

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



وزارة التعليم العالي
و البحث العلمي
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات



شركة هندسة الكهرباء والغاز
Compagnie de l'Engineering de l'Electricité et du Gaz

Département d'Electrotechnique



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

Thème

*Proposition d'un système optimisé de mise
à la terre pour l'ouvrage énergétique de
LABREG*

Proposé et dirigé par :

Pr. M. TEGUAR

A.TAHRAOUI (chef de division des études électriques /CEEK-SONELGAZ)

Etudié par :

ALIK Benamrane

DINE Abdallah

Promotion : Juin 2012

Ecole Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Alger, Algérie

Remerciements

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.

Nos remerciements vont également à Monsieur A.TAHRAOUI, chef de division des études électriques au niveau de CEEG- SONELGAZ.

Un grand merci à Monsieur A. MEKHALDI, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, à l'intérêt qu'il a porté à notre modeste travail et d'avoir accepté de présider ce jury.

Nous adressons nos sincères remerciements à Madame D. NAAMANE, Maitre Assistante A à l'Ecole Nationale Polytechnique, qui nous honoré en acceptant d'examiner ce travail.

Nous remercions Monsieur A. BOUBAKEUR, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour ses précieux conseils et son aide.

Nos remerciements vont également à Monsieur Z.DILMI.

Merci à Monsieur G. Si Salah, Bibliothécaire à l'Ecole Nationale Polytechnique, ses aides durant notre cursus universitaire.

Enfin, nous remercions tous les enseignants ayant contribué à notre formation, et tout l'équipe de SONELGAZ.

ملخص:

امن الاشخاص و المعدات و استمرار التغذية الكهربائية هي الاهداف التي نبحت عنها من خلال هذا العمل و المتمثل في دراسة سلوك هيكل حديدي يستعمل للتأريض في محطة التوليد الكهربائي لبرج بولاية خنشلة . من أجل ذلك، قمنا بعرض محاكات تحت بيئة CYMGRD. اعتبرنا عدة عوامل تأثير منها: طول الأوتاد، عمق الدفن، عدد الدارات، الطبقة السطحية، الشكل الهندسي للهيكل و طبيعة الأرض (متجانسة و غير متجانسة). اعتماداً على مقاومة الأرض، يقوم البرنامج بتقييم ارتفاع كمون الأرض، توتر اللمس، توتر الخطوة و المقاومة الكهربائية الأرضية. إقترحنا، في هذه الحالات، هيكل حديدي ناجع و اقل تكلفة.

الكلمات المفتاحية: التأريض، CYMGRD، هيكل حديدي، قضيب، ارتفاع كمون الأرض، توتر اللمس، توتر الخطوة، مقاومة الأرض، مقاومة الأرض.

Résumé :

Cette présente étude est une contribution permettant de proposer à l'ouvrage énergétique de LABREG un système de mise à la terre à la fois, simple, sécurisé, optimisé et donc moins coûteux, étant donné que le son système de mise à la terre, déjà existant, est très complexe, sur-dimensionner et donc couteux. Pour cela, divers grilles de mise à la terre de formes (ayant la même dimension que celle réelle) et en L inversé (en éliminant les parties inutiles de la configuration précédente), et pour deux maillages carré et rectangulaire, ont été considérées. Le choix de telles configurations est effectué selon plusieurs critères (sécuritaire, économique, contractuel, etc.). En utilisant le code de calcul CYMGrd, de tels systèmes ont été simulés. La configuration présentant les meilleurs résultats (faibles valeurs de la tension de pas, la tension de contact, l'élévation du potentiel, etc.) a été optimisée.

Mots clés : mise à la terre, CYMGRD, électrode de terre, grille, piquet, tension de contact, tension de pas, résistance de terre, résistivité de terre, ouvrage énergétiques de LABREG.

Abstract:

This study is a contribution allowing to propose to energy network of LABREG a grounding system simple, secure, optimized and therefore less expensive, since the real one, already exists, is very complex, oversize and thus expensive. For this, various grounding grids of rectangular form (having the same size as the real one) and L inverted (by eliminating unnecessary parts of the previous configuration), with two meshes for square and rectangular, were considered. The choice of such configurations is made according to several criteria (security, economic, contractual, etc.). Using the computer code CYMGRD, such systems were simulated. The best performing configuration (presenting low values of the step voltage, touch voltage, raising the potential, etc.) was optimized.

