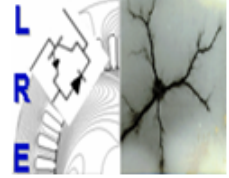


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



École Nationale Polytechnique
Département d'Électrotechnique
Laboratoire de Recherche en Électrotechnique



Mémoire de
Master en Electrotechnique

Présenté par :

HADJI Walid

INTITULÉ

**Méthode numérique simplifiée pour la détermination
de la résistance de l'électrode de mise à la terre
enterrée dans un sol à stratification verticale**

Soutenu le 17 juin 2015 à l'ENP

Membres du Jury d'examen

Président

A. HELLAL

Professeur ENP – Alger

Examineurs

M. TEGUAR

Professeur ENP – Alger

K. BOUGHRARA

Docteur ENP – Alger

ENP 2015

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

www.lre.enp.edu.dz

www.enp.edu.dz

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	ii
Liste des Figures	iv
Liste des Tableaux	v
Abréviations	vi
Symboles	vii
Introduction	viii
1 Résistance de mise à la terre	1
1.1 Introduction	1
1.2 Électrode cylindrique verticale dans un sol homogène	1
1.3 Résistance d'un piquet de terre dans un sol constitué de deux couches	3
1.3.1 Électrodes sur la circonférence d'un cercle	5
1.4 Configuration en anneau compact	6
1.5 Conclusion	7
2 Résistance de l'électrode enterrée dans un sol multicouche	8
2.1 Introduction	8
2.2 Électrode verticale dans un sol constitué de deux couches	8
2.3 Tendance de variation de la résistance de mise à la terre	9
2.4 Effet de la profondeur des couches	12
2.5 Résistivité équivalente pour un sol constitué de deux couches	14
2.5.1 Résistivité équivalente normalisée	14
2.6 Importance des caractéristiques de résistivité équivalente normalisée	15
2.7 Applications des courbes de la résistivité équivalente normalisée	19
2.7.1 Applications des courbes de la résistivité équivalente normalisée sur une électrode verticale enterrée dans un sol composé de deux couches	20
2.7.2 Applications des courbes de la résistivité équivalente normalisée sur un système de plusieurs tiges sur la circonférence d'un cercle	22
2.8 Sol multicouche avec un rapport arbitraire ρ_1/ρ_2	25
2.8.1 Application de la méthode des approximations successives	25
2.9 Discussion sur le rapport ρ_1/ρ_2	27
2.10 Conclusion	29

3 Conclusion générale

30

Bibliographie

32

Table des figures

1.1	Électrode cylindrique verticale dans un sol homogène	2
1.2	Electrode se situant dans la couche supérieure	3
1.3	Electrode traversant les deux couches	4
1.4	Électrodes sur la circonférence d'un cercle	5
2.1	Électrode verticale dans un sol constitué de deux couches	9
2.2	Variation de la résistance de mise à la terre d'une tige verticale dans un sol en deux couches avec $\rho_1=100 \Omega.m$ et $\rho_2=200 \Omega.m$ et $L=20m$	10
2.3	Variation de la résistance de mise à la terre d'une tige verticale dans un sol composé de deux couches avec $\rho_1=200 \Omega.m$ et $\rho_2=100 \Omega.m$ et $L=20m$	11
2.4	Variation de la résistance de mise à la terre d'une tige verticale dans un sol en deux couches avec $\rho_1=500 \Omega.m$ et $\rho_2=1000 \Omega.m$ et $L=20m$	11
2.5	Variation de la résistance de mise à la terre d'une tige verticale dans un sol en deux couches avec $\rho_1=1000 \Omega.m$ et $\rho_2=500 \Omega.m$ et $L=20m$	12
2.6	Modèle axisymétrique d'une tige verticale dans un sol multicouche	13
2.7	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=1/2$	16
2.8	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=2$	17
2.9	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1 < \rho_2$	18
2.10	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1 > \rho_2$	19
2.11	Électrode verticale dans un sol composé de deux couches	20
2.12	Électrodes sur la circonférence d'un cercle	23
2.13	Électrode verticale dans un sol à quatre couches	25
2.14	Sol à quatre couches réduit en trois couches	26
2.15	Sol à trois couches réduit en deux couches	27

Liste des tableaux

2.1	Estimation de la résistance de mise à la terre en utilisant la technique du paragraphe 2.4. $l = 20\text{m}$, D_1 , D_2 et D_3 sont égaux à 10m, 30m et 50m respectivement	13
2.2	Estimation de la résistance de mise à la terre en utilisant la technique du paragraphe 2.4. $l = 20\text{m}$, D_1 , D_2 et D_3 sont égaux à 8m, 8m et 24m respectivement	14
2.3	Comparaison entre R_{equiv} , R_{exact} et R_{exact_p} pour un système de terre composé de deux couches en utilisant l'approche du paragraphe 2.5 pour $\rho_1=100 \Omega.m < \rho_2$, $L=100\text{m}$ et $r=0.127\text{m}$	23
2.4	Comparaison entre R_{equiv} , R_{exact} et R_{exact_p} pour un système de terre composé de deux couches en utilisant l'approche du paragraphe 2.5 pour $\rho_1=100 \Omega.m > \rho_2$, $L=10\text{m}$ et $r=0.127\text{m}$	23

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

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

Introduction

On se rapportant à l'importance de la sécurité et de la performance des stations du convertisseurs du HVDC, le système de mise à la terre devrait être désigner délicatement et adéquatement. les types commun des configuration de la station du convertisseur DC (redresseur) sont monopolaire, bipolaire et tête-bêche. les systèmes monopolaire et têtebêche utilisent la terre comme un retour et donc l'électrode de la terre transporte le courant nominal continu vert un système monopolaire et le double pour un système homopolaire. Pour les systèmes bipolaire, seulement un petit courant différentielle circule vert le retour à la terre. Ce courant différentiel est due à la différence de reactance , aux caractéristiques des deux pôles. L'amplitude de ce courant différentielle est plus petite que le courant nominal et sa direction demeure imprévisible. Si l'un des pôles a un défaut, le système bipolaire peut être basculer vers un mode monopolaire qui est capable de maintenir la moitier de sa puissance nominale. Dans ce cas la, le courant nominale est renvoyé vers la terre. Plusieurs facteurs et critères sont impliqués dans le désigne de l'électrode de la terre du système HVDC, le facteur le plus important est la résistivité du sol.

Dans le premier chapitre, nous présentons les méthodes analytiques permettant le calcul de la résistance de diverses configurations des systèmes de mise à la terre enfouis dans différents types de sol.

Le deuxième chapitre est consacré d'abord à la simulation d'une terre à deux couches. Cette technique est généralisée afin d'étudier une terre multicouche. Les résistivités des différentes couches sont remplacées par une résistivité équivalente, pouvant être utiliser dans les équations analytiques. De ce fait, la terre multicouche a été transformée en terre homogène.

Notre simulation a été faite en utilisant le logiciel COMSOL *Multiphysics* v.4.3. Ce dernier est basé sur la méthode des éléments finis (FEM). Une comparaison entre nos résultats et ceux obtenus les formules analytiques est présentée.

Chapitre 1

Résistance de mise à la terre

1.1 Introduction

Nous nous intéressons, dans ce chapitre, à la présentation méthodes analytiques relatives au calcul la résistance de quelques systèmes de terre ainsi qu'aux principales techniques de mesure de la résistivité de terre.

En effet, un système de terre est modélisé, en basse fréquence, par une résistance. Le meilleur système de terre est celui qui possède une résistance la plus faible. Cependant, cette dernière est varie en fonction des paramètres géométriques d'un tel système et géologiques du sol.

1.2 Électrode cylindrique verticale dans un sol homogène

Dans la littérature, trois relations ont été développées pour la détermination de la résistance d'un piquet de terre vertical [1] [2] [3] (Figure 1.1), de forme cylindrique :

La relation de Dwight-Sunde [4] :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \frac{4L}{r} - 1 \right] \quad (1.1)$$

La relation de Rudenberg [4] :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \frac{4L}{d} \right] \quad (1.2)$$

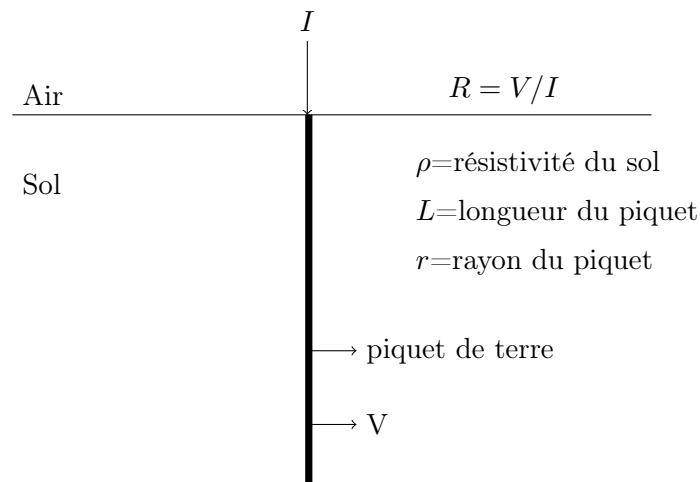


FIGURE 1.1: Électrode cylindrique verticale dans un sol homogène

La relation de Liew-Darveniza [4] :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \frac{r + L}{r} \right] \quad (1.3)$$

avec ρ la résistivité du sol, L la longueur de l'électrode et d le diamètre de l'électrode.

L'hypothèse la plus importante est que la longueur de la tige doit être beaucoup supérieure à son rayon ($L \gg r$).

Un examen de l'équation (1.1) démontre que le rayon de la tige ne joue pas un rôle très important en termes de détermination de sa résistance de terre.

La longueur de la tige est la première variable de conception qui affecte la résistance du sol. En général, plus la longueur de la tige augmente, plus la résistance du sol diminue. La résistivité du sol est néanmoins, le facteur le plus important qui affecte la résistance du sol. Ceci est un paramètre géologique que l'on a peu de contrôle. Il devient une question de choix stratégique du site.

Par ailleurs, le rayon affecte la capacité de dissipation de chaleur de la tige.

L'équation (1.1) ne donne pas d'informations sur la distribution du champ, mais introduit une erreur de seulement quelques pour cent [5].

1.3 Résistance d'un piquet de terre dans un sol constitué de deux couches

Tagg a établi la relation donnant la résistance d'une électrode cylindrique verticale de longueur l et de rayon r dans un sol composé deux couches de résistivité ρ_1 et ρ_2 respectivement [4].

Deux cas sont alors considérés :

L'électrode peut se situer entièrement dans la couche supérieure ou elle peut traverser les deux couches.

