Omega.m$ . Même si la tige n'atteint pas la deuxième couche, la présence de cette dernière avec une résistivité 5 fois plus importante que la première rend la dissipation du courant plus difficile. La figure 2.26 nous donne une idée sur cette influence où on peut voir la déformation du champ de potentiel à la frontière avec la deuxième couche.
- Une diminution de la résistance de 8,4% dans le deuxième modèle par rapport à un sol homogène de résistivité  $500 \Omega.m$ . La présence d'une deuxième couche, avec une résistivité 5 fois moins importante que la première, facilite la dissipation du courant et on peut voir ça sur la figure 2.27, par l'ouverture de la courbure du champ de potentiel au niveau de la frontière avec la deuxième couche.
- Pour les modèles 3 et 4, lorsque la tige est émergée dans les deux couches du sol avec des résistivités différentes, le même phénomène se reproduit que le cas précédent. La différence de résistivité influence sur la dissipation du courant en augmentant ou diminuant la résistance de la prise de terre.

Pour le sol à trois couches, trois cas de figure sont possibles où plusieurs modèles ont été considérés. Les résultats obtenus nous ont permis de constater une variation de la résistance qui dépend de la résistivité des couches du sol. La différence de la valeur de la résistance entre les modèles choisis est importante comme on peut le voir dans le premier cas et diminue à chaque fois que la tige est en contact avec les couches du sol jusqu'à ce qu'elle devienne beaucoup moins importante comme le troisième cas.

## **2.4. Conclusion**

L'analyse du comportement d'un système de mise à la terre composé d'une ou plusieurs tiges cylindriques verticales a été réalisée pour différentes configurations du sol. Les valeurs de la résistance des tiges dans un sol homogène et hétérogène composé de deux couches ont été déterminées par des simulations basées sur la méthode des éléments finis et comparées avec celles trouvées analytiquement. Les erreurs relatives, étant données très faibles, nous ont permis de valider les modèles utilisés. Pour un sol hétérogène composé de trois couches de résistivité différente, les valeurs de la résistance ont été calculées par simulations basées sur la méthode des éléments finis. Les différentes résistivités entre les couches du sol nous ont permis de voir leur impact sur la valeur de la résistance ainsi que sur la répartition du potentiel.

## CHAPITRE III

### 3. ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE L'ÉLECTRODE PROPOSÉE

#### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier les performances d'une électrode, de forme géométrique complexe, en appliquant les mêmes paramètres utilisés pour les tiges cylindriques dans le chapitre précédent. Ce type d'électrode a été mis en place par l'entreprise Télébec S.E.C./Northern Tel après avoir constaté que plusieurs dérangements provoqués par des événements électriques ont été observés à des endroits bien précis sur son réseau de télécommunication. Les valeurs de sa résistance ont été déterminées par simulation basée sur la méthode des EF et comparées avec celles d'une tige conventionnelle utilisée par l'industrie. L'entreprise avait confirmé l'efficacité de cette électrode uniquement par une étude basée des échantillonnages effectués sur plusieurs sites. De ce faite, un avis scientifique théorique s'impose afin de valider les observations de l'entreprise de manière à modifier, si nécessaire, ses pratiques de travail et ainsi améliorer les performances du réseau de télécommunication.

#### 3.2. Caractéristique de l'électrode

L'électrode proposée, utilisée par l'entreprise de télécommunication, est un appareil protégé par le brevet n° 1330158. Le type du matériau utilisé pour sa fabrique est l'acier G40.21 44W et ses dimensions sont représentées dans la figure 3.1.

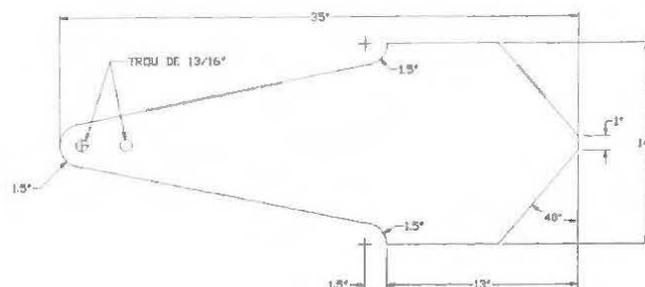


Figure 3. 1 L'électrode avec ses dimensions en pouce

### 3.3. Description du produit

La surface de contact au sol incluant son fil de raccord est d'environ  $6452 \text{ cm}^2$  (soit environ 5 fois plus de surface de contact qu'une tige conventionnelle). L'électrode est posée dans un sol non remué, à une profondeur d'environ  $2m$ . Elle réside en permanence dans une terre humide en dessous de la base du poteau, ce qui représente un endroit optimal pour une électrode. Cette plaque galvanisée est dotée d'un fil de raccord en cuivre étamé de diamètres variant selon les besoins de l'utilisateur offrant ainsi une très grande conductivité et une capacité d'absorption supérieure. Ce conducteur est fixé à l'électrode par une soudure exothermique qui assure une connexion :

- Permanent et robuste
- À basse résistance
- À l'épreuve de la corrosion
- Qui ne peut relâcher ou affaiblir avec l'âge

Les branchements proposés se font en étoile entre le réseau de distribution électrique et le réseau téléphonique, éliminant le risque de décharges d'un réseau à l'autre.

Étant boulonnée à la base du poteau avant son installation, l'électrode assume la double fonction d'un support de pied mécanique pour le poteau. Ceci stabilise le poteau et l'aide à maintenir sa verticalité. La forme en pieux de l'extrémité de l'électrode a pour but de faciliter sa pénétration dans le sol. La partie supérieure de l'électrode a été conçue afin de lui donner suffisamment de prise avec la base du poteau pour assurer un support mécanique adéquat. La figure 3.2 nous montre l'électrode installée en dessous de la base du poteau.

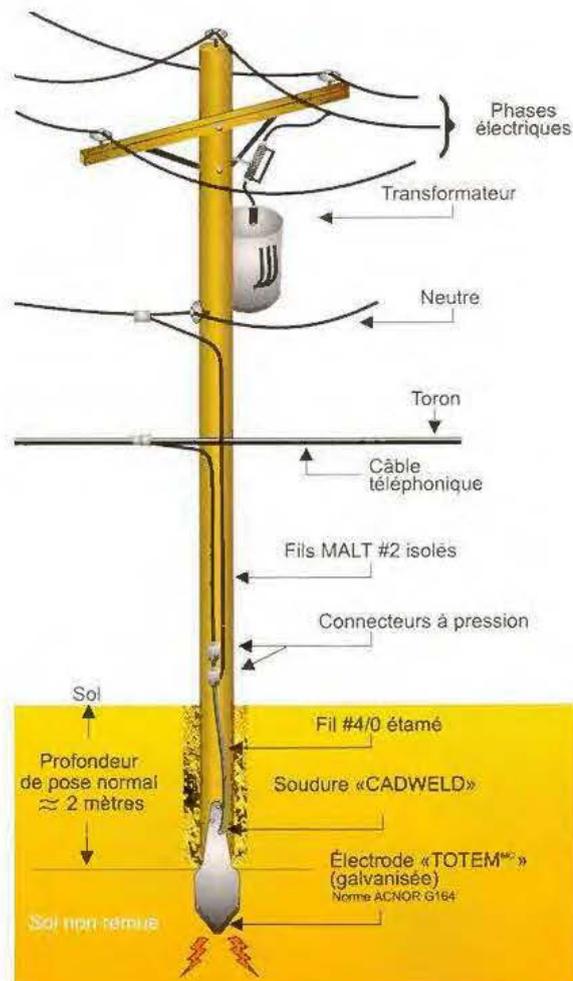


Figure 3. 2 L'électrode en dessous de la base du poteau

### 3.4. Installation de l'électrode

Bien que l'installation se fasse normalement lors de la pose initiale du poteau, il est possible de l'accomplir d'une manière différente pour des réseaux existants. La pose de l'électrode est faite à proximité du poteau déjà en place (à un minimum de 0,6m), comme montré sur la figure 3.3, tout en s'assurant de bien respecter les paramètres de profondeur du trou percé afin de ne pas mouvoir le sol environnant et pour ne pas changer les caractéristiques de l'installation. À l'aide d'une poutre d'enfoncement, l'électrode est enfoncée dans un sol non remué à une profondeur d'environ 2m. L'électrode réside en permanence dans une terre humide en dessous de la base du poteau où elle n'est pas affectée par des changements de température et d'humidité.



