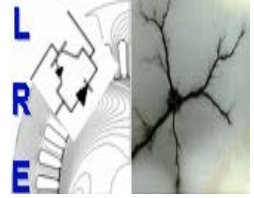




Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Mémoire de
Master en Electrotechnique

Présenté par
GHALEM Farouk

Intitulé

**Détermination de la résistance de
l'électrode de mise à la terre enterrée dans
un sol à stratification inclinée**

Soutenu le 17 juin 2015 à l'ENP

Membres du Jury d'examen

Président	M. TEGUAR	Professeur à l'ENP
Rapporteur	M. TEGUAR	Professeur à l'ENP
Examineurs	A. HELLAL	Professeur à l'ENP
	K. BOUGHRARA	Maître de Conférences à l'ENP

ENP 2015

Resumé

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur le calcul numérique de la résistance de mise à la terre par le biais du logiciel COMSOL Multiphysics version 4.3. Nous avons entrepris l'étude et la simulation des différents systèmes de terre, utilisés en courant continu à haute tension, à savoir une tige verticale, et plusieurs tiges verticales dans un sol homogène, ou à stratification verticale. Une technique basée sur les approximations successives et utilisant la courbe de la résistivité équivalente normalisée a été mise au point. Elle permet de remplacer un sol multicouche par un sol homogène. Les résultats que nous avons obtenus sont comparés à ceux tirés analytiquement. La validation des calculs est faite avec une marge de tolérance fixée à 10%.

Mots clés : Mise à la terre, résistivité du sol, résistance de terre, Comsol, sol homogène, sol multicouche, résistivité équivalente normalisée.

Abstract

The work presented in this thesis deals with the use numeric calculation of ground resistance using COMSOL *Multiphysics* v.4.3 software. We have carried out the study and the simulation of different earth systems, used in high voltage direct current, namely a vertical rod, spheroidal rod and multiple rod grounding in homogenous soil, or vertical stratified soil. A technique based on successive approximations using the curve of the normalized equivalent resistivity has been developed. This technique allows to replace a multi-layers earth by a homogeneous one. The results we obtained are compared to those derived analytically. The validation of calculations is made with a tolerance marge fixed at 10%.

Key words : Ground resistance, soil resistivity, rod resistance, Comsol, homogenous soil, multi-layers earth, normalized equivalent resistivity.

المخلص

يركز العمل المقدم في هذه الأطروحة على الحساب العددي لمقاومة التأسيس بواسطة برنامج كومسول الإصدار 4.3. قمنا بدراسة ومحاكاة النظم الأرضية المختلفة المستخدمة في ذات التوتر العالي ذو التيار المستمر، باستعمال مسرى ارضي عمودي، مسرى ارضي كرواني شبيه بالكرة والعديد من القضبان الأرضية العمودية في أرض ذات مقاومة متجانسة وكذا ذات طبقات عمودية أو مائلة. قد تم تطوير تقنية تقوم على التقريبات المتعاقبة باستخدام منحني المقاومة المكافئة الموحدة والتي تمكننا من تلخيص الطبقات الأرضية الي طبقة مكافئة متجانسة. تتم مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع تلك المستمدة من العلاقات التحليلية مع التحقق من صحة نسبة الارتباب المسموحة والمقدرة ب 10٪

كلمات ذات دلالة: التأسيس أو المنظومة الأرضية، كومسول، مقاومة الأرض، أرضية متجانسة، أرضية ذي عدة طبقات، أرضية مائلة، المقاومة المكافئة الموحدة.

Table des matières

Contenu	i
Liste des Figures	iii
Liste des Tableaux	iv
Abréviations	v
Canstantes Physiques	vi
Symboles	vii
1 Généralités sur les SMLT	3
1.1 Introduction	3
1.2 Définitions	3
1.2.1 Prise de terre	3
1.2.1.1 Mise à la terre	4
1.2.1.2 Masse	4
1.2.1.3 Réseau de terre	4
1.2.1.4 Conception d'un reseau de terre	4
1.2.1.5 Conducteur de terre	5
1.2.2 Rôle des systèmes de mise à la terre	5
1.2.3 Critères de conception d'une électrode de mise à la terre	6
1.2.3.1 Adéquation de performance	6
1.2.3.2 Adéquation de fiabilité	6
1.2.3.3 Adéquation des effets sur l'environnement	7
1.2.4 Conduction du courant électrique dans le sol	7
1.2.5 Caractéristiques électriques du sol	8
1.2.5.1 Résistivité	8
1.2.5.2 Permittivité du sol	11
1.2.5.3 Perméabilité du sol	12
2 Méthodologie et évaluation de la précision de calcul de la résistance	13
2.1 Introduction	13
2.2 Méthodologie	13
2.3 Conception et mise en œuvre du logiciel de simulation(logiciel COMSOL)	14
2.4 Tige verticale dans un sol homogène	16
2.5 Conditions aux limites	18

Table des figures

1.1	Réseau de transport et mise à la terre de pylônes et de postes	6
1.2	Effet d'humidité, température et concentration des sels sur la résistivité du sol . .	10
2.1	Maillage du modèle	15
2.2	Modèle résolu	16
2.3	Modèle axisymétrique du sol avec une tige verticale	17
2.4	Neumann	20
2.5	Dirichlet	21
2.6	Distribution latérale du potentiel le long de la surface pour une électrode sphéroïdale dans un sol homogène	22
2.7	Distribution latérale du champ électrique le long de la surface pour une électrode sphéroïdale dans un sol homogène	22
2.8	Distribution verticale du potentiel le long d'axe de symétrie pour une électrode sphéroïdale dans un sol homogène	23
2.9	Distribution verticale du champ électrique le long d'axe de symétrie pour une électrode sphéroïdale dans un sol homogène	23
3.1	Type-1 de la couche inclinée de la terre	26
3.2	Type-2 de la couche inclinée de la terre, en forme de V	27
3.3	Type-2 de la couche inclinée de la terre, en forme de V inversé	27
3.4	Modèle axisymétrique d'une tige verticale dans un sol incliné composé de deux couches	28

Liste des tableaux

1.1	Résistivités moyennes des différents types de sol	11
2.1	Effets des conditions aux limites du modèle sur l'estimation de la résistance du sol	17
3.1	$D=18\text{m}$ (90% de L); $\rho_1=100 \Omega\cdot\text{m}$ et $\rho_2=200 \Omega\cdot\text{m}$	29
3.2	$D=30\text{m}$ (150% de L); $\rho_1=100 \Omega\cdot\text{m}$ et $\rho_2=200 \Omega\cdot\text{m}$	29
3.3	$D=40\text{m}$ (200% de L); $\rho_1=100 \Omega\cdot\text{m}$ et $\rho_2=200 \Omega\cdot\text{m}$	30

Abréviations

SMLT	S ystème de M ise à L a T erre
HVDC	H igh V oltage D irect C urrent
CCHT	C ourant C ontinu H aute T ension
VSC	V oltage S ource C onverters
CST	C onvertisseur de S ource T ension
LCC	L ine C ommutated C onverters
FEM	F init E lement M ethod
MEF	M éthode des E léments F inis
CL	C ondition au L imite
SLT	S chémas des L iaisons T erre
PDE	P artical D ifferential E quations
EPT	E lévation du P otentiel de T erre

Canstantes Physiques

perméabilité magnétique du vide $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ kg.m.A}^{-2}.\text{s}^{-2}$

permittivité diélectrique du vide $\epsilon_0 = 8,85418782 \times 10^{-12} \text{ m.A}^2.\text{s}^4.\text{kg}^{-1}.\text{m}^{-3}$

conductivité électrique du cuivre $\sigma = 5,99 \times 10^7 (\Omega.m)^{-1}$

résistivité du cuivre $\rho = 1,66 \times 10^{-8} (\Omega.m)$

Symboles

R	Résistance	Ω
E	Champ électrique	V/m
V	Potentiel électrique	V
ρ	Résistivité	$\Omega.m$
σ	Conductivité électrique	$[\Omega.m]^{-1}$
ρ_1	Résistivité de la première couche du sol	$\Omega.m$
ρ_2	Résistivité de la deuxième couche du sol	$\Omega.m$
ρ_3	Résistivité de la troisième couche du sol	$\Omega.m$
ρ_4	Résistivité de la quatrième couche du sol	$\Omega.m$
ρ_{eqv_n}	Résistivité équivalente normalisée	
ρ_{eqv}	Résistivité équivalente	$\Omega.m$
ρ_{eqv_nx}	Résistivité équivalente après x approximation	
ρ_{eqv_x}	Résistivité équivalente pour x-ème approximation	$\Omega.m$
L	Longueur de la tige	m
L_x	Longueur effective de la tige pour x-ème approximation	m
r	rayon de la tige	m
D	Épaisseur d'une couche	m
D_1	Épaisseur de la 1 ^{er} couche couche	m
D_2	Épaisseur de la 2 ^{ème} couche	m
D_3	Épaisseur de la 3 ^{ème} couche	m
D_4	Épaisseur de la 4 ^{ème} couche	m
R_{exact}	Résistance apparente exacte obtenue en utilisant les formules analytiques	Ω
R'_{exact}	Résistance apparente exacte obtenue en utilisant le COMSOL	Ω
R_{est}	Résistance estimée de mise à terre	Ω
θ	Angle d'inclinaison d'une couche	°

Introduction générale

Les systèmes de terre jouent un rôle essentiel dans la protection des individus contre les accidents électriques et l'assurance du fonctionnement adéquat des installations électriques.

La nécessité de la mise à la terre se fait sentir d'une façon très aiguë avec l'augmentation de l'importance des systèmes d'alimentation, des tensions nominales et de la capacité des courts circuits. En cas de défaut, les systèmes non reliés à la terre produisent des surtensions plus importantes que ceux qui sont reliés ; ce qui présente un grand avantage pour les systèmes reliés à la terre. Pour limiter les surtensions lors d'un défaut, une méthode consiste à mettre en série une résistance ou une réactance adéquate dans le circuit de terre.

En pratique, plusieurs éléments des centrales, des postes et des lignes de transport d'énergie 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.

Les mises à la terre ont été introduites par *Benjamin Franklin*, célèbre inventeur des parafoudres. Son système de mise à la terre était constitué d'une tige enfouie dans le sol et reliée par un conducteur au neutre du réseau auquel différents équipements sont branchés.