Key words: earthing, CYMGRD, ground electrode, roasts, stake, contact voltage, step voltage, ground resistance, ground resistivity, energy network of LABREG.

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les systèmes de mise à la terre

I.1. Introduction	6
I.2. Définitions	7
I.2.1 Prise de terre	7
I.2.1.1 Prise de terre "profonde"	7
I.2.1.2 Prise de terre de "surface"	7
I.2.3.Éléments d'une mise à la terre.....	8
I.2.4.Masse	8
I.2.5. Conducteur de terre	8
I.2.6.Réseau de terre	8
I.2.7. Terre de référence.....	9
I.2.9. Potentiel surfacique de terre.....	9
I.2.10. Élévation du potentielle de terre(EPT)	9
I.2.11. Tension de pas (VS)	9
I.2.12. Tension de contact (VT)	10
I.2.12.1. Contact direct.....	10
I.2.12.2. Contact indirect	11
I.2.13. Tension du contact métal sur métal (VMM)	11
I.2.14. Tension de maille (VM).....	12
I.2.15.Tension transféré (VTRRD).....	12
I.3. Critères de conception d'une électrode de mise à la terre.....	13
I.3.1. Adéquation de performance.....	13
I.3.2. Adéquation de fiabilité.....	13
I.3.3.Adéquation des effets sur l'environnement.....	13
I.4. Environnement : sol et fondations	14
I.4.1.Structure du globe terrestre	14
I.4.2. Nature du sol	15
I.5. Conduction du courant électrique dans le sol.....	15
I.6. Caractéristiques électriques du sol	16
I.6.1. Résistivité	17
I.6.2. Permittivité.....	20
I.6.3. Perméabilité.....	21
I.7. Propriétés thermiques du sol.....	21
I.8. Chauffage du sol.....	23
I.9. Comportement diélectrique des fondations	24
I.9.1 Problématique	24
I.9.2. Conduction du béton : mise en évidence par la mesure et application.....	25
I.9.3. Particularités du phénomène de conduction dans le béton.....	25
I.10 Conclusion	26

Chapitre II : Détermination de la résistivité et de la résistance de terre

II.1. Introduction	48
II.2. Propriétés électriques d'une prise de terre.....	49
II.3. Résistance de terre et répartition de potentiel	50

Sommaire

II.4. Tension de terre et gradient de potentielle.....	51
II.5. Modélisation de la résistivité des sol.....	51
II.5.1. Sol homogène.....	52
II.5.2. Sol en deux couches de résistivités différentes.....	53
II.5.3. Sol en plusieurs couches de résistivités différentes.....	53
II.6. Détermination de la résistance de quelques configurations de mise à la terre.....	53
II.6.1. Sol homogène.....	54
II.6.2. Sol non homogène.....	55
II.6.2.1. Résistance d'un piquet de terre dans un sol en deux couches.....	56
II.6.2.2. Résistance d'une électrode horizontale dans un sol en deux couches.....	57
II.7. Principales méthodes de mesure de la résistivité de sol	57
II.7.1. Méthode de Wenner.....	58
II.7.2. Méthode de Schlumberger.....	60
II.7.3. Méthodes de mesure à 3 pôles.....	60
II.7.4. Mesures sans piquets de terre.....	60
II.8. Conclusion	73

Chapitre III : Présentation et validation du code CYMGRD

III.1. Introduction	48
III.2. Présentation de CYMGRD	49
III.2.1. Modules d'analyse du logiciel	50
III.2.2. Types d'électrodes et terminologie	51
III.2.3. Résistivité et évaluation de la sécurité	52
III.2.4. Mesure de la résistivité du sol et modèles de sol	53
III.2.5. Evaluation de la sécurité	53
III.2.5.1. Courant toléré du corps humain.....	54
III.2.5.2. Circuits accidentels équivalents.....	55
III.2.5.2.1. Circuit accidentel de la tension de contact.....	56
III.2.5.2.2. Circuit accidentel de la tension de pas.....	57
III.2.5.3. Tensions de contact et de pas maximale les permises ($V_{T\max}$ et $V_{S\max}$).....	58
III.3. Validation du code CYMGRD	60
III.3.1.1. Principe de conception d'un réseau de terre selon IEEE 80-2000.....	62
III.3.2. Principe de conception d'un réseau de terre selon CYMGrd.....	75
III.3.2.1. Configuration de base.....	76
III.4. Conclusion	79