Pour une électrode se situant dans la couche supérieure de résistivité ρ_1 (Figure 1.2), la résistance correspondante est donnée par :

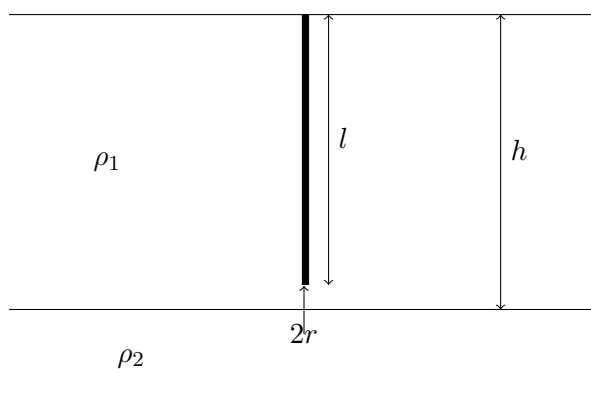


FIGURE 1.2: Electrode se situant dans la couche supérieure

$$R_{exact} = \frac{\rho_1}{2\pi L} \left[\left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right) + \sum_{i=1}^{n=\infty} \frac{K^i}{2} \cdot \ln \frac{\frac{iD}{L} + 1}{\frac{iD}{D} - 1} \right] \quad (1.4)$$

$$\text{avec : } K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

avec :

l : longueur de l'électrode ;

K : coefficient de réflexion donnée par la relation ;

h : profondeur de la couche de résistivité ρ_1 ;

i : nombre entier varié de 1 a ∞ .

Pour une électrode qui traverse deux couches de résistivités différentes (Figure 1.3), la résistance est donnée par :

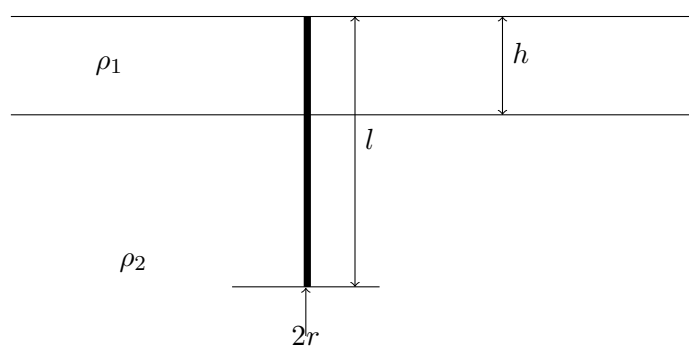


FIGURE 1.3: Electrode traversant les deux couches

$$R_{exact} = \frac{\rho_1}{2\pi L} \cdot \frac{1 + K}{(1 - K) + 2K \frac{D}{L}} \left[\ln \frac{2L}{r} + \sum_{n=1}^{n=\infty} K^n \ln \frac{(2nD + L)}{(2n - 2)D + L} \right] \quad (1.5)$$

$$R_{exact} = F[R_1 + R_a]$$

$$\text{avec : } K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad \text{et} \quad F = \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{K^n}{2} \ln \frac{nh/l + 1}{nh/l - 1}$$

Tel que r est le rayon et l est la longueur de la tige, h est la profondeur de la couche supérieure, le facteur de pénétration F est défini par une série de courbes [4], R_1 est la résistance de piquet de terre du sol homogène de résistivité ρ_1 , R_a est la résistance supplémentaire à la seconde couche et K est le coefficient de réflexion.

1.3.1 Électrodes sur la circonférence d'un cercle

Afin de parvenir à une formule qui peut être utilisée pour estimer la résistance d'un système d'électrode à multiples tiges comme le montre la figure 1.4, les tiges individuelles sont remplacées par une hémisphère équivalente. Il est sous-entendu ici que toutes les tiges sont identiques et l'espace entre tiges est constant, donc la géométrie est symétrique. Avec ce remplacement, on obtient l'équation (1.6) [4].

Pour appliquer l'équation (1.6), on doit connaître la résistance de mise à la terre obtenue avec les barres individuelles utilisées pour former le système d'électrode à tiges multiples dans le site sélectionné. Cette valeur peut facilement être obtenue à partir de l'équation (1.1).

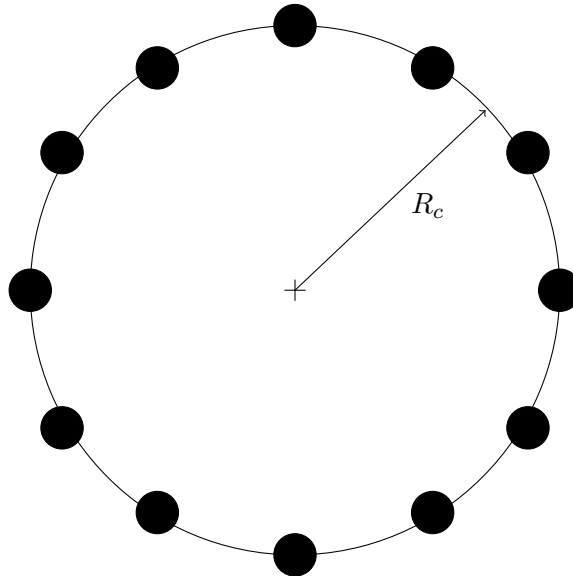


FIGURE 1.4: Électrodes sur la circonférence d'un cercle

$$\frac{R_{electrode}}{R_{tige}} = \frac{1 + 0.5\alpha \sum_{S=1}^{S=\frac{n}{2}-1} \cos \frac{S\pi}{n}}{n} \quad (1.6)$$

avec :

$R_{electrode}$: Résistance des multiples électrodes ;

R_{tige} : Résistance d'une tige individu isolée ;

n : Nombre de tiges totales ;

r : rayon de l'hémisphère équivalent qui remplace la tige ;

R_c : rayon du cercle formé par les tiges ;

$\alpha=r/R_c$.

L'équation (1.6) a été obtenue en remplaçant les tiges par des demi-sphères. On suppose que l'espace entre les tiges doit être égal ou supérieur à deux fois le rayon de l'hémisphère équivalente. Avant d'utiliser l'équation, il faut toujours vérifier la géométrie du système d'électrode à tiges multiples à l'aide de l'équation (??) pour assurer que cette hypothèse est valable.

Avant d'utiliser l'équation (1.6), il faut toujours vérifier la géométrie du système d'électrode à tiges multiples à l'aide de l'équation (??) pour vous assurer que cette hypothèse est valable. Des problèmes se posent lorsque les tiges utilisées sont très longues en longueur et sont disposées près de l'autre dans le cercle. Dans ces conditions, l'équation (1.6) donnant un résultat erroné, offert l'équation (1.6) donne effectivement une approximation assez conservatrice. La vraie résistance de mise à la terre peut être Inférieure ou égale 5-25 %. Ils existent des solutions analytiques similaires à l'équation (1.6) pour différents systèmes d'électrodes multiples.

1.4 Configuration en anneau compact

Une configuration en anneau compact est composé de longues tiges verticales, proches les unes des autres et disposées en cercle. Autrement dit, l'arrangement est identique à la disposition représentée sur la figure 1.4 mais l'espacement entre les barres est beaucoup plus petite. Cela implique que l'équation (1.6) ne peut pas être utilisée dans ce cas. L'équation suivante donne la résistance de ce système d'électrode comprenant toutes les mutuelles résistances [6] :

$$R_n = \frac{1}{n} \left[R_1(\alpha) + \sum_{m=1}^{n-1} R_1 \left(D \sin \frac{m \cdot \pi}{n} \right) \right] \quad (1.7)$$

où :

$$R_1(x) = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \left[\frac{2l}{x} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{x}{2l} \right)^2} \right) \right] + \frac{x}{2l} - \sqrt{1 + \left(\frac{x}{2l} \right)^2} \right] \quad (1.8)$$

avec :

ρ : Résistivité du sol ($\Omega.m$);

l : longueur de la tige individuelle (m);

D : diamètre de l'anneau (m);

n : nombre totale de tiges;

α : rayon d'une tige.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les différentes méthodes analytiques et expérimentales rapportées dans la littérature en vue de déterminer la résistance de mise à la terre. Il est difficile de calculer une valeur exacte de la résistance de mise à la terre. Ceci est dû essentiellement au fait que les relations décrivant la résistance de mise à la terre proviennent de l'hypothèse que le sol a une structure homogène et une résistivité constante. Le recours aux mesures est indispensable pour l'obtention des valeurs réelles.

Chapitre 2

Résistance de l'électrode enterrée dans un sol multicouche

2.1 Introduction

La considération d'une terre multicouche avec des résistivités ρ_k différentes, est plus réaliste. Compte tenu de la résistivité et les configurations des couches, le défi est de savoir comment modéliser un système de terre enfouis dans un sol multicouche. La plupart des solutions analytiques sont générés pour le cas d'une terre homogène. Ces solutions ne sont pas valides dans le cas d'une terre multicouche. Le but des travaux de recherche dans le domaine est d'avoir une seule valeur de résistivité apparente, équivalente à l'ensemble des résistivités de la terre multicouche ; c'est l'objectif principal de ce présent chapitre.

Au départ, une terre à deux couches est considérée ; ensuite, des techniques pour étudier la terre multicouche sont suggérées. Les couches de terre sont supposées être parallèles à la surface de la terre. Il est évident que par le remplacement des résistivités différentes ρ_k , avec une résistivité équivalente ρ_{eqv} , le problème est grandement simplifié, ce qui facilite les efforts de calcul. Cette résistivité équivalente ρ_{eqv} , est également possible de l'utiliser dans les équations analytiques.

2.2 Électrode verticale dans un sol constitué de deux couches

Une électrode verticale enterrée dans un sol composé de deux couches est représentée sur la figure 2.1, donc le sol est non homogène. La couche supérieure est caractérisée par une épaisseur

D et une résistivité ρ_1 . La couche inférieure possède une résistivité ρ_2 et une épaisseur infinie. Pour faciliter l'analyse et la discussion, l'épaisseur de la couche supérieure est exprimée en pourcentage de la longueur de la tige L , (lorsque $D = 0,5L$ implique que la couche supérieure se prolonge à partir de la surface de la terre à une distance de $L/2$, la couche inférieure).