Figure 3. 3 L'électrode installée à proximité du poteau

### 3.4. Calcul analytique de la résistance de mise à la terre

Comme mentionné dans le chapitre 2, la résistance d'une prise de terre est un paramètre très important à déterminer pour évaluer les performances d'une électrode et calculer sa valeur analytiquement dépend de la forme géométrique. Les formules analytiques présentes dans la littérature sont souvent pour des formes simples donc pour notre cas il n'existe pas de relation qui nous permet de calculer la résistance de notre électrode. Néanmoins, il existe d'autres méthodes qui permettent d'obtenir un modèle équivalent de géométrie simple par rapport à celle de l'électrode proposée. Afin de déterminer ces paramètres, on s'est basé sur ces méthodes où on a procédé comme suit :

- Validation des données géométriques de l'électrode et qui, grâce à l'application d'un découpage, a permis d'obtenir un diamètre moyen de 146 mm pour cette électrode.
- Un échantillonnage qui a permis d'identifier la résistance de prise de terre ainsi que la résistivité du sol du système MALT, composé de cette électrode, installer à différents endroits sur le territoire de Télébec S.E.C./Northern Tel.
- Une fois ces données obtenues et en utilisant la méthode de calcul de la prise de mise à la terre à l'aide de la théorie des images pour une sphère, ça permet

d'obtenir un diamètre révisé équivalent pour une tige cylindrique de 0,125 *m*. En terme plus clair, de façon à pouvoir appliquer les calculs issus de la théorie des images en fonction dans l'industrie, les paramètres de surface de l'électrode ont été exprimés comme si elle était une tige cylindrique de 3 mètres de longueur. Raison de plus qui nous a poussés à choisir de faire l'étude dans le chapitre 2 pour les tiges cylindriques verticales.

Une multitude de configuration peuvent être utilisées pour notre étude comparative, cependant nous ne nous arrêterons qu'aux configurations choisies au deuxième chapitre avec une distance entre les électrodes de 4*m*.

Les résultats, du calcul analytique de la résistance des différentes configurations choisies, sont inclus dans le tableau 3.1. La relation (1.15) a été utilisée pour la géométrie à une tige seule (2.12) pour deux tiges parallèles (2.13) pour trois tiges en triangle et (2.14) pour quatre tiges en carrés.

Tableau 3. 1 Résultat analytique de la résistance de prise de terre

Résistivité du sol ( $\Omega \cdot m$ )	Résistance de prise de terre ( $\Omega$ )							
	Tige standard $d = 0.01575m$				Tige $d = 0.125m$			
	seule	parallèle	triangle	carré	seule	parallèle	triangle	carré
<b>30</b>	10,07	5,63	4,15	3,07	6,77	3,98	3,05	2,24
<b>100</b>	33,57	18,77	13,84	10,23	22,58	13,27	10,17	7,48
<b>500</b>	167,88	93,88	69,22	51,16	112,93	66,41	50,9	37,43
<b>1000</b>	335,76	187,77	138,44	102,33	225,86	132,82	101,82	74,86
<b>1500</b>	503,64	281,66	207,66	153,5	338,8	199,24	152,72	112,29
<b>2000</b>	671,52	375,54	276,89	204,66	451,73	265,65	203,62	149,72

Les résultats obtenus analytiquement nous montre bien que le comportement de l'électrode proposée est meilleur que ce de la tige conventionnelle. Ce meilleur comportement est expliqué par une valeur de résistance plus faible et qui démontre bien que lorsqu'il a une augmentation de la surface de contact de l'électrode mise dans le sol, il y a diminution de la résistivité de contact entre le sol et l'électrode.

Afin de procéder à une comparaison de ces résultats, une représentation graphique sera très intéressante pour bien observer l'évolution de la résistance de prise de terre par rapport à la croissance de la résistivité du sol. Cette observation va nous permettre aussi de voir s'il y a un seuil d'opération qui nous donnera une idée sur le choix d'utiliser l'électrode proposée en fonction de la résistivité du sol.

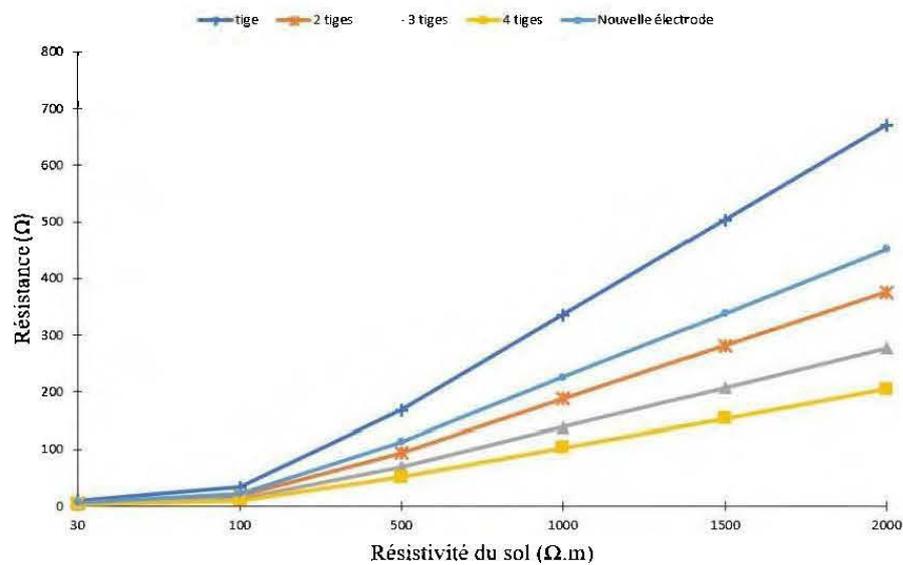


Figure 3. 4 Évolution de la résistance de l'électrode proposée vs des tiges standard

On peut clairement distinguer dans la figure 3.4 l'écart qui augmente entre les valeurs de la résistance de l'électrode et celles de la tige standard avec la croissance de la résistivité du sol. On remarque aussi qu'il est intéressant de choisir l'électrode proposée pour une résistivité du sol allant jusqu'à  $200 \Omega.m$ . Dépasser ce seuil, les

performances des autres configurations (deux tiges parallèles, trois tiges en triangle et quatre tiges en carré) deviennent meilleures.

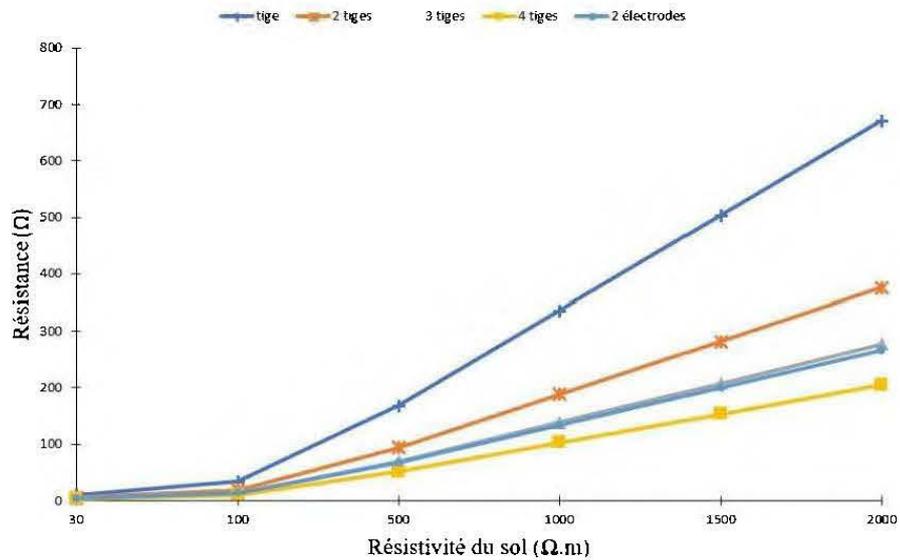


Figure 3. 5 Évolution de la résistance de deux électrodes proposées en parallèle vs des tiges standard

En utilisant deux électrodes en parallèle, nous remarquons une diminution importante de la résistance par rapport à celle d'une seule électrode. La figure 3.5 nous montre aussi qu'il est meilleur de choisir une configuration de deux électrodes en parallèle au lieu de deux tiges standard en parallèle et légèrement meilleur que trois tiges en triangle. À partir d'une résistivité du sol de 500 Ω.m, les performances des quatre tiges standard deviennent meilleures que celles des deux électrodes en parallèle.

