

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



Projet de Fin d'Études
En vue d'obtention du diplôme
d'Ingénieur d'État en Électrotechnique

Présenté par :

HADJI Walid et GHALEM Farouk

INTITULÉ

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

Soutenu le 15 juin 2015 à l'ENP

Rapporteur M. TEGUAR

Professeur 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

Déclaration de l'auteur

Je déclare, HADJI Walid , que le mémoire intitulé "**Méthode numérique simplifiée pour la détermination de la résistance de l'électrode de mise à la terre enterrée dans un sol multicouche**" et le travail présenté sont le fruit de mon propre effort, je confirme que :

- Ce travail était élaboré en vue de la soutenance du projet de fin d'étude au département de l'électrotechnique.
- Ce support ne contient aucune forme de plagia.
- Toute information abordée est clairement et précisément attribuée à une référence bibliographique.
- Toute source d'aide à l'élaboration de ce travail est reconnue

Signé :

Date : 06/06/2015

Déclaration de l'auteur

Je déclare, GHALEM Farouk , que le mémoire intitulé "**Méthode numérique simplifiée pour la détermination de la résistance de l'électrode de mise à la terre enterrée dans un sol multicouche**" et le travail présenté sont le fruit de mon propre effort, je confirme que :

- Ce travail était élaboré en vue de la soutenance du projet de fin d'étude au département de l'électrotechnique.
- Ce support ne contient aucune forme de plagia.
- Toute information abordée est clairement et précisément attribuée à une référence bibliographique.
- Toute source d'aide à l'élaboration de ce travail est reconnue

Signé :

Date : 06/06/2015

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, une électrode sphéroïdale et plusieurs tiges verticales dans un sol homogène, ou à stratification verticale ou oblique. 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, sol incliné, 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 or non-horizontal 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, non-horizontal earth, normalized equivalent resistivity.

المخلص

يركز العمل المقدم في هذه الأطروحة على الحساب العددي لمقاومة التأريض 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 منحنى 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 الارتياب المسموحة والمقدرة بـ 10%.

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

Remerciement

Nous remercions Dieu de nous avoir prêté vie, santé et volonté pour achever ce travail. Nous tenons à remercier notre promoteur Monsieur M.TEGUAR, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour tout ce qu'il a sacrifié pour nous, pour sa disponibilité, ses conseils, son suivi constant, et surtout ses qualités humaines.

Nous remercions également notre co-promoteur Mr. Alik Benamrane qui n'a jamais hésité de nous donner les conseils et de nous orienter et a toujours répondu présent pour résoudre les problèmes que nous avons rencontrés durant ce travail.

Nous remercions Monsieur A.BOUBAKEUR, Professeur à l'école Nationale Polytechnique, à l'intérêt qu'il a porté à notre modeste travail et d'avoir accepté de présider ce jury.

Un grand merci à Monsieur A. MEKHALDI, Professeur à l'École Nationale Polytechnique, qui nous a honorés en acceptons d'examiner ce travail.

Enfin, nous remercions tous les enseignants ayant contribué à notre formation...

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents et ma famille, sources de tendresse et d'amours pour leurs soutiens tout le long de ma vie scolaire.

Je dédie ce travail à Ra Cha.

Mes cher amis, Assem, Hamada, Khalil, Djoony, Taloub, Sidali, Coucou, hakim, yacine, khoya kamel, pokche, Mou3taz, Bagou, Hawawa, Farouk, mon amis 9adem, nabil, jugo, zoubir, moh, bedriwi, imad, hassane, issam tiw, rabe7, youcef l'algérois, panini, bachir w hichem w ga3 la clique w ga3 la promo.

Que dieu leur accorde santé et prospérité.

Walid

Dédicaces

Chaleureusement je dédie ce modeste travail :

À mes chères parents pour tout ce qu'ils ont fait pour me soutenir, m'encourager, financier mes études et me donner tout leur soutien durant mon cursus universitaire.

À mon chère frère Sofiane, ma chère sœurs Naziha et son mari Ismail la3ziz.

À tous mes collègues de la promotion ELECTROTECHNIQUE 2015 et surtout Walid, Karim, Jugo, Nabil, Zoubir, Abdelouahab, Ilyes, Mouh, Khadidja et Ammina.

.À tous mes amis proches : Moumen, Billel, Ali, Nabil, Moh seddik, cousin Bob, Ghazi, Omar, Fethi, Lotfi, Lyes, Yacine, Adlane, mouh, Hassen, Youcef, Islem, Salim, Fateh , Abderrezak, Sâm...

Enfin, à tous ceux qui me connaissent,

Farouk

Table des matières

Déclaration de l'auteur	i
Déclaration de l'auteur	ii
Remerciement	iv
Abstract	v
Abstract	vi
Contenu	vii
Liste des Figures	xi
Liste des Tableaux	xiii
Abréviations	xiv
Canstantes Physiques	xv
Symboles	xvi
1 Généralités sur les SMLT et HVDC	3
1.1 Première partie : Généralités sur les mises à la terre	3
1.1.1 Introduction	3
1.1.2 Définitions	3
1.1.2.1 Prise de terre	3
1.1.2.2 Mise à la terre	4
1.1.2.3 Masse	4
1.1.2.4 Réseau de terre	4
1.1.2.5 Conception d'un réseau de terre	5
1.1.2.6 Conducteur de terre	5
1.1.3 Rôle des systèmes de mise à la terre	5
1.1.4 Tensions de sécurité	6
1.1.4.1 Tension de contact	6
1.1.4.2 Tension de pas	7
1.1.4.3 Tension de maille	8

1.1.4.4	Tension transféré	8
1.1.4.5	Élévation du potentiel de terre (EPT)	8
1.1.5	Critères de conception d'une électrode de mise à la terre	9
1.1.5.1	Adéquation de performance	9
1.1.5.2	Adéquation de fiabilité	9
1.1.5.3	Adéquation des effets sur l'environnement	9
1.1.6	Conduction du courant électrique dans le sol	9
1.1.7	Caractéristiques électriques du sol	10
1.1.7.1	Résistivité	11
1.1.7.2	Permittivité du sol	13
1.1.7.3	Perméabilité du sol	14
1.1.8	Matériaux utilisés pour la construction des systèmes de mise à la terre	15
1.1.9	Régime de neutre et schémas de liaison à la terre en basse tension	17
1.1.9.1	Schémas de liaison	17
1.1.10	Choix d'utilisation des régimes de neutre	19
1.1.11	Régimes de neutre utilisés en haute tension	19
1.1.12	Méthodologie pour le choix du schéma de liaison à la terre	19
1.1.13	Mise à la terre directe	19
1.1.14	Mise à la terre par l'intermédiaire d'une résistance	20
1.1.15	Mise à la terre par l'intermédiaire d'une réactance	20
1.1.15.1	Réactance accordée (bobine de Petersen)	20
1.1.15.2	Réactance de limitation	20
1.2	Deuxième partie : Courant continu à haute tension	20
1.2.1	Courant continu à haute tension	20
1.2.2	Courant continu et courant alternatif	22
1.2.2.1	Applications de HVDC	22
1.2.2.2	Lignes et câbles	24
1.2.2.3	Configurations de HVDC	25
1.2.2.4	Monopôle	25
1.2.2.5	Bipôle	26
1.2.2.6	Tête-bêche	26
1.3	Conclusion	27
2	Solutions analytiques de la résistance de mise à la terre	29
2.1	Introduction	29
2.2	Électrode cylindrique verticale dans un sol homogène	29
2.2.1	Résistance minimale réalisable	31
2.3	Résistance d'un piquet de terre dans un sol constitué de deux couches	31
2.4	Résistance d'une électrode horizontale dans un sol composé de deux couches	34
2.5	Système de plusieurs tiges dans un sol homogène	35
2.5.1	Électrodes aux sommets d'un triangle équilatéral	35
2.5.2	Électrodes sur les côtés d'un carré	35
2.5.3	Hémisphère équivalente à une électrode verticale	36
2.5.4	Électrodes sur la circonférence d'un cercle	37
2.6	Configuration en anneau compact	38
2.7	Électrode sphéroïdale	39
2.8	Principales méthodes de mesure de la résistivité du sol	41

2.8.1	Méthode de Wenner	41
2.8.2	Méthode de Schlumberger	42
2.8.3	Méthode à trois pôles	42
2.9	Conclusion	44
3	Méthodologie et évaluation de la précision de calcul de la résistance	45
3.1	Introduction	45
3.2	Méthodologie	45
3.3	Conception et mise en œuvre du logiciel de simulation (COMSOL)	46
3.4	Tige verticale dans un sol homogène	48
3.5	Conditions aux limites	50
3.5.1	Considérations théoriques	50
	L'équation de Laplace en milieu conducteur :	50
3.5.2	Application des Conditions aux limites	51
3.6	Électrode cylindrique verticale dans un sol multicouche	53
3.7	Vérification de la méthode proposée pour l'évaluation de la précision de la résistance estimée dans un sol multicouche	55
3.8	Plusieurs tiges de mise à la terre dans un sol homogène	56
3.8.1	Domaine et conditions aux limites	56
3.9	Électrode sphéroïdale	58
3.9.1	Estimation de la résistance d'une électrode sphéroïdale de mise à la terre	58
3.9.2	Distribution de potentiel et de gradient de potentiel	58
3.10	Conclusion	61
4	Résistance de l'électrode enterrée dans un sol multicouche	62
4.1	Introduction	62
4.2	Présentation de CYMGrd	62
4.3	Électrode verticale dans un sol constitué de deux couches	63
4.4	Tendance de variation de la résistance de mise à la terre	64
4.5	Effet de la profondeur des couches	67
4.6	Résistivité équivalente pour un sol constitué de deux couches	69
4.6.1	Résistivité équivalente normalisée	69
4.7	Importance des caractéristiques de résistivité équivalente normalisée	70
4.8	Applications des courbes de la résistivité équivalente normalisée	80
4.8.1	Applications des courbes de la résistivité équivalente normalisée sur une électrode verticale enterrée dans un sol composé de deux couches	80
4.8.2	Applications des courbes de la résistivité équivalente normalisée sur un système de plusieurs tiges sur la circonférence d'un cercle	83
4.9	Sol multicouche avec un rapport arbitraire ρ_1/ρ_2	85
4.9.1	Application de la méthode des approximations successives	85
4.10	Discussion sur le rapport ρ_1/ρ_2	87
4.11	Conclusion	89
5	Résistance de l'électrode enterrée dans un sol multicouche incliné	91
5.1	Introduction	91
5.2	Types d'inclinaison	91
5.3	Type-1 de la couche inclinée de la terre	92
5.4	Type-2 de la couche inclinée de la terre	93

5.5	Modèle COMSOL (MEF) et Résultats de la simulation	94
5.6	Discussion des résultats	96
5.7	Conclusion	97

Bibliographie	101
----------------------	------------

Table des figures

1.1	Réseau de transport et mise à la terre de pylônes et de postes	6
1.2	Tension de contact	7
1.3	Tension de pas	7
1.4	Représentation des différentes tensions de sécurité	8
1.5	Effet d'humidité, température et concentration des sels sur la résistivité du sol	12
1.6	Schéma TT	18
1.7	Schéma IT	18
1.8	Schéma TN-C	18
1.9	Schéma TN-S	18
2.1	Électrode cylindrique verticale dans un sol homogène	30
2.2	Electrode se situant dans la couche supérieure	31
2.3	Electrode traversant les deux couches	33
2.4	Électrode horizontale dans un sol composé de deux couches	34
2.5	Electrodes aux sommets d'un triangle équilatéral	35
2.6	Electrode sur les côtés d'un carré	35
2.7	Remplacement d'une tige verticale avec un hémisphère équivalente	37
2.8	Électrodes sur la circonférence d'un cercle	37
2.9	Électrode sphéroïdale dans un sol à deux couches	39
2.10	Schéma de principe de la méthode de Wenner.	41
2.11	Schéma de mesure de la méthode de Schlumberger	42
2.12	Principe de la méthode à 3 pôles	43
3.1	Maillage du modèle	47
3.2	Modèle résolu	48
3.3	Modèle axisymétrique du sol avec une tige verticale	49
3.4	Neumann	53
3.5	Dirichlet	53
3.6	Modèle axisymétrique d'une tige verticale dans un sol multicouche	54
3.7	Électrodes sur la circonférence d'un cercle	56
3.8	Distribution latérale du potentiel le long de la surface pour une électrode sphéroïdale dans un sol homogène	59
3.9	Distribution latérale du champ électrique le long de la surface pour une électrode sphéroïdale dans un sol homogène	59
3.10	Distribution verticale du potentiel le long d'axe de symétrie pour une électrode sphéroïdale dans un sol homogène	60
3.11	Distribution verticale du champ électrique le long d'axe de symétrie pour une électrode sphéroïdale dans un sol homogène	60

4.1	Électrode verticale dans un sol constitué de deux couches	64
4.2	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 $L=20m$	65
4.3	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 $L=20m$	66
4.4	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 $L=20m$	66
4.5	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 $L=20m$	67
4.6	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=1/2$	71
4.7	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=2$	71
4.8	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=1/3$	73
4.9	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=3$	73
4.10	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=1/4$	74
4.11	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=4$	74
4.12	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=1/6$	75
4.13	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=6$	75
4.14	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=1/8$	76
4.15	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=8$	76
4.16	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=1/10$	77
4.17	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=10$	77
4.18	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=1/14$	78
4.19	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=1/14$	78
4.20	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1 < \rho_2$	79
4.21	Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1 > \rho_2$	79
4.22	Électrode verticale dans un sol composé de deux couches	81
4.23	Électrodes sur la circonférence d'un cercle	84
4.24	Électrode verticale dans un sol à quatre couches	86
4.25	Sol à quatre couches réduit en trois couches	87
4.26	Sol à trois couches réduit en deux couches	87
5.1	Type-1 de la couche inclinée de la terre	92
5.2	Type-2 de la couche inclinée de la terre, en forme de V	93
5.3	Type-2 de la couche inclinée de la terre, en forme de V inversé	93
5.4	Modèle axisymétrique d'une tige verticale dans un sol incliné composé de deux couches	94

Liste des tableaux

1.1	Résistivités moyennes des différents types de sol	14
1.2	Matériaux des systèmes de protection contre la foudre et conditions d'utilisation	16
2.1	Coefficients k pour des électrodes sur les côtés d'un carré	36
3.1	Effets des conditions aux limites du modèle sur l'estimation de la résistance du sol	50
3.2	Effets des conditions aux limites du modèle utilisé pour la détermination de la résistance du sol estimée dans le cas de plusieurs tiges enterrées dans un sol homogène. R_{exact} est 7,75 Ω	57
4.1	Estimation de la résistance de mise à la terre en utilisant la technique du paragraphe 4.5. $l = 20\text{m}$, D_1 , D_2 et D_3 sont égaux à 10m, 30m et 50m respectivement	68
4.2	Estimation de la résistance de mise à la terre en utilisant la technique du paragraphe 4.5. $l = 20\text{m}$, D_1 , D_2 et D_3 sont égaux à 8m, 8m et 24m respectivement	68
4.3	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 4.6 pour $\rho_1=100 \Omega.m < \rho_2$, $L=100\text{m}$ et $r=0.127\text{m}$	83
4.4	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 4.6 pour $\rho_1=100 \Omega.m > \rho_2$, $L=10\text{m}$ et $r=0.127\text{m}$	83
5.1	$D=18\text{m}$ (90% de L); $\rho_1=100 \Omega.m$ et $\rho_2=200 \Omega.m$	95
5.2	$D=30\text{m}$ (150% de L); $\rho_1=100 \Omega.m$ et $\rho_2=200 \Omega.m$	95
5.3	$D=40\text{m}$ (200% de L); $\rho_1=100 \Omega.m$ et $\rho_2=200 \Omega.m$	96

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

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 de différentes configurations utilisées en courant continu à haute tension. Il s'agit, d'une

tige verticale, d'une électrode sphéroïdale et de plusieurs tiges verticales installées dans un sol homogène ou à stratification verticale ou oblique. Une technique approximative est proposée pour ramener un sol multicouche en un sol 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.

Notre mémoire s'articule sur cinq 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. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous citons quelque notion générale sur le courant continu à haute tension.

Dans le second 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. Les principales techniques de mesures de la résistivité du sol y sont également exposées.

Nous présentons, dans le troisième chapitre, le logiciel de simulation COMSOL *Multiphysics* 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. Certains de nos résultats seront comparés à ceux analytiques cités dans le deuxième chapitre.

Le quatrième 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 utilisée dans les équations analytiques. De ce fait, la terre multicouche a été transformée en terre homogène.

Le cinquième 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 considérés. 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 et HVDC

1.1 Première partie : Généralités sur les mises à la terre

1.1.1 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.

1.1.2 Définitions

1.1.2.1 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].

1.1.2.2 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].

1.1.2.3 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].

1.1.2.4 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].

1.1.2.5 Conception d'un réseau de terre

A 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].

1.1.2.6 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].

1.1.3 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].

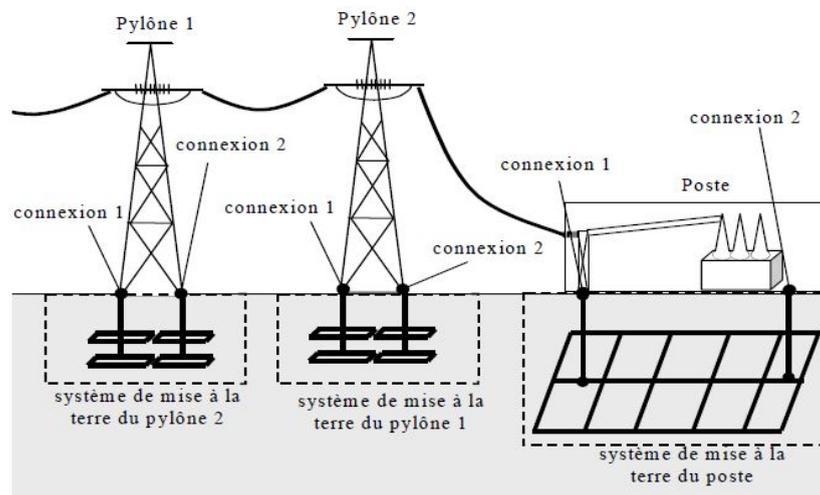


FIGURE 1.1: Réseau de transport et mise à la terre de pylônes et de postes

1.1.4 Tensions de sécurité

Le fait de toucher un objet relié à une prise de terre ou de se trouver à proximité de celle-ci au moment précis où elle écoule un courant de défaut peut, dans certaines conditions, constituer un risque.

Le risque d'électrocution est lié non à la valeur de l'élévation de potentiel de terre, mais au courant traversant le corps.

1.1.4.1 Tension de contact

La tension de contact (ou de toucher), selon la norme IEEE, est la différence de potentiel entre la main d'une personne, touchant une structure mise à la terre, et son pied (Figure 1.2) On distingue deux types de contacts : le contact direct et le contact indirect [4].

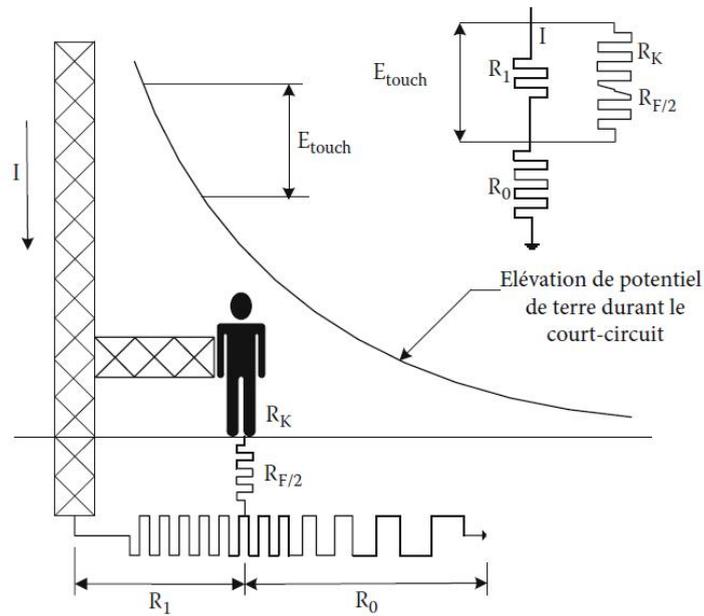


FIGURE 1.2: Tension de contact

1.1.4.2 Tension de pas

La tension de pas est la différence de potentiel entre deux points à la surface du sol, séparés par une distance d'environ 1 m correspondant à un pas humain, dans la direction du gradient de potentiel maximum (Figure 1.3) [6].

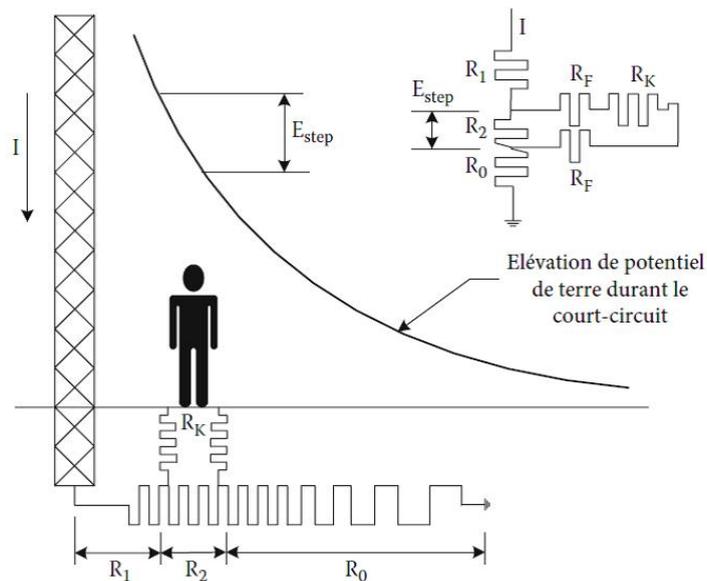


FIGURE 1.3: Tension de pas

1.1.4.3 Tension de maille

Tension de maille (E_m) est la différence de potentiel de surface maximale entre un conducteur de la grille et un point entre deux conducteurs de cette grille. Il pourrait également être la tension de contact maximale trouvée à l'intérieur de la grille de sol [6].