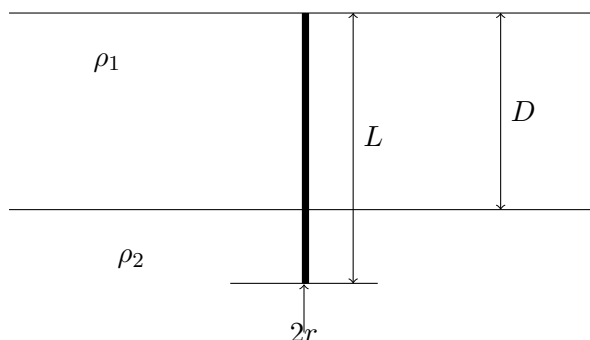


FIGURE 2.1: Électrode verticale dans un sol constitué de deux couches

2.3 Tendence de variation de la résistance de mise à la terre

Supposant que l'électrode est verticale avec une longueur de $L=20\text{ m}$ et un rayon $r=0,1778\text{ m}$. Lorsque la couche supérieure a une résistivité $\rho_1=100\ \Omega.m$ et la couche inférieure a une résistivité $\rho_2=200\ \Omega.m$. Dans ces conditions, le rapport ρ_1/ρ_2 est $1/2$. Dans le cas contraire, lorsque $\rho_1=200\ \Omega.m$ et $\rho_2=100\ \Omega.m$, le rapport devient 2 .

Ce sont deux cas distincts qui représentent deux types de variations très différentes de résistances.

Les figures 2.2 et 2.3 montrent les résultats ainsi obtenus en faisant varier l'épaisseur de la couche supérieure D , et ce pour ρ_1/ρ_2 égale à $1/2$ et 2 respectivement.

L'axe des abscisses représente l'épaisseur variable de la couche supérieure et l'axe des ordonnées correspond à la résistance du sol estimée R_{est} . Une telle estimation a été déjà présentée et débattu dans le chapitre 3 avec une erreur inférieure à 5% .

Les figures 2.4 et 2.5 représentent les caractéristiques trouvées pour les deux rapports ρ_1/ρ_2 ($1/2$ et 2) adoptés.

La différence entre la figure 2.2 et la figure 2.4 est que ρ_1 pour la figure 2.2 est de $100\ \Omega.m$ alors pour la figure 2.4 ρ_1 est de $500\ \Omega.m$. De même, ρ_1 pour la figure 2.3 est de $200\ \Omega.m$ alors pour

la figure 2.5 ρ_1 est de 1000 Ω .m.

Il est évident que la tendance des variations est similaire aussi bien sur les figures 2.2 et 2.4, que sur 2.3 et 2.5.

Les figures 2.2 et 2.4 montrent une tendance à la baisse de R_{est} . En effet, pour ces deux figures, ρ_1 est inférieure à ρ_2 .

Comme D augmente, une grande partie de l'électrode est noyée dans le sol qui a une résistivité plus faible, et par conséquent R_{est} diminue. Ceci est toujours vrai car la résistance de la terre est proportionnelle à la résistivité. D'un autre côté, les figures 2.3 et 2.5 montrent une tendance croissante de R_{est} , parce que pour ces deux figures, ρ_1 est supérieure à ρ_2 .

Une vérification rapide et simple concernant la justesse de ces courbes est possible en examinant les points où D est à 0% et 500% de L . Si D est 0%, cela implique que la terre homogène avec une résistivité égale à ρ_2 .

Dans ces conditions la figure 2.2, R_{est} est égale à 8,62 Ω et de l'équation (1.1), R_{exact} est trouvée égale à 8,55 Ω . Pour le deuxième cas correspondant à D égal à 500% de L , R_{est} est égale à 4,29 Ω et de l'équation (1.1) R_{exact} est égale à 4,13 Ω . Dans ce cas, la résistivité effective se rapproche de ρ_1 . Cela montre que ces courbes obéissent à la tendance générale de la variation attendue.

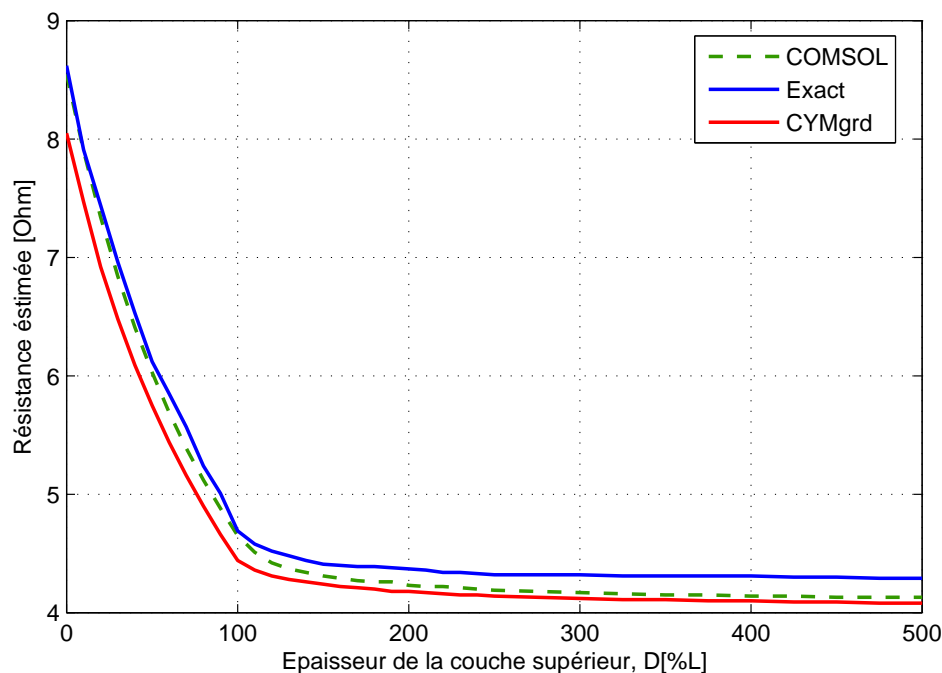


FIGURE 2.2: Variation de la résistance de mise à la terre d'une tige verticale dans un sol en deux couches avec $\rho_1=100 \Omega$.m et $\rho_2=200 \Omega$.m et $L=20$ m

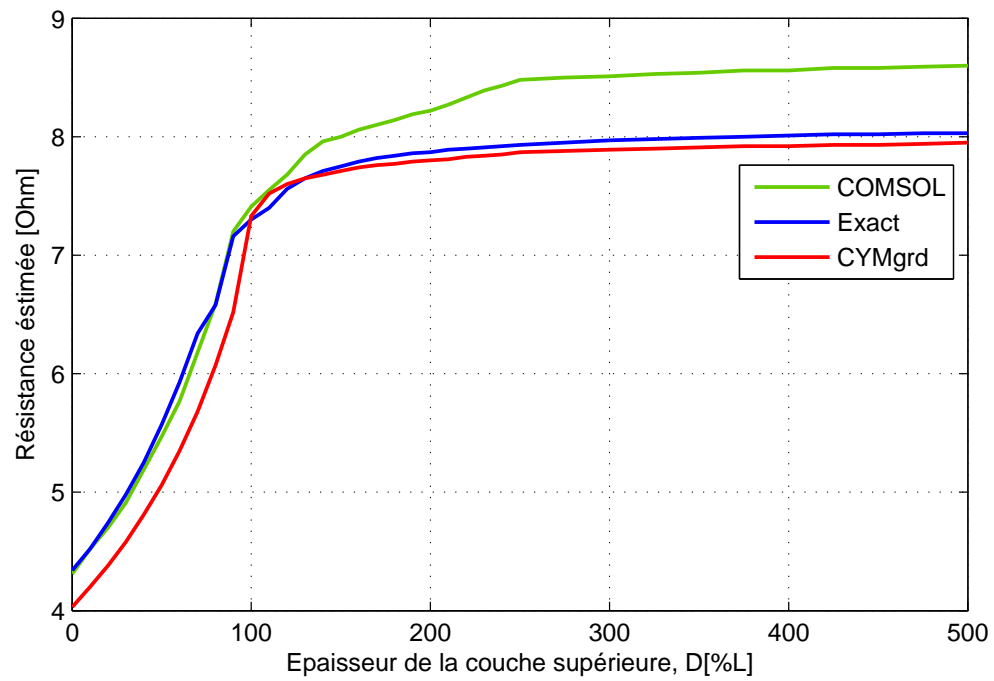


FIGURE 2.3: Variation de la résistance de mise à la terre d'une tige verticale dans un sol composé de deux couches avec $\rho_1=200 \Omega.m$ et $\rho_2=100 \Omega.m$ et $L=20m$

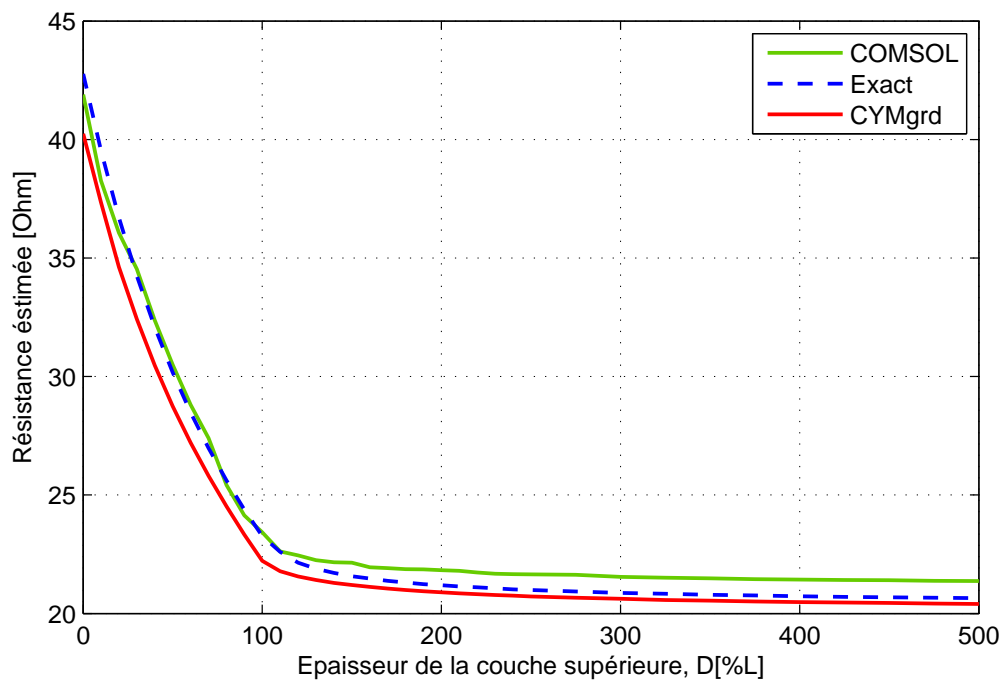


FIGURE 2.4: Variation de la résistance de mise à la terre d'une tige verticale dans un sol en deux couches avec $\rho_1=500 \Omega.m$ et $\rho_2=1000 \Omega.m$ et $L=20m$