À base fréquence, un système de terre est représenté par des résistances. La valeur de cette résistance dépend non seulement de la forme géométrique et la nature du système de terre, mais également du type de sol et de sa structure, ainsi que de son humidité et ses des propriétés. En effet, afin d'être sûr qu'un système de mise à la terre est placé dans un bon endroit, il est donc nécessaire de maintenir une faible résistance de mise à la terre, et une faible résistivité du sol local.

Cette étude présente une méthode numérique simplifiée en vue de déterminer la résistance de terre d'un sol multicouche inclinées.

Notre mémoire s'articule sur trois chapitres distincts. Le premier chapitre regroupe les généralités sur la mise à la terre des installations électriques de haute tension, ainsi que les définitions relatives au système de mise à la terre, sa construction et son rôle.

Nous présentons, dans le seconde chapitre, le logiciel de simulation COMSOL *Multiphy-isics* 4.3 basé sur la méthode des éléments finis (FEM), la méthodologie suivie ainsi que la méthode numérique établie en vue de déterminer la résistance de quelques configurations de mise à la terre enterrées dans diverses structures de sol.

Le troisième et dernier chapitre est consacré à la détermination de la résistance globale d'une électrode enfouie dans une terre composée de deux couches obliques. Plusieurs types d'inclinaisons ont été considérées. Comme hypothèse simplificatrice pour cette section, nous avons supposé des interfaces inter-couches planes. Des suggestions quant à la manipulation de ce genre de sol hétérogène ont été proposées.

Nous terminons notre présente étude par une conclusion générale.

Chapitre 1

Généralités sur les SMLT

1.1 Introduction

Les systèmes de mise à la terre permettent l'écoulement des courants en cas de défaut vers la terre, protègent les individus contre les accidents électriques et les équipements électriques contre la foudre et les surtensions et assurent le bon fonctionnement des installations électriques. C'est pourquoi, les différents éléments des réseaux électriques sont mis à la terre.

En effet, en cas de défaut, les systèmes non reliés à la terre produisent des surtensions plus importantes que ceux qui sont reliés ; ce qui présente un grand avantage pour les systèmes reliés à la terre.

1.2 Définitions

1.2.1 Prise de terre

Corps conducteur enterré, ou ensemble de conducteurs enterrés et connectés, assurant une liaison électrique avec la terre (câble, piquet, grille) [1]. On distingue deux types de prise de terre en fonction de leur profondeur d'enfouissement, une prise de terre profonde et une prise de terre de surface.

Une prise de terre est dite profonde dès que la profondeur atteinte est supérieure à 3 mètres [1]. En effet, cette prise de terre est réalisée par l'enfoncement dans le plan vertical de piquets auto-allongeables.

Une prise de terre de surface est également réalisée par l'enfouissement dans le plan horizontal de câbles, de grilles...etc suivant une forme géométrique adaptée. La profondeur d'enfouissement est de 0,80 m à 1 m [1].

1.2.1.1 Mise à la terre

Mettre un équipement à la terre c'est relier son enveloppe métallique à une prise de terre, à condition que cette enveloppe soit considérée comme une masse [1].

1.2.1.2 Masse

C'est la partie conductrice d'un matériel électrique, qui n'est pas normalement sous tension, mais qui peut le devenir en cas de défaut d'isolement des parties actives de ce matériel [1].

1.2.1.3 Réseau de terre

Un réseau de terre est constitué d'un ensemble de conducteurs enterrés, en contact direct avec le sol et reliés électriquement entre eux. D'une manière générale, il a pour but :

- d'assurer et maintenir à tout moment la sécurité des biens et des personnes ;
- d'écouler dans le sol les courants de défaut et de foudre ;
- de maintenir un potentiel de référence.

Une prise de terre est habituellement composée d'une ou de plusieurs électrodes verticales (piquets) ou horizontales (grilles). La forme de la prise de terre est normalement commandée par l'emplacement physique des appareils et des structures métalliques à mettre à la terre. Par exemple, la prise de terre d'un poste de transformation ou de distribution est généralement constituée d'un réseau maillé de conducteurs enfouis dans le sol et formant le treillis du poste [2].

1.2.1.4 Conception d'un réseau de terre

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

sa permittivité aussi), des caractéristiques géométriques du réseau de terre et de la source. La conception d'un réseau de terre doit donc être précédée d'une étude géologique du sol [2].

1.2.1.5 Conducteur de terre

C'est un conducteur qui relie une partie d'installation électrique, une partie conductrice accessible ou une partie métallique conductrice situées dans l'environnement électrique, à la prise de terre ou qui relie différentes prises de terre. Le conducteur de terre chemine sur le sol ou, s'il est enterré dans le sol, doit être isolé de celui-ci [3].

1.2.2 Rôle des systèmes de mise à la terre

Les guides [4, 5] définissent le rôle et les objectifs des systèmes de mise à la terre. D'une manière générale, il s'agit de relier les masses à la terre par l'intermédiaire d'un ou plusieurs conducteurs afin de permettre aux courants permanents et aux courants de défaut de s'y écouler. Une bonne mise à la terre doit assurer :

- la sécurité des personnes à proximité des installations, notamment dans les zones fréquentées (abords de piscines, terrains de camping, ...);
- la protection des équipements (qualité de service) ou des installations de tiers, reliés, ou à proximité (canalisations de transport de fluide, installations de télécommunication, ...).

Le courant à écouler dans le sol peut être de différente nature :

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

Un système de mise à la terre peut être composé d'un ou plusieurs sous-systèmes qui ne sont pas nécessairement connectés directement mais sont mutuellement influencés par couplage électromagnétique. On représente ainsi sur la figure 1.1 le cas d'un réseau de transport. On admet que les pylônes et les postes sont suffisamment éloignés pour que l'on puisse considérer séparément leur mise à la terre. Chaque système de mise à la terre est relié en un ou plusieurs points de connexion au réseau électrique.

Pour des systèmes de mise à la terre de faible étendue, comme c'est le cas pour les pylônes, on pourra parler de "prise de terre" [5].

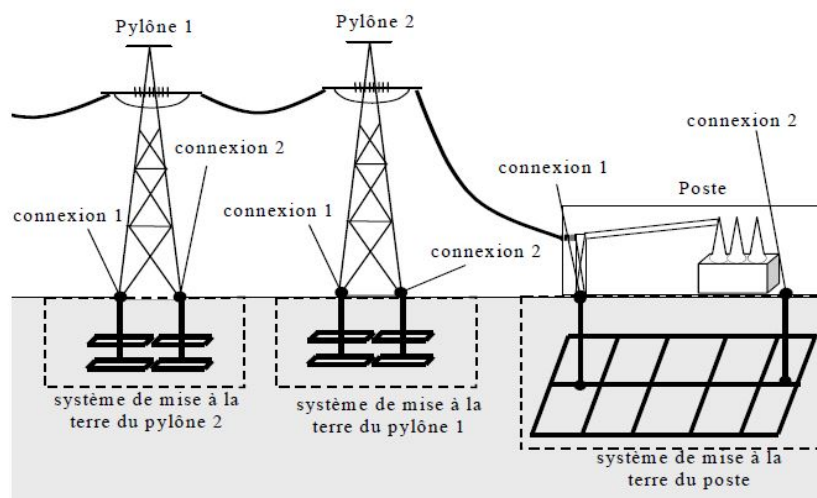


FIGURE 1.1: Réseau de transport et mise à la terre de pylônes et de postes

1.2.3 Critères de conception d'une électrode de mise à la terre

La conception d'une électrode de terre doit considérer l'adéquation de performance, de la fiabilité et des effets sur l'environnement.

1.2.3.1 Adéquation de performance

C'est la caractéristique de fonctionnement désirée comme prescrite par un client. Elle implique normalement des paramètres tels que, la résistance de terre maximale acceptable, le champ électrique et la densité de courant, l'électrode de terre et son environnement, la durée de vie prévue et la capacité de manipuler des conditions anormales. Un facteur important ici est l'effet thermique. Le sol environnant de l'électrode est soumis au chauffage dû aux écoulements de courants, ayant pour résultat l'évaporation de l'humidité et par conséquent l'augmentation de la résistance et l'échauffement progressivement [3].

1.2.3.2 Adéquation de fiabilité

La conception finale doit être fiable avec un entretien minimum durant toute sa durée de vie. La capacité du système d'électrodes d'exécuter en juste proportion sous une configuration inachevée nous donne un dispositif désiré. Ce dispositif permet d'entretenir le système d'électrode section par section, tout en maintenant une performance globale satisfaisante [3].

1.2.3.3 Adéquation des effets sur l'environnement

Il est inévitable que l'installation d'un système d'une énorme électrode dans le sol cause quelques effets sur l'environnement. La tâche finale ici est de rechercher un équilibre entre une conception de technologie de l'électrode et la nature du sol [3].

1.2.4 Conduction du courant électrique dans le sol

Le courant de conduction dans le sol résulte du déplacement des charges électriques sous l'effet d'un champ électrique appliqué [6]. Ce mécanisme dépend de la structure physique et chimique du globe terrestre. Sous l'action d'un courant électrique, tout corps, qui à l'état soluble, peut se dissocier en anions et cations. Il est appelé électrolyte. La présence d'eau dans un milieu est une condition essentielle à la conduction électrolytique. La combinaison des sels, des acides et des bases avec l'eau, comme par exemple dans les océans et dans les couches de sol humide, forment des solutions conductrices. On distingue deux types de conduction dans le sol [7] :

- La conduction électrolytique : sous l'effet du champ électrique, les électrolytes sont soumis à l'électrolyse. Ils sont donc décomposés en anions et cations. Les charges négatives sont appelées anions ou ions négatifs. Elles se dirigent vers l'anode. Les charges positives sont appelées cations ou ions positifs. Elles se dirigent vers la cathode. Les ions qui atteignent les électrodes se départissent de leur charge, ils se déposent sur ces électrodes ou réagissent chimiquement avec elles. Le déplacement des ions engendre le passage d'un courant électrique. La vitesse de déplacement des ions est proportionnelle à l'intensité du champ électrique. Le nombre des particules dissociées ou le nombre des ions varie avec la température. Par exemple, pour une augmentation de 1°C, le nombre d'ions libérés augmente et la résistivité de l'électrolyte diminue d'environ 2%. Ainsi, le courant électrique augmente avec l'augmentation du champ électrique ou de la température.
- La conduction électronique : elle est assurée par la présence des électrons libres qui sont caractérisés par une grande mobilité et se trouvent sur l'orbite externe de l'atome. Ce type de conduction est rencontré dans les milieux du globe où il y a une concentration des minerais et dépend de l'intensité du champ électrique. En général, les électrons libres sont rares dans les couches extérieures du globe, mais quand même une faible conduction est toujours possible à cause de la grande superficie du milieu.