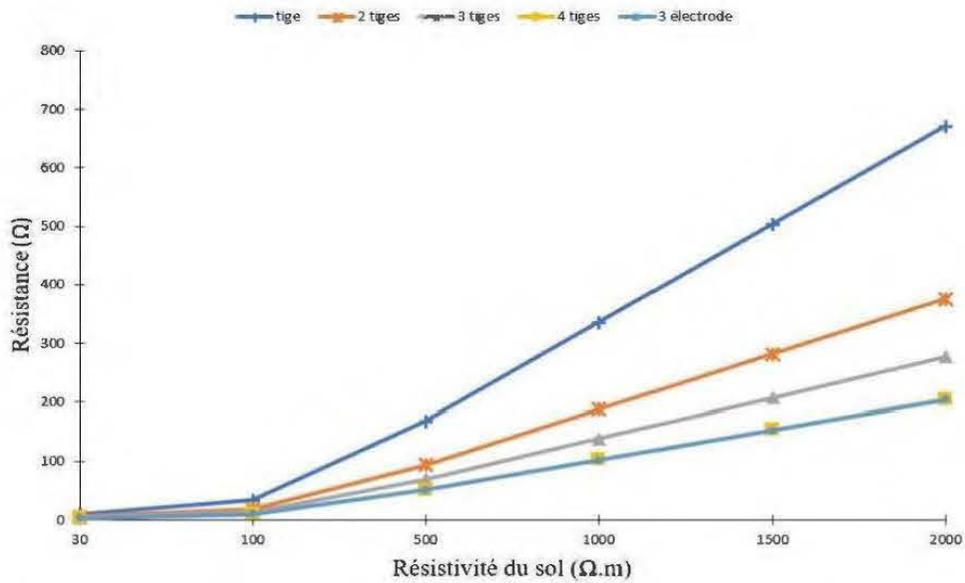


Figure 3. 6 Évolution de la résistance de trois électrodes proposées en triangle vs des tiges standard

La figure 3.6 nous montre que les performances des trois électrodes en triangle sont pareilles que celles des quatre tiges standard donc beaucoup meilleur que les autres configurations. On constate aussi qu'à partir d'une résistivité du sol de 500  $\Omega.m$  il est intéressant de choisir pour un système MALT une configuration de trois électrodes en triangle.

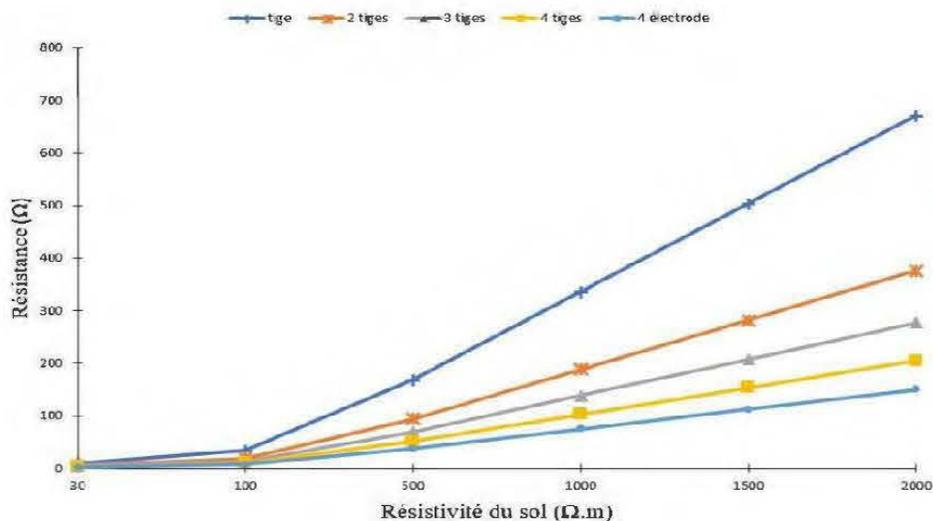


Figure 3. 7 Évolution de la résistance de quatre électrodes proposées en carré vs des tiges standard

Comme on peut le voir dans la figure 3.7, les performances des quatre électrodes en carré sont meilleures que celles des autres configurations des tiges, mais il est plus intéressant de choisir cette configuration qu'à partir d'une résistivité du sol égale à  $500 \Omega.m$ .

### 3.5. Résultat des simulations

Après avoir déterminé les valeurs de la résistance de prise de terre analytiquement de l'électrode proposée pour différente configuration et comparée avec celles d'une tige conventionnelle, nous passons à l'étude numérique basée sur la méthode des éléments finis où nous allons suivre la répartition du potentiel électrique ainsi que déterminé la résistance de l'électrode proposée dans un sol homogène et hétérogène.

#### 3.5.1. Comportement de l'électrode dans un sol homogène

On considère l'électrode dans un sol homogène de résistivité  $\rho = 100 \Omega.m$ , à une profondeur de  $2,33m$  et branchée à un fil en cuivre de diamètre  $1,1cm$ .

Un maillage extrêmement fin a été considéré comme on peut le voir sur la figure 3.8.

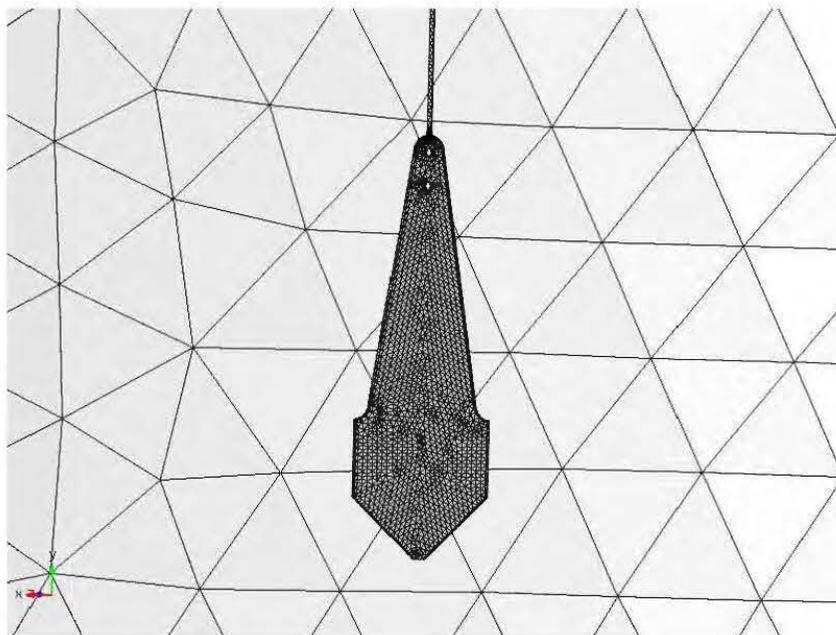


Figure 3. 8 Maillage du modèle

La figure 3.9 montre l'électrode proposée dans le sol avec l'apparition du potentiel électrique engendré par le courant injecté dans le sol.

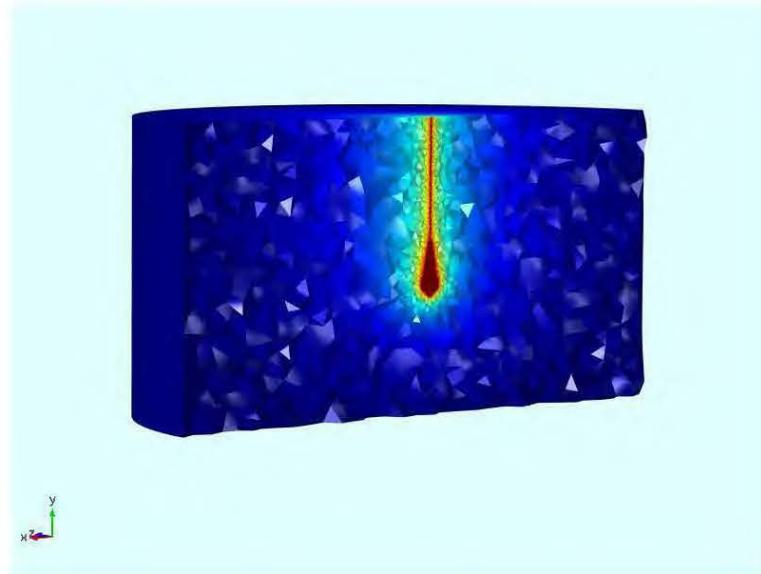


Figure 3. 9 l'électrode proposée dans un sol homogène avec l'apparition du potentiel électrique

Le potentiel électrique appliqué sur toute la surface de l'électrode est de  $25000V$  et on peut voir sa distribution surfacique dans la figure 3.10.