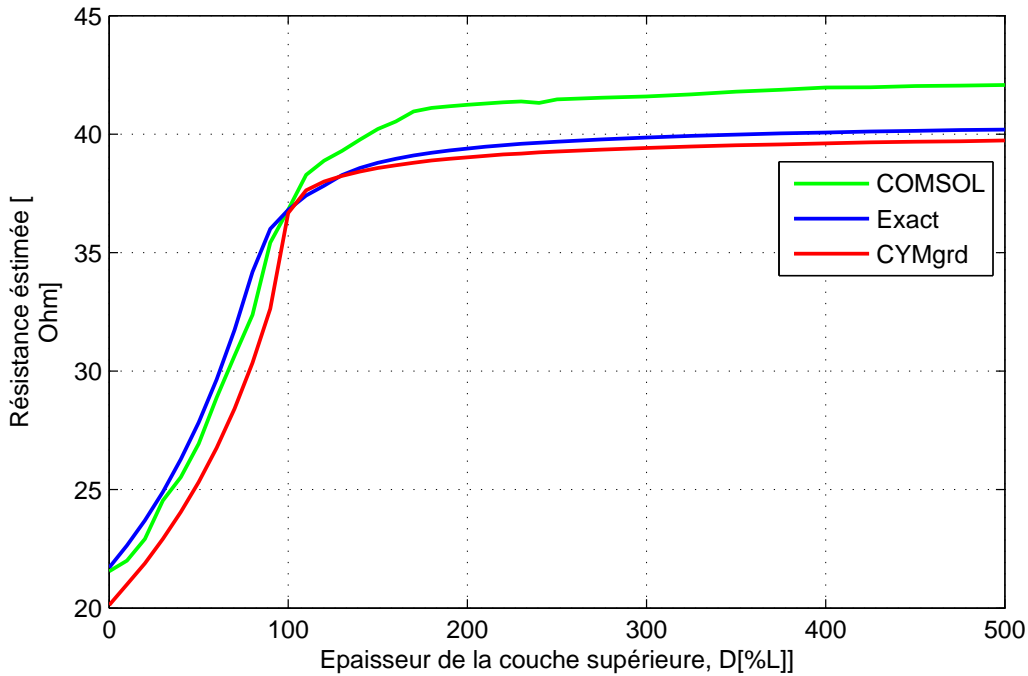


FIGURE 2.5: Variation de la résistance de mise à la terre d'une tige verticale dans un sol en deux couches avec $\rho_1=1000 \Omega.m$ et $\rho_2=500 \Omega.m$ et $L=20m$

2.4 Effet de la profondeur des couches

Les figures 2.2 à 2.5 partagent un trait commun intéressant, qui est une fois que D est supérieur à 200% de L , la variation se stabilise. Ceci conduit à la première conclusion de ce chapitre c'est à dire si la seconde couche est située à une distance de plus de 200% de L en dessous de la surface de la terre, son existence pourrait être ignorée. Nous pouvons simplement remplacer le sol composé de deux couches avec un sol homogène avec une résistivité équivalente, ρ_{eqv} égale à la résistivité de la couche supérieure ρ_1 .

Cette constatation peut être généralisée au cas de multicouche représentée sur la figure 2.6.

Supposons qu'il existe un piquet de terre de longueur L et de rayon r et la terre contient k couches avec k résistivités ρ_k . Soit X un nombre supérieur à 1 et inférieur à k . Si la X ème couche est située à une certaine distance au-delà de $2L$ à partir de la surface de la terre, cette couche et toutes les couches suivantes c'est à dire du X ème jusqu'à k ème couches, pourraient être remplacées par une résistivité équivalente ρ_{eqv} qui est égale à la résistivité de la $(x-1)$ ème couche qui est ρ_{x-1} . Cette approximation encourra une erreur ne dépassant pas 5%.

Prenons un exemple avec une tige de terrain de 20 m de longueur et de rayon de 0.1778m.

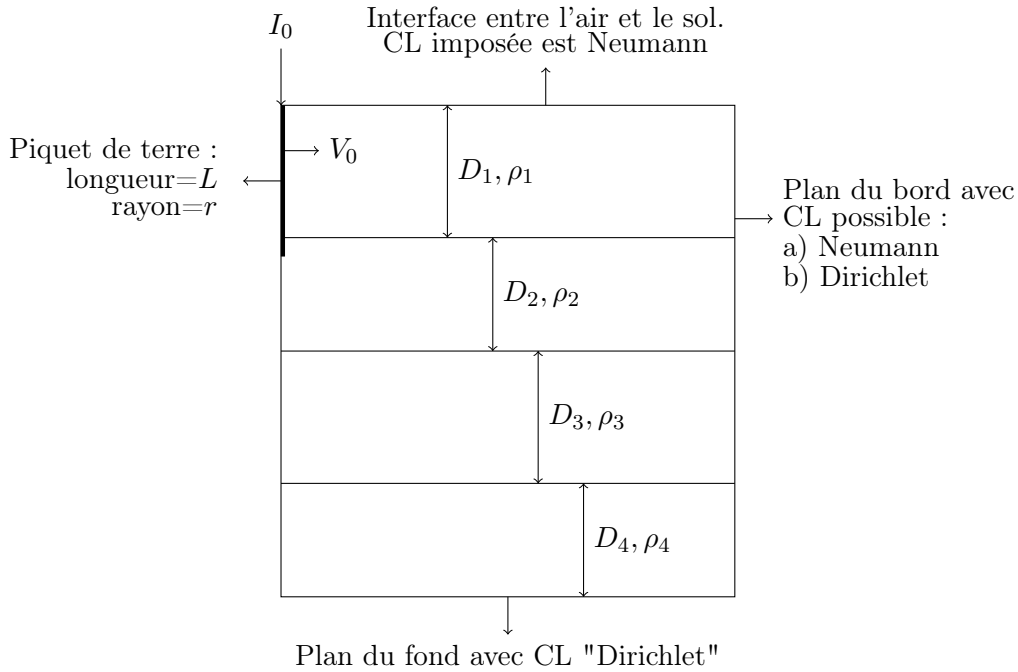


FIGURE 2.6: Modèle axisymétrique d'une tige verticale dans un sol multicouche

La terre est composée de quatre couches avec des résistivités ρ_1, ρ_2, ρ_3 et ρ_4 . D_1, D_2 et D_3 correspondent aux épaisseurs de la 1ère, de la 2ème et de la 3ème couches. Théoriquement, la 4ème couche se prolonge à l'infini vers le bas, donc D_4 tend vers l'infini. Cependant, afin de simuler ce système, un domaine fini est nécessaire donc une valeur finie de D_4 est utilisée.

Les tables 2.1 et 2.2 présentent les résultats obtenus en appliquant l'approximation discutée dans cette section. R_{est} est la résistance apparente exact de mise à la terre obtenue en simulant le système (utilisant COMSOL *Multiphysics* 4.3) considérant l'ensemble des quatre couches de la terre. R'_{est} est la résistance de mise à la terre estimée obtenue en remplaçant les couches situées à une distance de plus de $2L$ par une résistivité appropriée ρ_{eqv} comme il est expliqué dans le paragraphe précédent.

cas	$\rho_1(\Omega.m)$	$\rho_2(\Omega.m)$	$\rho_3(\Omega.m)$	$\rho_4(\Omega.m)$	$R_{est}(\Omega)$	$R'_{est}(\Omega)$	Erreur(%)
1	300	100	1000	10	5,7759	5,7788	0,05
2	300	100	10	1000	5,7817	5,7788	0,05
3	100	300	1000	10	6,9823	6,9744	0,11
4	100	300	10	1000	6,9830	6,9744	0,12

TABLE 2.1: Estimation de la résistance de mise à la terre en utilisant la technique du paragraphe 2.4. $l = 20m$, D_1, D_2 et D_3 sont égaux à 10m, 30m et 50m respectivement

Pour les cas représentés dans la table 2.1, D_1 plus D_2 est égal à $40m$, qui est $2L$. Ceci implique que la 3ème et la 4ème couches peuvent être remplacées par ρ_{eqv} égale à ρ_2 . En d'autres termes, la

deuxième couche se prolonge à l'infini et remplace les 3ème et 4ème couches. Cette approximation permet de réduire le système en quatre couches à un système en deux couches.

cas	$\rho_1(\Omega.m)$	$\rho_2(\Omega.m)$	$\rho_3(\Omega.m)$	$\rho_4(\Omega.m)$	$R_{est}(\Omega)$	$R'_{est}(\Omega)$	Erreur(%)
1	300	100	1000	10	5.2612	5.2613	0.00
2	300	100	10	1000	5.2609	5.2613	0.01
3	100	300	1000	10	6.8215	6.8225	0.01
4	100	300	10	1000	6.8208	6.8225	0.02

TABLE 2.2: Estimation de la résistance de mise à la terre en utilisant la technique du paragraphe 2.4. $l = 20m$, D_1 , D_2 et D_3 sont égaux à 8m, 8m et 24m respectivement

Pour les cas représentés dans la table 2.2. D_1 plus D_2 est égale à 16m, qui est inférieur à $2L$. Ce qui fait que l'effet de la 3ème couche ne peut être ignoré. En ajoutant D_3 au D_1 plus D_2 , ce qui permet de prolonger la troisième couche infiniment pour remplacer la 4ème couche. Donc le système en 4 couches a été remplacé par un système en 3 couches.

Il est évident que cette méthode d'approximation devrait produire des résultats très acceptables.

2.5 Résistivité équivalente pour un sol constitué de deux couches

Cette section est consacrée à une discussion sur la déduction des courbes de résistivité équivalente normalisée. Ces courbes peuvent être utilisées pour trouver la résistivité équivalente. L'application de ces courbes sera démontrée par des exemples.

2.5.1 Résistivité équivalente normalisée

Les figures 2.2 à 2.5 montrent la variation de la résistance de mise à la terre estimée R_{est} en fonction de l'épaisseur de la couche supérieure D . En utilisant l'équation (2.1) et les figures 2.2 à 2.5, nous pouvons obtenir les courbes de résistivités équivalentes normalisées.

Pour une tige verticale dans un sol homogène, la résistance de mise à la terre est :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \frac{4L}{r} - 1 \right] \quad (2.1)$$

Si L et r sont connus, l'équation (2.1) permet d'écrire :

$$R = \rho A \quad (2.2)$$

où :

$$A = \frac{1}{2\pi L} \left[\ln \frac{4L}{r} - 1 \right]$$

Le sol composé de deux couches ayant une résistivité ρ_1 et ρ_2 respectivement peut être remplacé par un sol homogène de résistivité équivalente ρ_{eqv} . Dans ces conditions :

$$R = \rho_{eqv} A \quad (2.3)$$

La valeur de la résistance R dans l'équation (2.3) est obtenue à partir des caractéristiques 2.2 à 2.5 en fonction de la valeur de ρ_1, ρ_2 et D . En d'autres termes, R dépend des conditions sur la terre et l'électrode. Supposons que R_n est la résistance de mise à la terre obtenue à partir d'un sol homogène d'une résistivité égale à la résistivité de la couche supérieure ρ_1 . Dans ces conditions, R_n peut se mettre sous la forme suivante :

$$R_n = \rho_1 A \quad (2.4)$$

Nous avons normalisé la résistance R en choisissant R_n comme base. Notons que R_n est une constante qui dépend de L , r et ρ_1 .