Un autre phénomène qui mérite quelques explications est la décharge électrique. Lorsque l'intensité du champ électrique atteint une valeur critique de 1 à 3 kV/cm. il peut y avoir une formation de décharges électriques dans la partie gazeuse du sol sous forme d'étincelles ou d'arcs électriques selon l'intensité du champ.

1.2.5 Caractéristiques électriques du sol

Comme pour tout milieu conducteur, le comportement électrique du sol est caractérisé par les trois grandeurs suivantes :

- sa résistivité ;
- sa permittivité ;
- sa perméabilité.

Le sol est composé de plusieurs matériaux dont la proportion va avoir une influence sur chacune de ces grandeurs (notamment l'eau, dont la proportion varie en fonction du temps) [8].

1.2.5.1 Résistivité

Le sol (la terre) est constitué de matériaux à faible conductivité. Celle-ci est due aux sels et aux impuretés entre les isolants (oxyde de silice et oxyde d'aluminium). A cause de la faible conductivité de la terre, tout courant qui passe à travers elle crée une grande chute de tension, ce qui revient à affirmer que le potentiel de la terre n'est pas uniforme.

La conductivité du sol est principalement de type électrolytique. La résistivité (qui est l'inverse de la conductivité), notée ρ , est une quantité variable et la seule manière de la connaître avec précision est de la mesurer. Elle dépend de la densité de porteurs libres (ions) et est donc très étroitement liée à [3, 7] .

- la nature du sol ;
- la pression ;
- la dimension des grains ;
- la porosité (pourcentage de volume des vides dans le sol) ;
- le pourcentage d'eau contenu dans le sol ;
- le pourcentage de sels solubles ;
- le pourcentage d'acides et de bases.

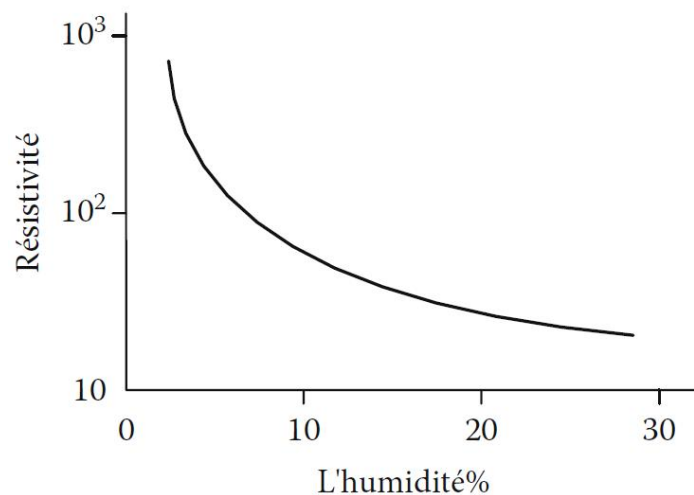
Dans cette section, nous présentons brièvement l'influence de la température et l'humidité sur la résistivité du sol.

Une augmentation de la température du sol permet à un électrolyte de mieux se dissocier. Ce qui réduit la résistivité du sol. Par contre, une augmentation de la température à 100°C cause l'évaporation de l'eau du sol et ainsi une augmentation de la résistivité.

Lorsque la température tombe au-dessous de 0°C comme le cas des régions froides, la conductivité de l'électrolyte diminue et ainsi un accroissement rapide de la résistivité se produit.

Par ailleurs, l'humidité peut varier sur une large gamme, en fonction de la situation géographique et des conditions atmosphériques, depuis un faible pourcentage dans les régions désertiques, jusqu'à 80% pour les régions marécageuses. La résistivité de terre dépend principalement de ce paramètre. La figure I.6 illustre ce rapport entre la résistivité et l'humidité dans le cas d'une argile.

On peut constater que, pour des valeurs d'humidité supérieures à 30%, les variations de ρ sont faibles et non significatives. Cependant, lorsque le sol est sec, c'est-à-dire pour des valeurs d'humidité inférieures à 20%, la résistivité augmente rapidement [3, 7].



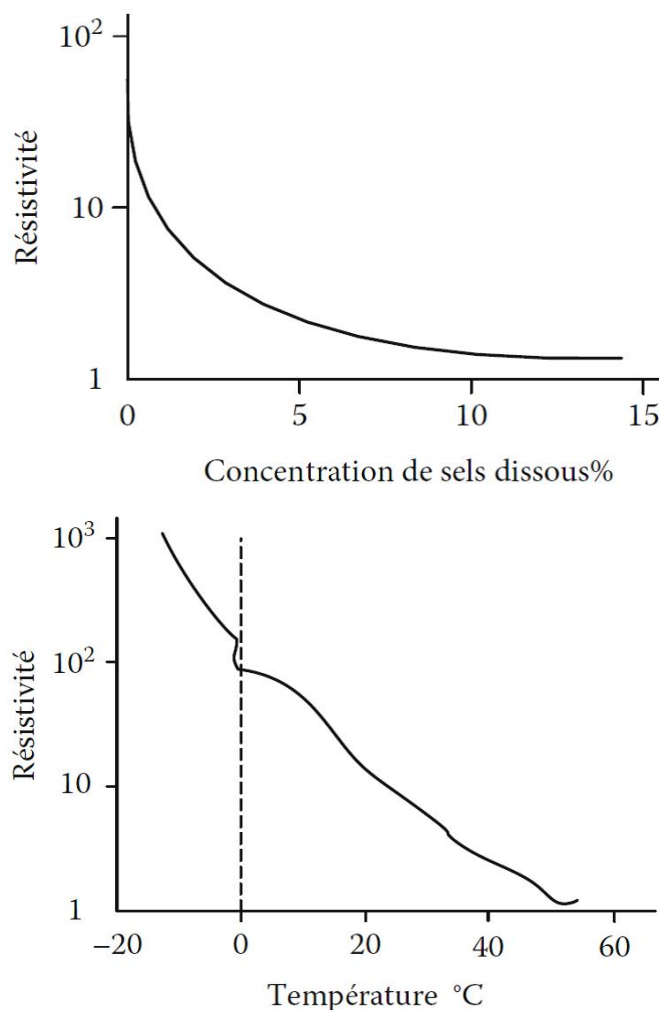


FIGURE 1.2: Effet d'humidité, température et concentration des sels sur la résistivité du sol

Dans les régions tempérées, les pays européens par exemple, la résistance de terre varie en fonction des saisons à cause de la dépendance de l'humidité du sol avec la résistivité de terre. En Europe, cette dépendance est approximativement de forme sinusoïdale, où la valeur maximale de la résistance de la terre apparaît en février et la valeur minimale en août.

La valeur moyenne apparaît en mai et en novembre. L'amplitude en février est approximativement 30% supérieure à la moyenne, tandis qu'en août elle est de 30 % inférieure à cette moyenne.

Il est bon de rappeler que les effets du gel sont similaires à la sécheresse où la résistivité augmente significativement [8].

Pour ces raisons, les calculs d'une résistance de terre et la conception d'une prise de terre peuvent être réalisés jusqu'à un niveau limité d'exactitude. Les connaissances de la résistivité réelle et des différentes couches composantes du sol aux diverses profondeurs, sont les bases principales pour déterminer la configuration du réseau de terre.

En général, la résistance augmente avec la résistivité. Le sol peut généralement être considéré comme une résistance pure [3]. Un autre facteur dont il faudra tenir compte est la caractéristique de l'électrode de mise à la terre : la matière, la forme, la profondeur dans le sol, le nombre, la structure...

La résistance de terre dépend essentiellement du type de sol, de l'humidité et de la température. Elle varie donc en fonction des saisons qui influent sur la température et la teneur en eau du sol. Pour être efficace, un système de mise à la terre doit assurer une résistance de terre qui reste faible même lorsque les conditions sont les plus défavorables.

Le terrain et l'eau étant plus stables dans les couches profondes. Il est conseillé, d'enfoncer la prise de terre le plus profondément possible (c'est-à-dire en dessous du niveau de la nappe phréatique).

La table 1.1 donne une indication sur les résistivités des différents types de sol [1].

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

TABLE 1.1: Résistivités moyennes des différents types de sol

Notons finalement que la résistance d'une mise à la terre est directement proportionnelle à la résistivité du sol, si celle-ci peut être considérée comme homogène.

1.2.5.2 Permittivité du sol

La permittivité d'un matériau, notée ϵ , caractérise son comportement diélectrique. Elle est fonction de la permittivité propre des différents composants du sol et de leurs proportions. Dans la nature, le liquide polarise le plus répandu est l'eau, dont la permittivité relative à 50Hz est d'environ 80, contre environ 5 pour le quartz, constituant majeur des sols sableux. Comme c'est le cas pour la résistivité, la permittivité apparente d'un sol poreux est donc largement influencée

par son taux d'humidité. Pour les agronomes, la mesure de la permittivité apparente est même un excellent moyen de sondage non destructif du taux d'humidité des sols [9].

On dispose de plusieurs méthodes pour mesurer la permittivité apparente du sol, parmi lesquelles les deux plus utilisées sont [10] :

- La méthode TDR (Time Domain Reflectometry), qui permet la mesure de la vitesse de l'onde électromagnétique dans le sol pour en déduire la permittivité du milieu.

- La méthode SCIP (Surface Capacitance Insertion Probe), qui permet la mesure de la capacité C du condensateur créé entre deux plaques parallèles plongées dans le milieu, et l'estimation de la permittivité du milieu à partir de la relation :

$C = \epsilon \cdot g \cdot \epsilon_0$ avec g une constante qui dépend de la géométrie de l'installation, ϵ la permittivité relative du milieu, et ϵ_0 la permittivité du vide. On retiendra que ϵ est généralement comprise entre 5 (sol sec) et 30 (sol humide) (ces valeurs ont été obtenues pour des fréquences voisines de 50Hz) [9].

1.2.5.3 Perméabilité du sol

On considère que le sol est constitué de matériaux amagnétiques (ce qui se vérifie toujours en pratique, sauf dans le cas de quelques roches riches en oxyde de fer comme la magnétite). Sa perméabilité relative μ est donc égale à 1 et nous ne considérerons plus ce paramètre dans la suite [8].