Chapitre IV : proposition d'un système optimisé de mise à la terre pour l'ouvrage énergétique LABREG

IV.1. Introduction	80
IV.2. Présentation succincte de l'ouvrage énergétique de LABREG	80
IV.2.1. Situation géographique et Superficie de la centrale de LABREG	80
IV.2.2. Equipements et Données de base	81
IV.2.3. Régimes du neutre et niveaux de tension dans l'ouvrage énergétique de LABREG	81
IV.2.4. Données réelles du réseau de terre de l'ouvrage de LABRE.....	85

Sommaire

IV.2.4.2. Hypothèses et paramètres de calculs	85
IV.3. Configurations de mise à la terre proposée pour l'ouvrage énergétique de LABREG.....	86
IV.3.1. Première Configuration : Grille rectangulaire	87
IV.3.1.1. Présentation	87
IV.3.1.2. Analyse du sol	87
IV.3.1.3. Dimensionnement des électrodes.....	88
IV.3.1.4. Résultats de simulation.....	89
IV.3.1.5. Effets de la longueur totale et de la profondeur de la grille.....	90
IV.3.1.5.1. Effet de la longueur totale de la grille.....	90
IV.3.1.5.2. Effet de la profondeur du réseau de terre	96
IV.3.2. Deuxième configuration : Grille en forme de L inversé	101
IV.3.2.1. Présentation et résultats.....	101
IV.3.2.2. Influence de l'ajout des piquets de terre	104
IV.3.2.2.1. Influence du nombre et de l'emplacement des piquets de terre.....	104
IV.3.2.2.2. Influence de la longueur des piquets.....	109
IV.3.2.2.3. Détermination du paramètre prépondérant entre la longueur totale et le nombre des piquets	112
IV.3.2.3. Traitement de la couche superficielle du sol.....	115
IV.4.2.3.1. Traitement par la modification de la résistivité.....	116
IV.4.2.3.2. Traitement par variation de l'épaisseur.....	118
IV.4.3. Configuration optimale.....	120
IV.5. Conclusion	123
Conclusion générale	127
Bibliographie	130

Les ouvrages énergétiques rassemblent les connexions de hautes et très hautes tensions qui assurent le lien, souvent sur de longues distances, entre les centrales de production d'énergie électrique et les réseaux de distribution alimentant les consommateurs. De tels ouvrages sont des maillons clés d'un système électrique dans lequel toute défaillance doit rester rare, puisque ses conséquences peuvent aller jusqu'au 'black-out', c'est-à-dire la coupure de l'alimentation en électricité d'une zone géographique plus ou moins grande.

Les ouvrages énergétiques constituent donc une partie essentielle d'un réseau électrique qui doit répondre à trois exigences essentielles : la stabilité, l'économie et surtout la continuité du service (alimentation en électricité aux consommateurs). Les entreprises d'électricité consacrent des efforts constants à l'optimisation de leur réseau de transport, afin d'en améliorer la qualité de fourniture et la sûreté de fonctionnement, en contrôlant et/ou en évitant les principaux phénomènes qui pourraient conduire à l'effondrement du système électrique. Cependant, de tels ouvrages sont souvent exposés à des incidents ou défauts électriques (court-circuit, la foudre, ...) difficiles à maîtriser, qui peuvent interrompre ce service et engendrer des pertes financières importantes pour les industriels et des désagréments pour les simples consommateurs.

La majorité des défauts sont dus aux court-circuits causés souvent par la foudre, la pluie ou les surtensions créées lors de l'ouverture et la fermeture des disjoncteurs [Georges, 2001]. Ces courts-circuits peuvent être permanents, il est ainsi nécessaire de les détecter et localiser avec précision pour réparer et restaurer l'alimentation dès que possible. C'est pour cela que l'on utilise des dispositifs de protection.

Lors d'un défaut à la terre dans un ouvrage énergétique ou sur une ligne de transport d'énergie, le courant de défaut cherche à s'écouler dans le sol à travers le système de mise à la terre, ce qui fait monter le potentiel local du sol par rapport à celui d'une terre lointaine (potentiel de référence) [Georges, 2001]. En effet, avec l'avènement de l'industrie et la forte demande en énergie électrique, les problèmes liés à la conception de la mise à la terre retiennent l'attention des ingénieurs en électricité et les concepteurs des ouvrages énergétiques et des lignes de transport d'énergie en haute tension.