Divisons l'équation (2.3) par l'équation (2.4), On obtient :

$$\frac{R}{R_n} = \frac{\rho_{eqv}}{\rho_1} \quad (2.5)$$

2.6 Importance des caractéristiques de résistivité équivalente normalisée

L'équation (2.5) a un rôle important. En effet, si les figures 2.2 à 2.5 sont normalisées par R_n convenable. Cette équation permet de lire le rapport approprié de $\frac{\rho_{eqv}}{\rho_1}$ correspondant à Une certaine valeur donnée de D en utilisant les courbes normalisées. En multipliant ce rapport par ρ_1 , Nous pouvons obtenir ρ_{eqv} , ce qui réduit le système de mise à la terre constitué initialement de deux couches à un sol d'une seule couche.

Un autre fait très important qui a paru après la normalisation des figures 2.2 à 2.5 c'est que les tracés normalisés des figures 2.2 et 2.4 se chevauchent les uns sur les autres comme représenté sur la figure 2.7. La même remarque est faite pour les tracés des figures normalisées 2.3 et 2.5 comme le montre la figure 2.8. Cette constatation nous amène à la conclusion que le rapport $\frac{\rho_1}{\rho_2}$ et D sont les facteurs les plus importants dans la détermination de la tendance de la variation de la résistance de mise à la terre d'une tige verticale dans un sol contenant deux couches.

Les figures 2.7 et 2.8 sont les courbes de résistivité équivalentes normalisées pour le rapport ρ_1/ρ_2 de 1/2 et 2.

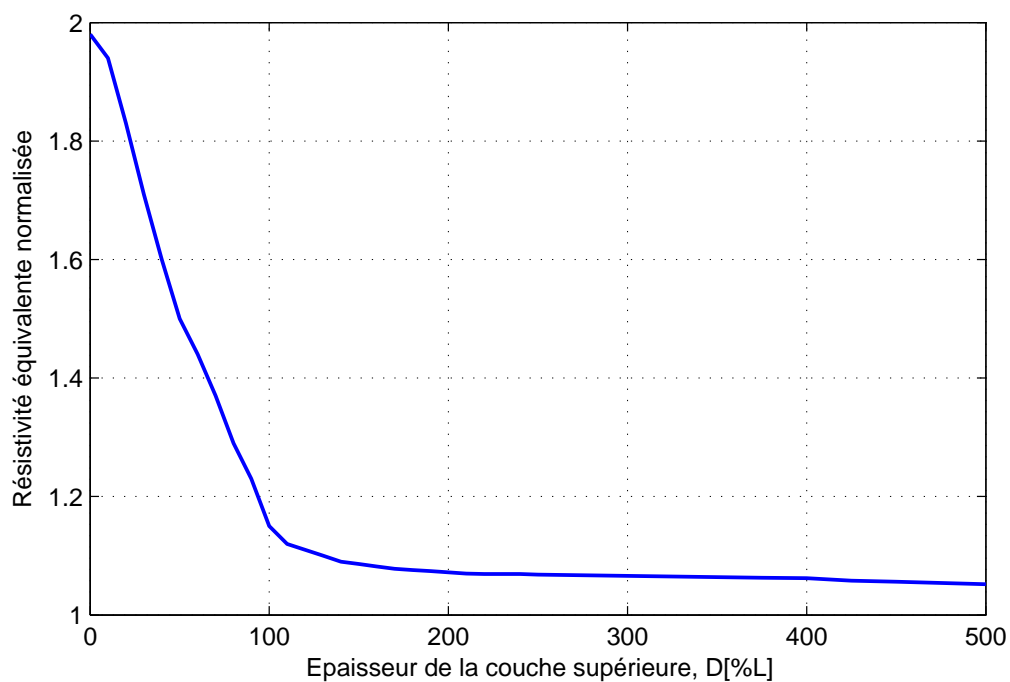
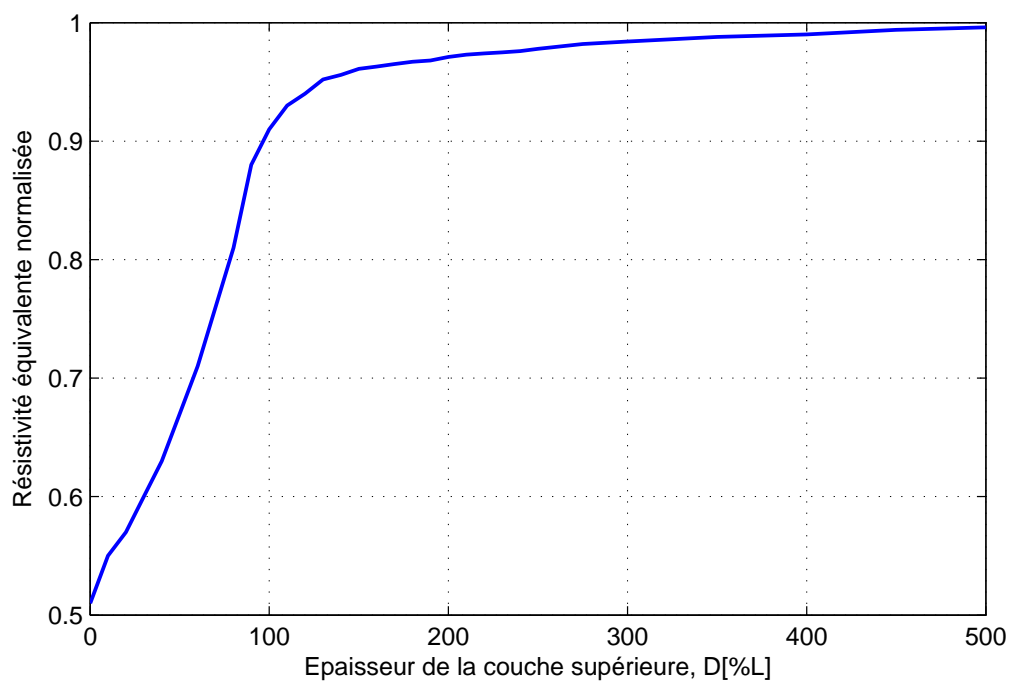


FIGURE 2.7: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=1/2$

FIGURE 2.8: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=2$

Cependant, ces courbes de résistivité équivalente normalisée sont générées en utilisant une tige de longueur L de 20 m et un rayon r de 0,1778 m. Elles peuvent être utilisées pour résoudre des problèmes concernant un sol de deux couches quelle que soit la longueur de la tige et son rayon, tant que $L \gg r$.

Autrement dit, l'influence de r sur ρ_{eqv} , est insignifiante tant que la condition $L \gg r$ est remplie, ce qui est essentiellement vrai pour toutes les tiges pratiques de sol de type vertical. Pour utiliser ces courbes afin d'obtenir ρ_{eqv} , nous avons besoin de connaître les valeurs de L , D , ρ_1 et ρ_2 .

Une fois la résistivité équivalente ρ_{eqv} obtenue, nous pouvons alors utiliser les équations analytiques relatives au calcul de la résistance de mise à la terre dans le cas d'un sol homogène, dans le but de déduire la résistance de mise à la terre pour une électrode dans un sol à deux couches. Le facteur de normalisation est évaluée à l'aide de FEM et non pas en utilisant l'équation (1.1).

Cela a été fait de maintenir la cohérence dans le processus de calcul des courbes de résistivité équivalents normalisés. Rappelons que toutes les valeurs de R_{est} ne contiennent pas une erreur plus de 5%. Si on utilise l'équation (1.1) pour obtenir R_n , les courbes de résistivité normalisées ne vont pas atteindre un maximum ou minimum de la valeur 1.

Par conséquent, pour maintenir la cohérence, R_n devrait être obtenue en utilisant FEM et doit être vérifiée à l'aide de l'équation (1.1) pour assurer une erreur pas plus de 5%. Par ailleurs, lors de la simulation de la tige dans un sol à deux couches pour couvrir toute la gamme des D de 0% à 100% de L , il faut toujours vérifier l'adéquation du modèle et de maillage. Ceci est effectué en mettant $\rho_1 = \rho_2 = \rho$, en produisant un sol homogène. La résistance évaluée R_{est} est ensuite comparée à R_{exact} à l'aide de l'équation (1.1). L'erreur ne devrait pas être plus de 5% sur toute la plage de D .

Ces erreurs doivent être très proche de l'erreur de R_n . Cette simple procédure assure l'adéquation du modèle et de maillage ou une fiable R_{est} et favorise la cohérence.