Chapitre 2

Méthodologie et évaluation de la précision de calcul de la résistance

2.1 Introduction

Ce chapitre présente la méthodologie suivie ainsi que la méthode numérique établie en vue de déterminer la résistance de quelques configurations de mise à la terre (utilisées en courant continu à haute tension) enterrée dans diverses structures de sol. Les configurations que nous avons envisagées sont : une tige verticale, électrode sphérique et plusieurs tiges verticales. Deux types de sol ont été considérés, à savoir un sol homogène et un sol multicouche. Nous avons utilisé le COMSOL *Multiphysics* 4.3 basé sur la méthode des éléments finis (FEM). Certains de nos résultats seront comparés à ceux analytiques cités dans le chapitre précédent.

2.2 Méthodologie

La méthode utilisée est la méthode des éléments finis (MEF), via COMSOL Multiphysics 4.3. Le système d'électrodes et la terre sont modélisés. Un courant I_0 connu est injecté dans l'électrode. Le potentiel d'électrode V_0 et la résistance R sont ensuite évalués. Pour un système de plusieurs tiges de terre en parallèle, on injecte un courant dans chaque tige et la résistance individuelle de mise à la terre est évaluée.

La résistance globale de mise à la terre de l'électrode est la résistance de terre équivalente de ces tiges individuelles qui sont connectées en parallèle.

En termes de précision, il y a deux facteurs principaux qui sont impliqués. Le premier est le domaine de la terre en cours de modélisation et d'autre part le nombre total de nœuds utilisés. Lorsque l'on utilise la FEM pour évaluer la résistance du sol d'une électrode de terre, on doit décider combien de sol environnants seront modélisés.

2.3 Conception et mise en œuvre du logiciel de simulation (logiciel COMSOL)

COMSOL *Multiphysics* est un logiciel de simulation numérique (logiciel de résolution de modèles différentiels PDE) basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multiphysiques.

COMSOL *Multiphysics* a été développé par des étudiants de *Germund Dahlquist* (1925-2005) à la Royal Institute of Technology à Stockholm [11].

C'est une plateforme logicielle flexible qui traite, entre-autres : la généricité, le couplage mécanique des fluides, l'électromagnétisme, la mécanique des structures, la thermique.. [11].

Il contient es équations adéquates aux domaines susmentionnés. Il a un nombre illimité d'interactions entre différentes physiques. Il possède une interface graphique, peu de programmation directe et une interface MATLAB possible.

Pour notre étude, la conception et la mise en œuvre du système de mise à la terre seront présentés. En utilisant ce logiciel COMSOL *Multiphysics* 4.3, la conception a été divisée en deux parties : la conception de l'électrode et la conception du sol [11].

Exigences et paramètres de conception

L'idée est de concevoir un modèle qui simule tout type désiré de système de mise à la terre tel qu'une électrode verticale, horizontale, hémisphérique...etc. Ce modèle permet l'analyse du gradient du potentiel le long de la surface de la terre. Il permet également le calcul de la résistance de l'ensemble du modèle constituée par l'électrode, le sol et la résistance entre l'électrode et le sol en utilisant COMSOL *Multiphysics* basé sur la MEF.

Dans cette étude, nous sommes intéressés à la simulation d'une électrode de mise à la terre vertical enterrée dans un sol uniforme ou multicouche.

Conception de l'électrode

La tige est cylindrique de rayon r , et de longueur l . La tige est en cuivre qui a une conductivité $\sigma = 5,99 \times 10^7 (\Omega.m)^{-1}$ et une résistivité $\rho = 1,66 \times 10^{-8} (\Omega.m)$. Cette tige est enterrée verticalement dans le sol.

Conception du sol

Le sol dans les systèmes de mise à la terre est considéré comme un milieu conducteur. Il est supposé être uniforme ayant une résistivité constante ρ , ou une conductivité constante σ .

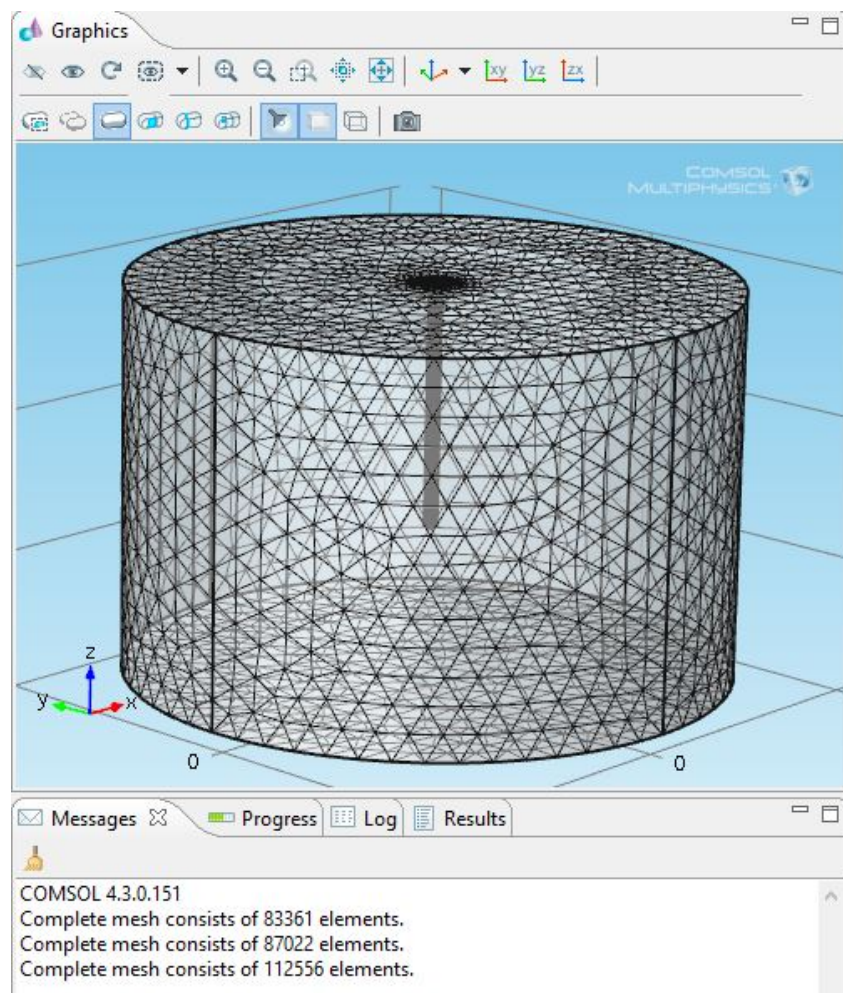


FIGURE 2.1: Maillage du modèle

La simulation que nous avons adoptée est basée sur les étapes suivante :

- ✓ Choix de la dimension : 3D, 2D, 2D axisymétrique ;
- ✓ Choix des modules physiques : Modules continu/alternatif, courant électrique ;
- ✓ Choix du type d'étude : Stationnaire, Temporelle, Fréquentielle.. ;
- ✓ Construction de la géométrie ;
- ✓ Choix du (ou des) matériau(x) ;
- ✓ Paramétrage du (ou des) module(s) physique(s) ;
- ✓ Paramétrage et calcul du maillage ;
- ✓ Paramétrage et calcul de l'étude ;
- ✓ Représentation graphique des résultats.

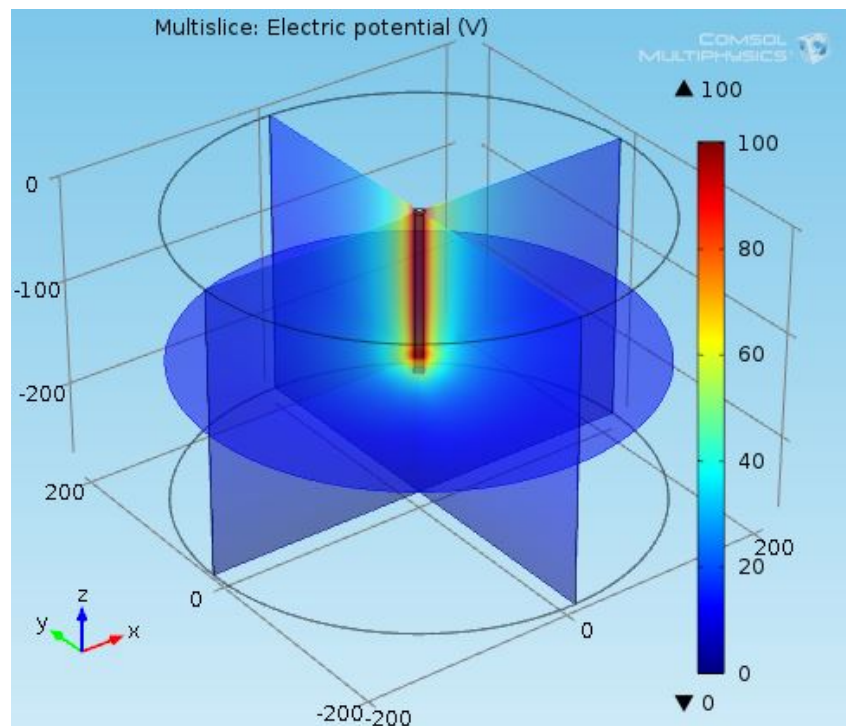


FIGURE 2.2: Modèle résolu

2.4 Tige verticale dans un sol homogène

Le modèle de révolution est présenté sur la figure 2.1. La figure 2.3 représente le modèle axisymétrique.

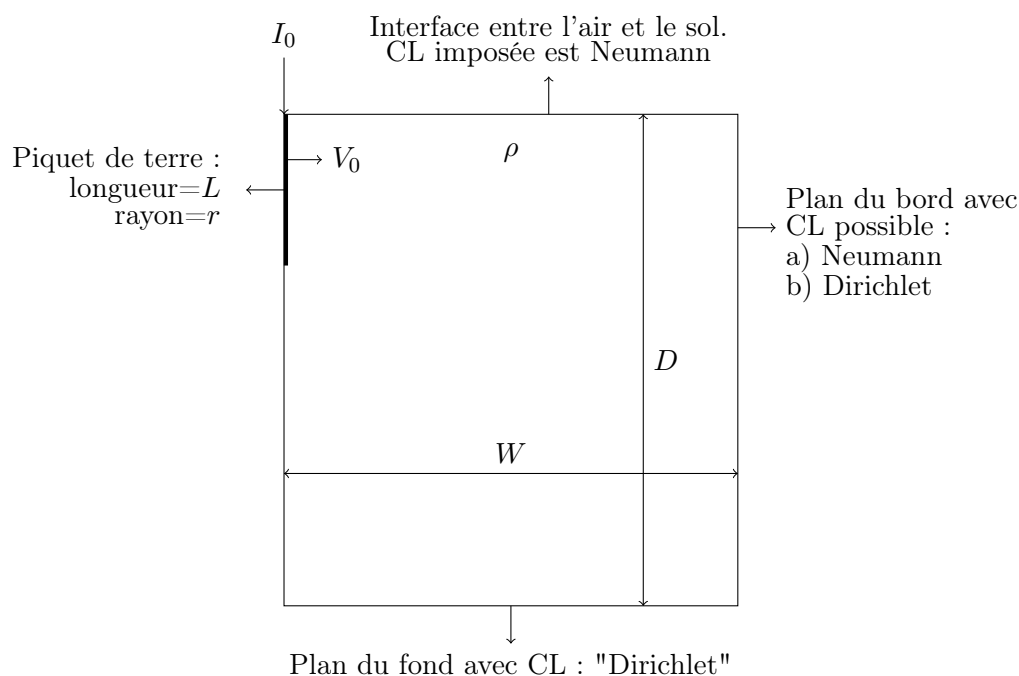


FIGURE 2.3: Modèle axisymétrique du sol avec une tige verticale

Les plans du bord et du fond sont les limites du modèle utilisé. Il y a deux conditions possibles pour le bord qui sont soit "Neumann" ou "Dirichlet".