1.1.4.4 Tension transféré

Un cas spécial de la tension de contact dans laquelle une personne dans une sous-station pour une certaine distance touche un conducteur relié à la grille de mise à la terre, à l'aide d'un conducteur métallique référencé par terre. Ceci peut être une tension de contact très élevée [6]. La figure 1.4 représente les tensions de sécurité :

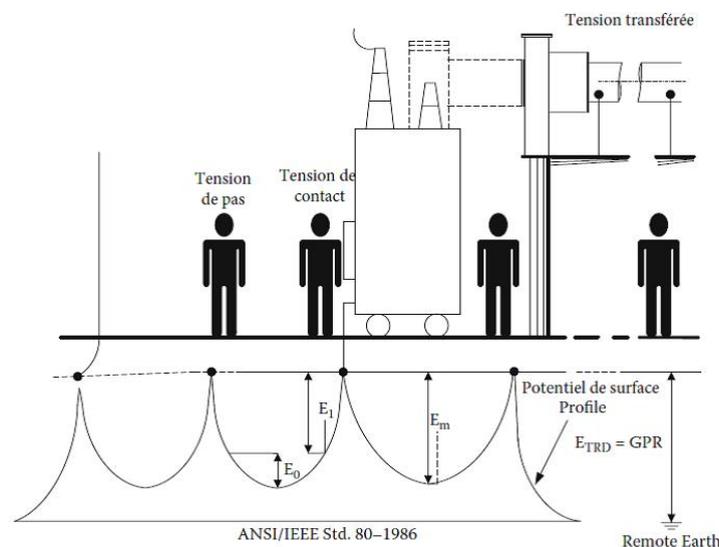


FIGURE 1.4: Représentation des différentes tensions de sécurité

1.1.4.5 Élévation du potentiel de terre (EPT)

Le potentiel électrique maximum qu'une grille de terre peut atteindre relativement à un point au sol éloigné assumé pour être au potentiel de la terre à distance. Cette tension, EPT, est égale au courant maximum de la grille multiplié par la résistance de la grille [4].

1.1.5 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.

1.1.5.1 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].

1.1.5.2 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].

1.1.5.3 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].

1.1.6 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 [7]. 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 [8] :

- 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.

1.1.7 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) [9].

1.1.7.1 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, 8] .

- 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 1.5 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, 8].

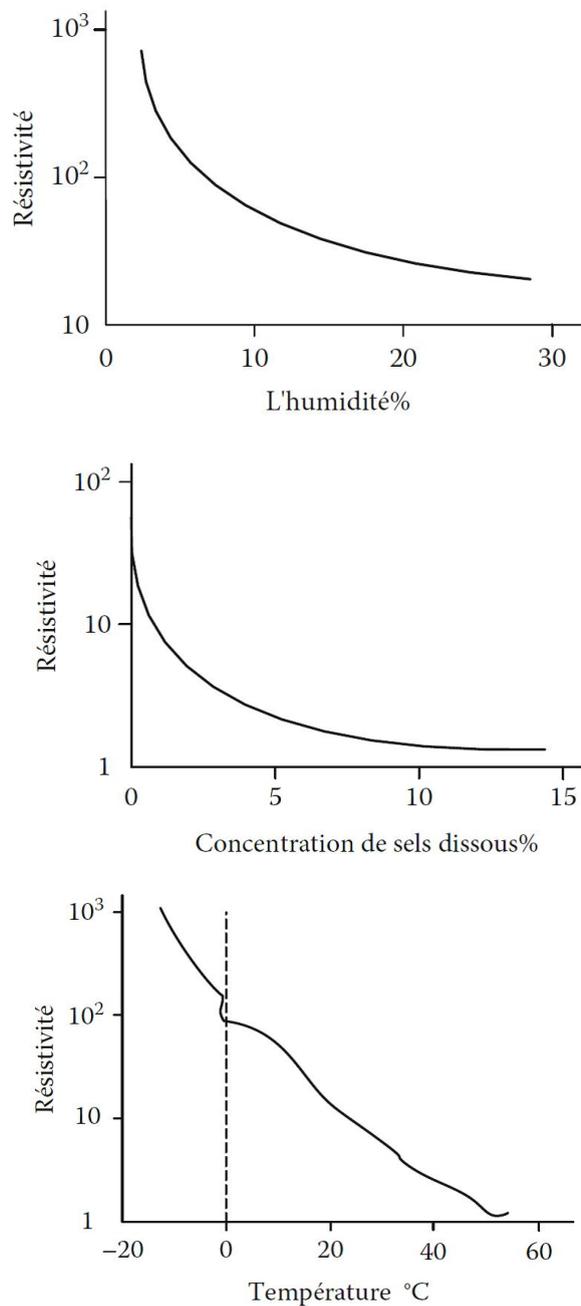


FIGURE 1.5: Effet d'humidité, température et concentration des sels sur la résistivité du sol

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 [9].

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].

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.

1.1.7.2 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

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

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 [10].

On dispose de plusieurs méthodes pour mesurer la permittivité apparente du sol, parmi lesquelles les deux plus utilisées sont [11] :

- 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) [10].

1.1.7.3 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 [9].

1.1.8 Matériaux utilisées pour la construction des systèmes de mise à la terre

La table 1.2 illustre les matériaux des systèmes de protection contre la foudre et conditions d'utilisation [12]. D'autres produits sont disponibles sur le marché pour ce faire. Dans tous les cas, il faut éviter toute solution tendant à réduire les performances de la mise à la terre avec le temps. C'est souvent le cas en pratique, les produits à base de sel permettent d'obtenir des faibles résistivités des sols mais perdent leurs caractéristiques dans le temps [3].

Matériau	Utilisation			Corrosion		
	A l'air libre	Enterré	Sous béton	Résistance	Accrue par	Peut être détruit par couplage galvanique avec
Cuivre	Massif Torsadé	Massif Torsadé En revêtement	Massif Torsadé En revêtement	Bonne dans de nombreux environnements	Composés sulfureux Matériaux Organisés	22
Acier galvanisé à chaud	Massif Torsadé	Massif	Massif Torsadé	Acceptable dans l'air, le béton et en sol normal	Contenu important de chlorides	Cuivre
Acier Inoxydable	Massif Torsadé	Massif Torsadé	Massif Torsadé	bonne dans de nombreux environnements	Solutions alcalines	7
Aluminium	Massif Torsadé	Pas bon	Pas bon	Bonne dans des atmosphères contenant des concentrations faibles de sulfure et de chlore	Sols acides	Cuivre
Plomb	Massif En revêtement	Massif En revêtement	Pas bon	Bonne dans des atmosphères contenant des fortes concentrations de sulfates	Sols acides	Cuivre acier inox

Note1 : Ce tableau ne donne que des indications générales, dans des conditions particulières, à des considérations sur l'immunité contre la corrosion est requise.

Note2 : Les conducteurs torsadés sont plus vulnérables à la corrosion que les conducteurs massifs. Les conducteurs torsadés sont aussi vulnérables s'ils entrent ou sortent du béton ou du sol. C'est pourquoi les conducteurs torsadés galvanisés ne sont pas recommandés dans le sol.

Note3 : L'acier galvanisé peut être corrodé dans des sols argileux ou humides.

TABLE 1.2: Matériaux des systèmes de protection contre la foudre et conditions d'utilisation

1.1.9 Régime de neutre et schémas de liaison à la terre en basse tension

1.1.9.1 Schémas de liaison

Le régime de neutre symbolise la situation d'une installation électrique par rapport au potentiel de la terre. Du fait que cette situation ne concerne que le neutre, la normalisation utilise l'expression des schémas des liaisons à la terre (SLT).

Le schéma de liaison à la terre représente tout simplement la manière dont les neutres du transformateur d'alimentation et des masses des récepteurs sont (ou pas) reliés à la terre ou au neutre du réseau d'alimentation. On distingue trois schémas possibles TT (Figure 1.6), IT (Figure 1.7) et TN (TN-C ou TN-S) (Figure 1.8 et 1.9). Ces différentes codifications sont données selon les normes NF C 15-100, NF C 13-100 et NF C13-200 et définies comme suit :

La première lettre : caractérise le point neutre du transformateur ou de la source.

T : liaison directe du neutre à la Terre ;

I : liaison est Isolée ou relie à la terre par l'intermédiaire d'une Impédance 1 à 2 k Ω .

La deuxième lettre : caractérise les masses électriques des récepteurs.

T : liaison des masses à une prise de Terre ;

N : liaison des masses au Neutre.

La troisième lettre : concerne le régime TN ;

C : dans ce cas, le conducteur de protection PE et le conducteur neutre N sont Confondus ; il appelé PEN ;

S : dans ce cas, le conducteur de protection PE et le conducteur Neutre sont séparés.

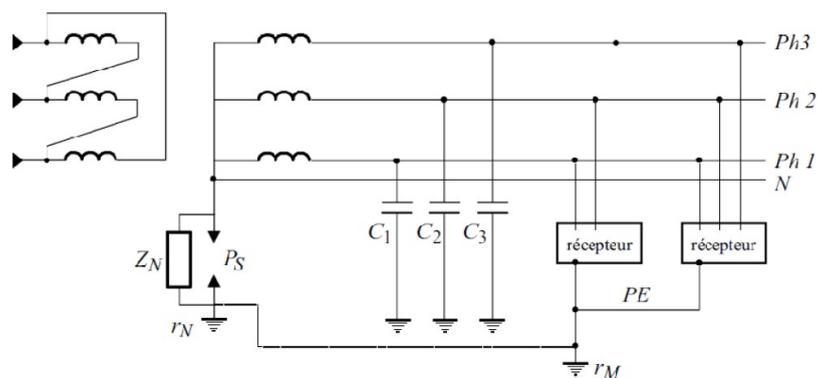


FIGURE 1.6: Schéma TT

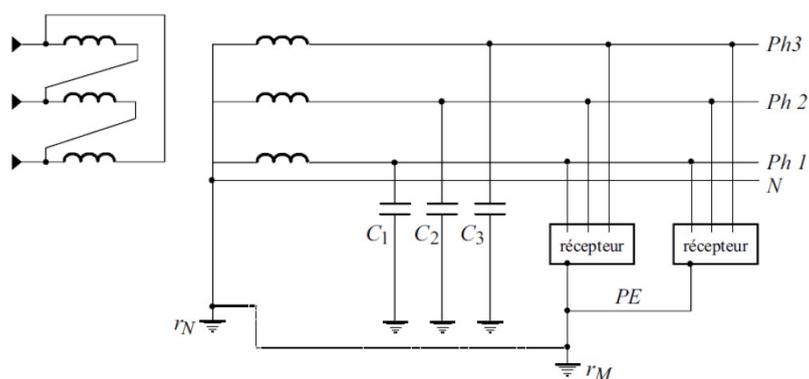


FIGURE 1.7: Schéma IT

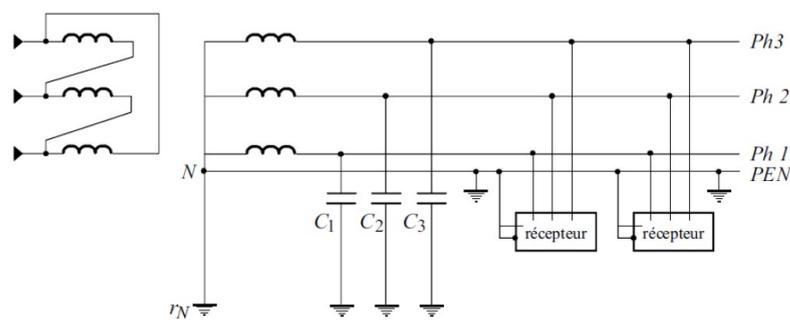


FIGURE 1.8: Schéma TN-C

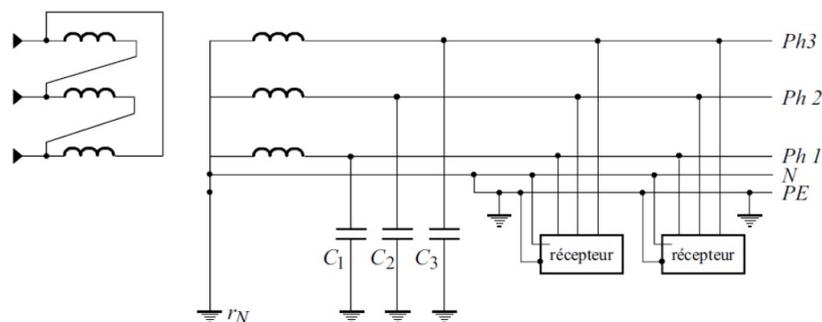


FIGURE 1.9: Schéma TN-S

1.1.10 Choix d'utilisation des régimes de neutre

Les trois SLT, mondialement utilisés et normalisés par la CEI 60364-5-54 [13], ont pour objectif commun la recherche de la meilleure sûreté. Sur le plan de la protection des personnes, les 3 régimes sont équivalents si l'on respecte toutes les règles d'installation et d'exploitation. Étant donné les caractéristiques spécifiques à chaque régime, il ne peut donc être question de faire un choix à priori. Ce choix doit résulter d'une concertation entre l'utilisateur et le concepteur de réseau (Bureaux d'études, installateur...) sur [14] :

- les caractéristiques de l'installation ;
- les conditions et les impératifs d'exploitation.

1.1.11 Régimes de neutre utilisés en haute tension

Lorsque l'on considère, sans distinction, les réseaux de distribution publique et les réseaux privés industriels ou tertiaires, on rencontre tous les principes de mise à la terre du point neutre, à savoir [15, 16].

1.1.12 Méthodologie pour le choix du schéma de liaison à la terre

Les trois schémas de liaison à la terre suscités peuvent coexister dans une même installation électrique, ce qui est une garantie pour obtenir la meilleure réponse aux besoins de sécurité et de disponibilité. Ensuite, s'assurer que le choix n'est pas recommandé ou imposé par les normes ou la législation (décrets, arrêtés ministériels ...). Puis, dialoguer avec l'utilisateur pour connaître ses exigences et ses moyens [14] :

- besoin de continuité de service ;
- service entretien ou non ;
- risque incendie.

1.1.13 Mise à la terre directe

Ce type de mise à la terre limite au mieux les surtensions, et la sélectivité des protections ne présente pas de difficultés.

Par contre, en cas de défaut à la terre, le courant n'est pas limité, les dégâts et les perturbations

sont maximaux et le danger pour le personnel est important pendant la durée du défaut. Cette solution n'est pas utilisée pour la distribution en haute tension. Elle peut être utilisée quand la puissance de court-circuit de la source est faible [15, 16].

1.1.14 Mise à la terre par l'intermédiaire d'une résistance

Cette solution doit être appliquée lorsque le neutre MT du transformateur d'alimentation est accessible et lorsque son impédance propre est insuffisante pour limiter convenablement les courants de défaut, ce qui est le cas le plus courant [1].

1.1.15 Mise à la terre par l'intermédiaire d'une réactance

1.1.15.1 Réactance accordée (bobine de Petersen)

Cette solution est parfois utilisée sur les réseaux HT de distribution publique. Elle est peu utilisée en distribution industrielle. Des relais de protection sensibles à la composante active du courant homopolaire sont nécessaires pour obtenir la sélectivité [15, 16]].

1.1.15.2 Réactance de limitation

Cette solution peut provoquer des surtensions sévères. Elle n'est applicable que si l'impédance de limitation a une valeur faible [15, 16].

1.2 Deuxième partie : Courant continu à haute tension

1.2.1 Courant continu à haute tension

Le courant continu à haute tension (CCHT), en anglais High Voltage Direct Current (HVDC), est une technologie d'électronique de puissance utilisée pour le transport de l'électricité en courant continu à haute tension. Son utilisation est minoritaire par rapport au transport électrique à courant alternatif (AC). Le principal intérêt de HVDC est de permettre le transport d'électricité sur de longues distances car il cause moins de pertes. Par ailleurs, c'est l'unique possibilité pour transporter de l'électricité dans des câbles enterrés ou sous-marins sur des distances supérieures

à environ 100 km. En effet, la puissance réactive produite par le caractère capacitif du câble, en cas d'une alimentation alternative, finit par empêcher le transport de la puissance active, qui est recherchée. En courant continu, aucune puissance réactive n'est produite dans le câble [17].

D'autres avantages de la technologie HVDC peuvent également justifier son choix sur des liaisons plus courtes : facilité de réglage, influence sur la stabilité et possibilité de régler la puissance transitée notamment [17].

Une station en courant continu à haute tension peut permettre de connecter entre eux deux réseaux alternatifs non-synchrones, par exemple n'ayant pas la même fréquence (liaisons au Japon entre des îles à 50 Hz et d'autres à 60 Hz) ou ayant des réglages de fréquence indépendants. Cela permet d'échanger de l'énergie entre des réseaux sans les connecter directement et donc en évitant la propagation des instabilités d'un réseau à l'autre. De manière plus générale, la stabilité des réseaux est améliorée, le flux d'énergie s'interrompant si une instabilité ou un défaut est détecté d'un côté de la liaison, qui ne se propage donc pas. Au-delà de ce point, les liens HVDC permettent un net gain en termes de stabilité. Par exemple les liens HVDC-VSC (convertisseurs source de tension) permettent de stabiliser le réseau, entre autres en fournissant juste la quantité d'énergie réactive dont le réseau a besoin pour avoir un profil de tension stable [17].

La technologie HVDC est apparue dans les années 1930. Elle a été développée par ASEA en Suède et en Allemagne. La première ligne HVDC a été construite en Union soviétique en 1951 entre Moscou et Kachira. Une ligne a été ensuite construite en 1954 entre l'île de Gotland et le continent de la Suède, avec une tension de 100 kV et une puissance de 20 MW[18].

Il existe deux grandes familles technologiques de connexions à courant continu. La première fonctionne en source de courant, utilisant des thyristors, appelée « Line-commutated converters, LCC ». Cette famille sert au transport de grande ou très grande puissance, jusqu'à 7600 MW [19], avec des tensions allant jusqu'à ± 800 kV, sur de grandes distances, jusqu'à 2 500 km. La deuxième famille fonctionne en source de tension, utilisant des IGBT développées dans les années 1990 et appelées « Voltage-source converters, VSC ». Cette famille, plus réglable, plus compacte, ne nécessitant pas un réseau « fort », est particulièrement adaptée au transport d'électricité provenant des éoliennes offshore ou au transport d'électricité par câble en polyéthylène réticulé (XLPE), donc sans huile minérale. Elle a cependant une puissance maximale limitée à 1 GW par bipole en 2012 [18].

1.2.2 Courant continu et courant alternatif

Dans les années 1880 eut lieu la guerre des courants entre les partisans d'un réseau à courant continu comme Thomas Edison et ceux d'un réseau à courant alternatif comme Nikola Tesla et George Westinghouse. Le courant continu survécut 10 ans ; mais rapidement le développement des transformateurs de puissance, nécessaires pour élever la tension et ainsi limiter les pertes, conduisit à la généralisation des réseaux en courant alternatif [20].

Ainsi dans les réseaux actuels, la puissance électrique est produite, transportée, distribuée et consommée très majoritairement en courant alternatif. Toutefois, dans certains cas, l'usage du courant continu est avantageux : il rend possible la connexion de réseaux asynchrones, il est utilisé quand la distance est trop importante pour avoir une liaison aérienne en courant alternatif stable et/ou économique, pour transporter de grandes puissances, pour les lignes sous-marines, augmenter l'apport de puissance sans augmenter la puissance de court circuit ou améliorer les performances du réseau en courant alternatif grâce à la commandabilité des stations HVDC [21].

Ce n'est qu'avec le développement de l'électronique de puissance avec notamment l'invention des diodes à vapeur de mercure que l'utilisation de courant continu à haute tension est devenue possible. Cette invention fut suivie par celle des thyristors à base de semi-conducteurs dans les années 1970. Les insulated-gate bipolar transistor (IGBT) n'apparurent que plus tard [22].

Les lignes de transport en courant continu sont de plus en plus répandues, le rythme des projets augmentant ces dernières années [21].

1.2.2.1 Applications de HVDC

Liaisons entre grande centrale électrique et charge distante

La technologie HVDC-LCC offre de grands avantages pour le transport d'une grande puissance depuis une centrale électrique vers une charge éloignée. À la différence des lignes en courant alternatif, les lignes en HVDC n'ont pas besoin de compensation sur de longues distances, la stabilité de la centrale n'est pas menacée [17], les pertes en lignes sont également très réduites.

La réduction des pertes est en particulier liée au fait que la résistance des lignes en courant continu est plus faible que celle en courant alternatif (absence d'effet de peau), mais surtout au fait que seule la puissance active est transportée en courant continu. Les pertes Joule dues au

transport de la puissance réactive n'existent pas en courant continu, le courant est donc seulement limité par les capacités thermiques des conducteurs [17]. Inversement le courant continu à haute tension implique des pertes supplémentaires dans les stations de conversion. En dehors de toute considération technique, le choix économique d'utiliser ou pas du courant continu pour une liaison de grande longueur est lié en particulier un équilibre en trois paramètres [17] :

- ✓ le coût supplémentaire des stations de conversion ;
- ✓ les pertes de ces stations de conversion ;
- ✓ les pertes en ligne.

Il en résulte donc une longueur de ligne au-delà duquel un projet de ligne à courant continu est rentable. On estime en général cette longueur à 500 km environ [19].

Les exemples les plus marquants sont les connexions entre barrages, barrage des Trois-Gorges, barrages du Tibet ou Itaipu, et centre de charge : côte chinoise, Sud-est brésilien. De très hautes tensions sont utilisées à cette fin : ± 500 , 600 ou 800 kV. La facilité de commande des HVDC est également un avantage majeur pour gérer de telles puissances [21].

Liaisons sous-marine et à câbles

Par ailleurs, le HVDC est particulièrement adapté pour transporter de l'énergie électrique par câble, sous-marin entre autres. Au-delà d'une certaine distance, 60 à 80 km environ pour des liaisons souterraines ou sous-marines, l'importance du courant capacitif rend peu intéressant le transport d'électricité en courant alternatif. Les câbles à courant alternatif ont en effet un comportement capacitif vis-à-vis de la terre. Leurs charges et décharges finissent par consommer l'intégralité du courant disponible. Autrement dit, la puissance transportée par le câble devient intégralement réactive. Afin de réduire cet effet capacitif, on installe dans les liaisons classiques en courant alternatif des réactances de compensation, ce qui est coûteux. Ce phénomène n'apparaît pour le courant continu que lors de la mise sous tension ou d'inversion de polarité (pour le VSC, il n'y a même pas d'inversion de polarité). En régime permanent, le courant étant continu, la capacité parasite du câble ne se charge ou décharge pas. Il n'y a donc aucune limite théorique existante, en matière de distance, pour le HVDC. Ainsi le projet NorNed entre la Norvège et les Pays-Bas comporte deux câbles de 580 km chacun [21, 23].

L'utilisation de câbles en polyéthylène réticulé n'est possible que pour les VSC, l'inversion de polarité les endommageant. Ces câbles ont l'avantage de ne pas contenir d'huile ce qui présente

un avantage sur le plan écologique. La technologie VSC est donc souvent associée aux câbles [24].

1.2.2.2 Lignes et câbles

Lignes aériennes

Les lignes aériennes en courant continu ont les mêmes éléments constitutifs de base que celles en courant alternatif : les poteaux treillis, les chaînes d'isolateurs, les conducteurs de ligne et les accessoires mécaniques. Néanmoins, les caractéristiques techniques de projet de chaque composant sont spécifiques pour les applications en tension continue à cause des différentes capacités de tenue diélectrique sous contraintes différentes. Le champ étant toujours dans la même direction, il y a une accumulation de la pollution superficielle sur les isolateurs plus importante que dans le cas des lignes à courant alternatif [25].