L'importance de la conception de systèmes de mise à la terre des lignes de transport d'énergie et des postes de transformation tient de la nécessité de limiter les surtensions

nuisibles aux appareils avoisinants et potentiellement dangereuses pour les individus, de réduire les coûts associés à l'installation des électrodes de terre, de protéger les biens (matériel) et d'améliorer la qualité du service [Nzuru, 2009].

Le besoin d'une mise à la terre se fait sentir d'une façon plus aiguë, étant donné l'importance des systèmes d'alimentation d'énergie. Les systèmes non reliés à la terre produisent des surtensions plus importantes en cas de défaut, la méthode la plus logique pour les limiter consiste à mettre en série une résistance adéquate dans le circuit de terre [Nzuru, 2009].

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 toutes les électrodes de terre, et une faible résistivité du sol local. La valeur de la résistance de mise à la terre repose sur les propriétés du sol, la forme géométrique des électrodes de terre et le nombre d'électrodes connectées. Les propriétés du sol sont caractérisées par la résistivité de la terre, qui dépend du type de sol et de sa structure, ainsi que de son humidité. Par conséquent, il est difficile de calculer une valeur exacte de la résistance de mise à la terre [Nzuru, 2009].

En général, 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 [Georges, 2001]. 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. La détermination réelle de la valeur de la résistance de mise à la terre permet de dimensionner avec exactitude les dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels, par exemple).

Il existe différentes méthodes pour mesurer la résistivité de terre [Georges, 2001]. La méthode de Wenner est la plus utilisée. Elle est employée souvent pour la stratification verticale des terrains. Par contre, la méthode de Schlumberger, qu'est basée sur le même principe de mesure de Wenner, est utilisée souvent pour la stratification horizontale des terrains. En pratique, la résistivité du sol n'est pas homogène, le sol est constitué de plusieurs couches de résistivités différentes. Les modèles du sol uniforme et en deux couches de résistivités différentes sont les plus utilisés, mais pour plus de précision dans les calculs, on peut appliquer le modèle de sol à plusieurs couches de résistivités différentes.

Par ailleurs, il existe plusieurs méthodes (expérimentales et numériques) et codes de calcul permettant la modélisation et l'analyse des systèmes de mise à la terre. Parmi ces codes, CYMGRD, développé en se basant sur la norme IEEE 80-2000 et reposant sur la méthode de Wenner, permet la conception et/ou l'analyse des systèmes de mise à la terre en évaluant à partir des résistivités du sol, l'élévation de potentiel de terre, la résistance du système, les tensions de contact et de pas, et les gradients de potentiel de contact et de surface dans n'importe quel point d'intérêt de la zone d'étude. Ce code permet également de produire les contours équipotentiels des tensions de contact et de surface, ainsi que les profils des tensions de pas et de contact dans n'importe quelle direction. Sa codification couleur permet de repérer les zones à risque ou dangereuses en deux ou trois dimensions, facilitant l'évaluation de la sécurité du personnel et la protection des équipements entourant la grille de mise à la terre.

Afin de pouvoir faire une conception d'un circuit de mise à la terre, plusieurs efforts ont été déployés pour s'approcher le plus possible des conditions réelles de l'installation et de façon à prévoir le comportement des systèmes de mise à la terre sous différentes charges rencontrées lors d'un défaut du réseau électrique. La structure du sol et sa résistivité peuvent influencer beaucoup le comportement de tels systèmes.

Le travail effectué dans le cadre de ce projet de fin d'études s'inscrit dans la continuité des efforts pour obtenir une conception optimale et réaliste de systèmes de mise à la terre en tenant compte des différents paramètres du sol qui peuvent influencer le comportement de tels systèmes, pour assurer la sécurité du personnel et pour réduire les coûts associés à l'installation des systèmes de mise à la terre en essayant d'exploiter les données contractuelles de conception d'un ouvrage.

L'objectif principal du présent travail consiste à proposer un système de mise à la terre à l'ouvrage énergétiques de LABREG (situant à la Wilaya de Khenchela) et contenant une centrale à turbine à gaz (TG) d'une puissance nominale d'environ 2×140.5 MW), à la fois simple, performant, optimisé et moins coûteux relativement à celui réel (donc déjà existant). Le présent manuscrit est structuré en quatre chapitres distincts.