La condition "Neumann" correspond au cas où le vecteur de densité de courant est en parallèle avec le bord. Le plan du fond est contraint à "Dirichlet".

La table 2.1 présente les effets du domaine de la terre modélisé et les conditions aux limites (CL) imposée sur la résistance estimée de la terre R_{est} .

cas	W/L	D/L	Les conditions aux limites	R_{est} (Ω)	Erreur (%)
A	1	3	Neumann	4,58	-48
			Dirichlet	2,60	16
B	2	4	Neumann	3,49	-12
			Dirichlet	2,77	11
C	3	5	Neumann	3,22	-3
			Dirichlet	2,80	10
D	4	6	Neumann	3,01	3
			Dirichlet	2,88	7
E	5	7	Neumann	2,94	5
			Dirichlet	2,90	7
F	6	8	Neumann	2,89	6
			Dirichlet	2,97	4
G	7	9	Neumann	2,98	4
			Dirichlet	2,97	4

TABLE 2.1: Effets des conditions aux limites du modèle sur l'estimation de la résistance du sol

Les résultats de la table 2.1 sont obtenus pour le cas où la longueur de la tige L est de 30 m, son rayon r est égal à 0,127 m et la résistivité du sol ρ est égal à 100 Ω .m. W et D sont des dimensions montrées sur la figure 2.3, ils sont exprimées en termes de multiples de la longueur de la tige L .

R_{est} est la résistance estimée en utilisant COMSOL *Multiphysics* 4.3. Les erreurs sont calculées par rapport à la résistance exacte du sol. Cette dernière donne une valeur de 3,1041 Ω .

D'après la table précédente, la différence entre les erreurs dans les deux types de conditions (Neumann et Dirichlet) sur le long du plan de bord diminue lorsque le domaine concerné devient plus grand. Autres sources d'erreurs importantes sont le nombre total de nœuds utilisés et leur distribution de densité. Si le nombre total de nœuds est augmenté, il en résulte une augmentation de la quantité de mémoire requise, des ressources de calcul et de temps. Les régions plus proches de l'électrode, devraient avoir une densité de nœuds supérieure, tandis que les régions plus éloignées de l'électrode peut avoir une plus faible densité de nœuds.

2.5 Conditions aux limites

2.5.1 Considérations théoriques

Ce projet de recherche consiste à déterminer la résistance de mise à la terre dans un sol non homogène.

L'équation de Laplace en milieu conducteur : Pour un courant continu stable, l'équation de Laplace en milieu conducteur est donnée par l'équation différentielle suivante :

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0$$

La densité du courant J est reliée au champ électrique par la loi d'Ohm :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

Le champ électrique E peut être obtenu comme le gradient négatif du potentiel électrique :

$$\vec{E} = -\nabla\vec{V}$$

De ces 3 équations, on obtient :

$$\begin{aligned}\sigma\nabla \cdot \vec{E} &= 0 \\ \sigma\nabla \cdot (\nabla\vec{V}) &= 0\end{aligned}$$

Enfin, nous arrivons à l'équation de Laplace :

$$\nabla^2\vec{V} = 0$$

Cette dérivation montre que les problèmes concernant la distribution des courants stables directs dans des milieux conducteurs sont similaires aux problèmes de champ statique dans les milieux isolés. Si une solution de l'équation de Laplace qui satisfait toutes les conditions aux limites peut être trouvée, nous avons alors les solutions donnant les distributions du potentiel et du courant dans le milieu conducteur.

Afin de résoudre un problème de mise à la terre à l'aide du COMSOL, on doit le limiter par un grand domaine dont la taille est numériquement gérable. Le domaine dicte le modèle des éléments finis et donc le nombre total de mailles et les degrés de liberté, qui ont un effet direct sur la précision de la solution.

Si les bords du domaine utilisé sont suffisamment loin des électrodes, les deux conditions de Dirichlet (spécification du potentiel sur les frontières) ou de Neumann (spécification de composante normale d'une quantité de champ sur les frontières) peuvent être appliquées.

Ces deux différentes conditions aux limites affectent la distribution du flux de courant à la limite des bords du domaine. Cependant, elles ont un effet négligeable sur la solution globale. En effet, si le domaine est suffisamment grand, il n'y aura pratiquement aucun effet sur la solution globale.

2.5.2 Application des Conditions aux limites

Il a été discuté dans le paragraphe précédent que si le domaine du sol modélisé est suffisamment assez grand, l'imposition de la "Neumann" ou de "Dirichlet" à la condition aux limites sur les plans du bord donnera des résultats très similaires. D'après la table 2.1, nous observons que R_{est} produite par l'imposition de l'état de "Neumann" sur les plans de pointe est toujours plus grand que le R_{est} produite par l'imposition de l'état "Dirichlet" sur les plans du bord.

Il est clair que la raison de ceci est que le domaine du sol n'est pas assez grand! En théorie, le domaine devra être étendu à l'infini pour arriver à un même R_{est} indépendamment de la condition au limite imposée sur le plan du bord.

Des explications plus descriptives peuvent être obtenues en examinant les figures (2.4 et 2.5) qui montrent des croquis de lignes de flux dans un système de mise à la terre composé d'une seule tige vertical.

La figure 2.4 montre les lignes de flux dans le cas de l'imposition de l'état "Neumann" sur les plans du bord. En imposant cette condition, les courants sont forcés à écouler vers le bas sur la fissuration des plans de bord. L'effet est que la section transversale disponible pour l'écoulement des courants est réduite et donc une plus grande valeur de R_{est} est obtenue.

La figure 2.5 montre les lignes de flux dans le cas de l'imposition de la condition de "Dirichlet" sur le plan du bord. En imposant cette condition, les lignes de flux sont forcées à écouler vers le bas après avoir atteint le plan du bord. Ce qui augmente la section transversale disponible pour l'écoulement des courants et donc une petite valeur de R_{est} . En raison de ressources limitées, la modélisation d'un domaine assez grand n'est pas pratique et impossible.

Pour les modèles FEM pratiques telles ceux considérés dans le cas E , F et G exposés dans la table 2.1, l'imposition de la condition de limite "Dirichlet" produit réellement les courants et les modèles d'écoulement les plus cohérents.

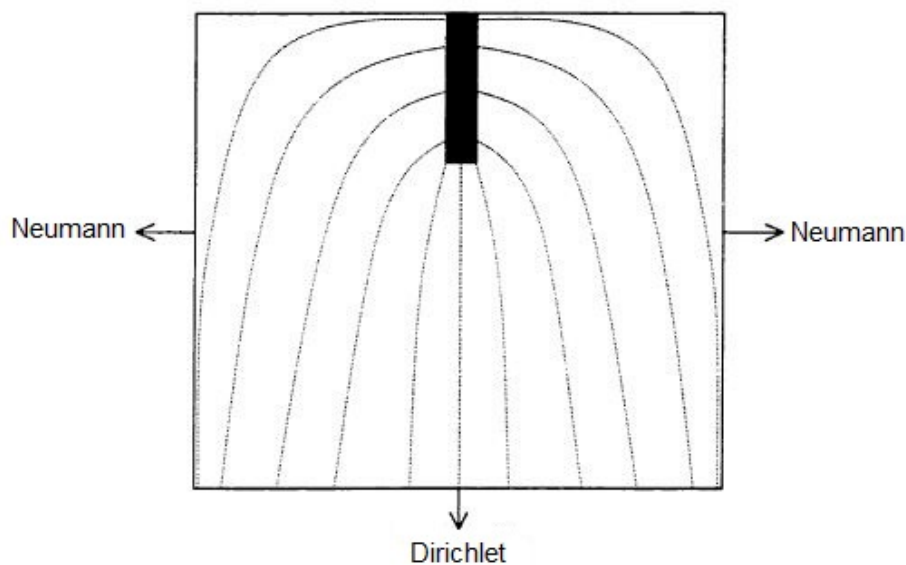


FIGURE 2.4: Neumann

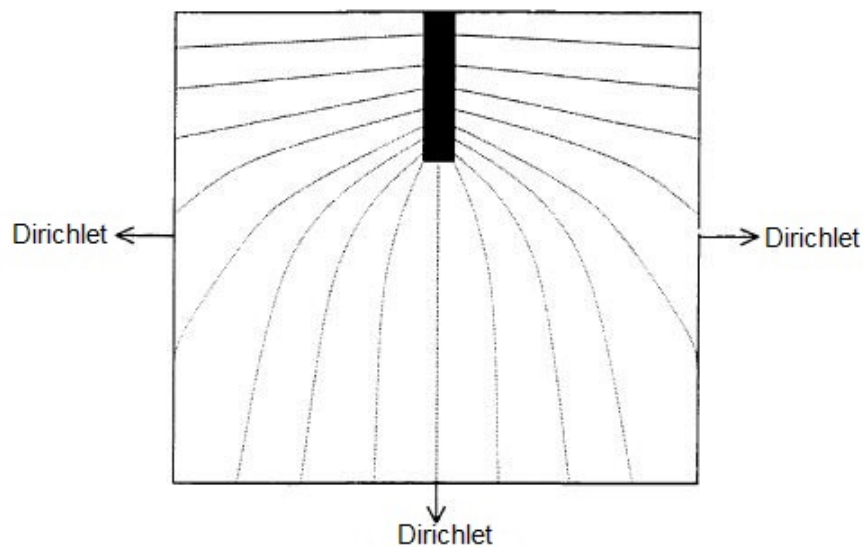


FIGURE 2.5: Dirichlet

2.6 Distribution de potentiel et de gradient de potentiel : Électrode sphéroïdale

Le profil du potentiel et le gradient du potentiel sont tracés sur les figures 2.6, 2.7, 2.8 et 2.9. Les figures 2.6 et 2.7 illustrent les profils le long de la surface de la terre c.à.d dans la direction latérale alors, les figures 2.8 et 2.9 montrent les profils le long de l'axe de symétrie sous l'électrode. Ces résultats sont générés en supposant que le courant total injecté dans l'électrode est 1 A.