Un autre avantage est le gain en place, pour avoir un même niveau de redondance, 2 faisceaux de conducteurs HVDC remplacent 2 systèmes triphasés, soit 6 faisceaux de conducteurs. Pour le projet trois-gorges, ABB déclare que le remplacement de 5 pylônes électriques en courant alternatif par 2 en courant continu suffit pour transporter 3000 MW [26]. Par ailleurs, l'absence d'effet de peau, combiné à l'absence de transport de la puissance réactive, permet de mieux utiliser l'intégralité du conducteur et donc de réduire son diamètre [17, 27].

Câbles

En 2012, les câbles utilisés pour les liaisons en courant continu sont soit au papier imprégné ou en polyéthylène réticulé, "Pr" en abrégé français ou XLPE en acronyme anglais. Les câbles à huile fluide ne sont pas adaptés aux longues distances, plus de 50 km. N'ayant, de plus, que peu d'avantages face aux câbles extrudés. Ces câbles à huile ont été supplantés [28]. Ceux au papier imprégné sont majoritaires dans les liaisons existantes et peuvent atteindre jusqu'à 450 kV [23]. Ceux en XLPE les remplacent progressivement pour les convertisseurs VSC. Pour les LCC, jusqu'à récemment, les inversions de polarité les endommageaient, mais des recherches semblent avoir levé cet obstacle [28, 29]. Leur tension commerciale est actuellement limitée à 320 kV, mais elle devrait augmenter dans un futur proche [28].

1.2.2.3 Configurations de HVDC

1.2.2.4 Monopôle

La configuration la plus simple, consiste à n'avoir qu'un pôle, on parle de monopôle. Deux possibilités existent pour faire circuler le courant de retour entre les stations. La première consiste à connecter une borne des redresseurs et de l'onduleur à la terre. L'autre borne est connectée à la ligne de transport. La seconde consiste à connecter le retour à l'aide d'un conducteur. On parle alors de retour métallique [17, 30].

Monopôle et retour par la terre

Dans le cas d'un retour par la terre, le courant circule à travers la terre (dans les couches profondes) entre les électrodes des deux stations [30].

Monopôle à retour métallique

Ces effets indésirables peuvent être annulés par l'utilisation d'un retour métallique. Comme l'une des stations est connectée à la terre, l'isolation électrique n'a pas besoin d'être dimensionnée pour la tension de la ligne de transport. Le retour métallique n'est donc pas aussi coûteux qu'une ligne de transmission. La décision de faire un retour métallique ou non est prise en fonction de paramètres économiques, techniques et environnementaux [17, 30].

La plupart des monopôles sont conçus afin de pouvoir être transformés en bipôles par la suite [30], les pylônes électriques sont alors dimensionnés pour porter deux conducteurs même si seulement un est requis. On peut faire alors le choix de n'en utiliser qu'un ou de les utiliser en parallèle.

Monopôle symétrique

Une troisième possibilité est d'utiliser une ligne à une tension de + la moitié de la tension totale et une à - cette même tension. On est exactement dans le même cas de figure que pour un bipôle sans conducteur au neutre. Cette configuration est appelée monopole symétrique. Les convertisseurs sont mis à la terre à travers une forte impédance, aucun courant n'est censé traverser la terre. Cette configuration n'est pas habituelle pour les LCC, à l'exception de NorNed par exemple [23], elle est par contre très courante pour les VSC si des câbles sont utilisés.

1.2.2.5 Bipôle

Dans un schéma bipolaire, deux conducteurs sont utilisés, l'un avec une tension positive, l'autre négative. Cette option est plus coûteuse qu'un monopole [17].

✓ En condition normale, le courant traversant la terre est négligeable, tout comme dans le cas d'un monopôle à retour métallique. Cela réduit les pertes par la terre et les effets sur l'environnement.

✓ Si un défaut quelconque se produit sur l'un des deux pôles, l'autre peut continuer d'opérer avec un retour par la terre ou même parfois un retour métallique si les disjoncteurs adéquats sont prévus. Le transport perd donc dans ce cas seulement la moitié de sa puissance.

✓ Chaque pôle ne transportant que la moitié de la puissance, les conducteurs peuvent être dimensionnés plus petits que pour la même puissance en monopôle.

✓ Les deux conducteurs ne doivent pas forcément être sur le même pylône. Cela peut réduire le risque de perte de la totalité de la puissance en cas de défaut.

✓ Les puissances pouvant être transmises à l'aide d'un bipôle sont plus importantes qu'avec un monopôle.

En plus des deux lignes de transport, un retour métallique peut être installé entre les neutres des deux stations rendant le courant traversant la terre parfaitement nul [17].

Parfois le bipôle peut être conçu de manière à pouvoir fonctionner comme deux monopôles en parallèle [30].

Pour les liaisons 800 kV, des schémas en 24 impulsions par pôle sont privilégiés, 2 ponts de 400 kV sont montés en série par pôle. En effet, le transport et la conception des transformateurs et des valves deviendraient très problématique pour un pôle en un seul bloc de 800 kV.

1.2.2.6 Tête-bêche

Une station « tête-bêche » (back to back en anglais) est une installation HVDC dont les deux stations sont « collées », souvent construites dans le même bâtiment ; la longueur de la ligne

de transport est donc négligeable. Ces stations sont utilisées principalement pour connecter des réseaux asynchrones, qu'ils soient de fréquences différentes, par exemple au Japon où la moitié du pays utilise une fréquence de 50 Hz et l'autre 60, des stations tête-bêche font la jonction, par exemple aussi en Amérique du Sud et en Arabie saoudite, ou qu'ils soient à la même fréquence mais non synchrones comme entre la Russie et la Finlande. Dans le passé, le bloc de l'est et le bloc de l'ouest avaient la même fréquence mais n'était pas synchrone ; ainsi la RFA et la RDA étaient reliées électriquement par des convertisseurs [17]. Pour la même raison, des interconnexions tête-bêche relient aussi le réseau électrique du Québec et les réseaux voisins de l'interconnexion de l'Est, en Amérique du Nord [31].

Ces stations peuvent également connecter des systèmes ayant des nombres de phases différents comme dans des sous-stations de traction.

La ligne étant courte, la tension continue est choisie beaucoup plus basse que dans le cas des stations normales, cela permet de réduire la taille des composants, leur isolation diélectrique ne devant pas être aussi importante. En conséquence, leur ampacité est en général grande [30].

1.3 Conclusion

La première partie de ce chapitre a été consacrée aux généralités sur la mise à la terre des installations électriques. Étant donné la capacité des systèmes de terre à évacuer les courants de défauts dans le sol, ces systèmes permettent non seulement d'assurer la sécurité des êtres vivants, mais également de protéger les installations et donc les ouvrages électriques (centrales, postes, etc.) De ce fait, la mise à la terre constitue un moyen de protection le plus élémentaire et le plus important. Le choix de la configuration ainsi que les caractéristiques des systèmes de terre sont de première importance, ils doivent donc être adéquats aux propriétés électriques du sol.

La deuxième partie a porté sur la technologie HVDC. Le transport de l'électricité dans des câbles enterrés ou sous-marins sur des distances supérieures à environ 100 km, se fait en HVDC. Bien que son utilisation soit très limitée, les avantages de la technologie HVDC sont nombreux, nous citons entre autres : le transport d'électricité sur de longues distances, moins de pertes, aucune puissance réactive n'est produite, facilité de réglage, l'amélioration de connexion entre deux réseaux alternatifs non-synchrones, l'amélioration des performances du réseau en courant

alternatif, la stabilité et la possibilité de régler la puissance transitée, le transport de grandes puissances, etc.

Chapitre 2

Solutions analytiques de la résistance de mise à la terre

2.1 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 varié en fonction des paramètres géométriques d'un tel système et géologiques du sol.

2.2 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 [32] [33] [34] (Figure 2.1), de forme cylindrique :

La relation de Dwight-Sunde [35] :

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

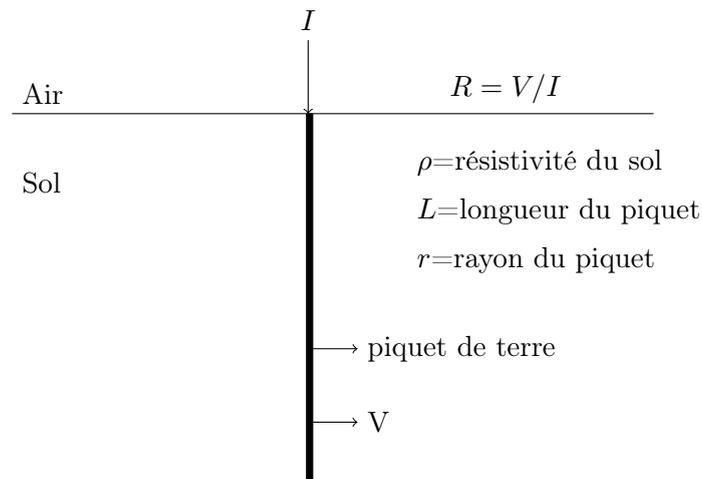


FIGURE 2.1: Électrode cylindrique verticale dans un sol homogène

La relation de Rudenberg [35] :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \frac{4L}{d} \right] \quad (2.2)$$

La relation de Liew-Darveniza [35] :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \frac{r + L}{r} \right] \quad (2.3)$$

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 (2.1) 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 (2.1) ne donne pas d'informations sur la distribution du champ, mais introduit une erreur de seulement quelques pour cent [36].

2.2.1 Résistance minimale réalisable

Si deux tiges verticales identiques sont connectées en parallèle, la question est de savoir si on peut utiliser l'équation (2.1) afin d'évaluer la résistance de terre avec une seule tige et réduire de moitié cette valeur pour arriver à la résistance de masse globale du système.

Malheureusement, la réponse est non ! Pour ce faire, les deux tiges doivent être séparées par une très grande distance de sorte que l'écoulement des courants d'une tige n'a aucune incidence sur l'écoulement de l'autre tige. Pour une superficie donnée, il ya une résistance au sol minimale réalisable quel que soit le nombre de tiges de terre installées.

2.3 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 [35].

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 2.2), la résistance correspondante est donnée par :

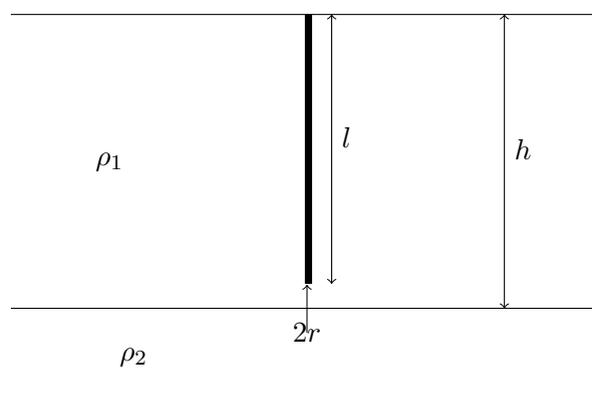


FIGURE 2.2: Electrode se situant dans la couche supérieure

$$R_{exact} = \frac{\rho_1}{2\pi L} \left[\left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right) + \sum_{i=1}^{n=\infty} \frac{K^i}{2} \cdot \ln \frac{\frac{iD}{L} + 1}{\frac{iD}{D} - 1} \right] \quad (2.4)$$

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

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 2.3), la résistance est donnée par :

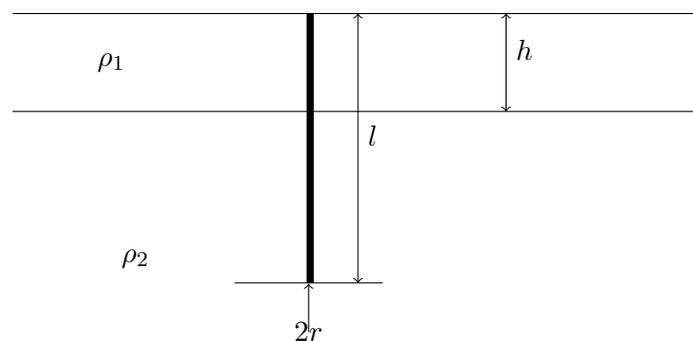


FIGURE 2.3: Electrode traversant les deux couches

$$R_{exact} = \frac{\rho_1}{2\pi L} \cdot \frac{1 + K}{(1 - K) + 2K \frac{D}{L}} \left[\ln \frac{2L}{r} + \sum_{n=1}^{n=\infty} K^n \ln \frac{(2nD + L)}{(2n - 2)D + L} \right] \quad (2.5)$$

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

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

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 [35], 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.

2.4 Résistance d'une électrode horizontale dans un sol composé de deux couches

Tagg [35] a établi la relation donnant la résistance d'une électrode cylindrique horizontale de longueur l et de rayon r , enterrée à une profondeur e ($e < h$) dans un sol constitué de deux couches de résistivité ρ_1 et ρ_2 (Figure 2.4). Elle est donnée par la relation [3] :

$$R = R_1 + R_a$$

R_1 est la résistance de l'électrode horizontale dans un sol homogène de résistivité ρ_1 ;

R_a est la résistance additionnelle due au changement de la résistivité du sol.

La résistance R_a est donnée par la relation suivante [3] :

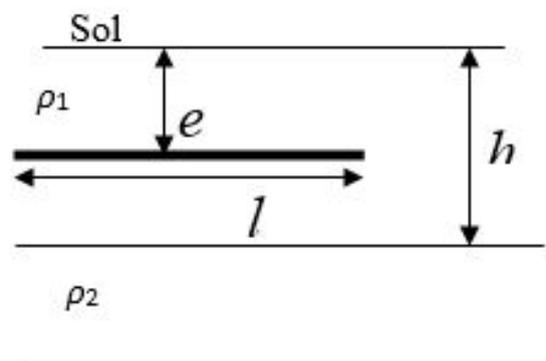


FIGURE 2.4: Électrode horizontale dans un sol composé de deux couches

2.5 Système de plusieurs tiges dans un sol homogène

Souvent, la résistance du sol souhaitée ne peut pas être réalisée avec seulement une barre de mise à la terre mais plutôt avec plusieurs tiges. Ces tiges peuvent être disposées en ligne, triangle, carré creux, carré plein ou une forme de cercle [35].

2.5.1 Électrodes aux sommets d'un triangle équilatéral

Si trois électrodes sont placées aux sommets d'un triangle équilatéral de côté d (Figure 2.5), la résistance équivalente est donnée par la relation suivante :

$$R_{3t} = R \left(\frac{1 + 2\alpha}{3} \right) \quad (2.6)$$

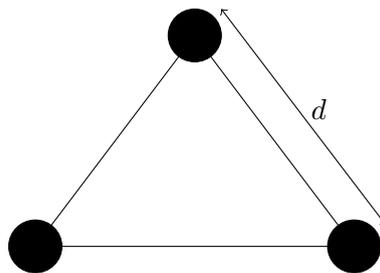


FIGURE 2.5: Electrodes aux sommets d'un triangle équilatéral

2.5.2 Électrodes sur les côtés d'un carré

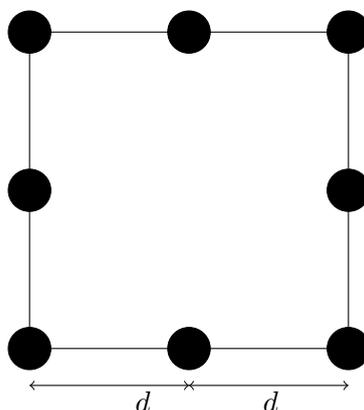


FIGURE 2.6: Electrode sur les côtés d'un carré

Soit N le nombre d'électrodes (Figure 2.6). La résistance équivalente est donnée par la relation :

$$R_N = R \left(\frac{1 + K\alpha}{N} \right) \quad (2.7)$$

avec :

$$\alpha = r/d;$$

d : la distance entre les électrodes ;

ρ : la résistivité du sol ;

r : le rayon de l'électrode ;

l : la longueur de l'électrode.

Les coefficients K sont donnés par la Table 2.1 ci-dessous.

Nombre d'électrodes par côté	Nombre total d'électrodes	K
2	4	2,7071
3	8	4,2583
4	12	5,3939
5	16	6,0072
6	20	6,4633
7	24	6,8363
8	28	7,1479
9	32	7,4179
10	36	7,6551

TABLE 2.1: Coefficients k pour des électrodes sur les côtés d'un carré

2.5.3 Hémisphère équivalente à une électrode verticale

Il est possible de remplacer une tige verticale par un hémisphère équivalente qui donne la même résistance de mise à la terre. Ce remplacement simplifie l'analyse des problèmes impliquant la terre avec des tiges multiples, mais n'a pas d'utilisation pratique significative autre que de calculer la résistance de mise à la terre théorique.

La formule utilisée pour le remplacement est :

$$r = \frac{l}{\ln \frac{8l}{d} - l} \quad (2.8)$$

r est le rayon de l'hémisphère équivalente, l et d sont la longueur et le diamètre de la tige verticale. Avec la possibilité de remplacer les tiges verticales par des hémisphères équivalentes, on peut procéder au cas de mise à la terre avec des plusieurs tiges.

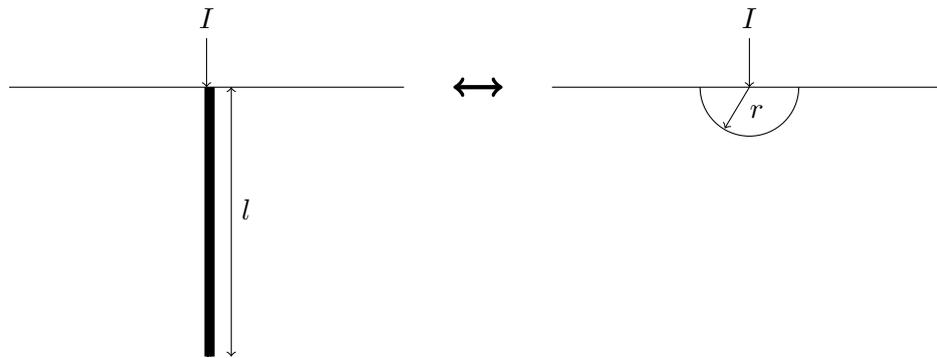


FIGURE 2.7: Remplacement d'une tige verticale avec un hémisphère équivalente

2.5.4 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 2.8, 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 (2.9) [35].

Pour appliquer l'équation (2.9), 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 (2.1).

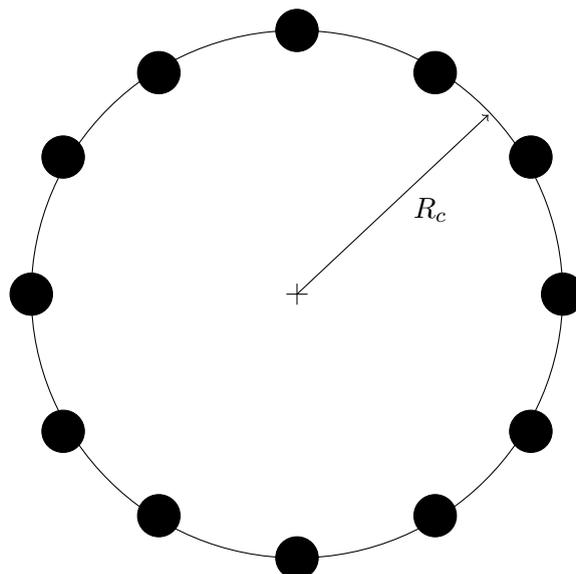


FIGURE 2.8: Électrodes sur la circonférence d'un cercle

$$\frac{R_{electrode}}{R_{tige}} = \frac{1 + 0.5\alpha \sum_{S=1}^{S=\frac{n}{2}-1} \cos \frac{S\pi}{n}}{n} \quad (2.9)$$

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 (2.9) 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 (2.8) pour assurer que cette hypothèse est valable.

Avant d'utiliser l'équation (2.9), il faut toujours vérifier la géométrie du système d'électrode à tiges multiples à l'aide de l'équation (2.8) 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 (2.9) donnant un résultat erroné, offert l'équation (2.9) 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 (2.9) pour différents systèmes d'électrodes multiples.

2.6 Configuration en anneau compact

Une configuration en anneau compact est composée 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 2.8 mais l'espacement entre les barres est beaucoup plus petit. Cela implique que l'équation (2.9) ne peut pas être utilisée dans ce cas. L'équation suivante donne la résistance de ce système d'électrode comprenant toutes les mutuelles résistances [37] :

$$R_n = \frac{1}{n} \left[R_1(\alpha) + \sum_{m=1}^{n-1} R_1 \left(D \sin \frac{m\pi}{n} \right) \right] \quad (2.10)$$

où :

$$R_1(x) = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \left[\frac{2l}{x} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{x}{2l} \right)^2} \right) \right] + \frac{x}{2l} - \sqrt{1 + \left(\frac{x}{2l} \right)^2} \right] \quad (2.11)$$

avec :

ρ : Résistivité du sol ($\Omega \cdot \text{m}$);

l : longueur de la tige individuelle (m);

D : diamètre de l'anneau (m);

n : nombre totale de tiges;

α : rayon d'une tige.

2.7 Électrode sphéroïdale

La figure 2.9 montre un modèle avec une électrode sphéroïdale parfaitement conductrice dans un sol à deux couches.

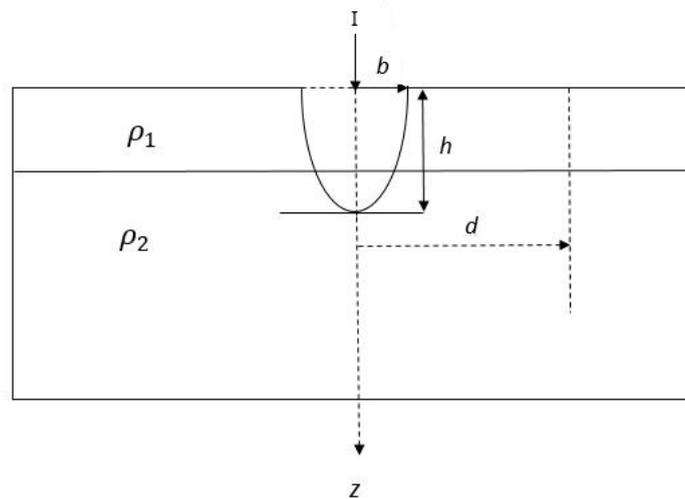


FIGURE 2.9: Électrode sphéroïdale dans un sol à deux couches

La solution analytique de ce système est [38] :

$$V = \frac{I}{4\pi b\sigma_1 F} \cdot \ln \frac{\left[1 + \frac{1}{\left(\frac{h}{b}\right)^2 - 1}\right]^{\frac{1}{2}} + 1}{\left[1 + \frac{1}{\left(\frac{h}{b}\right)^2 - 1}\right]^{\frac{1}{2}} - 1} \quad (2.12)$$

avec :

$$F = \sqrt{\left(\frac{h}{b}\right)^2 - 1} \cdot \frac{\sigma_2}{\sigma_1} + \frac{h_1}{b} \left[1 - \frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right] \quad (2.13)$$

Toutes les dimensions sont illustrées sur la figure 2.9.