Après l'introduction générale, des généralités sur les mises à la terre sont présentées dans le premier chapitre. L'importance de la mise à terre dans la protection des personnes (les exploitants, les utilisateurs, ...) et des biens (installations électriques, ouvrages, équipements, ...) est y discutée. Quelques définitions des principaux paramètres liés à la mise à la terre, la théorie pour calculer le potentiel de contact et de pas ainsi que le courant électrique toléré par l'être humain y sont exposés. Les phénomènes de conduction du courant électrique dans le sol, les paramètres qui affectent la valeur ou l'efficacité du réseau de terre à savoir l'influence des caractéristiques physico-chimiques du sol (propriétés thermiques et électriques du sol ainsi que l'échauffement du sol autour les prises de terre, ...), des conditions météorologiques (température, humidité, ...), et la géométrie et la nature des prises de terre sur le comportement des systèmes de mise à la terre y sont également présentés.

La détermination de la résistivité et de la résistance de terre, les méthodes de modélisation de la stratification de sol et les méthodes utilisées pour la mesure de la résistivité sont exposées dans le deuxième chapitre.

Nous présentons, brièvement, dans le troisième chapitre, le code de calcul et de simulation CYMGRD, que nous avons utilisé lors de cette présente étude. Pour cela, nous exposons, rapidement, ces différents modules d'analyse, types d'électrodes, méthodes d'évaluation de la sécurité et étapes de conception d'un projet. Dans le but de valider ce code de calcul, nous comparons nos résultats à ceux trouvés en utilisant le guide IEEE-80.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous présentons brièvement l'ouvrage énergétique de LABREG, le fonctionnement des différents organes qui le composent, ses équipements, ses différents niveaux de tension ainsi que ses différents régimes de neutre. En se basent sur les caractéristiques réelles de la centrale de LABREG d'une part, et sur les mesures réelles de la résistivité du sol d'autre part, et en utilisant le code de calcul CYMGrd, nous proposons, dans ce chapitre, plusieurs systèmes (grilles) de mise à la terre de différentes formes à la dite centrale. Le choix de telles configurations est effectué selon plusieurs critères (sécuritaire, économique, contractuel, etc.). A partir des résultats obtenus, nous proposons un système optimisé ne présentant pas de risque ou de zones dangereuses, en jouant plus particulièrement sur le maillage et en éliminant les parties inutiles.

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

I.1. Introduction

La mise à la terre, parfois simplement appelée « la terre », est l'ensemble des moyens mis en œuvre pour relier une partie métallique conductrice à la terre [Klajn et Markiewics, 2004].

Les mises à la terre ont été introduites par Benjamin Franklin célèbre inventeur des parafoudres. Son système de mise à la terre est constitué d'une tige enfouie dans le sol et reliée par un conducteur au neutre du circuit sur lequel différents équipements sont branchés [Georges, 2001].

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. Pour limiter les surtensions lors d'un défaut, une méthode consiste à mettre en série une résistance adéquate dans le circuit de terre. Il y a une autre méthode qui conduit à d'autres types de mise à la terre, soit par réactance soit direct [Georges, 2001].

La mise à la terre est un élément important d'un réseau électrique, que ce soit en haute ou basse tension. 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 [Georges, 2001].

Une bonne mise à la terre est par conséquent, essentielle pour [Klajn, 2009] :

- la sécurité des personnes et des animaux par limitation des tensions de pas et de contact à des valeurs de sécurité ;
- le fonctionnement correct du réseau d'alimentation électrique afin d'assurer une bonne qualité d'énergie ;
- la protection des bâtiments et des installations contre la foudre.

Toutes ces fonctions sont assurées par une mise à la terre unique qui doit être conçue pour satisfaire à toutes ces exigences. Certaines parties d'un système de mise à la terre peuvent être prévues pour assurer une fonction particulière, mais elles font néanmoins partie d'un réseau unique de mise à la terre. Les normes exigent que toutes les liaisons de terre d'une installation soient interconnectées, ne formant ainsi qu'un seul réseau [Dusseldorf, 1999].

I.2. Définitions

I.2.1. Mise à la terre

Mettre un équipement à la terre c'est relier son enveloppe métallique à une prise de terre, à condition que cette enveloppe soit considérée comme une masse [EDF, 1997 ; Lefouili, 2007].