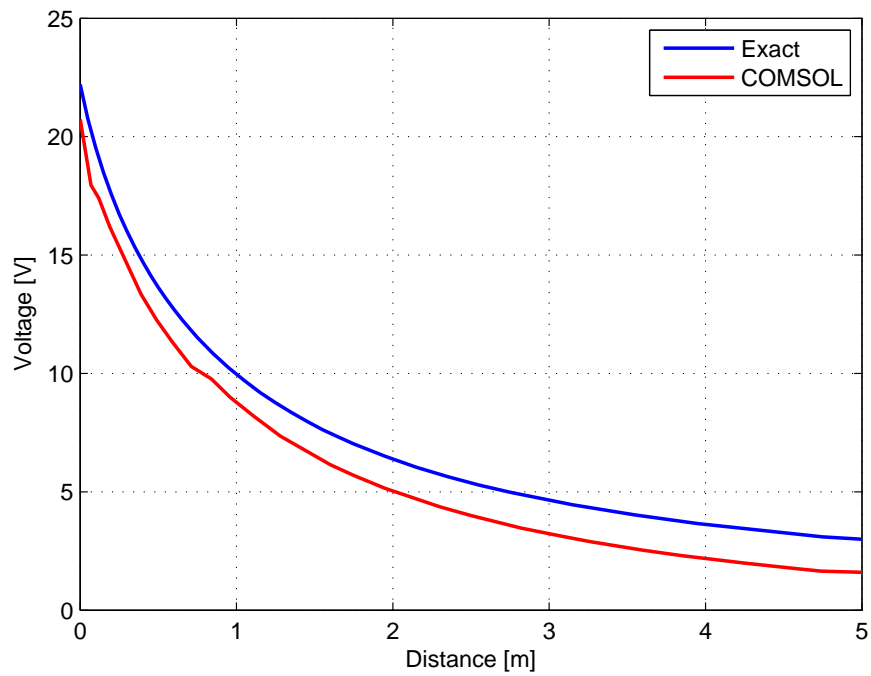


FIGURE 2.6: Distribution latérale du potentiel le long de la surface pour une électrode sphéroïdale dans un sol homogène

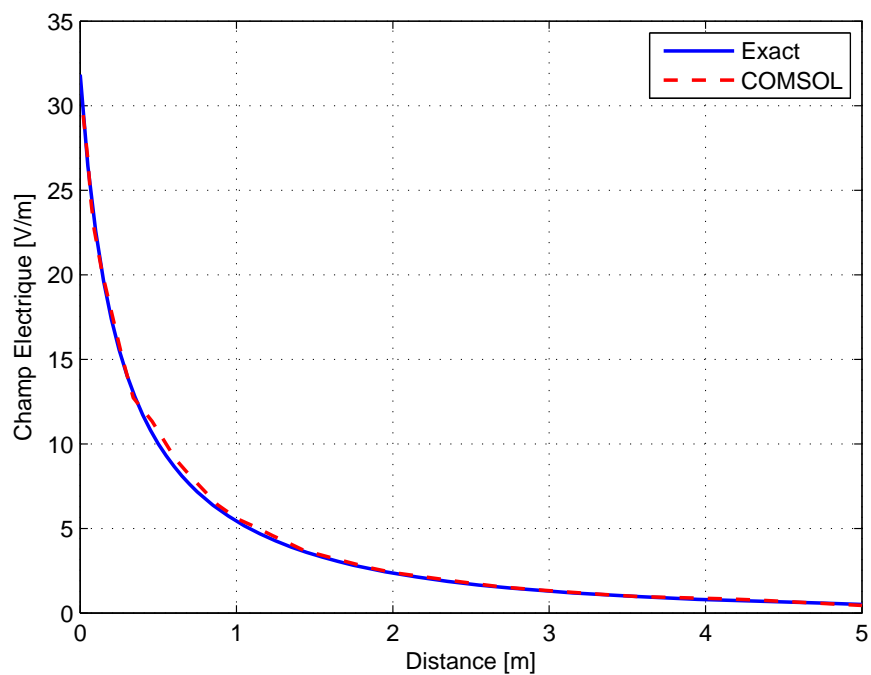


FIGURE 2.7: Distribution latérale du champ électrique le long de la surface pour une électrode sphéroïdale dans un sol homogène

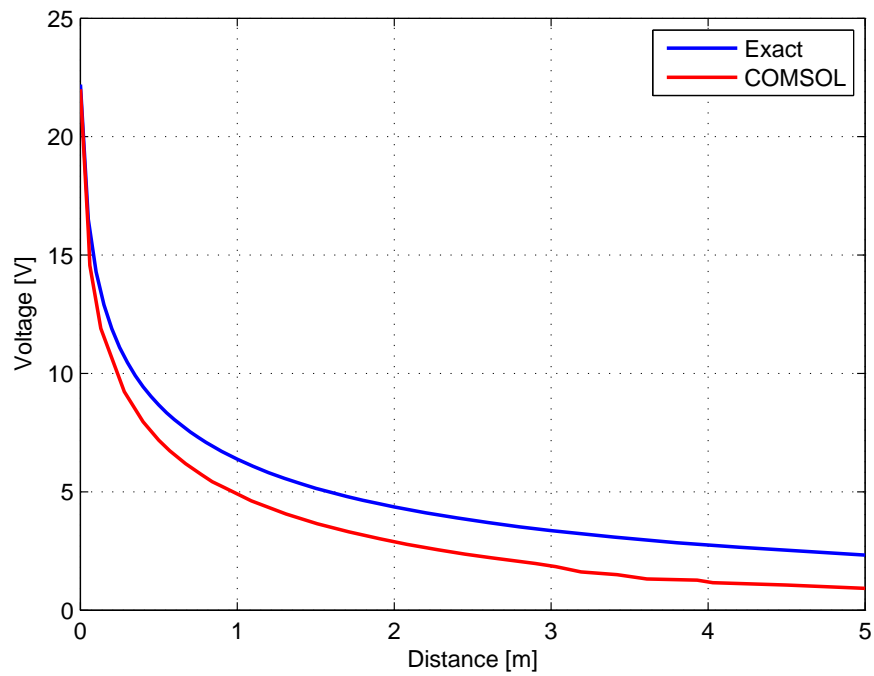


FIGURE 2.8: Distribution verticale du potentiel le long d'axe de symétrie pour une électrode sphéroïdale dans un sol homogène

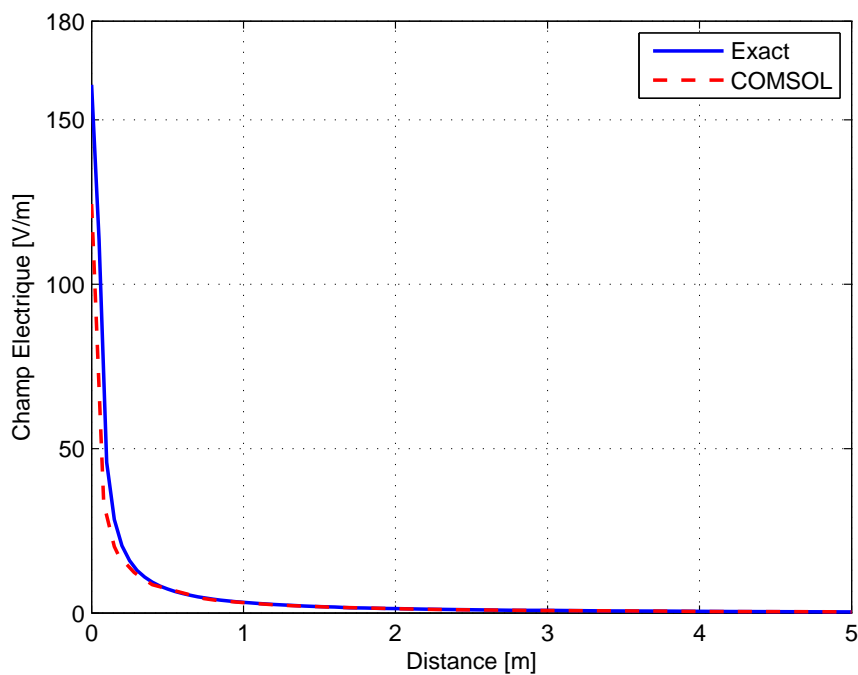


FIGURE 2.9: Distribution verticale du champ électrique le long d'axe de symétrie pour une électrode sphéroïdale dans un sol homogène

La solution principale consiste en la distribution de potentiel. Le gradient de potentiel est obtenu en dérivant cette solution. Si la solution principale n'est pas exacte, il est conseillé de procéder avec prudence supplémentaire lors de l'interprétation de la solution dérivée.

Le problème d'électrode sphéroïdale est résolu en utilisant un modèle de révolution. Quand un modèle de révolution est utilisé, le paquet FEM sélectionné avec toute sa limitation, aura encore la capacité de produire de très bonnes solutions pour toutes les quantités d'intérêt, y compris la distribution de potentiel.

2.7 Conclusion

Il ressort de ce chapitre les principales conclusions suivantes :

1. Le choix des conditions aux limites, le dimensionnement du domaine ainsi que le nombre d'éléments (finis) sont les facteurs de première importance dans l'obtention de bon résultats relatif à la détermination de la résistance de terre.
2. L'erreur dans l'estimation de notre résistance ne dépassant pas de 10%.

Chapitre 3

Résistance de l'électrode enterrée dans un sol multicouche incliné

3.1 Introduction

Jusqu'à présent, les discussions faites se sont concentrées sur la terre homogène et la terres composées de multicouches parallèles. Dans la pratique, les couches de terre ne peuvent pas être parallèles les unes aux autres.

Ce type de non-homogénéité présente une nouvelle série de défis, non seulement du point de vue de l'ingénierie de conception, mais aussi du point de vue du processus de collecte de données géophysiques. D'énormes efforts sont nécessaires afin d'obtenir des informations détaillées sur la nature des couches. Ceci est à la fois un processus long et très coûteux.