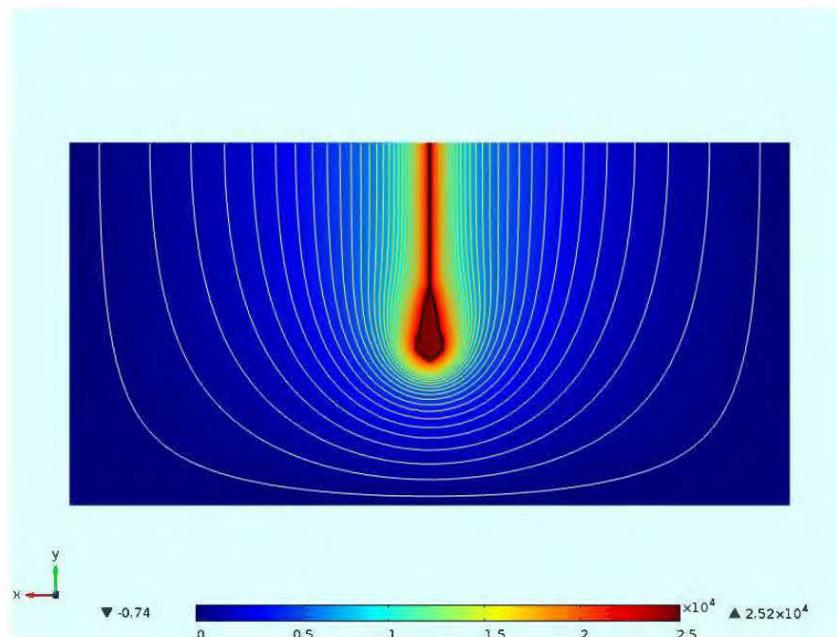


Figure 3. 10 Répartition surfacique du potentiel électrique dans le sol

Les valeurs de la résistance, déterminées par la méthode 3DEF, d'une tige standard et de l'électrode proposée pour différente configuration sont données dans le tableau 3.2.

Tableau 3. 2 Valeurs de la résistance obtenue par la méthode 3DEF

Résistivité du sol ( $\Omega.m$ )	Résistance de prise de terre ( $\Omega$ )							
	Tige standard $d=0.01575m$				Électrode proposée			
	seule	parallèle	triangle	carré	seule	parallèle	triangle	carré
<b>30</b>	9,92	5,41	3,93	3,1	7,44	3,43	2,04	1,51
<b>100</b>	33,08	18,06	13,1	10,33	24,82	11,44	6,82	5,04
<b>500</b>	165,41	90,31	65,51	51,69	124,38	57,24	34,11	25,51
<b>1000</b>	330,81	180,63	131,03	103,38	248,26	114,84	68,22	51,03
<b>1500</b>	496,26	270,96	196,55	155,08	372,44	171,73	102,34	75,69
<b>2000</b>	630,81	361,28	262,06	206,78	496,52	228,97	136,44	100,92

Les résultats obtenus par simulation nous montrent bien que le comportement de l'électrode est beaucoup meilleur que ce de la tige conventionnelle pareil que le calcul numérique. Afin de procéder à une comparaison de ces résultats, une deuxième représentation graphique, avec les nouvelles valeurs, sera faite pour bien observer l'évolution de la résistance de prise de terre par rapport à la croissance de la résistivité du sol.

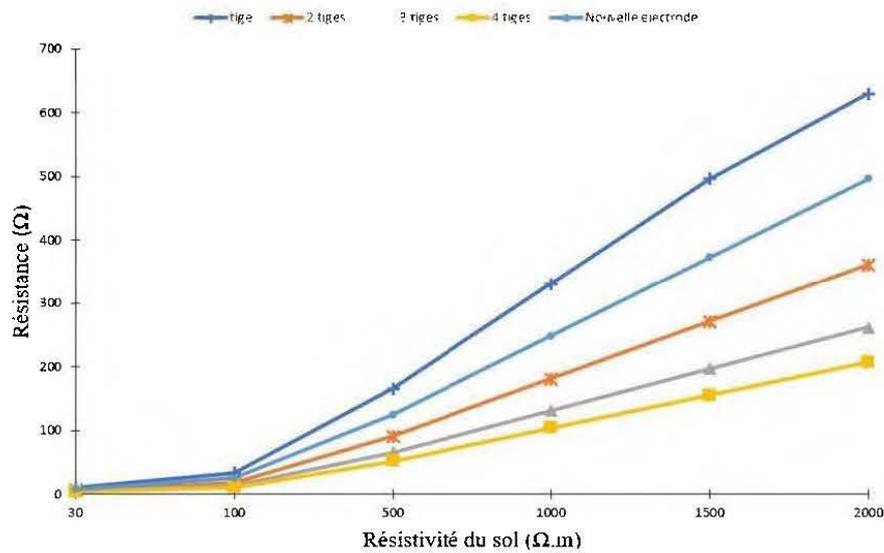


Figure 3. 11 Évolution de la résistance de l'électrode proposée vs des tiges standard

Les résultats obtenus par simulation, représentée dans la figure 3.11, montrent bien que le comportement de l'électrode proposée est meilleur que tige standard. L'évolution de la résistance, par rapport à la croissance de la résistivité du sol, est pareil que celle calculée analytiquement et confirme le choix de l'électrode proposée pour un sol allant jusqu'à 200  $\Omega.m$ .

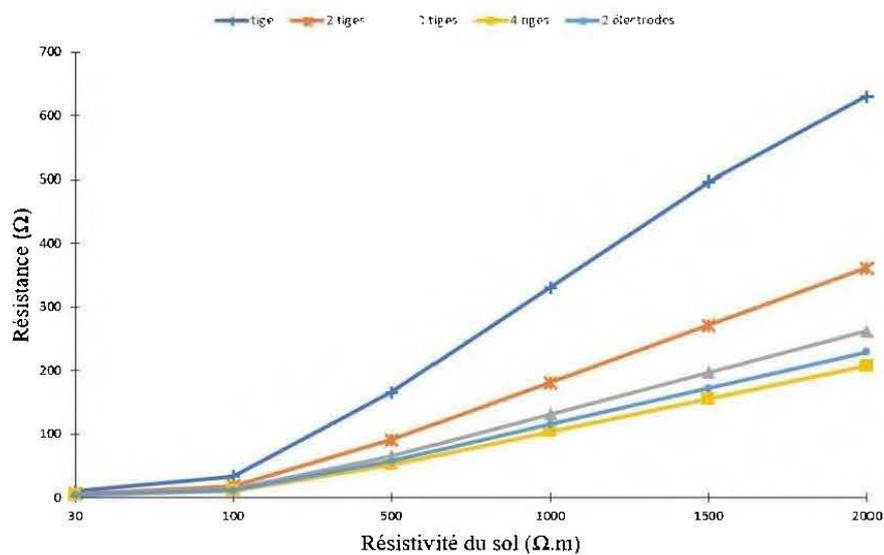


Figure 3. 12 Évolution de la résistance de deux électrodes proposées en parallèle vs des tiges standard

Les résultats des simulations de deux électrodes en parallèle, nous confirment la même observation du calcul analytique. La figure 3.12 nous montre aussi qu'il est beaucoup meilleur de choisir une configuration de deux électrodes en parallèle au lieu de deux tiges standard en parallèles et trois tiges en triangle. À partir d'une résistivité du sol de  $500 \Omega.m$ , les performances des quatre tiges standard deviennent meilleures que celles des deux électrodes en parallèle.

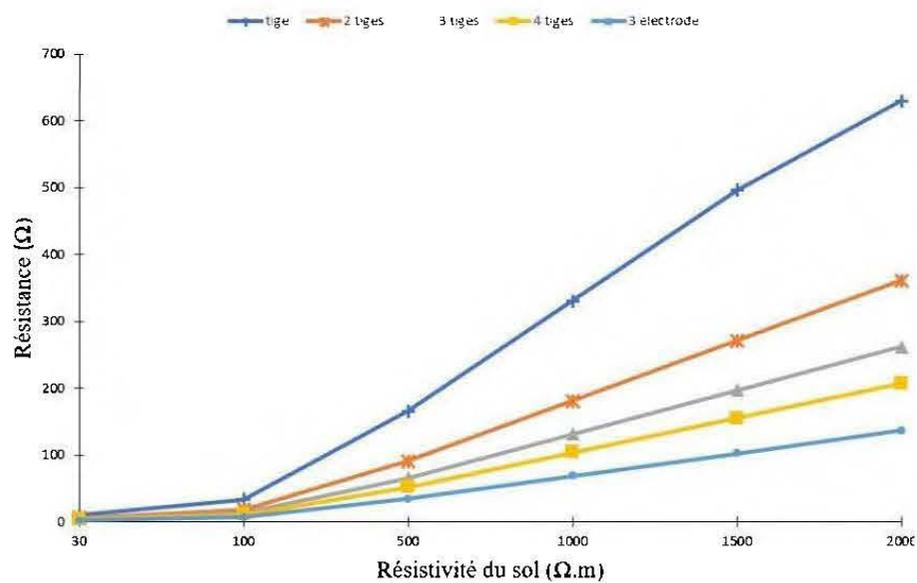


Figure 3. 13 Évolution de la résistance de trois électrodes proposées en triangle vs des tiges standard

La figure 3.13 nous montre que les performances de trois électrodes proposées en triangle sont meilleures que les autres configurations des tiges standard. On constate aussi qu'à partir d'une résistivité du sol de  $500 \Omega.m$  il est intéressant de choisir pour un système MALT une configuration de trois électrodes proposées en triangle.