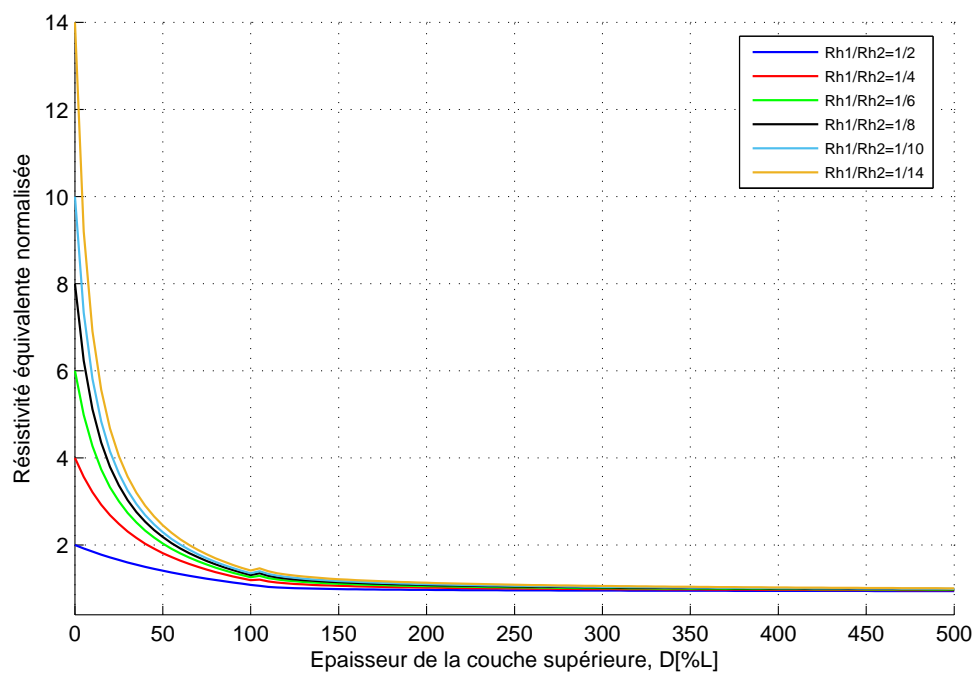
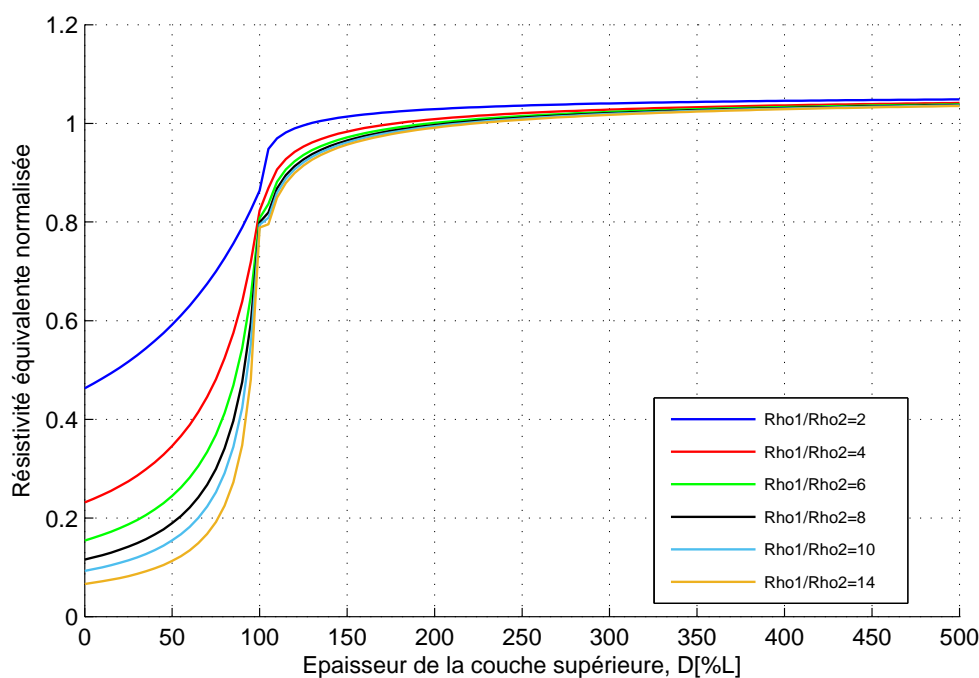


FIGURE 2.9: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1 < \rho_2$

FIGURE 2.10: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1 > \rho_2$

2.7 Applications des courbes de la résistivité équivalente normalisée

Cette section se concentre principalement sur l'application des courbes de la résistivité équivalente normalisée.

Avant de passer aux exemples, nous préférons donner les étapes générales relatives à une telle application de ces courbes. Pour cela, diverses configurations de systèmes de terre se présentent :

Electrode verticale enterrée dans un sol composé de deux couches

- ✓ Identifier D/L en pourcentage ;
- ✓ Identifier ρ_1/ρ_2 et déduire la résistivité équivalente normalisée ;
- ✓ Multiplier la résistivité équivalente normalisée par la résistivité de la couche supérieure ρ_1 pour obtenir la résistivité équivalente ;
- ✓ Utiliser la résistivité équivalente pour calculer la résistance de terre en utilisant l'équation 1.1 ou le logiciel COMSOL *Multiphysics*.

Plusieurs tiges de mise à la terre dans un sol composé de deux couches

- ✓ Supposer qu'il n'y a qu'une seule tige verticale installée dans le site sélectionné ;
- ✓ Identifier D/L en pourcentage ;
- ✓ Identifier ρ_1/ρ_2 et déduire la résistivité équivalente normalisée ;
- ✓ Multiplier la résistivité équivalente normalisée par la résistivité de la couche supérieure ρ_1 pour obtenir la résistivité équivalente ;
- ✓ Utiliser la résistivité équivalente pour calculer la résistance de terre en utilisant l'équation (1.6), (1.7) ou le logiciel COMSOL *Multiphysics*.

2.7.1 Applications des courbes de la résistivité équivalente normalisée sur une électrode verticale enterrée dans un sol composé de deux couches

Soit un système constitué d'une tige verticale enterrée dans un sol composé de deux couches (Figure 2.11). La longueur L et le rayon r de la tige sont égaux à 100m et 0,127m respectivement. La première étape est de vérifier l'adéquation du modèle choisi en supposant que $\rho_1 = \rho_2 = 400 \Omega \cdot m$ et à partir de l'équation (1.1), nous obtenons $R_{exact} = 4,49 \Omega$. En utilisant le logiciel COMSOL, nous avons trouvé que $R_{est} = 4,59 \Omega$; l'erreur est donc de 2%.

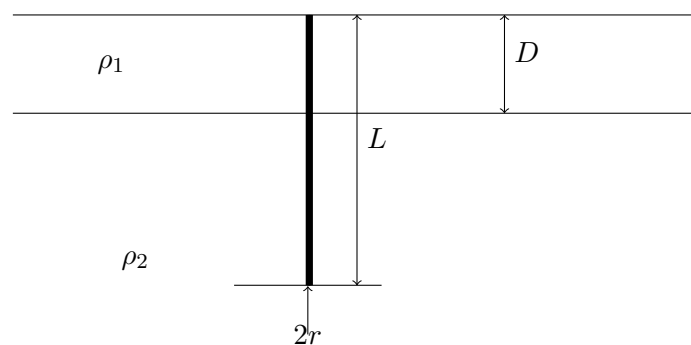


FIGURE 2.11: Électrode verticale dans un sol composé de deux couches

Exemple 1 :

Supposons que $L=100m$, $r=0,127m$, $D=50\%$ de L , $\rho_1=400 \Omega \cdot m$ et $\rho_2=800 \Omega \cdot m$. En utilisant le logiciel COMSOL, R_{est} est égale à $6,09 \Omega$. Donc, la résistance de terre projetée R_{exact_p} est égale à $6,09/0,98$; ce qui donne $6,21 \Omega$.

Étape 1 :

L'épaisseur de la couche supérieure, $D=0,5L$.

Étape 2 :

Le rapport $\rho_1/\rho_2=1/2$, de la figure 2.9, la résistivité équivalente normalisée correspondante $\rho_{eqv_n}=1,42$.

Étape 3 :

Nous avons : $\rho_1=400 \Omega.m$

$$\rho_{eqv} = \rho_{eqv_n} \cdot \rho_1$$

$$\rho_{eqv} = 1,42 \cdot 400$$

$$\rho_{eqv} = 568 \Omega.m$$

Étape 4 :

De l'équation (1.1) : $R_{eqv} = 6,38 \Omega.m$

Cette valeur est proche de la résistance exacte projetée de l'électrode $R_{exact_p}=6,21 \Omega$.

Exemple 2 :

Supposons que $L=10m$, $r=0.127m$, $D=50\%$ de L , $\rho_1=800 \Omega.m$ et $\rho_2=400 \Omega.m$. En utilisant le COMSOL, R_{est} est égale à $40,43 \Omega$. Donc, la résistance de terre projetée R_{exact_p} est égale à $40,43/0,98$, ce qui donne $41,25 \Omega$.

Étape 1 :

L'épaisseur de la couche supérieure, $D=0,5L$

Étape 2 :

Le rapport $\rho_1/\rho_2=2$, de la figure 2.10, la résistivité équivalente normalisée correspondante $\rho_{eqv_n}=0,68$.

Étape 3 :

On a : $\rho_1=800 \Omega.m$

$$\rho_{eqv} = \rho_{eqv_n} \cdot \rho_1$$

$$\rho_{eqv} = 0,68 \cdot 800$$

$$\rho_{eqv} = 544 \Omega.m$$

Étape 4 :

De l'équation (1.1) : $R_{eqv} = 41,17 \Omega.m$. Cette valeur est proche de la résistance exacte projetée de l'électrode $R_{exact_p} (=41,25 \Omega)$.

En comparant R_{exact_p} et R_{est} dans les exemples 1 et 2, nous pouvons dire que la méthode utilisée pour calculer ρ_{eqv} est une bonne approximation. Les valeurs de la longueur L et du rayon r de la tige utilisés dans les deux exemples ne sont pas les mêmes utilisés pour détermination des courbes de la résistivité équivalente normalisée. Par voie de conséquence, ces courbes peuvent être utilisées pour n'importe quelles valeurs de L et r (à condition que $L \gg r$).

Les tables 2.3 et 2.4 illustrent les différentes de la résistivité équivalente ρ_{eqv} (obtenue à partir des courbes de la résistivité équivalente normalisée), R_{exact} (trouvée à partir de la simulation du sol avec deux couches en utilisant COMSOL), R_{exact_p} (déduite à partir de la relation ??) et finalement R_{eqv} déterminée à partir de ρ_{eqv} via COMSOL ou l'équation (1.1). Il est clair que nous pouvons appliquer n'importe quelle approche, étant donné que les résultats obtenus sont très proches.

2.7.2 Applications des courbes de la résistivité équivalente normalisée sur un système de plusieurs tiges sur la circonférence d'un cercle

Dans cette section, nous allons analyser un système de terre constitué de plusieurs tiges placées sur la circonférence d'un cercle à des endroits équidistants (Figure 2.12). Ces tiges sont enterrées

Cas	ρ_1/ρ_2	$D[\%L]$	ρ_{eqv} [$\Omega.m$]	R_{exact} [Ω]	R_{exact_p} [Ω]	R_{eqv} [Ω]
1	1/2	20	181	1,88	1,91	2,03
2	1/3	30	210	2,13	2,18	2,35
3	1/4	40	215	2,11	2,16	2,41
4	1/5	50	190	1,98	2,02	2,13

TABLE 2.3: Comparaison entre R_{eqv} , R_{exact} et R_{exact_p} pour un système de terre composé de deux couches en utilisant l'approche du paragraphe 2.5 pour $\rho_1=100 \Omega.m < \rho_2$, $L=100m$ et $r=0.127m$

Cas	ρ_1/ρ_2	$D[\%L]$	ρ_{eqv} [$\Omega.m$]	R_{exact} [Ω]	R_{exact_p} [Ω]	R_{eqv} [Ω]
1	2	20	58	4,29	4,37	4,39
2	3	30	39	3,20	3,26	2,95
3	4	40	32	2,63	2,68	2,42
4	5	50	29	2,38	2,43	2,20

TABLE 2.4: Comparaison entre R_{eqv} , R_{exact} et R_{exact_p} pour un système de terre composé de deux couches en utilisant l'approche du paragraphe 2.5 pour $\rho_1=100 \Omega.m > \rho_2$, $L=10m$ et $r=0.127m$

dans un sol à deux couches de résistivités ρ_1 et ρ_2 . La solution (la valeur de la résistance de terre) obtenue dans ces conditions à l'aide du COMSOL sera comparée à celle déduite à partir de ρ_{eqv} en utilisant l'équation (1.6) (ou alors à partir du COMSOL, en considérant un sol homogène de résistivité ρ_{eqv}).