Dans ce chapitre, une étude sur l'influence des couches inclinées de la terre est effectuée. Pour ce faire, nous considérons seulement deux couches. Les effets sur la résistance globale du sol en raison de couches inclinées sont étudiés et des suggestions sont faites pour la manipulation de ce type de non-homogénéité. Il est nécessaire de souligner que les interfaces entre les couches sont modélisées comme des surfaces planes, ce qui est sans aucun doute une approximation.

3.2 Types d'inclinaison

Il y a effectivement de nombreux cas possibles de couches inclinées. Par souci de simplicité, une tige verticale de mise à la terre dans un modèle de terre à deux couches est utilisée tout au long

de ce chapitre. Il y a en général deux types de tendances, qui sont étiquetés type 1 et de type 2 et sont représentées sur les figures 3.1 et 3.2

3.3 Type-1 de la couche inclinée de la terre

La couche est inclinée d'un angle particulier θ . Il est évident que l'augmentation du volume de sol ayant une résistivité ρ_1 , à gauche de la tige est compensée par la diminution du volume du même sol à droite de cette même tige. De même pour la couche inférieure du sol ayant une résistivité ρ_2 . La diminution du volume de la terre de la couche inférieure à gauche de la tige est compensée par l'augmentation de volume vers la droite de cette même tige (Figure 3.1).

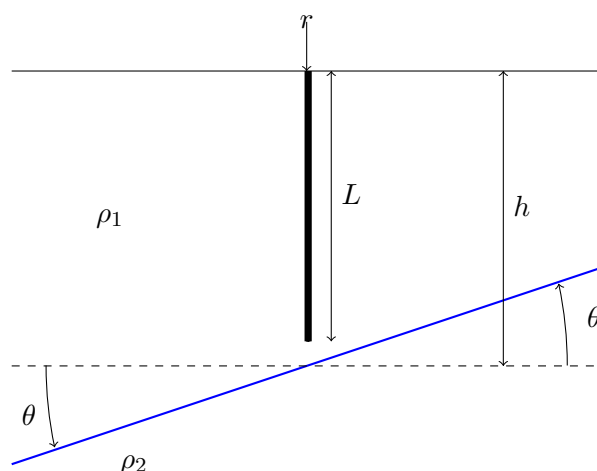


FIGURE 3.1: Type-1 de la couche inclinée de la terre

Supposons qu'il existe un tel emplacement physique de la structure comme représenté sur la figure 3.1. La meilleure façon d'obtenir une conception optimale sera de placer toute la tige de mise à la terre dans la région qui contient une résistivité inférieure. Il ne fait aucun doute que l'abaissement de la résistivité du sol, implique une réduction de la résistance du sol. Si ρ_1 est inférieure à ρ_2 , la tige de terre doit alors être déplacée vers la gauche. D'autre part, si ρ_1 est plus grand que ρ_2 , la tige de terre doit alors être déplacée vers la droite.

Si θ est grand, le déplacement de l'emplacement de l'électrode latéralement vers le sol de résistivité inférieure sera un bon moyen d'obtenir la conception optimale. Cependant, si θ est petite, le déplacement l'emplacement de l'électrode ne peut pas être pratique. La situation va être traitée comme elle est.

Supposons que l'inclinaison est petite, nous pouvons approximer l'interface des couches inclinées par un plan plat, et donc parallèle à la surface de la terre. Cela réduit le problème à un problème

de terre à deux couches qui peut être manipulé comme dans les chapitres précédents. L'effet de la grandeur de l'angle θ sur ce rapprochement est discuté dans ce chapitre.

3.4 Type-2 de la couche inclinée de la terre

Cette situation est représentée sur la figure 3.2. Par souci de simplicité, la géométrie est supposée être symétrique. Ceci est en effet le cas le plus défavorable. Une augmentation de θ signifie une diminution du volume de la couche supérieure du sol, et vice versa. Cela affecte néanmoins directement la résistance de terre de l'électrode.

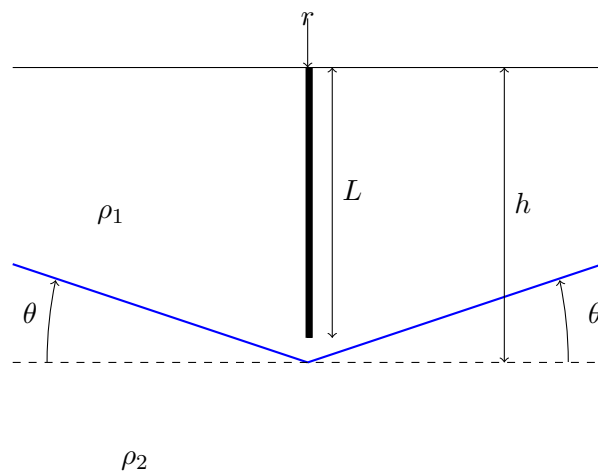


FIGURE 3.2: Type-2 de la couche inclinée de la terre, en forme de V

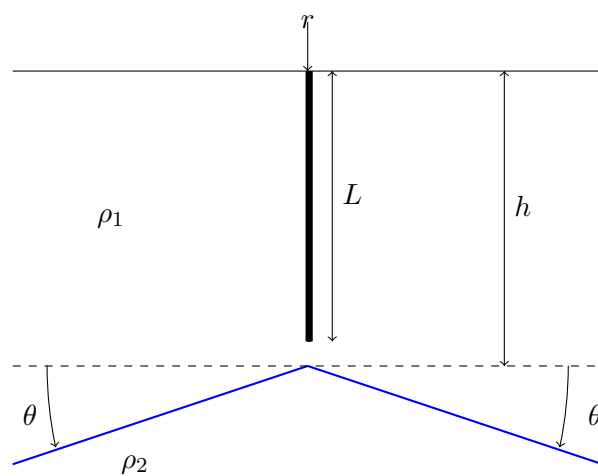


FIGURE 3.3: Type-2 de la couche inclinée de la terre, en forme de V inversé

L'angle θ mesure l'inclinaison de l'interface de la couche. Sur la figure 3.2, cet angle est considéré comme positif et l'interface de la couche est en forme de V. Il est clair qu'un autre cas également défavorable se produit lorsque les couches sont inclinées comme représenté sur la figure 3.3.

Sur la figure 3.3, l'angle θ est considéré comme négatif et l'interface de couche est en forme de V inversé.

3.5 Modèle COMSOL (MEF) et Résultats de la simulation

Supposons qu'il y ait une seule tige verticale d'une longueur L de 20m et d'un rayon r de 0,127m mise dans une terre à deux couches inclinées, comme décrit dans le paragraphe (5.4). Les résistivités ρ_1 et ρ_2 des couches supérieure et inférieure sont respectivement de 100 Ω .m et 200 Ω .m. Le modèle utilisé pour effectuer la simulation utilisant le logiciel COMSOL basé sur la MEF est représenté dans la figure 3.4.

L'angle d'inclinaison θ sur la figure 3.4 peut avoir une valeur positive ou négative. La figure 3.4 est similaire à celle 3.2 si θ est positif, et à celle 3.3 si θ est négatif. Les conditions aux limites imposées sont les mêmes décrites dans les paragraphes 2.4 et 2.5, Il s'agit de "Neumann" sur le plan supérieur et de "Dirichlet" sur le plan de bord et le plan inférieur.

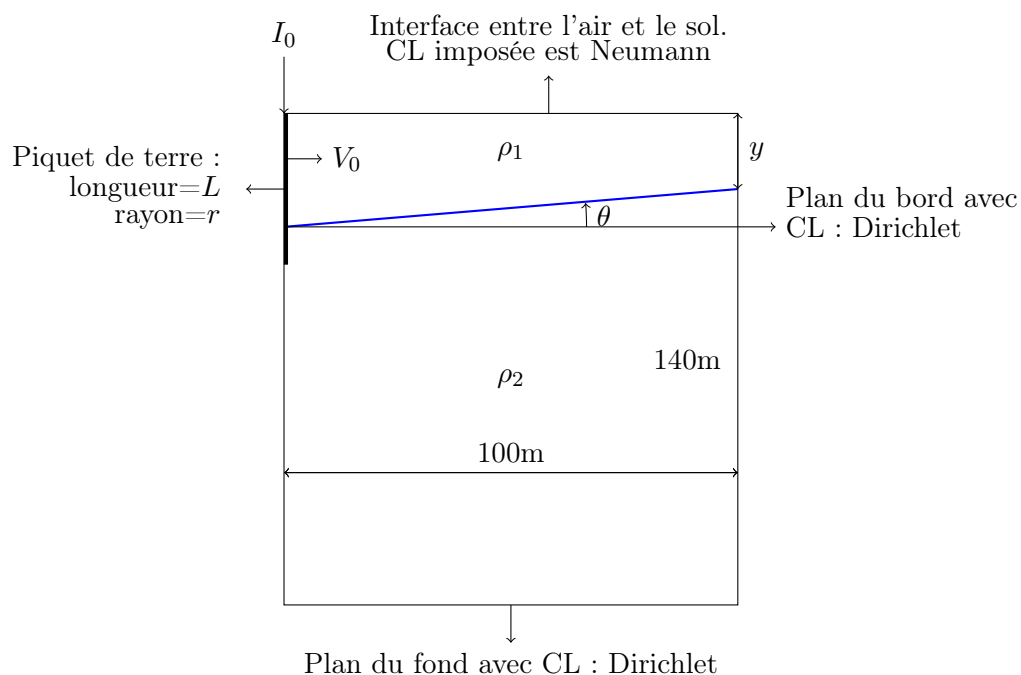


FIGURE 3.4: Modèle axisymétrique d'une tige verticale dans un sol incliné composé de deux couches

Les tables 3.1, 3.2 et 3.3 montrent les résultats obtenus à partir de simulations pour des valeurs de D (D étant l'épaisseur de la couche supérieure) égale à 18, 30 et 40 m, ce qui correspond à 90, 150 et 200% de L . Dans cette simulation, l'angle θ varie de -10 à 10 degrés par pas de 2 degrés. Notons que lorsque θ est de 0 degré, nous avons affaire à un fonctionnement en parallèle, donc une terre à deux couches parallèles (donc non inclinées).

Les valeurs dans la colonne "différences" dans les tables 3.1, 3.2 et 3.3 sont les différences en pourcentage entre les résistances R_{est} simulées et celles de R_{est} évaluées à θ égal à 0 degré. Ceci démontre l'effet de l'inclinaison des couches sur la résistance de mise à la terre de l'électrode.