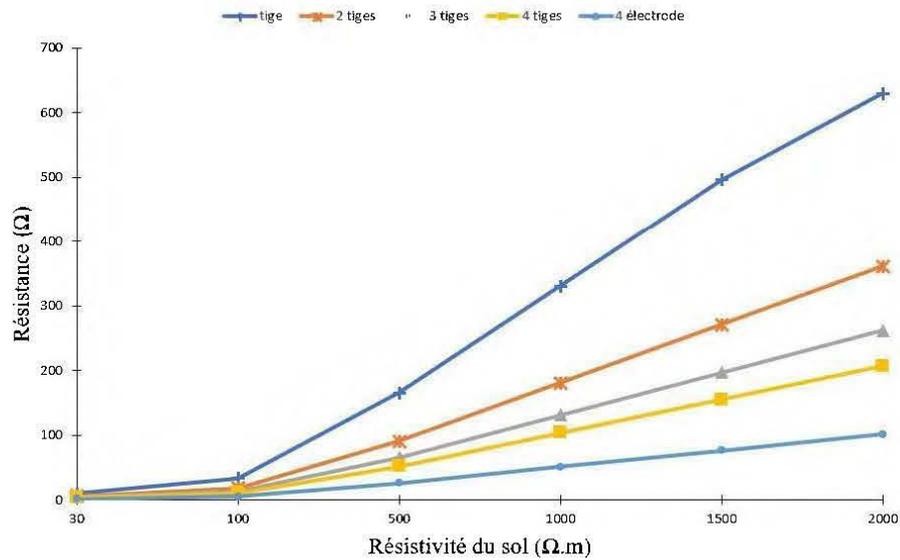


Figure 3. 14 Évolution de la résistance de quatre électrodes proposées en carré vs des tiges standard

Comme on peut le voir dans la figure 3.14, les performances des quatre électrodes proposées en carré sont meilleures que celles des autres géométries, mais il est plus intéressant de choisir cette configuration qu'à partir d'une résistivité du sol égale à  $1000 \Omega.m$ .

### 3.5.2. Comportement de l'électrode dans un sol hétérogène

#### 3.5.2.1. Sol à deux couches

**1<sup>er</sup> cas :** On considère un système de mise à la terre composée de l'électrode proposée dans un sol à deux couches. La première couche avec une résistivité  $\rho_1 = 100 \Omega.m$  et une hauteur  $h = 4m$  et la deuxième couche de résistivité  $\rho_2 = 500 \Omega.m$ .

En gardant les mêmes paramètres de la tige et on considère un deuxième modèle du sol d'une résistivité  $\rho_1 = 500 \Omega.m$  et  $\rho_2 = 100 \Omega.m$ .

Les valeurs de la résistance, déterminée par simulation, de l'électrode proposée ainsi que celle d'une tige standard dans le premier et le deuxième modèle du sol sont données dans le tableau 3.3. La répartition surfacique du potentiel électrique

dans le modèle 1 et 2 du sol est représentée dans la figure 3.15 et 3.16 respectivement.

Tableau 3. 3 Valeur de la résistance ( $\Omega$ ) dans un sol à deux couches lorsque l'électrode est dans la première couche

	<b>Électrode proposée</b>	<b>Tige standard</b>
<b>Modèle 1</b>	28,55	36,44
<b>Modèle 2</b>	141,29	155,15

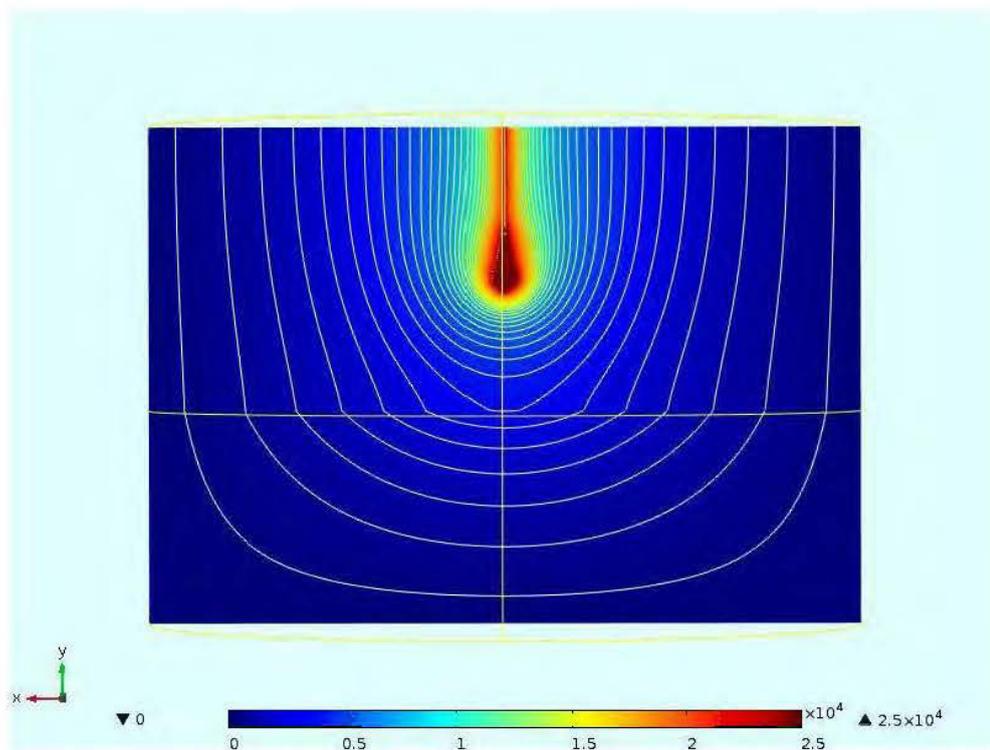


Figure 3. 15 Répartition surfacique du potentiel dans le premier modèle du sol lorsque l'électrode est dans la première couche

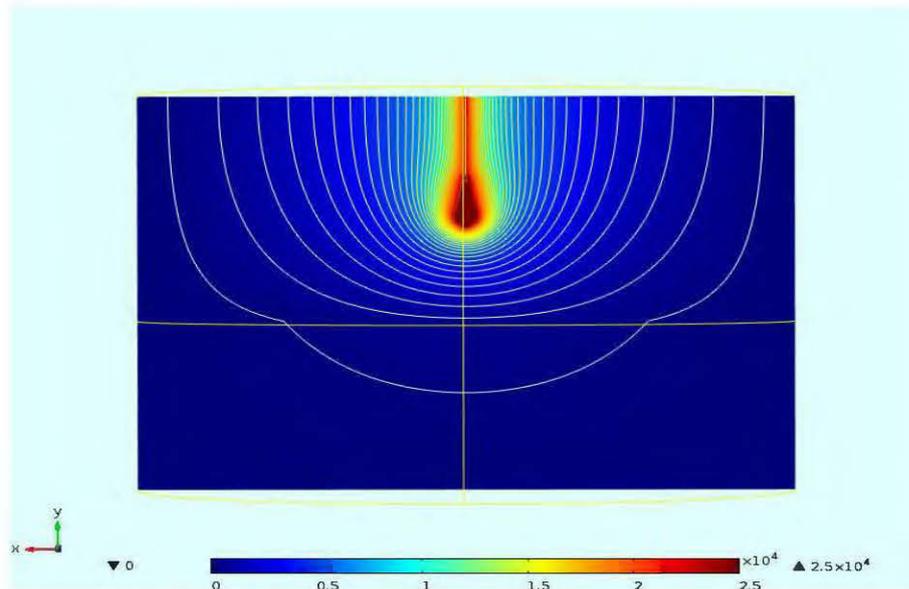


Figure 3. 16 Répartition surfacique du potentiel dans le deuxième modèle du sol lorsque l'électrode est dans la première couche

**2<sup>ème</sup> cas :** On garde les mêmes paramètres utilisés dans le cas précédent, mais on considère la hauteur de la première couche égale à  $2m$ . Les valeurs de la résistance, déterminées par simulation, de l'électrode proposée ainsi que celle d'une tige standard, dans le troisième et le quatrième modèle du sol sont données dans le tableau 3.4. La répartition surfacique du potentiel électrique dans le modèle 1 et 2 du sol est représentée dans la figure 3.17 et 3.18 respectivement.