Les distributions radiales du potentiel et le gradient du potentiel à la surface de la terre (pour $\rho/b \geq 1$) sont :

$$V = \frac{I}{4\pi b\sigma_1 F} \cdot \ln \frac{\left[1 + \frac{\left(\frac{d}{b}\right)^2}{\left(\frac{h}{b}\right)^2 - 1}\right]^{\frac{1}{2}} + 1}{\left[1 + \frac{\left(\frac{d}{b}\right)^2}{\left(\frac{h}{b}\right)^2 - 1}\right]^{\frac{1}{2}} - 1} \quad (2.14)$$

$$E = \frac{I}{2\pi b^2\sigma_1 F} \cdot \frac{1}{\left(\frac{d}{b}\right) \cdot \left[1 + \frac{\left(\frac{d}{b}\right)^2}{\left(\frac{h}{b}\right)^2 - 1}\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.15)$$

Les distributions verticales du potentiel et le gradient du potentiel sur le long d'axe de symétrie (axe z) sont :

$$V = \frac{I}{4\pi b\sigma_1 F} \cdot \ln \frac{\left(\frac{z}{b}\right) + \left[\left(\frac{h}{b}\right)^2 - 1\right]^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{z}{b}\right)^2 - \left[\left(\frac{h}{b}\right)^2 - 1\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.16)$$

$$E = \frac{I}{2\pi b^2\sigma_1 F} \cdot \ln \frac{\left[\left(\frac{h}{b}\right)^2 - 1\right]^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{z}{b}\right)^2 - \left[\left(\frac{h}{b}\right)^2 - 1\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.17)$$

2.8 Principales méthodes de mesure de la résistivité du sol

2.8.1 Méthode de Wenner

Le principe de mesure consiste à utiliser quatre électrodes qui sont disposées en ligne les équidistantes d'une distance a (Figure 2.10), ces électrodes sont enfoncées dans le sol à une profondeur de $(3a/4)$. Entre les deux électrodes extrêmes E et H , on injecte un courant de mesure I grâce à un générateur. E et H s'appellent électrodes de courant. Entre les deux électrodes centrales S et ES , on mesure le potentiel ΔV grâce à un voltmètre. S et ES s'appellent électrodes de potentiel. Le terme V/I est la résistance R qui est mesurée avec un telluromètre à quatre bornes [39].

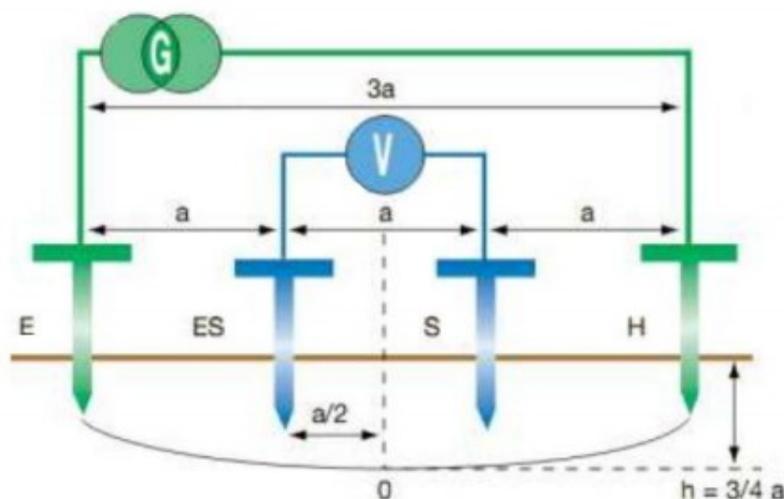


FIGURE 2.10: Schéma de principe de la méthode de Wenner.

La valeur de la résistance R lue sur l'ohmmètre permet de calculer la résistivité (ρ) au point situé sous le point O , à une profondeur de $e = \frac{3}{4}a$, par l'expression simplifiée suivante obtenue dans le cas d'un sol homogène : $\rho = 2\pi a R$

où :

ρ : résistivité [$\Omega \cdot m$];

a : distance entre les sondes [m];

R : résistance affichée sur l'appareil de mesure de terre [Ω].

La méthode de Wenner est utilisée souvent pour la stratification verticale des terrains [40].

2.8.2 Méthode de Schlumberger

La méthode de Schlumberger est basée sur le même principe de mesure de Wenner. La seule différence se situe au niveau du positionnement des électrodes :

- ✓ la distance entre les 2 piquets extérieurs est $2d$;
- ✓ la distance entre les 2 piquets intérieurs est a .

La valeur de résistance R lue sur l'ohmmètre permet de calculer la résistivité par la relation (2.18) [39] :

$$\rho = \frac{1}{4} \left[\pi \left(d^2 - \frac{a^2}{4} \right) \right] \quad (2.18)$$

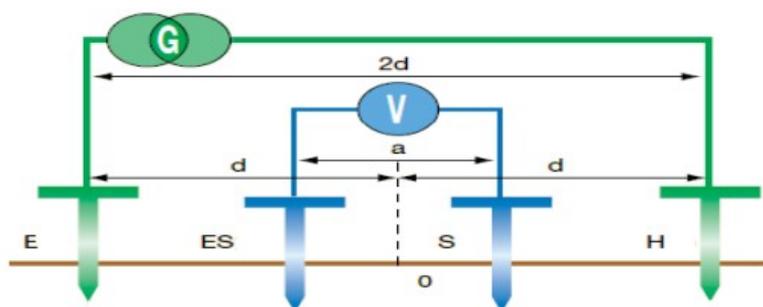


FIGURE 2.11: Schéma de mesure de la méthode de Schlumberger

La méthode de Schlumberger permet un gain de temps considérable sur le terrain notamment si l'on désire réaliser plusieurs mesures de résistivité. En effet, seules les 2 électrodes extérieures doivent être déplacées contrairement à la méthode de Wenner nécessitant de déplacer les 4 électrodes en même temps [39]. Bien que la méthode de Schlumberger permette de gagner du temps, c'est la méthode de Wenner qui est la plus connue et la plus utilisée. Sa formule mathématique est plus simple.

2.8.3 Méthode à trois pôles

Bien souvent, un dispositif de mise à la terre est constitué de plusieurs prises de terre branchées en parallèle ou en série. La méthode de mesure à trois pôles (Figure 2.11) donne la valeur de la résistance de terre équivalente à toutes les prises de terre du système (résistance de terre globale). Pour obtenir la valeur de la résistance d'une prise de terre individuelle, il faut déconnecter la prise de terre des autres. Mais surtout, cette méthode est peu pratique à mettre en œuvre dans de bonnes conditions. Il faut en effet, s'assurer que pendant la déconnexion de la prise de terre

à contrôler, le dispositif de protection (disjoncteur différentiel) continue à être opérationnel, afin d'éviter tout risque d'électrocution de ceux qui travaillent sur le site. Pour éviter tout risque, il faut donc arrêter l'alimentation électrique de l'installation (ou de la partie de celle-ci concernée par la prise de terre à contrôler). Ceci n'est en général pas envisageable [41].

Il existe une méthode où il n'est plus nécessaire de déconnecter la résistance de terre qu'on appelle méthode de mesure sélective, cette méthode de mesure sélective permet de vérifier la conductivité de terres individuelles, de systèmes maillés, de terres de fondation et d'autres systèmes de mise à la terre. Elle permet également de mesurer la résistance des prises de terre individuelles sur des systèmes complexes comportant des systèmes maillés ou des réseaux de grilles, tels que ceux utilisés pour les postes de distribution publique, pour les pylônes des lignes à haute tension comportant des câbles de garde, et pour les installations industrielles à terres multiples. La mesure sélective utilise une pince ampérométrique en plus des deux piquets de mesure. Au lieu de prendre en compte le courant généré par le mesureur de terre, qui traverse donc tout le dispositif maillé, la pince ampérométrique permet de mesurer individuellement chaque courant qui passe dans chaque prise de terre. On parvient ainsi à éliminer l'influence des autres prises de terre en parallèle [41].

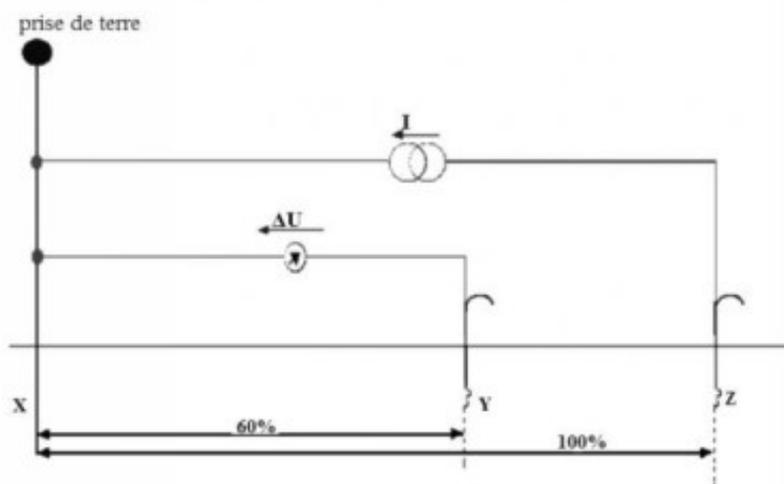


FIGURE 2.12: Principe de la méthode à 3 pôles

Le principe de la méthode de mesure à trois pôles repose sur trois éléments : Le premier est une prise de terre (X), les deux autres sont des piquets de terre. Le piquet situé le plus loin de la prise de terre assure le bouclage du courant I généré par l'ohmmètre de terre, c'est la sonde auxiliaire ou terre auxiliaire (Z). Le deuxième piquet est la sonde de tension (Y) qui permet de mesurer la différence de potentiel ΔV par rapport à la prise de terre. La sonde de tension doit être positionnée entre la prise de terre et la sonde auxiliaire selon la règle des 62%. Cette

règle qui consiste à placer la sonde de tension à 62% de la distance XZ permet de s'assurer de se trouver en dehors des zones d'influence de chaque pôle et donc de réaliser une mesure assez précise. Connaissant la différence de potentiel et le courant, on calcule la résistance de terre à l'aide de la loi d'ohm [41].

2.9 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. La mesure de la résistance des sols permet de choisir le meilleur emplacement pour les prises de terre. Pour cela, plusieurs techniques de mesure de la résistivité permettant de déterminer la résistance de terre ont été employées, les plus célèbres sont celles de Wenner, Schlumberger et à trois piquets.

Chapitre 3

Méthodologie et évaluation de la précision de calcul de la résistance

3.1 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.

3.2 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 sols environnants seront modélisés.

3.3 Conception et mise en œuvre du logiciel de simulation (COM-SOL)

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 [42].

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.. [42].

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 [42].

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 verticale 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 .

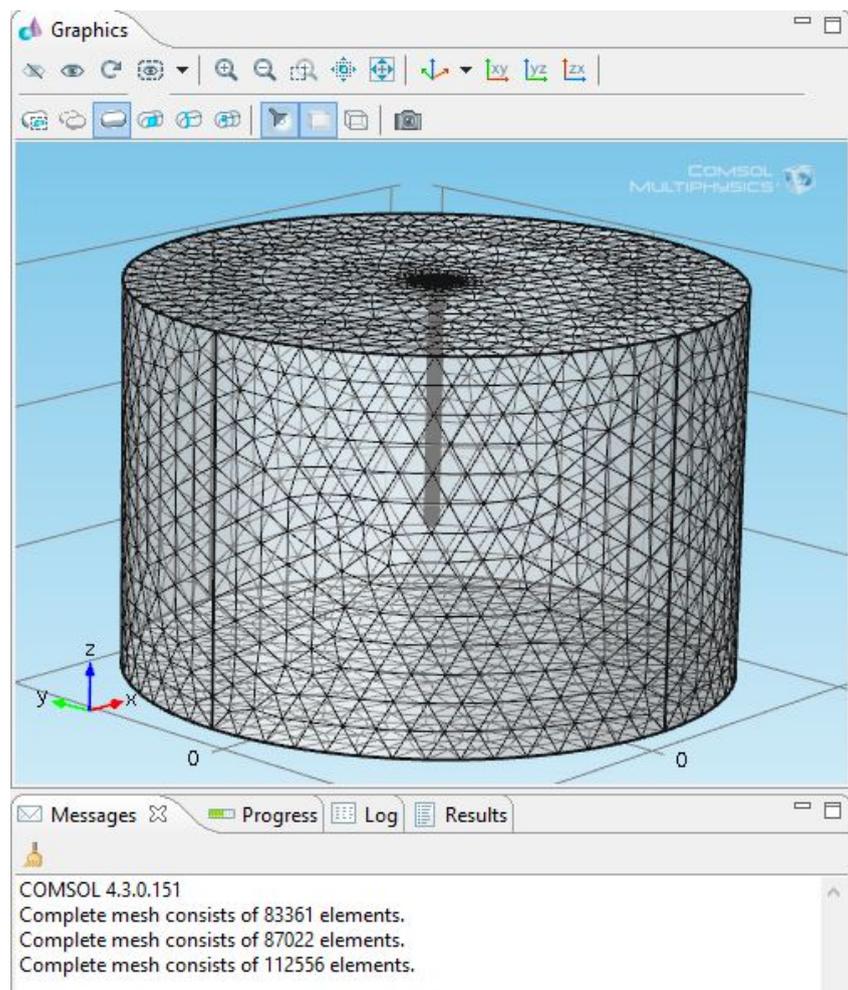


FIGURE 3.1: Maillage du modèle

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

- ✓ 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.

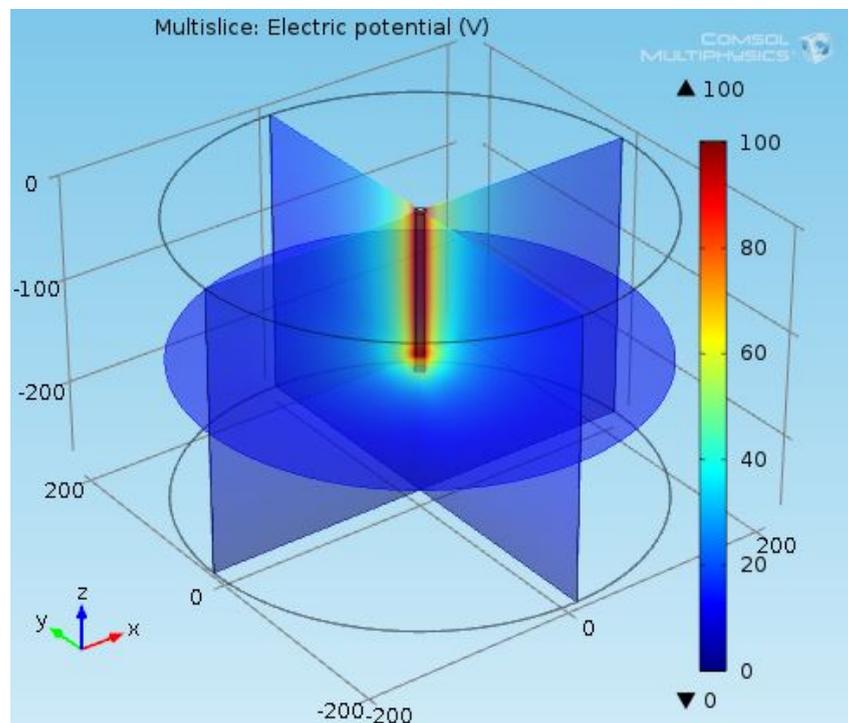


FIGURE 3.2: Modèle résolu

3.4 Tige verticale dans un sol homogène

Ce système est représenté sur la figure 2.1. Dans ces conditions, la résistance de mise à la terre peut être évaluée en utilisant l'équation (2.1). Dans cette équation, la terre est supposée être

homogène. Il s'agit d'un système de révolution. Le modèle de révolution est présenté sur la figure 3.1. La figure 3.3 représente le modèle axisymétrique.

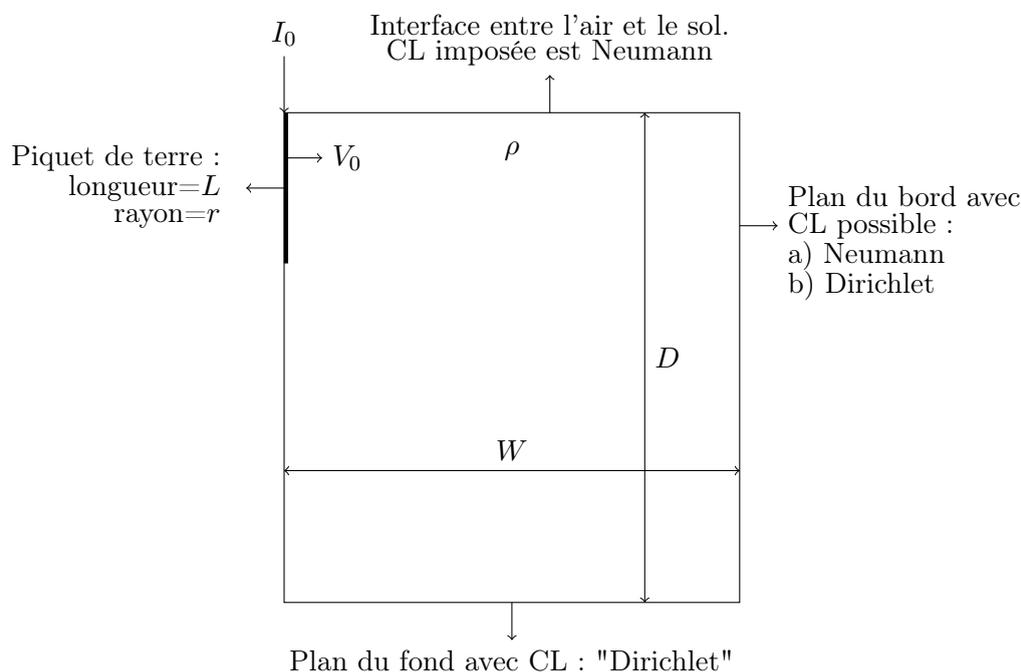


FIGURE 3.3: Modèle axisymétrique du sol avec une tige verticale

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 3.1 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} .

Les résultats de la table 3.1 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 $\Omega.m$. W et D sont des dimensions montrées sur la figure 3.3, 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. R_{exact} est obtenue en utilisant l'équation (2.1). 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

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

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.

3.5 Conditions aux limites

3.5.1 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.

3.5.2 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 3.1, 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 de 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 à la limite imposée sur le plan du bord.

Des explications plus descriptives peuvent être obtenues en examinant les figures (3.4 et 3.5) qui montrent des croquis de lignes de flux dans un système de mise à la terre composé d'une seule tige vertical. Les deux figures montrent les lignes de flux le long d'un plan de symétrie.

La figure 3.4 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 3.5 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 3.1, l'imposition de la condition de limite "Dirichlet" produit réellement les courants et les modèles d'écoulement les plus cohérents.

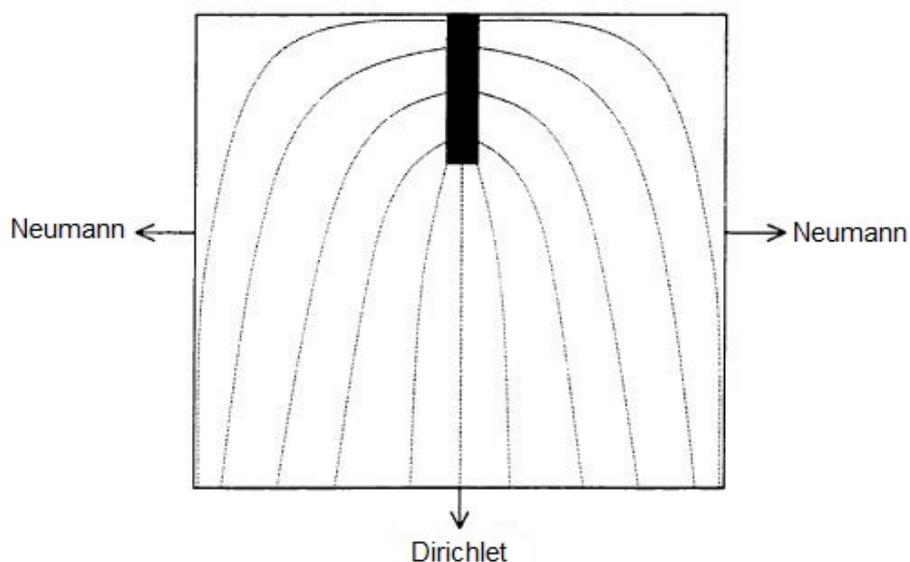


FIGURE 3.4: Neumann

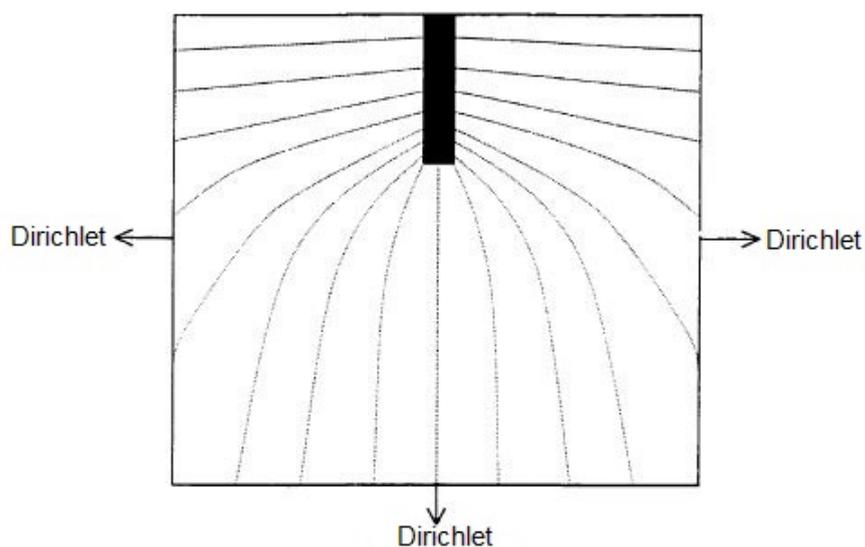


FIGURE 3.5: Dirichlet

3.6 Électrode cylindrique verticale dans un sol multicouche

L'hypothèse d'un sol homogène simplifie les calculs. Toutefois, cela n'est pas réaliste. Un modèle de sol plus pratique est de supposer une structure multicouche avec différentes épaisseurs D_k et résistivités ρ_k , où k indique la k -ème couche. Ce modèle est représenté sur la figure 3.6. Notons que toutes les couches sont parallèles à la surface de la terre. Les effets de l'inclinaison des couches seront abordés dans un chapitre ultérieur.