θ (°)	$Y[m]$	R_{est} (Ω)	Différence (%)
10	0,37	5,58	11,53
8	3,94	5,41	8,13
6	7,49	5,33	6,54
4	11,01	5,23	4,54
2	14,51	5,07	1,34
0	18,00	5,00	0
-2	21,49	4,92	1,66
-4	24,99	4,86	2,85
-6	28,51	4,79	4,26
-8	32,05	4,72	5,66
-10	35,63	4,66	6,86

TABLE 3.1: $D=18m$ (90% de L); $\rho_1=100 \Omega.m$ et $\rho_2=200 \Omega.m$

θ (°)	$Y[m]$	R_{est} (Ω)	Différence (%)
10	12,37	4,57	7,03
8	15,95	4,51	5,62
6	19,49	4,46	4,45
4	23,01	4,41	3,28
2	26,51	4,36	2,11
0	30,00	4,27	0
-2	33,49	4,28	0,24
-4	36,99	4,25	0,47
-6	40,51	4,21	1,40
-8	44,05	4,20	1,64
-10	47,63	4,19	1,87

TABLE 3.2: $D=30m$ (150% de L); $\rho_1=100 \Omega.m$ et $\rho_2=200 \Omega.m$

θ (°)	Y[m]	R_{est} (Ω)	Différence (%)
10	22,37	4,24	2,42
8	25,95	4,22	1,93
6	29,49	4,21	1,69
4	33,01	4,18	0,97
2	36,51	4,16	0,48
0	40,00	4,14	0
-2	43,49	4,13	0,24
-4	46,99	4,12	0,48
-6	50,51	4,11	0,72
-8	54,05	4,09	1,21
-10	57,63	4,05	2,17

TABLE 3.3: $D=40\text{m}$ (200% de L) ; $\rho_1=100 \Omega.\text{m}$ et $\rho_2=200 \Omega.\text{m}$

3.6 Discussion des résultats

Les tables 3.1, 3.2 et 3.3 représentent trois ensembles de données associées à des valeurs différentes de D . L'angle θ varie de 10 degrés à -10 degrés, et on observe une diminution de la résistance R_{est} . Cette tendance de variation est logique. Comme θ diminue de 10 degrés à -10 degrés, le volume de la couche du sol supérieure caractérisée par la plus faible résistivité ($\rho_1=100 \Omega.\text{m}$) augmente réellement. Cette augmentation de volume de la couche supérieure de la terre provoque une diminution de la résistivité équivalente du système, ce qui entraîne une baisse de la résistance du sol vu que la résistance du sol est proportionnelle à la résistivité équivalente de la terre.

La plus grande différence se produit lorsque θ est à 10 degrés. A partir des résultats de la table 3.1, cette différence peut dépasser 11,53% si D est à 90% de L . Un angle d'inclinaison de 10 degrés, cet angle représente une pente de 18%. Une telle pente est assez brusque pour cette tige de terre.

La différence qui se produit lorsque θ est à -10 degrés est toujours inférieure à celle trouvée lorsque θ est à 10 degrés. Une importante conclusion est obtenue : l'influence de la couche inférieure sur la résistance du sol diminue lorsque l'interface entre les deux couches se déplace vers le bas de l'électrode. Le déplacement de l'interface équivalente entre les 2 couches de sol vers le bas de l'électrode est dû au fait à la variation de θ de 10 degrés à -10 degrés.

En comparant les résultats des tables 3.1, 3.2 et 3.3, nous remarquons que si l'interface entre les deux couches se trouve assez loin de l'électrode, les couches inclinées remplacées par un modèle à deux couches de terre parallèles.

Deux conditions qui favorisent le remplacement des couches inclinées par un modèle de terre à deux couches parallèle (Figure 3.4) :

✓ y doit être plus grand que L , $y > L$.

✓ D doit être supérieur à $2L$, $D > 2L$.

Notons que y désigne l'épaisseur de la couche supérieur dans les bords, L la longueur de la tige et D l'épaisseur de la couche supérieure.

3.7 Conclusion

Lors de l'installation d'une électrode dans un sol à deux couches obliques :

1. Le meilleur emplacement correspond à l'installation de l'électrode dans la région où la résistivité du sol est inférieure. Le choix d'un site approprié est un facteur de première importance dans ce domaine.
2. Le cas le plus défavorable correspond à une inclinaison en forme de V de 10 degrés avec une erreur d'environ 11%.
3. Une inclinaison en forme de V implique un terrain accidenté, ce qui est assez peu probable pour être un bon choix du site de l'électrode.
4. Le remplacement du modèle de la terre en couches inclinées par un modèle de terre fonctionnant composée de plusieurs couches parallèles est conditionné par :
 $y > L$ et $D > 2L$.

Conclusion générale

Cette étude est une contribution à la détermination numérique de la résistance d'une tige verticale enterrée dans un sol multicouche inclinées

Le chapitre deux a été consacré à des discussions sur la méthodologie et les méthodes utilisées pour établir l'exactitude des solutions numériques. Il est intéressant de noter qu'une bonne estimation de R_{est} ne signifie pas nécessairement une bonne solution pour la distribution de potentiel. L'augmentation du nombre total de mailles utilisées dans le modèle est un bon moyen pour arriver à une solution plus fiable de la distribution de potentiel.

Dans le cadre de l'exécution des simulations COMSOL (FEM), tous les modèles et les mailles utilisés ont été évalués pour la précision et la pertinence. Une conclusion importante à partir des résultats présentés dans ce chapitre est que la valeur estimée de la résistance du sol, R_{est} présentée dans ce mémoire sera d'une erreur ne dépassant pas de 10%.

La définitions et le dimensionnement du domaine du modèle utilisé, et l'imposition des conditions aux limites des bords sont très importantes pour une bonne évaluation des résultats.

A partir du chapitre trois, le meilleur emplacement de l'électrode est dans la région où la résistivité du sol est inférieure d'un sol à deux couches inclinées. Le cas le plus défavorable est obtenu lors d'une inclinaison en forme de V de 10 degrés avec une erreur d'environ 11%. Une inclinaison en forme de V implique un terrain accidenté, ce qui est assez peu probable pour être un bon choix du site de l'électrode. Dans le cas où la plus petite épaisseur de la couche supérieure de la terre est plus grande que la longueur de la tige et la plus grande épaisseur de la couche supérieure est plus grand que le double de la longueur de la tige, le modèle de la terre à couches inclinées peut être approché à un modèle de sol à couches parallèles.

En général, la terre peut être en multicouche avec soit des couches horizontales ou non horizontales. Même si des renseignements concernant l'inclinaison sont obtenus, la précision et la fiabilité

sont discutables. D'un point de vu électrique, un modèle terrestre en multicouche parallèles est vraisemblablement suffisant.

S'il existe des preuves géophysique qui soutiennent l'existence des couches inclinées. On devrait faire usage de cette information pour choisir le meilleur emplacement de l'électrode, comme en déplaçant l'électrode dans la région ou la résistivité du sol est inférieure. Les problèmes liés à la conception de l'électrode de terre peuvent être considérablement réduits par une simple sélection d'un site approprié

Supposons que les données géophysiques fait faveur de l'examen des couches inclinées dans l'estimation de la résistance du sol pour l'emplacement de l'électrode sélectionnée, un ingénieur de conception peut toujours approcher le modèle de la terre en couches inclinées a un modèle de la terre en multicouche parallèle. Ceci est admissible en raison de la nature de l'incertitude des données géophysiques qui prescrivent un assez grand facteur de sécurité de la conception. Ce facteur de sécurité prend soin de l'erreur encouru par le remplacement du modèle de la terre en couches inclinées par un modèle terrestre en multicouche parallèle. Selon la table 3.1, lorsque l'angle d'inclinaison θ est de 10 degrés, l'erreur résultant du remplacement de ce pire scénario (inclinaison en forme de V avec une terre de deux couches) est d'environ 11%. Dans la conception Pratique de l'électrode de terre, en utilise certainement un facteur de sécurité de la conception supérieur à 1,1. En plus de cela, une inclinaison en forme de V implique un terrain accidenté, ce qui est assez peu probable pour être un bon choix du site de l'électrode. Les deux conditions favorables pour le remplacement du modèle de la terre en couches inclinées par un modèle de terre fonctionnant en multicouches parallèles sont : y doit être plus grand que L et D doit être supérieur à $2L$, c'est à dire $y > L$ et $D > 2L$

Bibliographie

- [1] Electricité de France. *Principes de conception et de réalisation des mises à la terre*. Centre de Normalisation, H 115, Janvier 1984.
- [2] Klajn A. & Markiewicz H. *Mise à la Terre, Aspects Fondamentaux de Construction, Section 6 : CEM et Mise à la Terre*. Leonardo Energy, France, Août 2007. URL www.leonardo-energy.org.
- [3] Nzuru N. J. P. *Contribution à l'Analyse et à la Réalisation des Mises à la Terre des Installations Electriques dans les Régions Tropicales*. Thèse de Doctorat en Sciences, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgique, Février 2009.
- [4] IEEE Std 80-2000. *IEEE guide for safety in AC substation grounding*. janvier 2000.
- [5] Guide d'application de la note H115 Note EDF. *Principes de mise à la terre des ouvrages du service du transport et des télécommunications*. septembre 1991.
- [6] Sunde E.D. *Conduction Effects in Transmission Systems, New York*. Dover Publications Inc, 1968.
- [7] Georges S. *Evaluation 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'Energie à Haute Tension dans un Sol Résistif*. Thèse de Doctorat, Département de Génie Electrique, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, Montréal, Septembre 2001.
- [8] Legrand X. *Modélisation des Systèmes de Mise à la Terre des Lignes Electriques Soumis à des Transitoires de Foudre*. Thèse de Doctorat, Département d'Electrotechnique, Ecole Centrale de Lyon, France, Décembre 2007.
- [9] T. Zenker G. Wessolek Stoffregen.H, U. Yamamanci. *Accuracy of soil water content measurements using ground penetrating radar : comparison of ground penetrating radar and lysimeter data*. Elsevier, Journal of Hydrology 267, pp 201-206, 2002.

-
- [10] J.D. Cooper Robinson. D.A, C.M.K. Gardner. *Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and theta probes : comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity*. Elsevier, Journal of Hydrology 223, pp 198-211, 1999.
- [11] COMSOL Multiphysics. *Modeling Guide*. Version 4.3, 2012.