Tableau 3. 4 Valeurs de la résistance ( $\Omega$ ) dans un sol à deux couches lorsque l'électrode est pénétrée dans les deux couches

	<b>Électrode proposée</b>	<b>Tige standard</b>
<b>Modèle 3</b>	35,58	52,59
<b>Modèle 4</b>	60,82	62,76

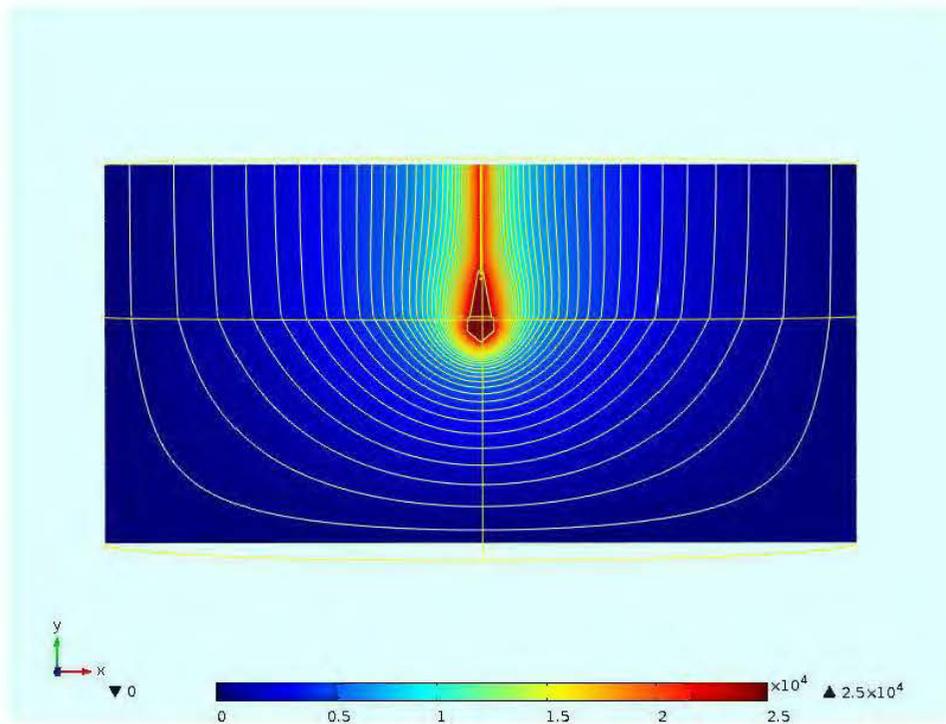


Figure 3. 17 Répartition surfacique du potentiel dans le modèle 3 du sol lorsque l'électrode est pénétrée dans les deux couches

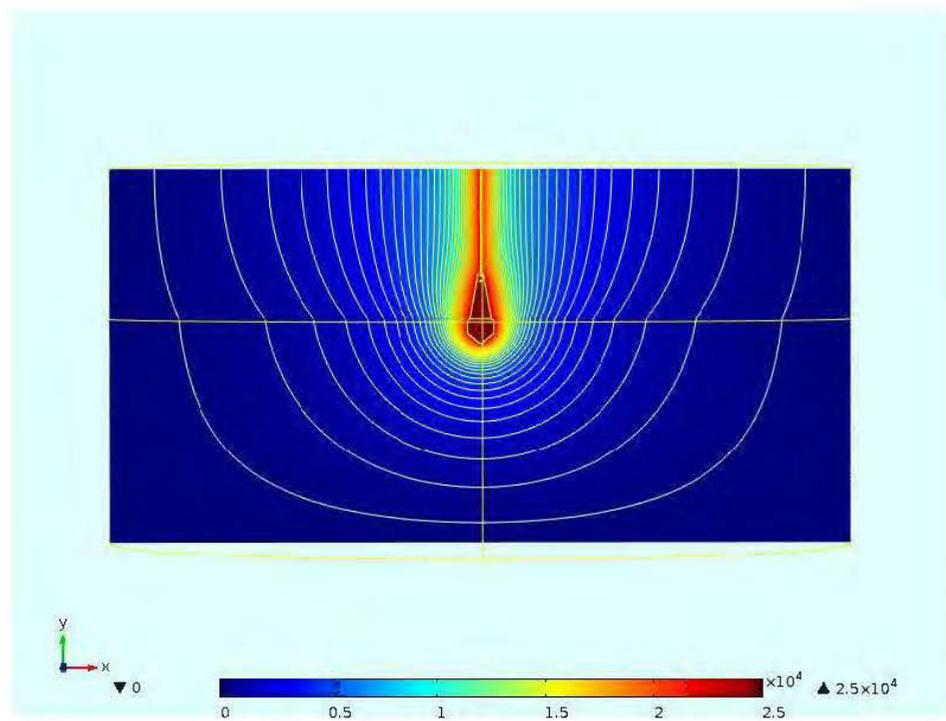


Figure 3. 18 Répartition surfacique du potentiel dans le sol 4 lorsque l'électrode est pénétrée dans les deux couches

### 3.5.2.2. Sol à trois couches

**1<sup>er</sup> cas :** Dans ce premier cas, nous considérons l'électrode dans la première couche du sol et nous calculons sa résistance pour différentes résistivités des couches. Le sol est composé d'une première couche de hauteur  $h=4m$  et une deuxième de hauteur  $h=2m$ . Les valeurs de la résistance sont données dans le tableau 3.5 et la répartition du potentiel électrique dans le modèle 10 du sol est représentée dans la figure 3.19.

Tableau 3. 5 Valeurs de la résistance pour différentes valeurs de résistivité des couches lorsque l'électrode est dans la première couche du sol

	Résistivité couche 1 ( $\Omega.m$ )	Résistivité couche 2 ( $\Omega.m$ )	Résistivité couche 3 ( $\Omega.m$ )	Résistance électrode proposée ( $\Omega$ )	Résistance tige standard ( $\Omega$ )
<b>Modèle 5</b>	100	500	1000	28,55	37,31
<b>Modèle 6</b>	100	1000	500	28,58	37
<b>Modèle 7</b>	500	1000	100	142,39	163,3
<b>Modèle 8</b>	500	100	1000	141,31	160,4
<b>Modèle 9</b>	1000	500	100	283,34	312,39
<b>Modèle 10</b>	1000	100	500	282,3	310,43

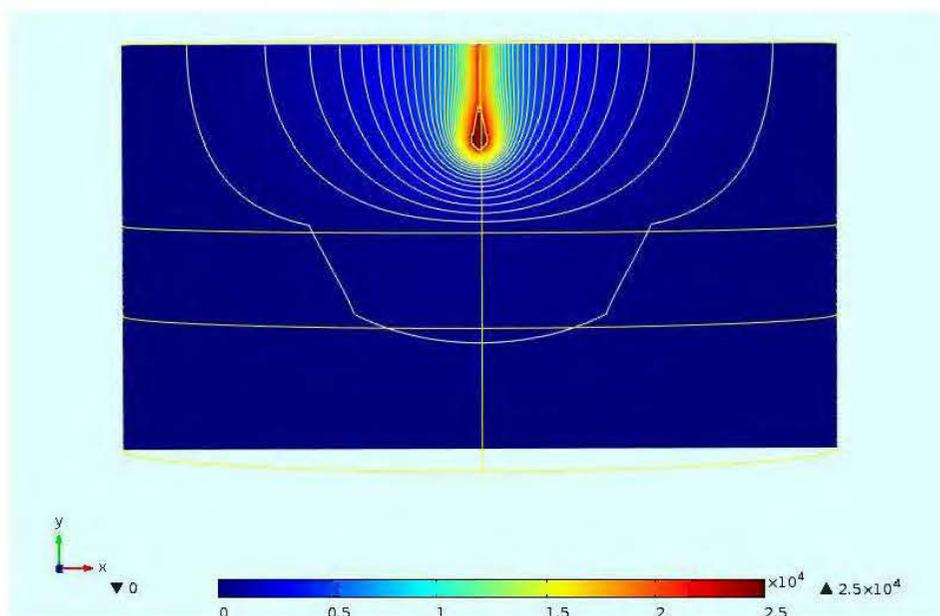


Figure 3. 19 Répartition du potentiel dans le modèle 10 du sol

**2<sup>ème</sup> cas :** Dans ce deuxième cas, nous considérons que l'électrode atteint la deuxième couche du sol et nous calculons sa résistance pour différentes résistivités des couches. Le sol est composé d'une première couche de hauteur  $h=2m$  et une deuxième de hauteur  $h=2m$ . Les valeurs de la résistance sont données dans le tableau 3.6 et la répartition du potentiel électrique dans le modèle 16 du sol est représentée dans la figure 3.20.