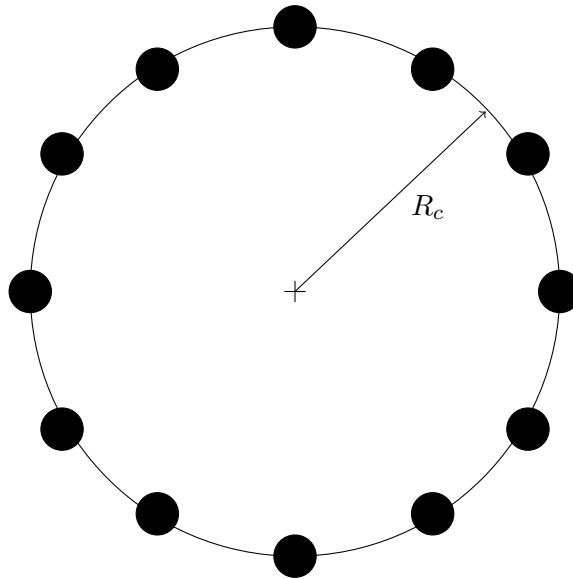


FIGURE 2.12: Électrodes sur la circonférence d'un cercle

Comme exemple, considérons le système représenté sur la figure 2.12, avec $L=2.44$ m, $r=0.0127$, l'épaisseur de la couche supérieure $D=1.952$ m, la résistivité de la couche supérieure $\rho_1=125 \Omega.m$, la résistivité de la couche inférieure $\rho_2=250 \Omega.m$ et le rayon du cercle $R_c=2,46$ m.

En supposant que R_n est la résistance d'une seule tige isolée déterminée en utilisant COMSOL, la résistance estimée de l'électrode est égale à :

$$R_{est} = \left[\sum_{n=1}^m \frac{1}{R_n} \right]^{-1} \quad (2.6)$$

m : le nombre total des tiges.

Pour cela, deux simulations ont été faites :

Simulation 1 : La résistance d'une seule tige individuelle obtenue à l'aide du COMSOL : $R_n =$

57,33Ω

$$R_{exact} = \left(\frac{1}{57,33} + \frac{1}{57,33} + \frac{1}{57,33} + \frac{1}{57,33} + \frac{1}{57,33} + \frac{1}{57,33} + \frac{1}{57,33} + \frac{1}{57,33} + \frac{1}{57,33} + \frac{1}{57,33} + \frac{1}{57,33} \right)^{-1}$$

$R_{exact} = 5,73 \Omega$

Simulation 2 : En utilisant ρ_{eqv}

Étape 1 :

Supposer qu'il n'y a qu'une seule tige verticale installée dans le site sélectionné.

Étape 2 :

L'épaisseur de la couche supérieure, $D=0,8L=80\%L$.

Étape 3 :

Le rapport $\rho_1/\rho_2=1/2$, de la figure $\rho_{eqv_n}=1,2$.

Étape 4 :

Nous avons : $\rho_1=125 \Omega.m$

$$\rho_{eqv} = \rho_{eqv_n} \cdot \rho_1$$

$$\rho_{eqv} = 1,2 \cdot 125$$

$$\rho_{eqv} = 150 \Omega.m$$

Étape 5 :

Nous utilisons $\rho_{eqv} = 150 \Omega.m$, à l'aide du COMSOL : $R_{est} = 5,82 \Omega.m$

2.8 Sol multicouche avec un rapport arbitraire ρ_1/ρ_2

Jusqu'à présent, la technique d'arriver à une résistivité équivalente a été confinée aux cas où la terre est composée de deux couches. Si le nombre de couches est supérieur à 2, la résolution du problème en utilisant les éléments finis peut devenir fastidieux et parfois n'est pas maniable.

2.8.1 Application de la méthode des approximations successives

La figure 2.13 montre une structure d'un sol à quatre couches ; les épaisseurs des couches étant D_1 , D_2 et D_3 . La 4ème couche étend jusqu'à l'infini.

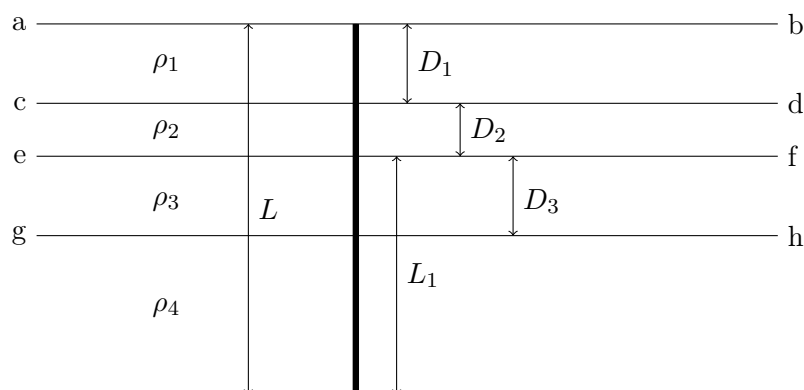


FIGURE 2.13: Électrode verticale dans un sol à quatre couches

L'application des courbes de résistivité équivalente normalisée dans le cas d'une terre à deux couches a été discutée à la section 2.7. Si il y a plus de deux couches ayant différentes résistivités, la décision suivante est recommandée :

On peut commencer par les deux couches les plus basses (profondes), en faisant une approximation successive de la terre à quatre couches à une terre homogène en utilisant les courbes de résistivité équivalente normalisée.

Comme nous l'avons discuté dans la section 2.4, si la couche k située à une distance de plus de $2L$ de la surface de la terre, peut être remplacée par celle $k - 1$.

Par exemple, si on veut approcher une terre à quatre couches par une terre homogène, une 1ère approximation impliquera seulement la 3ème et la 4ème couches c'est à dire ρ_3 et ρ_4 seront remplacées par une résistivité équivalente, ρ_{eqv_1} . Une telle configuration est représentée sur la figure 2.13. Pour ces deux couches, la longueur efficace de la tige, définie à partir de l'interface $e - f$, n'est pas L mais plutôt $[L - (D_1 + D_2)]$, qui est désignée par L_1 et représentée sur la figure 2.13. En effet, après la première approximation, la terre à quatre couches sur la figure 2.13 est réduite à une terre à trois couches comme représentée sur la figure 2.14.

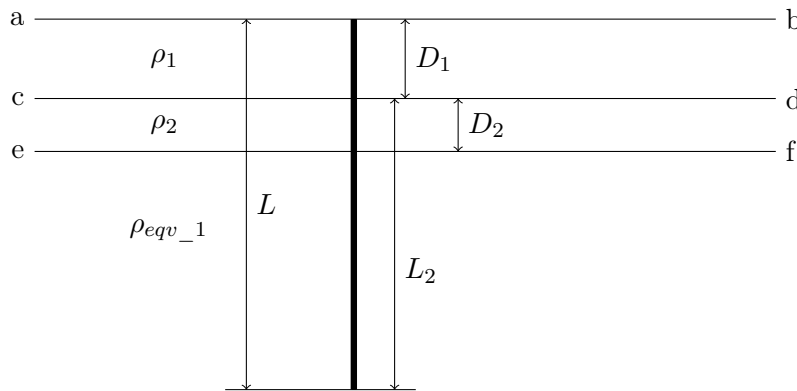


FIGURE 2.14: Sol à quatre couches réduit en trois couches

La 2ème approximation impliquera ρ_2 et ρ_{eqv_1} . Ces deux valeurs définissant un problème de terre à deux couches, permettent la détermination de la résistivité équivalente, ρ_{eqv_2} . Supposons que la tige de terre commence à partir de $c - d$ de la la figure 2.14. L'interface entre la couche supérieure et celle inférieure est $e - f$, et donc l'épaisseur de la couche supérieure est D_2 . La longueur efficace de la tige L_2 est égale à $[L - D_1]$ comme le montre la figure 2.14. Après la 2ème approximation, la terre à trois couches de la figure 2.14 a été réduite à une terre à deux couches comme représentée sur la figure 2.15. Cette terre à deux-couches peut être facilement réduite à une terre homogène avec une résistivité équivalente ρ_{eqv_3} par une troisième et dernière approximation.

En général, une terre à k -couches nécessite $(k - 1)$ approximations pour la réduire à une terre homogène. La longueur efficace de la tige, L_x est la partie de la tige qui est noyée dans la couche de terre sous approximation. Finalement, la longueur effective de la tige deviendra la longueur physique de la tige, L dans la $(k - 1)$ ième approximation.

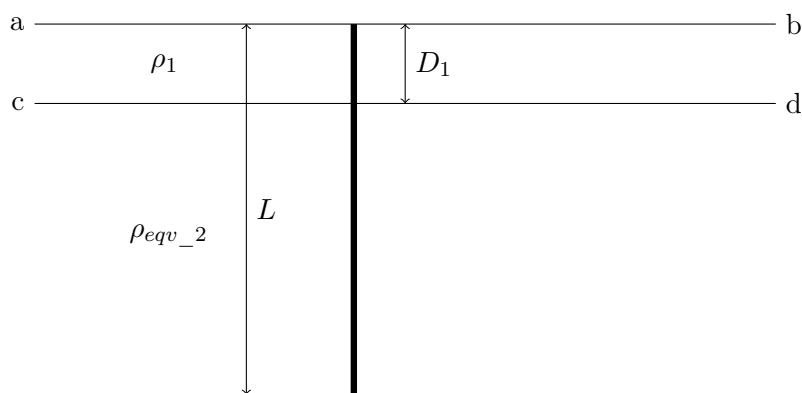


FIGURE 2.15: Sol à trois couches réduit en deux couches

2.9 Discussion sur le rapport ρ_1/ρ_2

Dans un cas pratique, le rapport ρ_1/ρ_2 peut différer des valeurs utilisées pour arriver à les courbes de résistivité équivalents normalisés. Une méthode de faire face à cette situation est d'arrondir le rapport par le rapport ρ_1/ρ_2 le plus proche pour lequel une courbe de résistivité équivalente normalisée est disponible. Le processus de l'arrondissement vers le haut ou l'arrondissement vers le bas du rapport ρ_1/ρ_2 soit ajoute ou diminue le facteur de sécurité dans la conception. Arrondir vers le haut va augmenter le facteur de sécurité, qui ne peut pas être une mauvaise idée. Cependant, arrondir le rapport vers le bas provoque la diminution du facteur de sécurité. Ce n'est pas un problème très grave, car il peut toujours être surmonté par des conceptions prudente et correcte.