I.2.2 Prise de terre

Corps conducteur enterré, ou ensemble de conducteurs enterrés et connectés, assurant une liaison électrique avec la terre (câble, piquet, grille) [EDF, 1997]. 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.

I.2.2.1. Prise de terre "profonde"

Une prise de terre est dite "profonde" dès que la profondeur atteinte est supérieure à 3 mètres [EDF, 1997]. En effet, cette prise de terre est réalisée par l'enfoncement dans le plan vertical de piquets auto-allongeables.

I.2.2.2. Prise de terre de "surface"

Elle 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 [EDF, 1997].

I.2.3. Éléments d'une mise à la terre

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 [Klajn et Markiewics, 2004].

I.2.4. 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 [EDF, 1997 ; Lefouili, 2007].

I.2.5. Conducteur de terre

C'est un conducteur qui relie une partie d'installation électrique, une partie conductrice accessible ou une partie métallique conductrice situées dans l'environnement électrique, à la prise de terre ou qui relie différentes prises de terre. Le conducteur de terre chemine sur le sol ou, s'il est enterré dans le sol, doit être isolé de celui-ci [Nzuru, 2009].

I.2.6. 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.

I.2.7. Terre de référence

C'est la partie du sol, en particulier à la surface, localisée en dehors de la sphère d'influence de la prise de terre considérée, c'est-à-dire entre deux points quelconques pour lesquels il n'y a pas de tension perceptible résultant de la circulation du courant dans cette prise de terre. Le potentiel de la terre de référence est toujours considéré comme nul [Nzuru, 2009].

I.2.9. Potentiel surfacique de terre

C'est la tension entre un point x de la surface du sol et la terre de référence [Nzuru, 2009].

I.2.10. Élévation du potentielle de terre (EPT)

Lorsqu'un courant circule dans une impédance de mise à la terre, une élévation de potentiel se développe entre l'électrode de mise à la terre et une terre lointaine (à potentiel nul) [Georges, 2001].

I.2.11. Tension de pas (V_s)

Comme représenté à la figure I.1, la tension de pas (V_s) est la différence de potentiel entre deux points à la surface du sol, séparés par une distance d'un pas, que l'on assimile à un mètre, dans la direction du gradient de potentiel croissant [Nzuru, 2009].

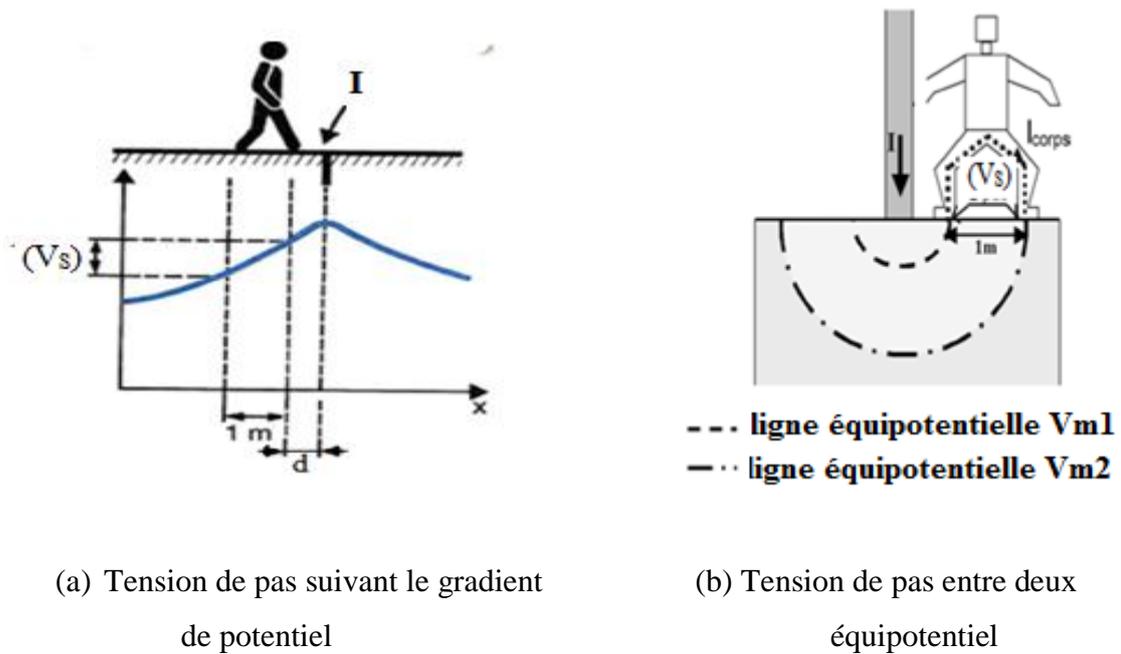


Figure I.1: Tension de pas

Dans un sol supposé homogène, la tension de pas est directement proportionnelle à la résistivité du sol. En général, elle dépend de la distribution de potentiel dans le sol [Nzuru, 2009].