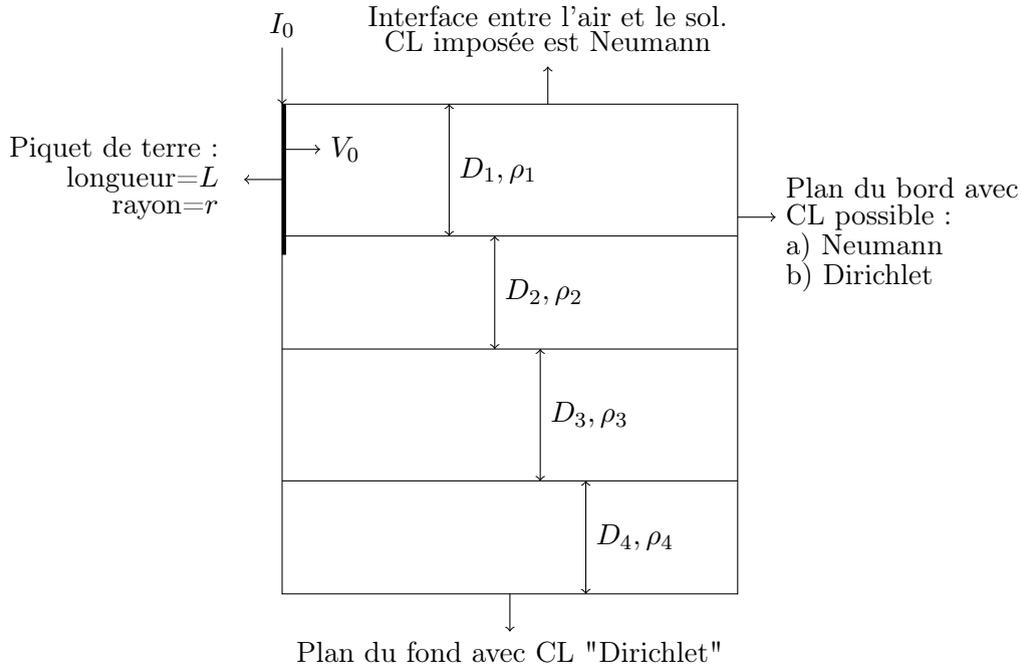


FIGURE 3.6: Modèle axisymétrique d'une tige verticale dans un sol multicouche

Elle n'existe pas une solution analytique semblable à l'équation (2.1) pour la configuration de la figure 3.6. Cependant, il y a une bonne façon d'évaluer l'adéquation de la FEM et la maille du modèle. On peut modéliser le maillage de la structure multicouche et ensuite définir toutes les résistivités et les remplacer par une valeur équivalente dite ρ_1 . La structure devient alors identique à celle représentée sur la figure 3.3, l'équation (2.1) peut maintenant être utilisée pour vérifier l'adéquation du modèle. Si une estimation d'erreur de 10% d'erreur est obtenue, nous pouvons conclure que le modèle et le maillage sont donc adéquats et peuvent être utilisés pour les sols multicouche.

Dans l'étape suivante, les résistivités ρ_k seront remplacées par leurs valeurs correspondantes et une estimation fiable de la résistance de mise à la terre R_{est} est obtenue tout en conservant le même maillage, pour le cas d'une seule tige verticale dans un sol multicouche.

Si l'erreur du modèle et de maillage est connue (cas d'une tige vertical dans un sol homogène), la résistance de mise à la terre estimée R_{est} pour le cas d'une seule tige vertical dans un sol multicouches peut être corrigée pour obtenir la résistance exacte projetée $R_{exact-p}$ comme suit :

$$Erreur = \frac{R_{exact} - R_{est}}{R_{exact}}$$

$$R_{exact} [1 - Erreur] = R_{est}$$

$$R_{exact} = \frac{R_{est}}{1 - Erreur}$$

Si R_{est} est la résistance de mise à la terre estimée d'une tige verticale unique intégrée dans un sol multicouche obtenue avec un modèle et maillage où l'erreur est connue, donc la résistance exacte projetée, $R_{exact-p}$ d'un tel arrangement est :

$$R_{exact-p} = \frac{R_{est}}{1 - Erreur} \quad (3.1)$$

3.7 Vérification de la méthode proposée pour l'évaluation de la précision de la résistance estimée dans un sol multicouche

L'exemple suivant montre que la méthode d'évaluation de l'exactitude de R_{est} dans un sol multicouche tel que proposé dans le paragraphe 3.6 est adéquate, dans le cas d'une seule tige verticale mise à la terre dans un sol à deux couches tel que représenté sur la figure 2.3. Supposons que le longueur de la tige l est 3.048 m, le rayon de la tige r est 0.03 m et h est de 0,51 m (Figure 2.3), ρ_1 et ρ_2 sont 5 et 100 $\Omega.m$ respectivement. Ce qui donne un coefficient de réflexion K d'environ -0,9.

Des équations (2.1), (2.5) nous trouvons :

$$R_{exact} = 0,1[26,1462 - 2,25] = 2,3896 \Omega$$

Ce même exemple est modélisé par COMSOL *Multiphysics* 4.3. Tout d'abord, ρ_1 et ρ_2 sont fixées à 100 $\Omega.m$, donc nous sommes dans le cas d'un sol homogène. La résistance estimée de la tige par Comsol Multiphysics 4.3 dans ce cas est $R_{est} = 23,975 \Omega$ et la solution analytique en utilisant l'équation (2.1) est $R_{exact} = 26,1462 \Omega$; l'erreur du modèle et du maillage est :

$$Erreur = \frac{26,1462 - 23,975}{26,1462}$$

Maintenant, en utilisant le même modèle et le même maillage, ρ_2 est fixée à 5 $\Omega.m$ pour avoir un sol composé de deux couches. la résistance estimée par Comsol *Multiphysics* 4.3 dans ce cas est $R_{est} = 2.094 \Omega$ En utilisant l'équation (3.1) la résistance de mise à la terre exacte projetée est :

$$R_{exact} = \frac{2,094}{1 - 0,083} = 2,2835 \Omega$$

La différence entre cette résistance de mise à la terre exacte projeté R_{exact_p} et la résistance du sol exacte R_{exact} est seulement de 4,4%. Ceci montre que la méthode proposée pour évaluer l'exactitude de la résistance du sol estimée et la technique pour arriver à la résistance du sol exacte projetée R_{exact_p} pour le cas d'une tige verticale dans un sol multicouche sont applicables.

3.8 Plusieurs tiges de mise à la terre dans un sol homogène

La figure 3.7 montre la représentation dans le plan d'un système d'électrodes à plusieurs tiges disposées dans une forme d'anneau. Le rayon du cercle formé par les tiges individuelles est R_c .

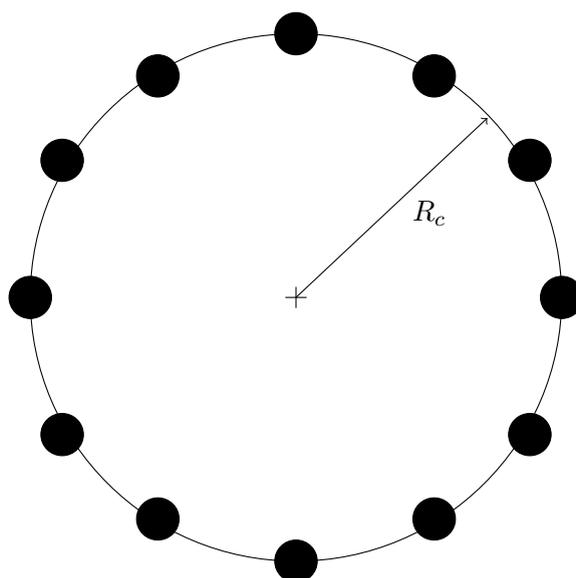


FIGURE 3.7: Électrodes sur la circonférence d'un cercle

3.8.1 Domaine et conditions aux limites

Le domaine du modèle requis et les conditions aux limites pour obtenir un résultat fiable dans une situation à 3D sont similaires à ceux décrits dans les paragraphes 3.4 et 3.5. Dans le paragraphe 3.4, il est recommandé que la distance latérale (le long de la surface de la terre) dans la modélisation doit être d'au moins 5 fois la longueur de la tige de terre L , et la distance verticale (profondeur dans la terre) soit au moins 7 fois L .

Cependant, pour une situation de modélisation en 3D, les résultats ont montré qu'une estimation plus fiable et meilleure est possible avec les distances latérales et verticales égales les unes aux autres. À condition que ces distances choisies sont au moins six fois L . Pour un cas de plusieurs

tiges formant un anneau, cette distance est mesurée à partir du centre du cercle formé par les barres individuelles et L est la longueur des tiges individuelles. La table 3.2 présente les effets de l'imposition de différentes conditions aux limites et l'étendue des domaines modélisés sur l'estimation de la résistance du sol. La résistance du sol estimée R_{est} est comparée à la valeur donnée par l'équation (2.9). Il est à noter ici que l'équation (2.9) est une formule très conservatrice, qui tend à donner des résultats 5-25% de plus que la valeur réelle [35].

cas	W/L	D/L	Les conditions aux limites	R_{est} (Ω)	Erreur (%)
A	6	6	Neumann	6,61	14
			Dirichlet	5,98	22
B	6	8	Neumann	7,35	5
			Dirichlet	6,00	22
C	12	12	Neumann	6,71	13
			Dirichlet	6,39	17
D	12	16	Neumann	7,04	9
			Dirichlet	6,42	17

TABLE 3.2: Effets des conditions aux limites du modèle utilisé pour la détermination de la résistance du sol estimée dans le cas de plusieurs tiges enterrées dans un sol homogène. R_{exact} est 7,75 Ω

Les résultats de la table 3.2 ont été obtenus pour 10 tiges verticales et installées dans une terre homogène avec une résistivité ρ de 100 Ω .m. Le rayon du cercle formé par les tiges est 3,043 m. Chaque tige est de 2,44 m de longueur et de rayon de 0,0127 m. En utilisant l'équation (2.9), R_{exact} est 7,7500 Ω .

Bien que, l'équation (2.9) a tendance à surestimer la véritable résistance à la terre de l'électrode, sa prévision pourrait être supposée exacte et utilisée comme base de comparaison. L'erreur calculée dans la table 3.2 est le pourcentage d'erreur entre R_{exact} et de R_{est} . Les conditions aux limites prescrites sont similaires à celles du paragraphe 3.4.

Le cas C mentionné dans la table 3.2 montre que l'imposition de conditions soit la "Neumann" ou "Dirichlet" donne des valeurs de R_{est} qui diffèrent seulement de 4%. Cela implique que c'est une estimation fiable. Contrairement au cas A où les distances latérales et verticales du modèle simulé sont égales à seulement à 6 fois L . les cas B et D montrent tous les deux que le fait d'avoir des distances du modèle inégales sur les directions latérales et verticales crée un écart dans l'estimation de R_{est} .

3.9 Électrode sphéroïdale

Dans les paragraphes 3.4 à 3.7, l'exactitude et la fiabilité de la valeur estimée de la résistance de mise à la terre R_{est} ont été évaluées. Les solutions de la distribution du potentiel V et la répartition du gradient du potentiel E ainsi la densité de courant J doivent être discutées.

A cet effet, une électrode sphéroïdale telle que celle représentée sur la figure 2.9, avec toutes ces solutions analytiques, est choisie pour former la base de l'évaluation.

La solution analytique d'une telle électrode de mise à la terre est fournie dans le paragraphe 2.7. Les calculs du paragraphe 2.7 sont effectués pour une terre à deux couches. Cependant, pour plus de simplicité, un modèle d'une terre homogène est utilisé.

Essentiellement, les conductivités de la terre σ_1 et σ_2 sont supposés être égaux. Les équations (2.12) à (2.17) sont utilisées pour évaluer la précision de la solution trouvée par (COMSOL *Multiphysics* 4.3).

3.9.1 Estimation de la résistance d'une électrode sphéroïdale de mise à la terre

Une électrode sphéroïdale avec demi-petit axe et demi-grand axe égaux respectivement à 0,25 m et 2.00 m est simulée. La terre est supposée homogène avec une résistivité de 100 Ω .m. En utilisant un modèle 3D et en imposant l'état "Dirichlet" sur toutes les limites, une bonne estimation de R_{est} peut être obtenue. A partir des équations (2.12) et (2.13), R_{exact} est 22,2065 Ω . La solution obtenue en utilisant (Comsol *Multiphysics* 4.3) donne un R_{est} de 20,2945 Ω . L'erreur est d'environ 9%. Une meilleure estimation peut être obtenue en augmentant la taille du domaine modélisé.

3.9.2 Distribution de potentiel et de gradient de potentiel

Le profil du potentiel et le gradient du potentiel sont tracés sur les figures 3.8, 3.9, 3.10 et 3.11. Les figures 3.8 et 3.9 illustrent les profils le long de la surface de la terre c.à.d dans la direction latérale alors, les figures 3.10 et 3.11 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.

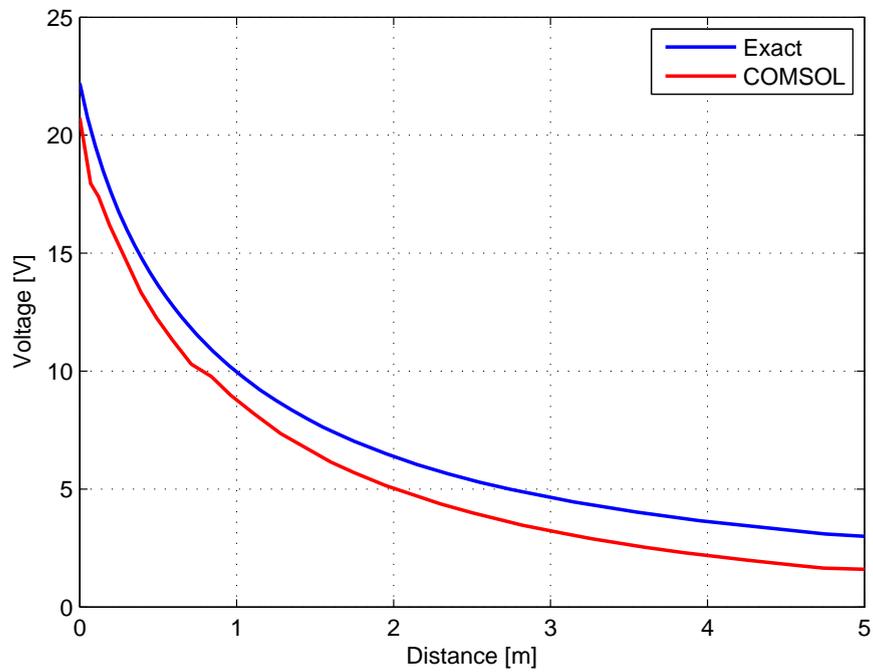


FIGURE 3.8: Distribution latérale du potentiel le long de la surface pour une électrode sphéroïdale dans un sol homogène

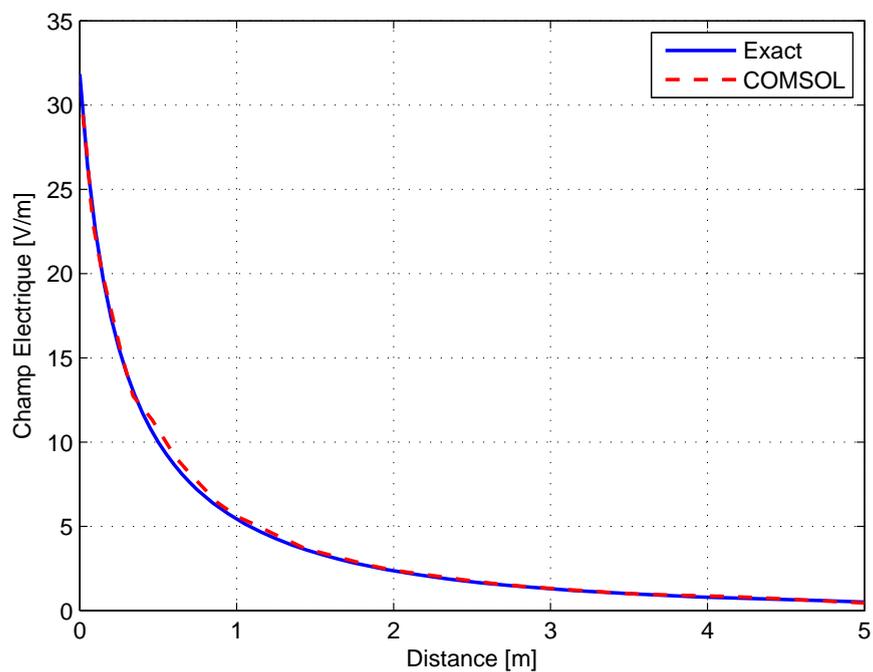


FIGURE 3.9: Distribution latérale du champ électrique le long de la surface pour une électrode sphéroïdale dans un sol homogène

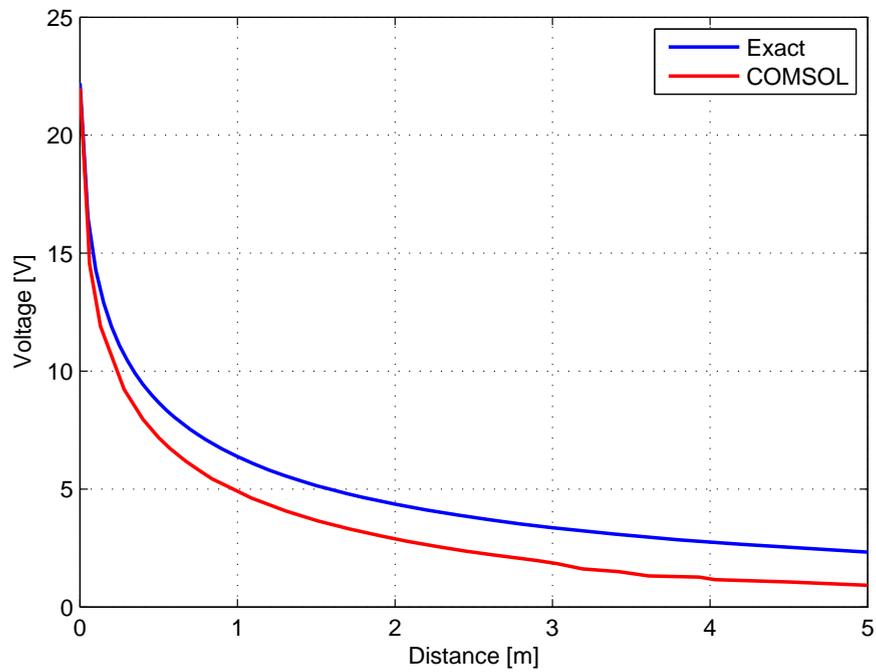


FIGURE 3.10: Distribution verticale du potentiel le long d'axe de symétrie pour une électrode sphéroïdale dans un sol homogène

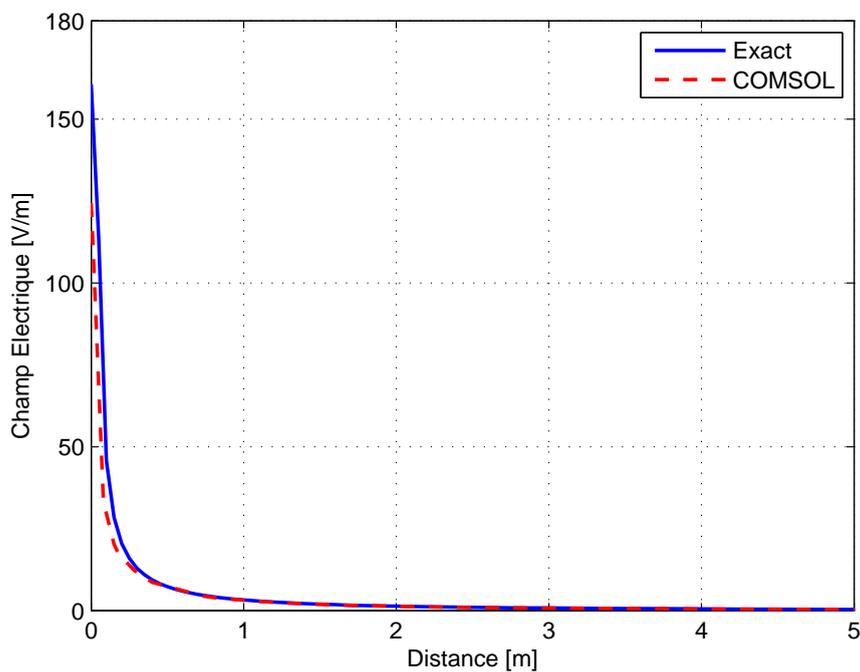


FIGURE 3.11: Distribution verticale du champ électrique le long d'axe de symétrie pour une électrode sphéroïdale dans un sol homogène

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.

3.10 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. Relativement à la formule (2.9), l'erreur dans l'estimation de notre résistance ne dépassant pas de 10%.

Chapitre 4

Résistance de l'électrode enterrée dans un sol multicouche

4.1 Introduction

Dans le chapitre 3, il a été constaté que 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.

4.2 Présentation de CYMGrd

Ce code peut effectuer des analyses de résistivité du sol. Il peut tracer les résistivités mesurée et calculée sur le même graphique. Cette analyse est nécessaire pour arriver à un modèle de sol

qui sera, par la suite, utilisé pour l'analyse des élévations de potentiel. Le module de ce code supporte l'analyse du sol uniforme ou stratifié horizontalement en deux couches de résistivités différentes (ce code ne tient pas compte de la stratification verticale du sol). CYMGrd calcule les tensions maximales admissibles de pas et de contact, selon la norme IEEE 80-2000. L'utilisateur peut définir l'amplitude future du courant de défaut, l'épaisseur et la résistivité des couches de matériau appliquées (exemple : la pierre concassée) à la surface du terrain, le poids corporel et la durée prévue d'exposition de la victime.

En plus, il le dimensionne les électrodes de terre et calcule l'élévation de potentiel de terre (EPT). Il peut également déterminer la résistance équivalente des grilles de mise à la terre, de configurations arbitraires, constituées de conducteurs de terre, de piquets de terre et d'arcs, puisqu'il emploie des méthodes matricielles pour résoudre la distribution de courant à la terre. Des électrodes directement sous tension et/ou passives, non connectées à la grille mises sous tension, peuvent être modélisées, afin d'évaluer les effets de proximité. CYMGrd calcule en outre, les gradients de potentiel de contact, de pas et de surface dans n'importe quel point d'intérêt de la zone d'étude. Ce code peut également produire les contours équipotentiels des potentiels de contact, de pas et de surface, ainsi que les profils des tensions de contact, de pas et de surface dans n'importe quelle direction. La codification couleur permet de visualiser les résultats en deux ou trois dimensions, facilitant ainsi l'évaluation de la sécurité du personnel et la protection des équipements entourant les électrodes de mise à la terre [43].

4.3 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 4.1, 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).

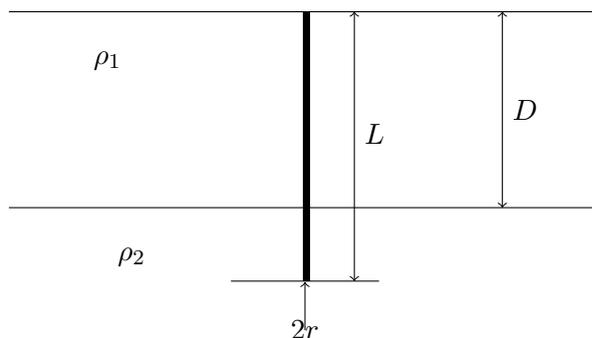


FIGURE 4.1: Électrode verticale dans un sol constitué de deux couches

4.4 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.

Afin d'étudier ces variations, les deux cas ont été traités en utilisant COMSOL *Multiphysics* basé sur la technique MEF avec des conditions aux limites (Neumann et Dirichlet), comme indiqué sur la figure 4.1.