Tableau 3. 6 Valeurs de la résistance pour différentes valeurs de la résistivité des couches lorsque l'électrode atteint la deuxième couche du sol

	Résistivité couche 1 ( $\Omega.m$ )	Résistivité couche 2 ( $\Omega.m$ )	Résistivité couche 3 ( $\Omega.m$ )	Résistance électrode proposée ( $\Omega$ )	Résistance tige standard ( $\Omega$ )
<b>Modèle 11</b>	100	500	1000	38,27	54,64
<b>Modèle 12</b>	100	1000	500	40	56,25
<b>Modèle 13</b>	500	1000	100	168,26	194,99
<b>Modèle 14</b>	500	100	1000	63,76	71,44
<b>Modèle 15</b>	1000	500	100	214,62	220,24
<b>Modèle 16</b>	1000	100	500	75,34	77,89

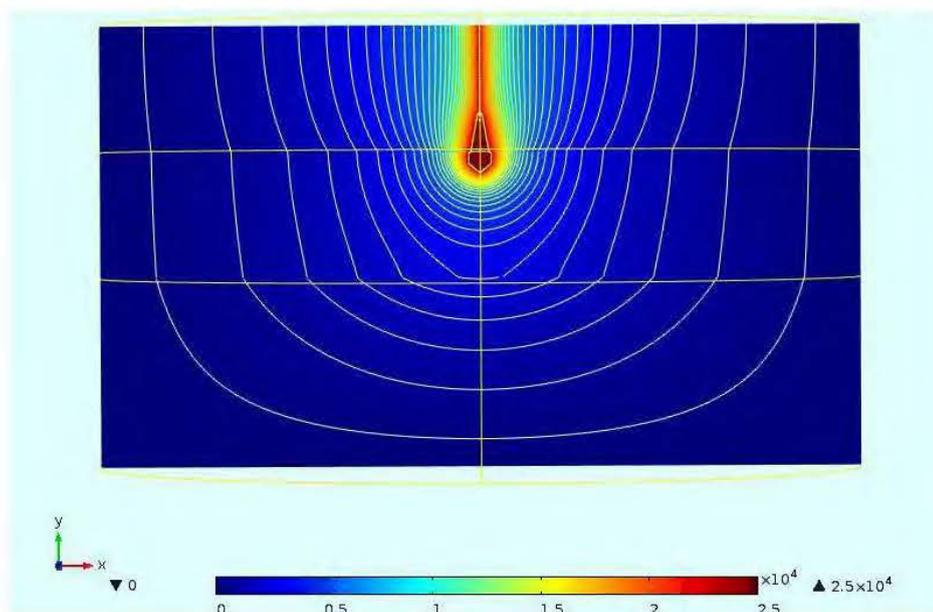


Figure 3. 20 Répartition du potentiel dans le modèle 16 du sol

**3<sup>ème</sup> cas :** Dans ce troisième cas, nous considérons que l'électrode atteint la troisième couche du sol et nous calculons sa résistance pour différentes résistivités des couches. Le sol est composé d'une première couche de hauteur  $h=1m$  et une deuxième de hauteur  $h=1m$ . Les valeurs de la résistance sont données dans le tableau 3.7 et la répartition du potentiel électrique dans le modèle 22 du sol est représentée dans la figure 3.21.

Tableau 3. 7 Valeurs de la résistance pour différentes valeurs de la résistivité des couches lorsque l'électrode atteint la troisième couche du sol

	Résistivité couche 1 ( $\Omega.m$ )	Résistivité couche 2 ( $\Omega.m$ )	Résistivité couche 3 ( $\Omega.m$ )	Résistance électrode proposée ( $\Omega$ )	Résistance tige standard ( $\Omega$ )
<b>Modèle 17</b>	100	500	1000	74,51	90,51
<b>Modèle 18</b>	100	1000	500	75,69	84,99
<b>Modèle 19</b>	500	1000	100	70,23	66,76
<b>Modèle 20</b>	500	100	1000	62,25	90,27
<b>Modèle 21</b>	1000	500	100	68,13	66,59
<b>Modèle 22</b>	1000	100	500	61,25	84,05

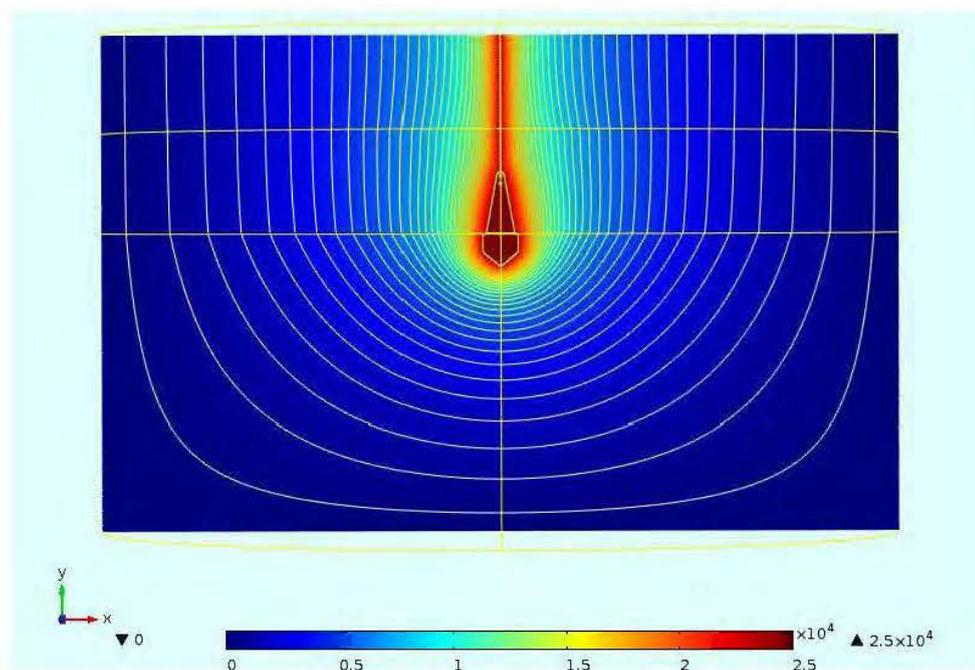


Figure 3. 21 Répartition du potentiel dans le modèle 22 du sol

### 3.6. Interprétation des résultats et comparaison

Le comportement de l'électrode proposée, pour la répartition du potentiel dans le sol, n'est pas très différent de celui de la tige standard, quoique nous remarquons une différence dans les valeurs de la résistance de terre. Dans un sol homogène, la résistance de l'électrode proposée a baissé de 25% par rapport à celle d'une tige standard et continue à baisser avec l'augmentation du nombre de l'électrode pour atteindre les 51%. On remarque aussi que la composition de deux électrodes, dans un sol de résistivité varie de 30 à 2000  $\Omega.m$ , a une résistance de terre meilleure que celle des deux tiges en parallèle de 36% et trois tiges en triangle de 12%. Les quatre tiges standards en carré ont une résistance meilleure que deux électrodes en parallèle seulement de 10%. Ces résultats nous montrent bien qu'il est plus intéressant de faire le choix de l'électrode proposée au lieu d'une tige standard dans un sol à faible résistivité. Pour les sols de forte résistivité, qui peut atteindre les 2000  $\Omega.m$ , l'ajout d'une électrode proposée en parallèle est suffisant pour réduire la résistance.

On peut voir aussi que la résistance de trois électrodes en triangle est plus basse que celle des quatre tiges standards de 34% donc pour une résistivité plus grande que 2000  $\Omega.m$ , il est plus judicieux de faire le choix de trois électrodes proposées en triangle. Ces résultats nous montrent bien l'importance de l'électrode proposée pour réduire la valeur de la résistance qui est due par une surface de contact plus grande avec le sol. Le choix de cette électrode permet aussi de réduire l'ajout des tiges standard et ainsi gagné de l'espace.

Pour un sol hétérogène, plusieurs modèles du sol ont été considérés avec différentes structures et résistivités distribuées à travers les couches. Les résultats obtenus nous ont permis de constater que les valeurs de la résistance de l'électrode proposée sont meilleures que celles d'une tige standard dans tous les modèles du sol choisis sauf les modèles 19 et 21. Ceci est expliqué par la profondeur de la tige standard dans la troisième couche qui est plus importante que celle de l'électrode proposée.