Une autre méthode consiste à interpoler entre deux courbes de résistivité équivalente normalisée. Par exemple, si le rapport requis ρ_1/ρ_2 est 11, cette courbe de résistivité équivalente normalisé peut être obtenue en interpolant les courbes de résistivité équivalentes normalisées correspondant au rapport ρ_1/ρ_2 de 10 et 12.

Comme la tendance des variations ne montre pas une dépendance linéaire sur les rapports des ρ_1/ρ_2 . L'interpolation fait introduire une erreur, mais cette erreur est insignifiante. Cependant, l'extrapolation ne devrait jamais être considérée. Si une courbe de résistivité équivalente normalisée correspondant à un rapport ρ_1/ρ_2 qui est au-delà de la gamme des courbes est nécessaire, cette courbe devra être généré, comme indiqué dans le paragraphe 2.5.

Nous considérons le cas ou $\rho_1 > \rho_2$. Dans ce cas, nous utilisons les courbes des résistivités équivalentes normalisées de la figure 2.10.

Nous prenons des valeurs arbitraires de D , ρ_1 et ρ_2 , par exemple $D = 0,5L$; $\rho_1=140$; $\rho_2=20$.

Dans ce cas le rapport de ρ_1/ρ_2 est égale à 7, et cela correspond à une courbes de résistivité équivalente normalisée qui n'est pas tracée dans la figure 2.10. cela va être traité en interpolant les deux courbes du rapport de ρ_1/ρ_2 de 6 et 8.

De la courbe du rapport $\rho_1/\rho_2=6$ et pour $D = 0,5L$, la résistive équivalente normalisée correspondante est $\rho_{eqv_n}=0,25$ De la courbe du rapport $\rho_1/\rho_2=8$ et pour $D=0,5L$, la résistive équivalente normalisée correspondante est $\rho_{eqv_n}=0,19$. Nous obtenons la résistivité équivalente normalisée pour le rapport $\rho_{eqv_n}=7$ et $D=0,5$; par interpolation :

$$\rho_{eqv_n} = \frac{0,19 - 0,25}{8 - 6}(7 - 6) + 0,25 = 0,22$$

Exemple : Soit une tige verticale de longueur $L=100\text{m}$ et un rayon $r=0.127\text{m}$ enterrée dans un sol à 4 couches, $D_1 = D_2 = D_3=20\text{m}$, $\rho_1=70 \Omega.\text{m}$, $\rho_2=100\Omega.\text{m}$, $\rho_3=30\Omega.\text{m}$ et $\rho_4= 20 \Omega.\text{m}$.

1ère approximation Nous commençons par les couches les plus basses, la longueur effective L_1 dans les deux couches les plus bases est égale à 60m qui est la somme des longueurs de la partie de la tige dans ces deux couches. La profondeur de la première couche est égale à 20 m, donc elle est de 33% de L_1 . Et nous avons $\rho_3/\rho_4=1/2$.

de la figure 2.10 :

$$\text{Si } \rho_3/\rho_4=1; D=33\%L; \rho_{eqv_n}=1,00$$

$$\text{Si } \rho_3/\rho_4=2; D=33L\%; \rho_{eqv_n}=0,58$$

Effectuer l'interpolation pour $\rho_3/\rho_4=1,5; D=33\%L$;

$$\rho_{eqv_n1}=0,79$$

$$\rho_{eqv_1}=0,79 \times 30 = 24 \Omega.\text{m}$$

2ème approximation Les deux couches les plus basses sont remplacées par une seule couche avec $\rho_{eqv_1}=24 \Omega.\text{m}$, la terre à quatre couches est réduite à une terre à trois couches. La 2ème approximation nous permet de réduire cette terre à trois couches à une une à deux couches.

La longueur effective L_2 est égale à 80m, $D=2/8=25\%L$, $\rho_2/\rho_{eqv_1}=100/24 = 4$

de la figure 2.10, $\rho_{eqv_n2}=0,30$

$$\rho_{eqv_2}=0,30 \times 100 = 30 \Omega.\text{m}$$

3ème approximation Après la 2ème approximation, les 4 couches ont été réduites en 2 couches avec une résistivité $\rho_1=70 \Omega.\text{m}$ et $\rho_{eqv_n2} =30 \Omega.\text{m}$. La longueur effective L_3 est égale à 100m, $D=20\%L$, $\rho_1/\rho_2=70/30 = 2,33$

De la figure 2.10 : Si $\rho_1/\rho_2=2$; $D=20\%L$; $\rho_{eqv_n}=0,545$

Si $\rho_1/\rho_2=3$; $D=20\%L$; $\rho_{eqv_n}=0,375$

Effectuer l'interpolation pour $\rho_1/\rho_2=2,33$; $D=20\%L$;

$$\rho_{eqv_n3} = 0,48$$

$$\rho_{eqv_3} = 0,48 \times 70 = 34,6 \text{ } \Omega.m$$

Après la 3ème approximation, les 4 couches ont été réduites à une terre homogène avec une résistivité équivalente ρ_{eqv_3} égale à 34,6 $\Omega.m$.

En utilisant ρ_{eqv_3} dans l'équation (1.1), elle nous donne $R_{eqv}=0,3773 \text{ } \Omega$, et à l'aide du COMSOL, nous obtenons $R_{eqv} = 0,3181 \text{ } \Omega$

2.10 Conclusion

Ce chapitre suggère des techniques permettant la détermination de la résistance d'une seule tige ou plusieurs tiges formant un cercle enfouies dans d'un sol multicouche. en vue rendre les équations analytiques applicables, nous procédons au remplacement des résistivités différentes par une résistivité équivalente. La méthodologie à suivre est la suivante :

1. Les couches situées à une distance de plus de $2L$ sont remplacées conformément à la technique discutée dans la section 2.4.
2. L'utilisation de la courbe de résistivité équivalente normalisée permettant le passage d'une terre à deux couches à une terre homogène.
3. Application de la méthode des approximations successives pour réduire la terre multicouche à une terre homogène en commençant par les deux couches les plus basses.
4. La courbe de résistivité équivalente normalisée générée en utilisant une seule tige verticale, peut être utilisée pour résoudre les problèmes nécessitants plusieurs tiges.

Conclusion générale

Cette étude est contribution à la détermination numérique de la résistance d'une tige verticale et de plusieurs tiges verticales de mise à la terre enterrées dans différentes structures de sol. Deux types de sol ont été considérés, à savoir un sol homogène, un sol composé de plusieurs couches parallèles. Dans le but de réduire une terre multicouche en une terre homogène (et donc rendre possible l'utilisation des équations analytiques), une technique basée sur les approximations successives et utilisant la courbe de la résistivité équivalente normalisée a été mise au point. Lors de notre simulation, nous avons utilisé le COMSOL *Multiphysicsv.4.3* basé sur la méthode des éléments finis (FEM). Nos résultats sont confrontés à ceux obtenus en utilisant les formules analytiques citées dans la littérature.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les méthodes analytiques permettant le calcul de la résistance de diverses configurations des systèmes de mise à la terre enfouis dans différents types de sol.

Le deuxième chapitre suggère des techniques pour la manipulation efficace des problèmes de mise à la terre d'un sol multicouche, soit par une seule tige soit par plusieurs tiges disposées le long d'une circonférence d'un cercle. Les principales techniques proposées sont :

Localisation des couches de terre : Il a été démontré que, si les couches sont situées à une distance de plus de $2L$ à partir de la surface de la terre, leur influence est insignifiante ; de telles couches peuvent être remplacées en se basant sur la technique discutée dans la section [2.4](#).

Courbe de résistivité équivalente normalisée : Il s'agit d'une courbe générale qui peut être utilisée pour réduire une terre à deux couches à une terre homogène, indépendamment de la longueur L , et du rayon r de la tige avec $L \gg r$. Pour utiliser cette courbe, il faut identifier deux rapport, le rapport D/L et le rapport de la résistivité de la couche supérieure ρ_1 , à la résistivité de la couche inférieure ρ_2 , qui est le rapport ρ_1/ρ_2 .

Approximations successives : Si la terre se compose de plus de deux couches, nous pouvons employer la méthode des approximations successives pour réduire la terre multicouche à une terre homogène en commençant par les deux couches les plus basses. En effet, pour k -couche de terre, $(k - 1)$ approximations sont nécessaires pour la réduire à une terre homogène.

Électrode à tiges multiples : La courbe de résistivité équivalente normalisée générée en utilisant une seule tige verticale, peut être utilisée pour résoudre les problèmes nécessitant plusieurs tiges. Pour cela, nous ne supposons qu'une seule tige installée dans le site sélectionné. Ensuite, nous appliquons les techniques appropriées abordées dans ce chapitre afin d'avoir une résistivité équivalente, ρ_{eqv} . Cette ρ_{eqv} est un paramètre fiable qui peut être utilisée pour la conception de l'électrode à tiges multiples.

Nous pouvons conclure sur quelque découverte importante dans ce projet de recherche. Ces connues que le paramètre le plus important dans le désigne de la terre du système HVDC est la résistivité du sol car elle contrôle la performance et dicte la taille de l'électrode. Dans ce mémoire, une technique a été proposée pour le simple et efficace calcul de la résistance du sol due aux électrodes embarquées verticalement dans un sol en deux couches avec des couches parallèles cette technique peut être élargit pour conclure sur le sol en plusieurs couches.

Bibliographie

- [1] Comber M. & Zaffanella L. Laforest J. *Transmission Line Referenc Book*. Catalogue de produits, Copyright, 2ème édition, 1989.
- [2] Chong Kiat Ng. *Simplified numerical based method for calculation of dc ground electrode resistance in multi-layered earth*. Thesis of Master of Science, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Manitoba Winnipeg, Manitoba, Canada, June 2000.
- [3] Nolasco J.F. & Kaintzyk U. Kiessling F., Nefzger P. *Overhead Power Lines : Planning, Design, Construction*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2003.
- [4] Tagg G.F. *Earth resistances*. George Newnes Limited, London, first published, 1964.
- [5] H.W. Dwight. *Calculation of Resistances to Ground*. Electrical Engineering, Vol. 55, Décembre 1936.
- [6] Erling Sunde. *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*. D. Van Nostrand Company, Inc, 1949.