Les figures 4.2 et 4.3 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 4.4 et 4.5 représentent les caractéristiques trouvées pour les deux rapports ρ_1/ρ_2 ($1/2$ et 2) adoptés.

La différence entre la figure 4.2 et la figure 4.4 est que ρ_1 pour la figure 4.2 est de $100\ \Omega.m$ alors pour la figure 4.4 ρ_1 est de $500\ \Omega.m$. De même, ρ_1 pour la figure 4.3 est de $200\ \Omega.m$ alors pour la figure 4.5 ρ_1 est de $1000\ \Omega.m$.

Il est évident que la tendance des variations est similaire aussi bien sur les figures 4.2 et 4.4, que sur 4.3 et 4.5.

Les figures 4.2 et 4.4 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 4.3 et 4.5 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 4.2, R_{est} est égale à 8,62 Ω et de l'équation (2.1), 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 (2.1) 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.

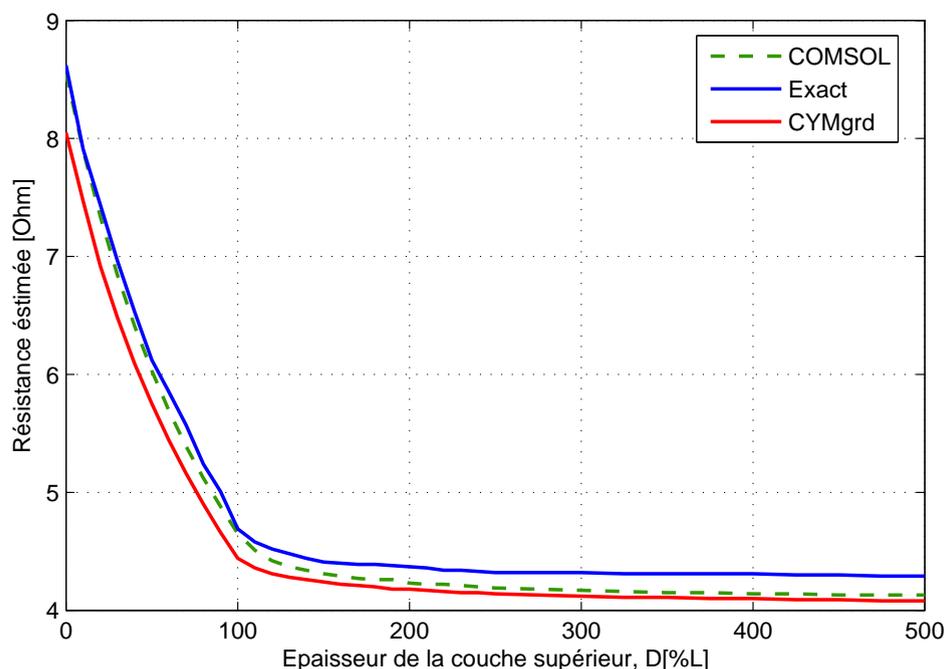


FIGURE 4.2: Variation de la résistance de mise à la terre d'une tige verticale dans un sol en deux couches avec $\rho_1=100 \Omega.m$ et $\rho_2=200 \Omega.m$ et $L=20m$

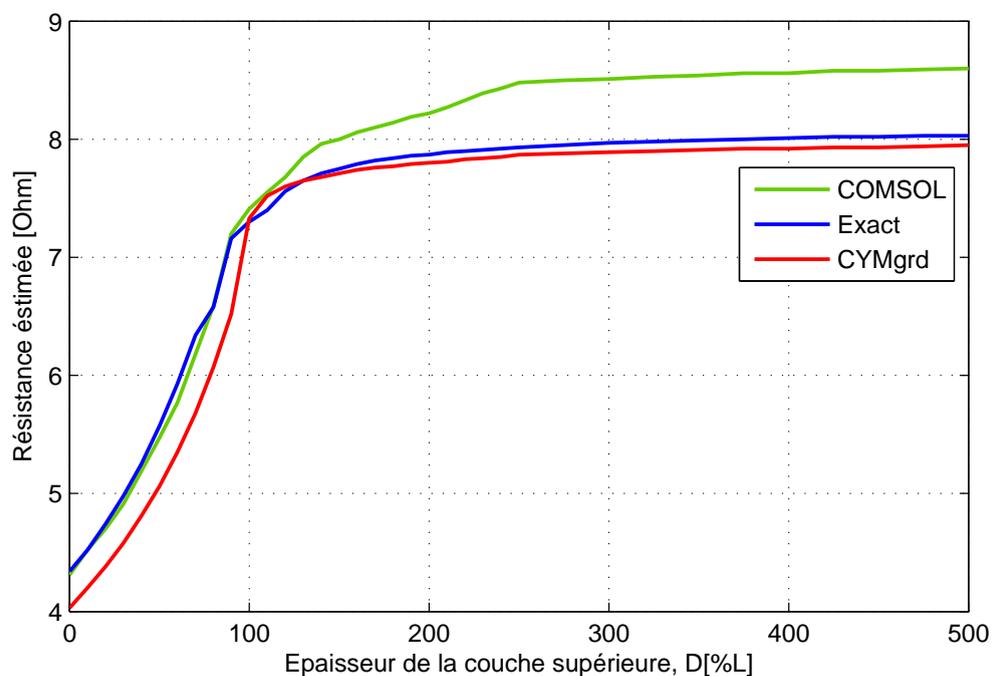


FIGURE 4.3: Variation de la résistance de mise à la terre d'une tige verticale dans un sol composé de deux couches avec $\rho_1=200 \Omega.m$ et $\rho_2=100 \Omega.m$ et $L=20m$

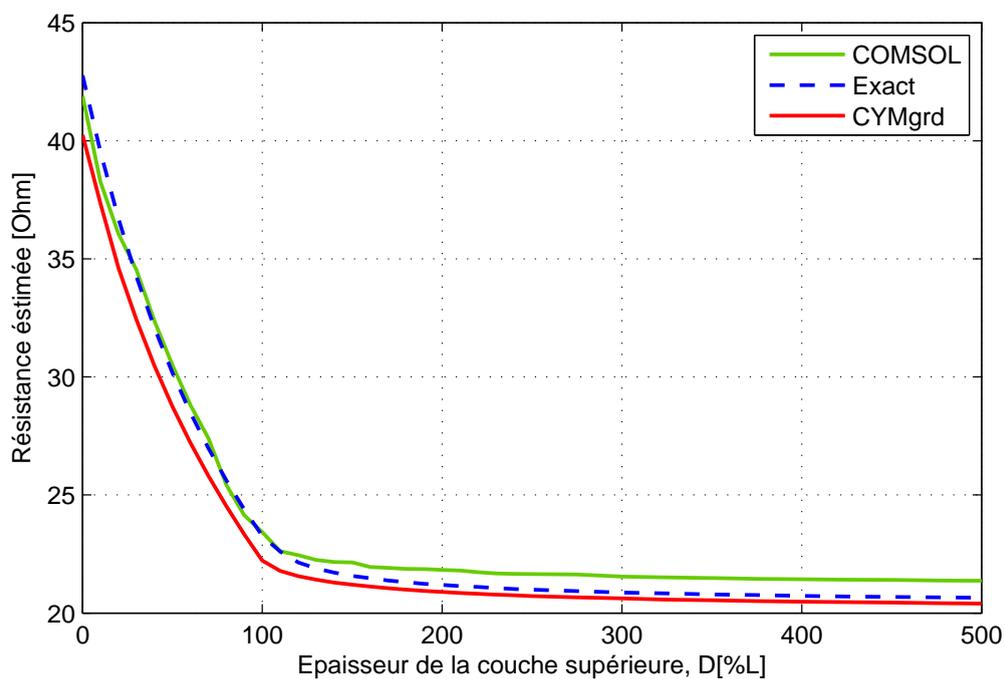


FIGURE 4.4: Variation de la résistance de mise à la terre d'une tige verticale dans un sol en deux couches avec $\rho_1=500 \Omega.m$ et $\rho_2=1000 \Omega.m$ et $L=20m$

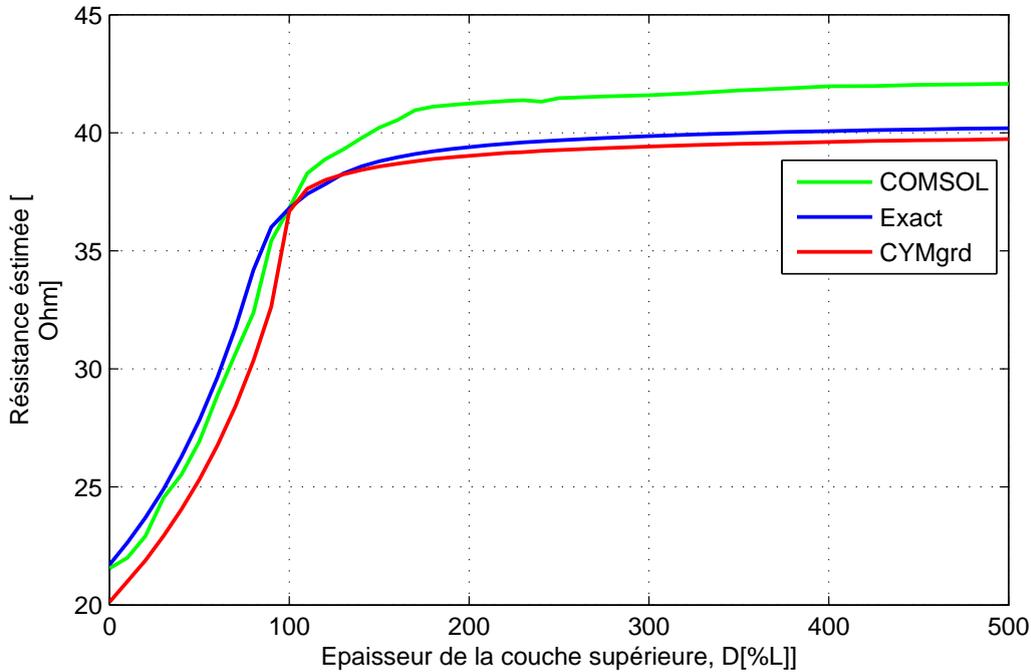


FIGURE 4.5: Variation de la résistance de mise à la terre d'une tige verticale dans un sol en deux couches avec $\rho_1=1000 \Omega.m$ et $\rho_2=500 \Omega.m$ et $L=20m$

4.5 Effet de la profondeur des couches

Les figures 4.2 à 4.5 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 3.6.

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.

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 4.1 et 4.2 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	$\rho_1(\Omega.m)$	$\rho_2(\Omega.m)$	$\rho_3(\Omega.m)$	$\rho_4(\Omega.m)$	$R_{est}(\Omega)$	$R'_{est}(\Omega)$	<i>Erreur</i> (%)
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 4.1: Estimation de la résistance de mise à la terre en utilisant la technique du paragraphe 4.5. $l = 20m$, D_1 , D_2 et D_3 sont égaux à 10m, 30m et 50m respectivement

Pour les cas représentés dans la table 4.1, 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	$\rho_1(\Omega.m)$	$\rho_2(\Omega.m)$	$\rho_3(\Omega.m)$	$\rho_4(\Omega.m)$	$R_{est}(\Omega)$	$R'_{est}(\Omega)$	<i>Erreur</i> (%)
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 4.2: Estimation de la résistance de mise à la terre en utilisant la technique du paragraphe 4.5. $l = 20m$, D_1 , D_2 et D_3 sont égaux à 8m, 8m et 24m respectivement

Pour les cas représentés dans la table 4.2. 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.

4.6 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.

4.6.1 Résistivité équivalente normalisée

Les figures 4.2 à 4.5 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 (4.1) et les figures 4.2 à 4.5, 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 :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \frac{4L}{r} - 1 \right] \quad (4.1)$$

Si L et r sont connus, l'équation (4.1) permet d'écrire :

$$R = \rho A \quad (4.2)$$

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 :

$$R = \rho_{eqv} A \quad (4.3)$$

La valeur de la résistance R dans l'équation (4.3) est obtenue à partir des caractéristiques 4.2 à 4.5 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 :

$$R_n = \rho_1 A \quad (4.4)$$

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 (4.3) par l'équation (4.4), On obtient :

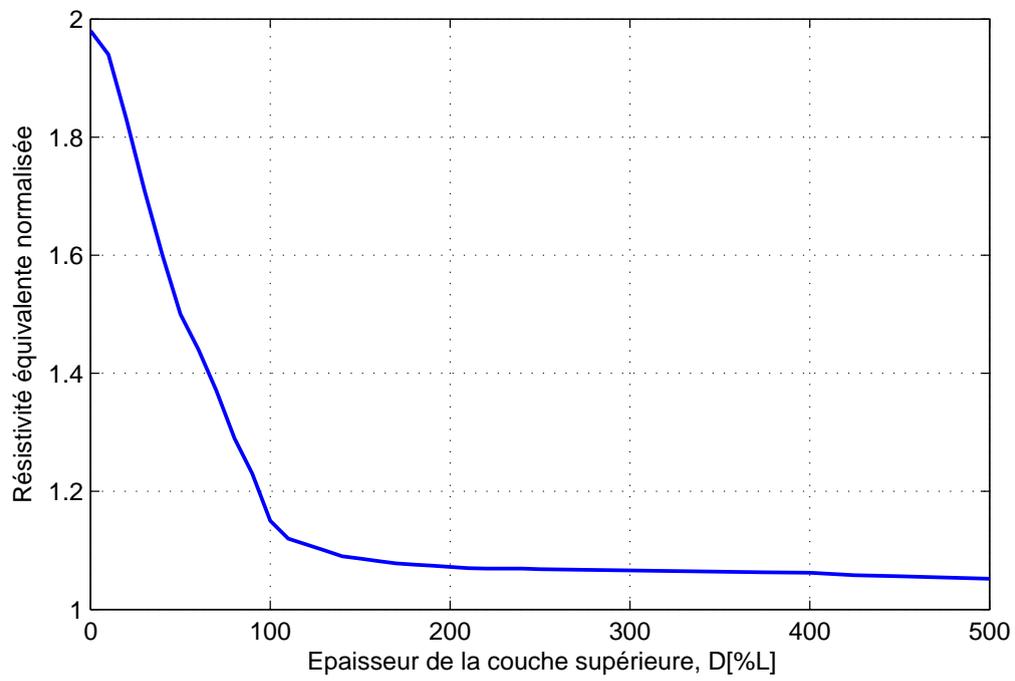
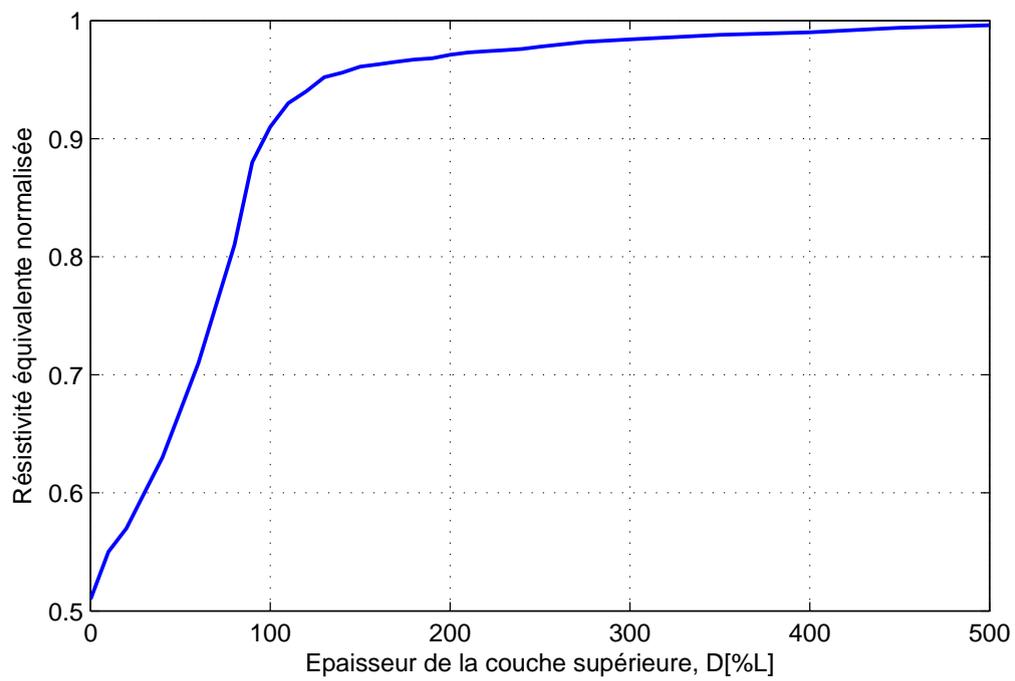
$$\frac{R}{R_n} = \frac{\rho_{eqv}}{\rho_1} \quad (4.5)$$

4.7 Importance des caractéristiques de résistivité équivalente normalisée

L'équation (4.5) a un rôle important. En effet, si les figures 4.2 à 4.5 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 4.2 à 4.5 c'est que les tracés normalisés des figures 4.2 et 4.4 se chevauchent les uns sur les autres comme représenté sur la figure 4.6. La même remarque est faite pour les tracés des figures normalisées 4.3 et 4.5 comme le montre la figure 4.7. 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 4.6 et 4.7 sont les courbes de résistivité équivalentes normalisées pour le rapport ρ_1/ρ_2 de 1/2 et 2.

FIGURE 4.6: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=1/2$ FIGURE 4.7: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=2$

Cependant, ces courbes de résistivité équivalente normalisé 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 $L \gg r$.

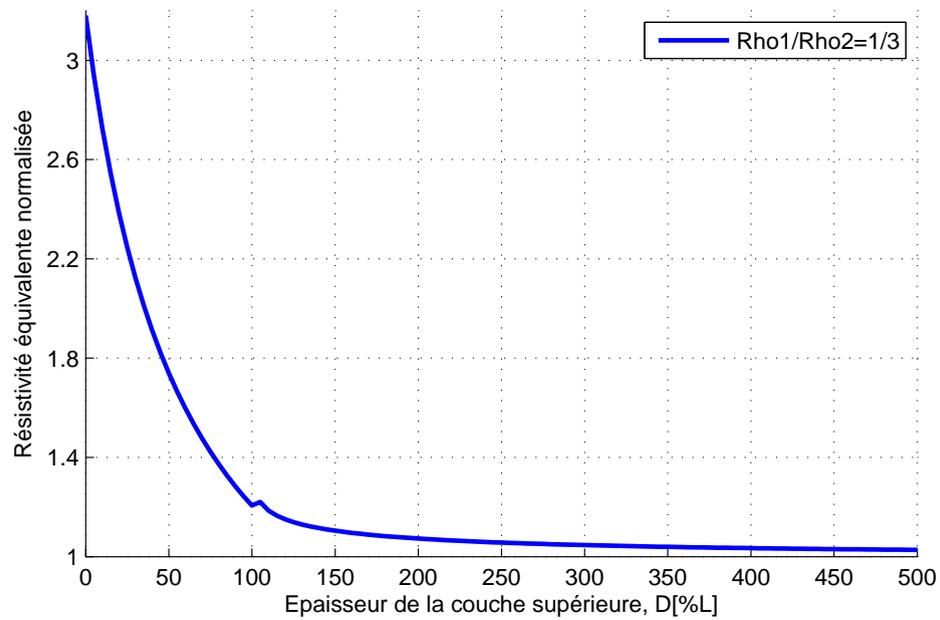
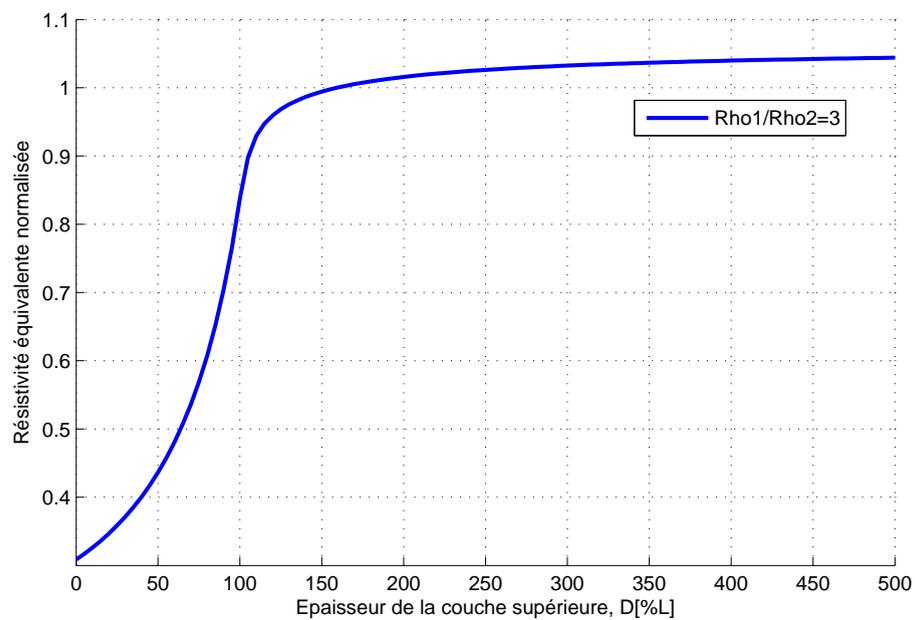
Autrement dit, l'influence de r sur ρ_{eqv} , est insignifiante tant que la condition $L \gg r$ est remplie, ce qui est essentiellement vrai pour toutes les tiges pratiques de sol de type vertical. Pour utiliser ces courbes afin d'obtenir ρ_{eqv} , nous avons besoin de connaître les valeurs de L , D , 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 (2.1).

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 (2.1) 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 (2.1) 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 (2.1). L'erreur ne devrait pas être plus de 5% sur toute la plage de D .