Afin d'avoir une idée plus claire sur l'étude comparative de l'électrode proposée avec les tiges conventionnelles, le tableau 3.8 présente une comparaison de leurs performances.

Tableau 3. 8 Tableau comparatif des performances

Caractéristiques	Électrode proposée	Tige conventionnelle
Superficie de contact avec le sol	$\approx 0,65 \text{ m}^2$	$\approx 0,13 \text{ m}^2$
Raccordement du conducteur MALT	Soudure CADWELD (sans entretien)	Attache mécanique (entretien requis)
Positionnement dans le sol	Sous le poteau (dissimulé)	Piquet dépasse à la surface du sol
Humidité du sol environnant	100% optimale (2m sous terre)	$\approx 70\%$ optimale (sol plus sec ou gelé à la surface)
Qualité de la prise avec la terre	Prise avec un sol non remué	Prise avec un sol remué (à éviter)
Offre un support mécanique (stabilise le poteau)	Oui	Non applicable
Profil résistif	Résistance plus faible (meilleure dissipation)	Résistance plus élevée

### 3.7. Conclusion

Dans ce chapitre, une description de l'électrode proposée a été présentée ainsi que ses caractéristiques et la méthode d'installation. Une évaluation de son comportement a été réalisée dans plusieurs modèles du sol basé sur le calcul de la résistance. Un modèle équivalent de géométrie simple par rapport à l'électrode proposée a permis d'avoir des valeurs de la résistance analytiquement et comparé avec celles d'une tige standard. Par la suite des simulations basées sur la méthode EF nous ont permis d'observer la répartition du potentiel électrique dans le sol et

de déterminer les valeurs de la résistance de l'électrode proposée selon les différentes résistivités distribuées à travers les couches du sol. Les résultats obtenus nous confirment que le comportement de cette électrode est meilleur que celui d'une tige standard, utilisé par l'entreprise de télécommunication, avec des valeurs de résistance plus faible.

## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement d'une électrode, dont la particularité est sa forme géométrique, dans plusieurs modèles de sol dans le but de valider les résultats des essais obtenus par l'entreprise "Télébec S.E.C./Northern Tel" suite aux relevés pris sur divers échantillons placés sur plusieurs sites.

Pour ce faire, nous avons tout d'abord effectué une série de simulations, basée sur la méthode des EF, sur plusieurs configurations de tiges standards afin de déterminer leurs valeurs de résistance respectives. Afin de valider les modèles choisis pour les simulations, nous avons comparé ces résultats avec les divers modèles analytiques associés.

Par la suite, nous avons étudié le comportement de l'électrode proposée par des simulations, en gardant les mêmes modèles de sol choisis dans les premières étapes, et nous avons déterminé les valeurs de sa résistance. Une fois cette étape d'analyse effectuée, les résultats obtenus nous ont permis de faire une étude comparative où nous en concluons que l'électrode proposée présente un meilleur profil de résistance que celui d'une tige standard dans un sol homogène et hétérogène.

Cette électrode répond au besoin de l'entreprise Télébec S.E.C./Northern Tel et grâce à elle, les systèmes MALT sont plus sécuritaires et performants. L'étude présentée dans ce mémoire confirme en partie l'efficacité de ce produit et une phase d'optimisation devrait être considérée afin de rendre sa commercialisation envisageable.

## RECOMMANDATIONS

Nous avons abordé dans ce mémoire une partie du domaine de mise à la terre qui est la détermination de la résistance de terre. Ce domaine est complexe et vaste, cela nécessite qu'on lui consacre le plus de recherche possible.

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

- Déterminer analytiquement la formule de la résistance de cette électrode qui est de forme géométrique complexe.
- Déterminer analytiquement la résistance de l'électrode dans un sol hétérogène.
- Étudier la réponse transitoire de l'électrode sous l'effet d'une décharge électromagnétique (Foudre) ou un courant de défaut très élevé.
- Étudier le comportement thermique de l'électrode.

## Références

1. Zaborszky, J., *Efficiency of Grounding Grids with Nonuniform Soil [includes discussion]*. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, 1955. 74(3): p. 1230-1233.
2. Kostic, M. and G. Shirkoohi, *Numerical analysis of a class of foundation grounding systems surrounded by two-layer soil*. IEEE transactions on power delivery, 1993. 8(3): p. 1080-1087.
3. Dawalibi, F., J. Ma, and R. Southey, *Behaviour of grounding systems in multilayer soils: a parametric analysis*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994. 9(1): p. 334-342.
4. Ma, J., F. Dawalibi, and W. Daily, *Analysis of grounding systems in soils with hemispherical layering*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993. 8(4): p. 1773-1781.
5. Tagg, G., „*Earth Resistance*.“ Gorge Newnes Limited. 1964, London.
6. Tagg, G. *Measurement of earth-electrode resistance with particular reference to earth-electrode systems covering a large area*. in *proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1964. IET.
7. Dwight, H., *Calculation of resistances to ground*. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1936. 55(12): p. 1319-1328.
8. Kiessling, F., et al., *Overhead power lines: planning, design, construction*. 2014: Springer.
9. Liew, A. and M. Darveniza. *Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths*. in *Proceedings of the Institution of electrical Engineers*. 1974. IET.
10. Sunde, E., *Earth conduction effects in transmission systems*. 1968.
11. Schwarz, S., *Analytical Expressions for the Resistance of Grounding Systems [includes discussion]*. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, 1954. 73(2): p. 1011-1016.

12. Dular, P., W. Legros, and A. Nicolet, *Coupling of local and global quantities in various finite element formulations and its application to electrostatics, magnetostatics and magnetodynamics*. IEEE Transactions on Magnetics, 1998. **34**(5): p. 3078-3081.
13. V Sabariego, R., et al. *Perturbation finite element method for the analysis of earthing systems with vertical and horizontal rods*. in *Proceedings of the 6ème Conférence Européenne sur les Méthodes Numériques en Electromagnétisme (NUMELEC2008)*. 2008. Liege.
14. Lorentzou, M., A. Kladas, and N. Hatziaargyriou, *Finite element modelling of grounding systems considering electrode geometry effects*. IEEE transactions on magnetics, 1999. **35**(3): p. 1757-1760.
15. Mitton, T. and R. Watson. *Practical Testing of Grounding Systems by Current Injection*. in *CDEGS User Meeting*. 2005.
16. CHOISEAU, D. and G. COURTIAL, *Postes à haute et très haute tensions: Construction et équipements*. Techniques de l'ingénieur. Génie électrique, 1995. **9**(D4574): p. D4574. 1-D4574. 19.
17. Slaoui Hasnaoui, F., *Estimation des paramètres par la méthode de régression rigide combinée avec l'analyse des paramètres statistiques pour l'interprétation des mesures de résistivités apparentes des modèles de sol à n-couches*. 2003, École de technologie supérieure.
18. Papaiz Garbini, G., *Contribution au calcul des élévations de potentiel de sol en contexte ferroviaire*. 2015, Paris 11.
19. Tabbagh, A., C. Camerlynck, and P. Cosenza, *Numerical modeling for investigating the physical meaning of the relationship between relative dielectric permittivity and water content of soils*. Water Resources Research, 2000. **36**(9): p. 2771-2776.
20. Tabbagh, A., et al., *Numerical modeling of the role of water and clay content in soils' and rocks' bulk electrical conductivity*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2002. **107**(B11).
21. Saarenketo, T., *Electrical properties of water in clay and silty soils*. Journal of applied geophysics, 1998. **40**(1-3): p. 73-88.

22. Vijayaraghavan, G., M. Brown, and M. Barnes, *Practical grounding, bonding, shielding and surge protection*. 2004: Elsevier.
23. Georges, S., *Évaluation de l'effet de la mer et du contrepoids sur le profil de la tension d'un système de mise à la terre d'une ligne de transport d'énergie à haute tension dans un sol résistif*. 2001, École de technologie supérieure.
24. Howe, G., *On the capacity of radiotelegraphic antennae*. *The Electrician*, 1914. **73**: p. 829-832.
25. Nahman, J. and V. Djordjević, *Resistance to earth of substation earth electrodes in uniform and two-layer soils*. *Electrical Engineering*, 1997. **80**(5): p. 337-342.
26. Arnautovski-Toseva, V. and L. Greev, *Electromagnetic analysis of horizontal wire in two-layered soil*. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2004. **168**(1-2): p. 21-29.
27. Valencia, M., F. Luz, and P. Dular, *Analytical and finite element modeling of grounding systems*. 2007.
28. Note du cour du professeur Fouad Slaoui Hasnaoui