Ces erreurs doivent être très proches 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 4.8: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=1/3$ FIGURE 4.9: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=3$

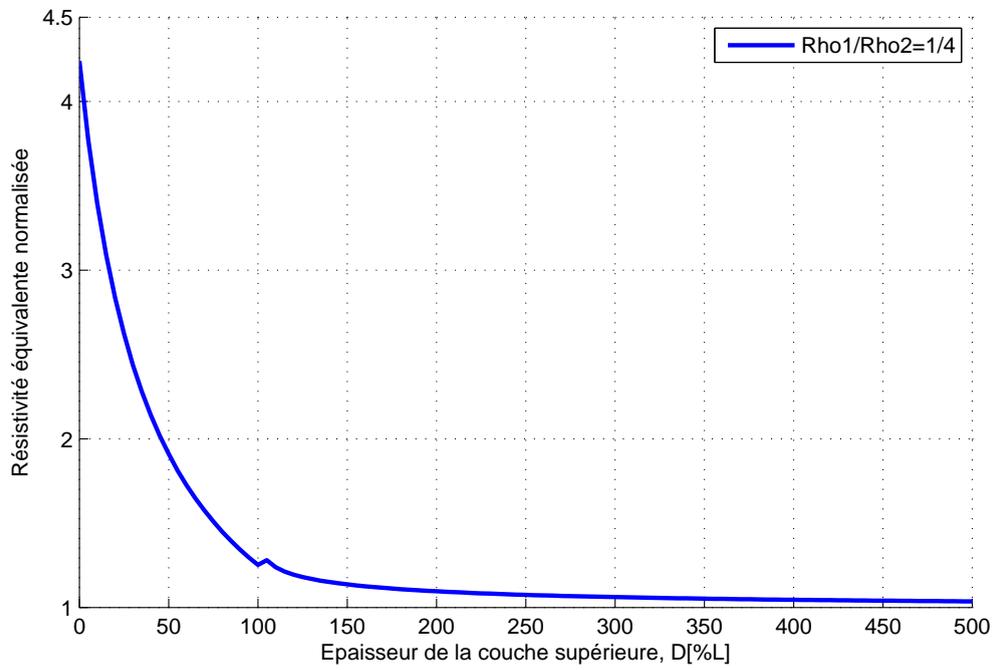


FIGURE 4.10: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=1/4$

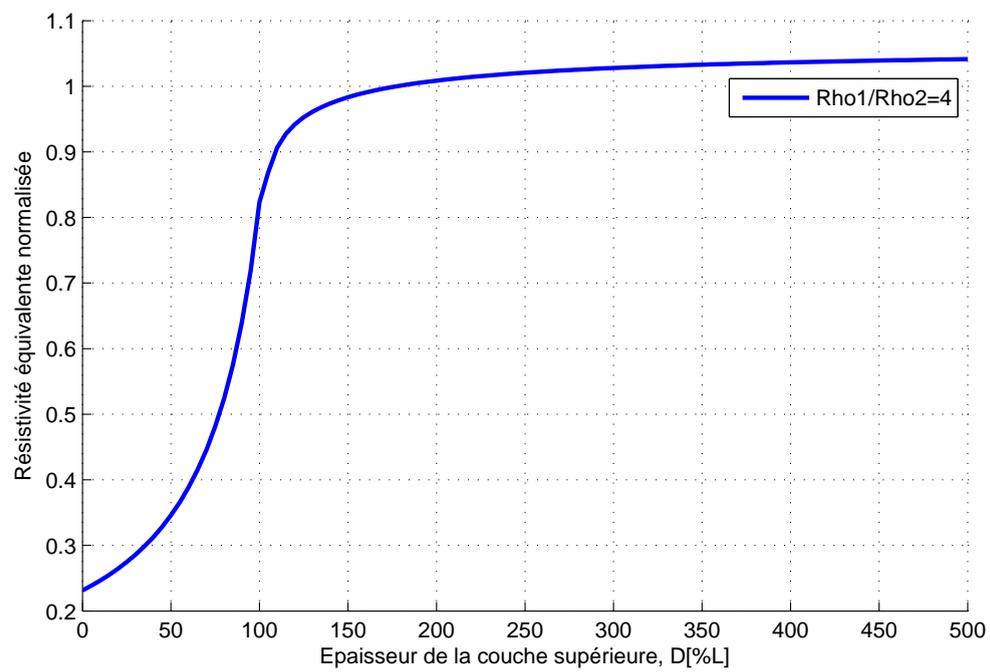


FIGURE 4.11: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=4$

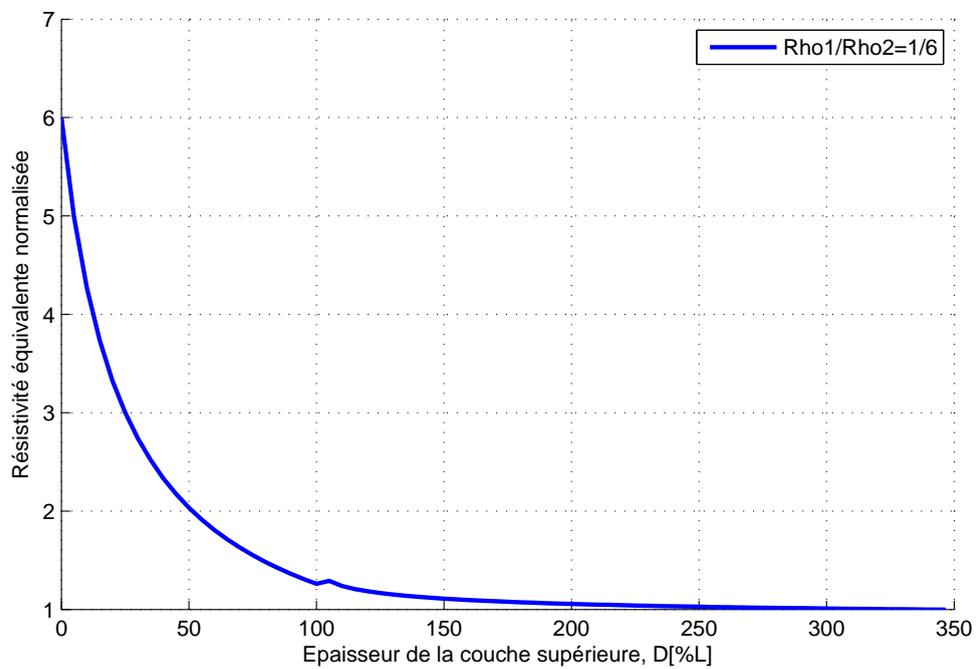


FIGURE 4.12: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=1/6$

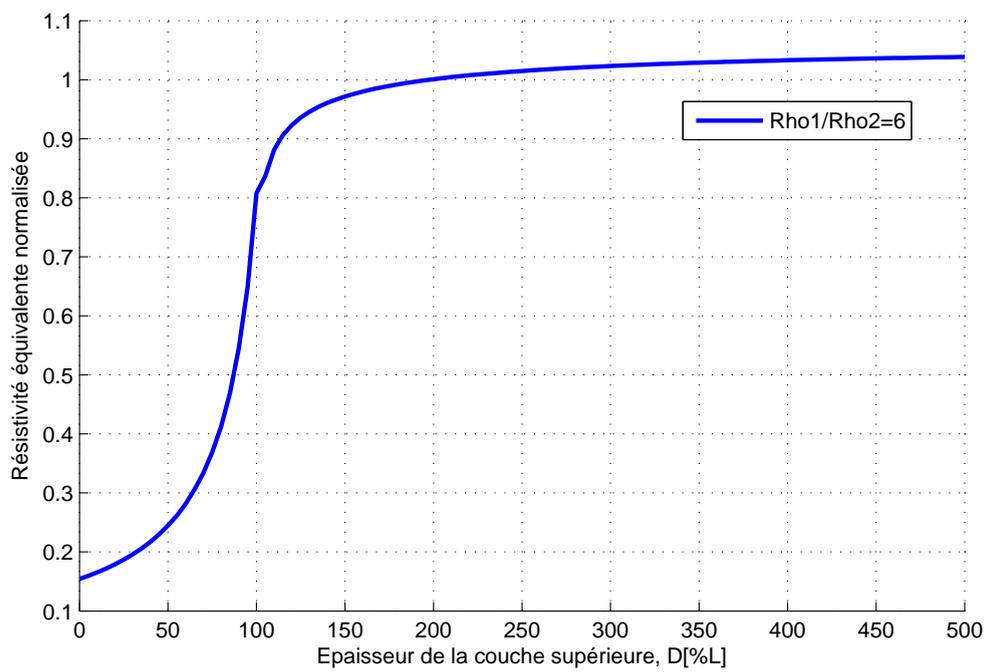


FIGURE 4.13: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=6$

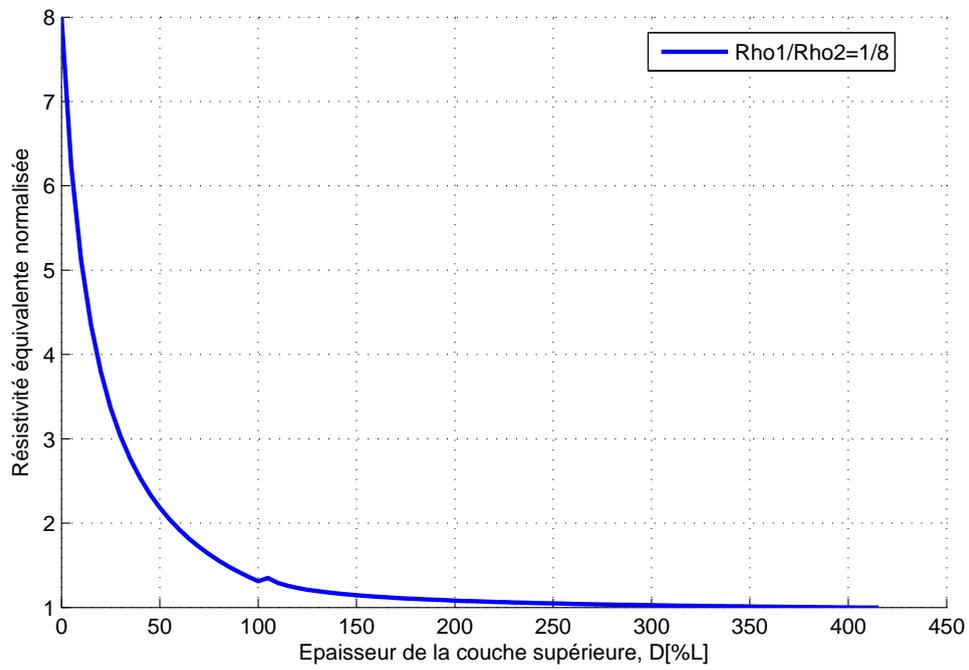


FIGURE 4.14: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=1/8$

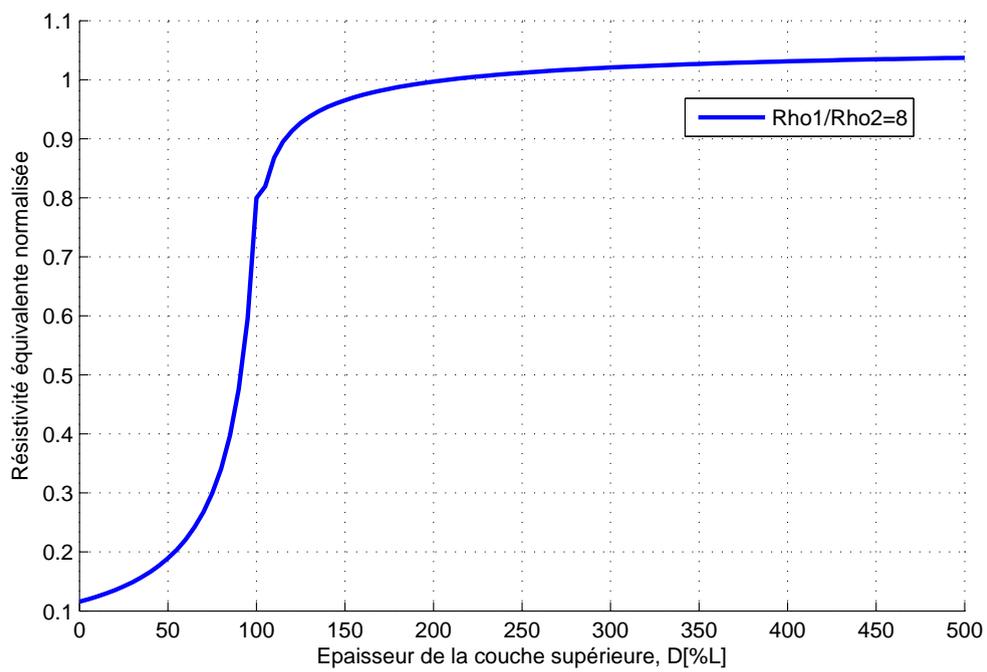


FIGURE 4.15: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=8$

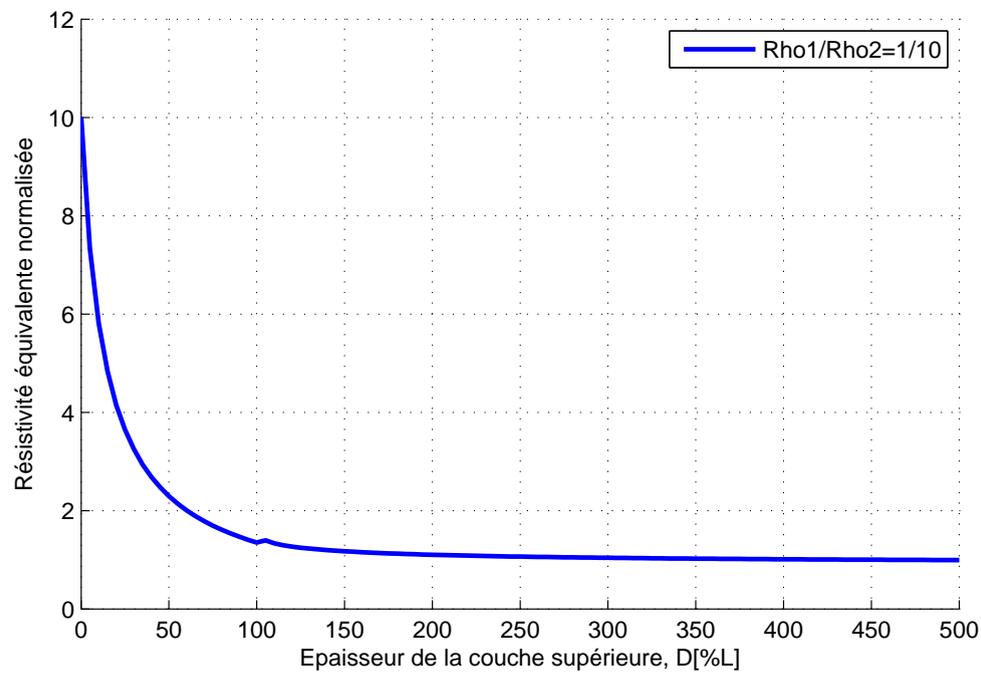


FIGURE 4.16: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=1/10$

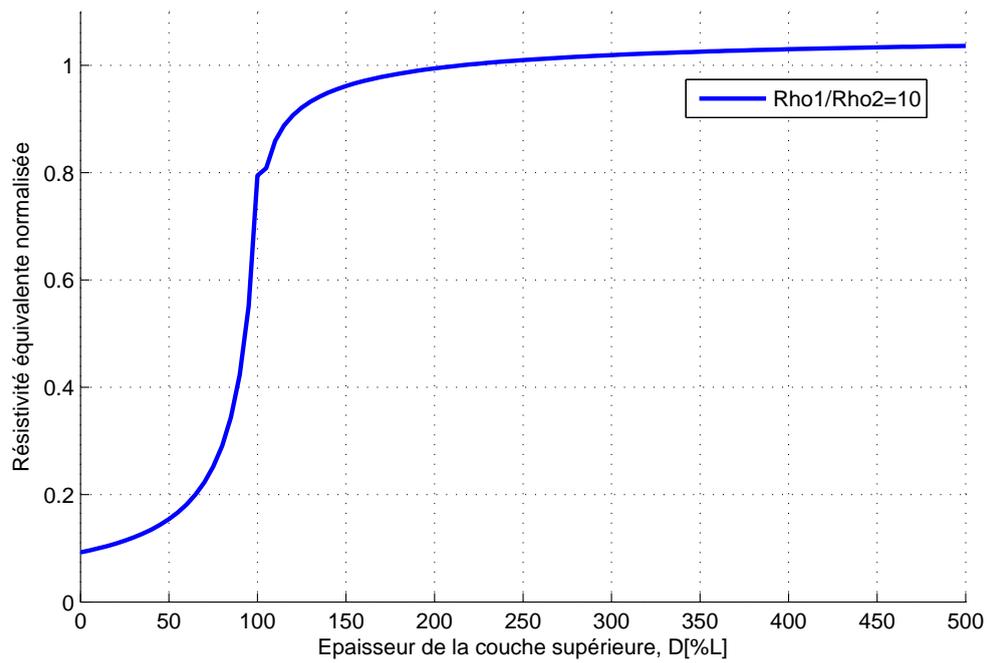


FIGURE 4.17: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=10$

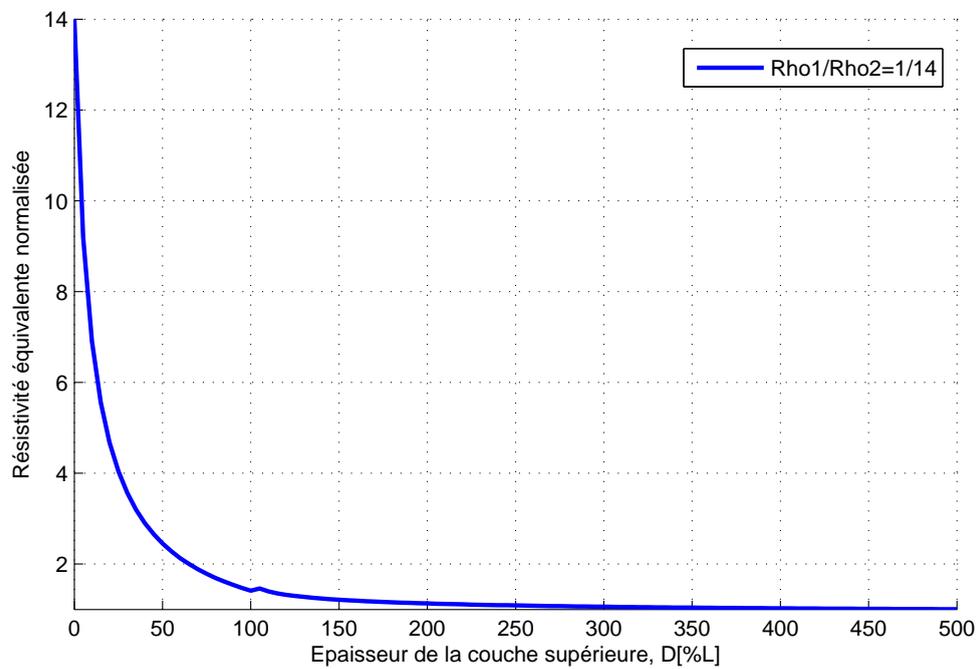


FIGURE 4.18: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=1/14$

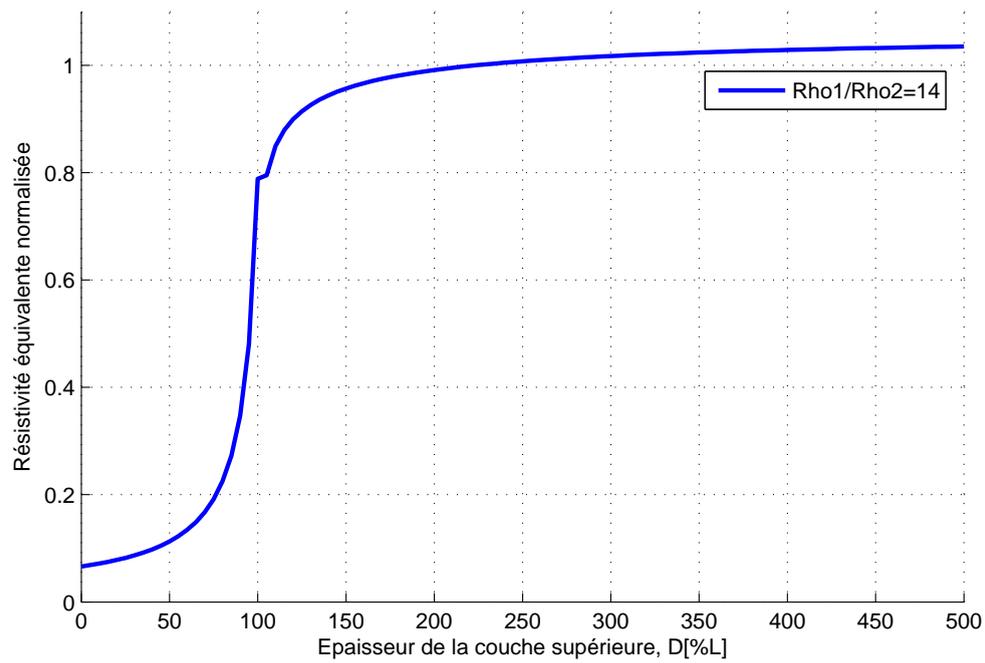


FIGURE 4.19: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1/\rho_2=14$

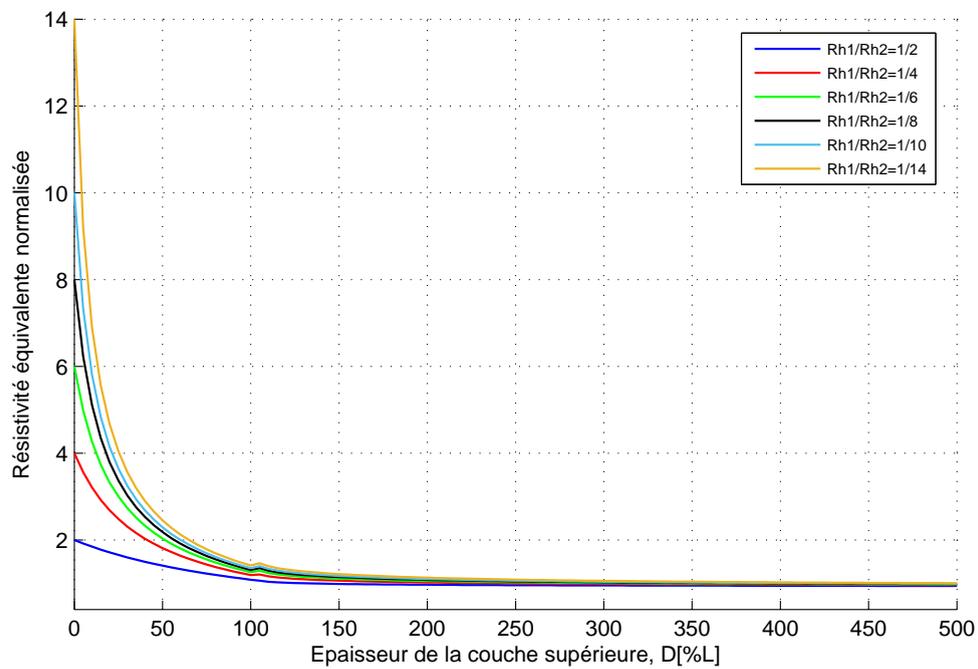


FIGURE 4.20: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1 < \rho_2$

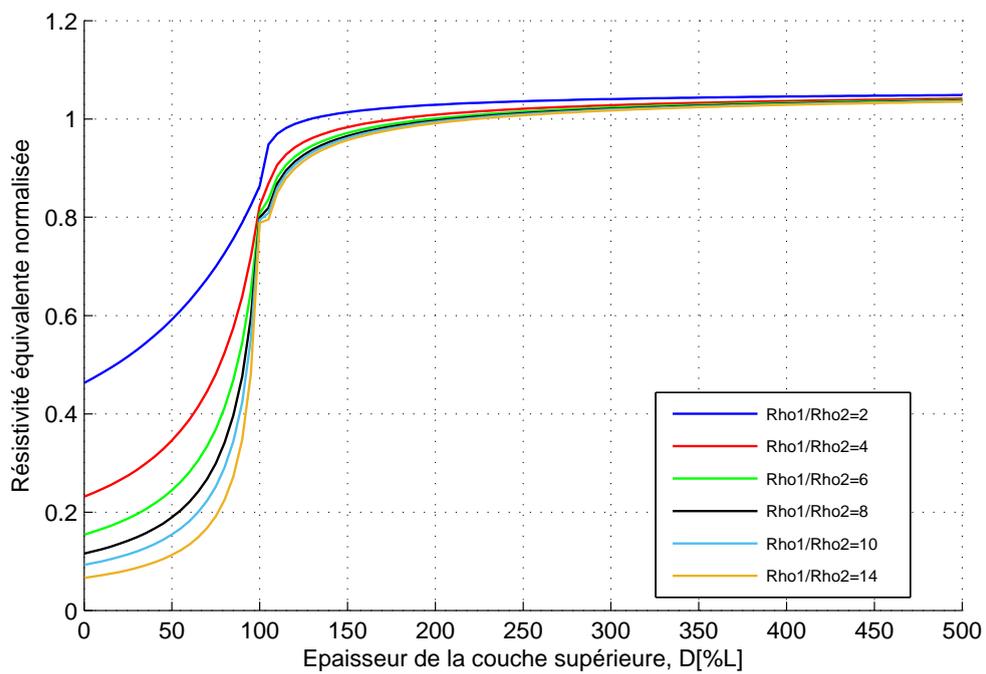


FIGURE 4.21: Résistivité équivalente normalisée pour $\rho_1 > \rho_2$

4.8 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 2.1 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 (2.9), (2.10) ou le logiciel COMSOL *Multiphysics*.

4.8.1 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 4.22). 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 $\Omega\cdot\text{m}$ et à partir de l'équation (2.1), 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%.

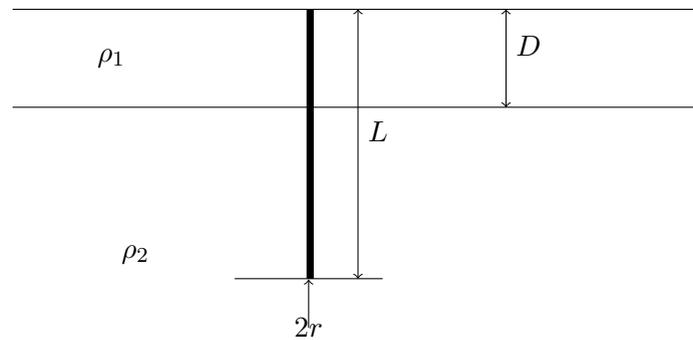


FIGURE 4.22: Électrode verticale dans un sol composé de deux couches

Exemple 1 :

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

Étape 1 :

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

Étape 2 :

Le rapport $\rho_1/\rho_2=1/2$, de la figure 4.20, la résistivité équivalente normalisée correspondante $\rho_{eqv_n}=1,42$.

Étape 3 :

Nous avons : $\rho_1=400 \Omega\cdot\text{m}$

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

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

$$\rho_{eqv} = 568 \Omega\cdot\text{m}$$

Étape 4 :

De l'équation (2.1) : $R_{eqv} = 6,38 \Omega.m$

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 4.21, 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 (2.1) : $R_{eqv} = 41,17 \Omega.m$. 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 l'exemple 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 4.3 et 4.4 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 3.1) et finalement R_{eqv} déterminée à partir de ρ_{eqv} via COMSOL ou l'équation (2.1). Il est clair que nous pouvons appliquer n'importe quelle approche, étant donné que les résultats obtenus sont très proches.

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 4.3: 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 4.6 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 4.4: 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 4.6 pour $\rho_1=100 \Omega.m > \rho_2$, $L=10m$ et $r=0.127m$

4.8.2 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 4.23). Ces tiges sont enterrées 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 (2.9) (ou alors à partir du COMSOL, en considérant un sol homogène de résistivité ρ_{eqv}).

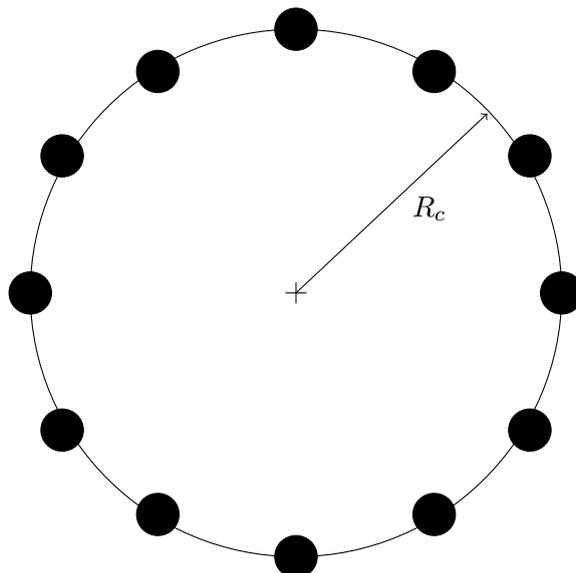


FIGURE 4.23: Électrodes sur la circonférence d'un cercle

Comme exemple, considérons le système représenté sur la figure 4.23, 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 :

$$R_{est} = \left[\sum_{n=1}^m \frac{1}{R_n} \right]^{-1} \quad (4.6)$$

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 : $R_n =$

57,33 Ω

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

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

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 : $R_{est} = 5,82 \Omega.m$

4.9 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.

4.9.1 Application de la méthode des approximations successives

La figure 4.24 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.

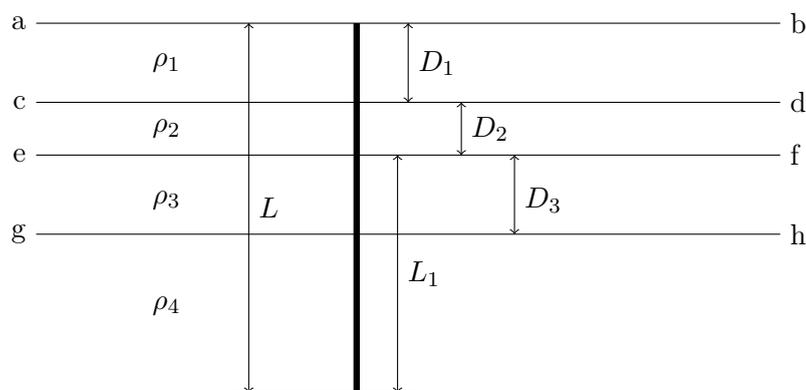


FIGURE 4.24: Électrode verticale dans un sol à quatre couches

L'application des courbes de résistivité équivalente normalisée dans le cas d'une terre à deux couches a été discutée à la section 4.8. 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 4.5, 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 4.24. 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 4.24. En effet, après la première approximation, la terre à quatre couches sur la figure 4.24 est réduite à une terre à trois couches comme représentée sur la figure 4.25.

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 4.25. 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 4.25. Après la 2ème approximation, la terre à trois couches de la figure 4.25 a été réduite à une terre à deux couches comme représentée sur la figure 4.26. Cette terre à deux-couches peut être facilement

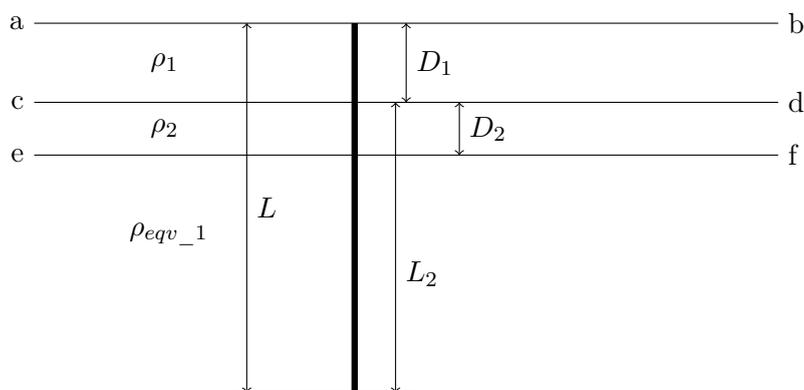


FIGURE 4.25: Sol à quatre couches réduit en trois couches

réduite à une terre homogène avec une résistivité équivalente ρ_{eqv_3} par une troisième et dernière approximation.

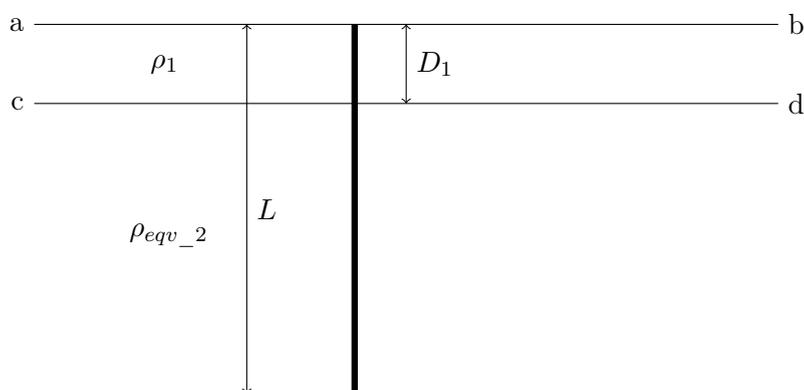


FIGURE 4.26: Sol à trois couches réduit en deux couches

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.

4.10 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 équivalente normalisée. 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 normalisée 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 générée, comme indiqué dans le paragraphe 4.6.

Nous considérons le cas où $\rho_1 > \rho_2$. Dans ce cas, nous utilisons les courbes des résistivités équivalentes normalisées de la figure 4.21.

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 égal à 7, et cela correspond à une courbe de résistivité équivalente normalisée qui n'est pas tracée dans la figure 4.21. 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 basses 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 4.21 :

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

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

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

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

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

2ème approximation Les deux couches les plus basses sont remplacées par une seule couche avec $\rho_{eqv_1}=24 \Omega.m$, 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 4.21, $\rho_{eqv_n2}=0,30$

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

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

De la figure 4.21 : Si $\rho_1/\rho_2=2; D=20\%L; \rho_{eqv_n}=0,545$

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

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

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

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

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 (2.1), elle nous donne $R_{eqv}=0,3773 \Omega$, et à l'aide du COMSOL, nous obtenons $R_{eqv}= 0,3181 \Omega$

4.11 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 4.5.
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 nécessitant plusieurs tiges.

Chapitre 5

Résistance de l'électrode enterrée dans un sol multicouche incliné

5.1 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.

5.2 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 5.1 et 5.2

5.3 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 5.1).

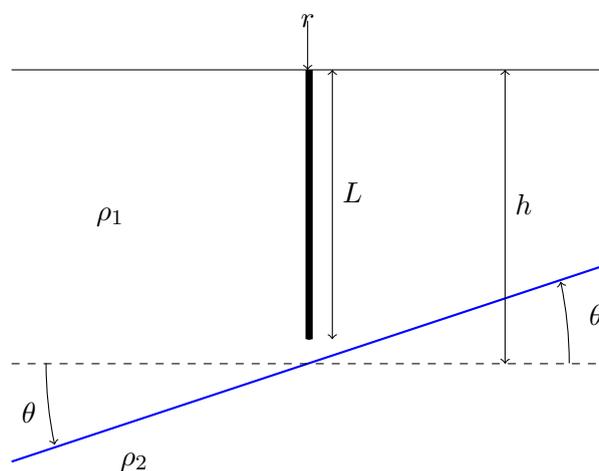


FIGURE 5.1: Type-1 de la couche inclinée de la terre

Supposons qu'il existe un tel emplacement physique de la structure comme représenté sur la figure 5.1. 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.

5.4 Type-2 de la couche inclinée de la terre

Cette situation est représentée sur la figure 5.2. 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.

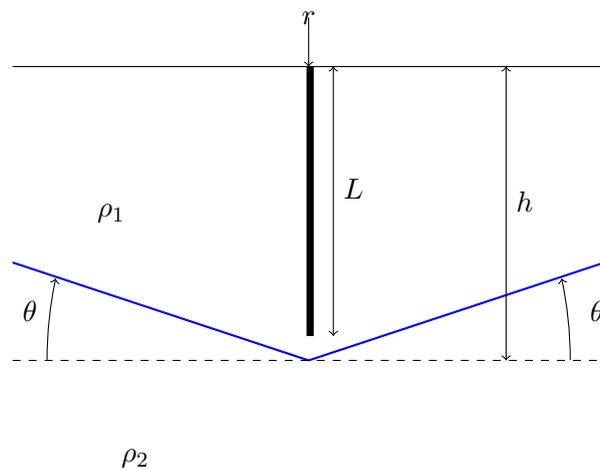


FIGURE 5.2: Type-2 de la couche inclinée de la terre, en forme de V

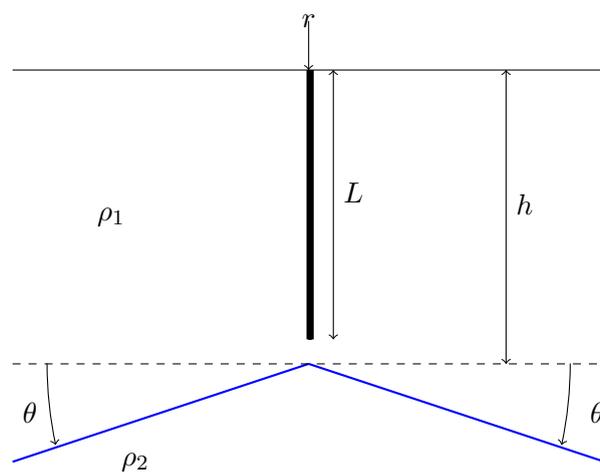


FIGURE 5.3: Type-2 de la couche inclinée de la terre, en forme de V inversé

L'angle θ mesure l'inclinaison de l'interface de la couche. Sur la figure 5.2, 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 5.3.

Sur la figure 5.3, l'angle θ est considéré comme négatif et l'interface de couche est en forme de V inversé.

5.5 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 $\Omega.m$ et 200 $\Omega.m$. Le modèle utilisé pour effectuer la simulation utilisant le logiciel COMSOL basé sur la MEF est représenté dans la figure 5.4.

L'angle d'inclinaison θ sur la figure 5.4 peut avoir une valeur positive ou négative. La figure 5.4 est similaire à celle 5.2 si θ est positif, et à celle 5.3 si θ est négatif. Les conditions aux limites imposées sont les mêmes décrites dans les paragraphes 3.4 et 3.5, Il s'agit de "Neumann" sur le plan supérieur et de "Dirichlet" sur le plan de bord et le plan inférieur.

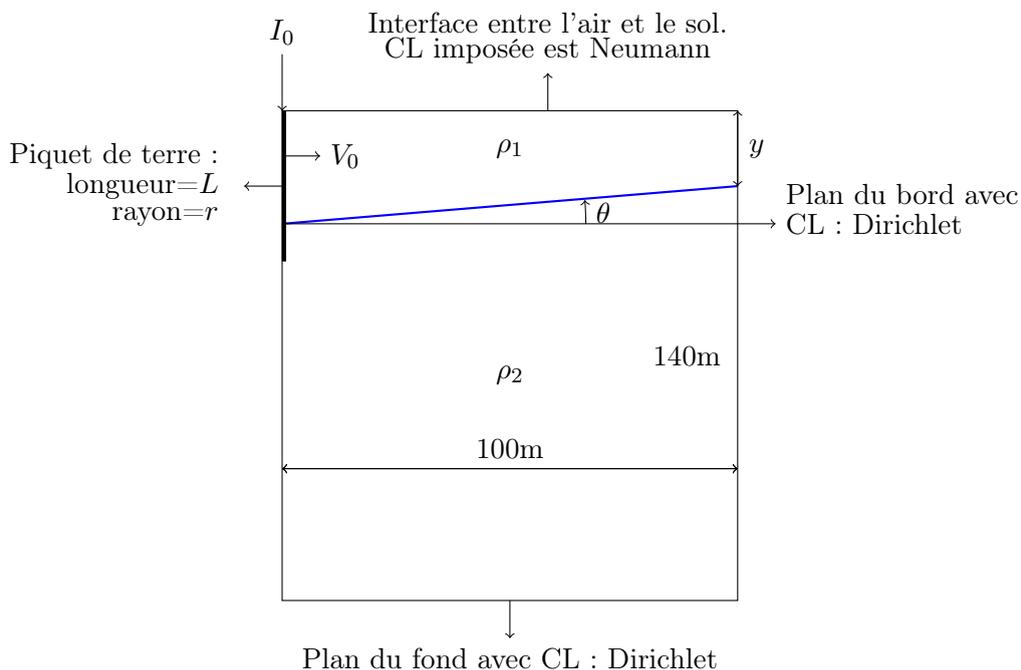


FIGURE 5.4: Modèle axisymétrique d'une tige verticale dans un sol incliné composé de deux couches

Les tables 5.1, 5.2 et 5.3 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 5.1, 5.2 et 5.3 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 5.1: $D=18m$ (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 5.2: $D=30m$ (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 5.3: $D=40\text{m}$ (200% de L) ; $\rho_1=100 \Omega\cdot\text{m}$ et $\rho_2=200 \Omega\cdot\text{m}$

5.6 Discussion des résultats

Les tables 5.1, 5.2 et 5.3 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 ($\rho_1=100 \Omega\cdot\text{m}$) 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 5.1, 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 5.1, 5.2 et 5.3, 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 5.4) :

✓ 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 est la longueur de la tige et D est l'épaisseur de la couche supérieure.

5.7 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, d'une électrode sphéroïdale 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 et finalement un sol à deux couches obliques. 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.

Le long de cette étude, une recherche bibliographique a été faite en deux chapitres. Le premier englobe des généralités sur la mise à la terre et sur le courant continu à haute tension. Dans le second, 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, ainsi que les techniques les plus populaires de mesure de la résistivité de terre.

Le travail que nous avons effectué s'étale sur trois chapitres (3 à 5). Le chapitre trois 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%, sauf pour l'analyse associée à l'équation (2.9).

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.

Le chapitre quatre 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 4.5.

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.

A partir du chapitre cinq, 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 vue 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 où 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 à 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 5.1, 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] Reyer Venhuizen. *Mise à la terre & CEM, Mise à la terre approche globale*. European Copper Institute (ECI), Mai 2002.
- [7] Sunde E.D. *Conduction Effects in Transmission Systems, New York*. Dover Publications Inc, 1968.
- [8] 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.
- [9] 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.

- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] CEI (Commission Electrotechnique Internationale). *Protection Contre la Foudre-Partie 1 : Principes Généraux*. CEI 62305-01, Première édition, 2006-01.
- [13] CEI (Commission Electrotechnique Internationale). *Installations électriques des bâtiments, choix et mise en oeuvre des matériels électriques – Mises à la terre, conducteurs de protection et d'équipotentialité*. CEI 60364-5-54, 2ème édition, 2002-06.
- [14] Bensoam M. *Qualité de la prise de terre et sécurité des personnes*. Cours, Faculté des Sciences et Techniques de St Jérôme, octobre 2003.
- [15] Christophe P. et Robert J. Schneider Electric Industries. *Guide de conception des réseaux électriques industriels : Les régimes de neutre*. DAS Transport et Distribution, Activité Ensembles et Applications, 6 883 427/A, France, Février 1997. URL www.schneiderelectric.com.
- [16] Sautriau F. *Mise à la terre du neutre dans un réseau industriel haute tension*. Cahier Technique Merlin Gerin n 62, édition septembre 1991.
- [17] Jos Arrillaga. *High Voltage Direct Current Transmission, Institution of Electrical Engineers*. 1998.
- [18] G. Hingorani Narain. *High-voltage DC transmission : a power electronics workhorse*. 1996.
- [19] Capacité en surcharge continue. *Projet Jinping-Sunan, ABB*. mise en service prévue courant, 2013. URL <http://www.abb.com>.
- [20] An Introduction to High Voltage Direct Current (HVDC) Subsea Cables Systems. 2013. URL <http://www.europacable.com>.
- [21] M. P. Bahrman. *HVDC Transmission Overview*. IEEE, 2008.
- [22] B.W. Williams. *Power Electronics - devices, drivers and applications*. Macmillan Press, 1992.

- [23] *Projet NorNed*. ABB, 2013.. URL <http://www.abb.com>.
- [24] Groupe de travail B4.37. *VSC TRANSMISSION, Cigré, coll.* Brochure, avril 2005.
- [25] rapport sur la liaison France-Espagne. Brochure, 2008. URL <http://www.liaison-france-espagne.org/>.
- [26] *Moins de lignes en DC*. ABB, 2013.. URL <http://www.abb.com>.
- [27] High Voltage Direct Current Transmission. 2013. URL http://www.elect.mrt.ac.lk/HV_Chap11.pdf.
- [28] An Introduction to High Voltage Direct Current (HVDC) Underground Cables. 2014. URL <http://www.europacable.com>.
- [29] HVDC XLPE cable systems applicable for higher temperature and polarity reversal operation. *Versailles*. Jicable, 2011.
- [30] Alstom. *HVDC for beginners and beyond*. 2014. URL <http://www.sari-energy.org/>.
- [31] Jean-Pierre Gingras et Jean-Robert Pierre Gilles Trudel. *Designing a Reliable Power System : Hydro-Québec's Integrated Approach*. Proceedings of the IEEE, Mai 2005 .
- [32] Comber M. & Zaffanella L. Laforest J. *Transmission Line Referenc Book*. Catalogue de produits, Copyright, 2ème édition, 1989.
- [33] 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.
- [34] Nolasco J.F. & Kaintzyk U. Kiessling F., Nefzger P. *Overhead Power Lines : Planning, Design, Construction*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2003.
- [35] Tagg G.F. *Earth resistances*. George Newnes Limited, London, first published, 1964.
- [36] H.W. Dwight. *Calculation of Resistances to Ground*. Electrical Engineering, Vol. 55, Décembre 1936.
- [37] Erling Sunde. *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*. D. Van Nostrand Company, Inc, 1949.

- [38] S. Bilgen B.W. Klimpke A. Wexler Y.B. Yildir I.M.Ciric, O. Aboul-Atta. *Ontario Hydro-GPU HVDC Interconnection Ground Electrode Study*. technical report, TR82-1, the University of Manitoba, 1982.
- [39] Chauvin Arnoux Group. *Guide de la Mesure de Terre : Contrôleurs de Terre et/ou de Résistivité*. Catalogue de produits, Première édition 2010. URL <http://www.chauvin-arnoux.com/fr>.
- [40] Chouteau M. & Giroux B. *Géophysique appliquée II : Méthodes électriques - Notes de cours*. Ecole Polytechnique de Montréal, pp. 148, 2006.
- [41] Demuyne P. *Mesures électriques : Mesurer une résistance de terre*. Cours, Lem France, leader mondial dans le développement et la production de capteurs de courants de très haute précision, Janvier 2002.
- [42] COMSOL Multiphysics. *Modeling Guide*. Version 4.3, 2012.
- [43] A.ALIK. *Proposition d'un système optimisé de mise à la terre pour l'ouvrage énergétique de LABREG*. PFE, Ecole nationale polytechnique, 2012.