I.2.12. Tension de contact (V_T)

La tension de contact est définie comme étant la différence de potentiel entre la main d'une personne, touchant une structure mise à la terre, et son pied [IEEE, 2000].

Deux types de contacts peuvent se présenter : contacte directe et contact indirect.

I.2.12.1. Contact direct

C'est le contact d'une personne avec une partie active d'un matériel sous tension. Le contact peut avoir lieu avec une phase ou avec le neutre (Figure I.2).

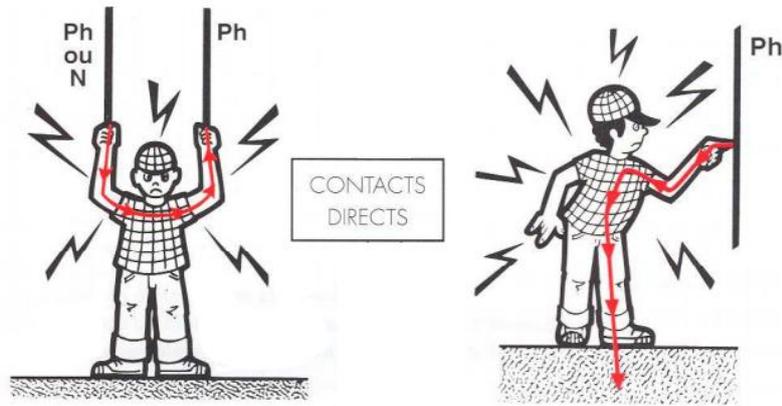


Figure I.2 : Contact direct [Bonnefoy et Lepeut, 2008]

I.2.12.2. Contact indirect

C'est le contact d'une personne avec une masse d'un récepteur mise accidentellement sous-tension à la suite d'un défaut d'isolement (Figure I.3).

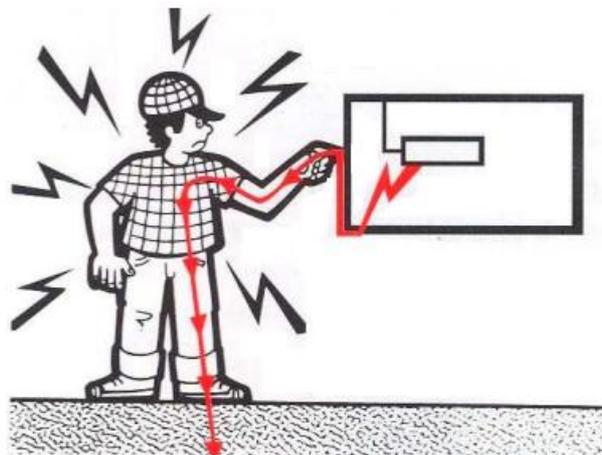


Figure I.3 : Contact indirect [Bonnefoy et Lepeut, 2008]

I.2.13. Tension du contact métal sur métal (V_{MM})

Qui est la différence du potentiel entre des objets ou les structures métalliques d'une sous-station pouvant être reliés par main-à-main ou main-à-pieds.

I.2.14. Tension de maille (V_M)

La tension de maille est définie comme étant la différence de potentiel entre le centre d'une maille de la grille et une structure aux conducteurs enterrés de la même grille de mise à la terre. Il s'agit du plus mauvais cas de la tension de contact [IEEE, 2000] .

I.2.15. Tension transféré (V_{TRRD})

Un cas spécial de la tension de contact dans laquelle on transfère une tension dans une ou hors sous-station pour une certaine distance, à l'aide d'un conducteur métallique référencé par terre. Ceci peut être une tension de contact très élevée dont la résultante peut égaler, le plein EPT lors d'un défaut [IEEE, 2000].

Une illustration des différentes tensions : EPT, pas, contact, maille et transférée est représentée sur la figure I.4.

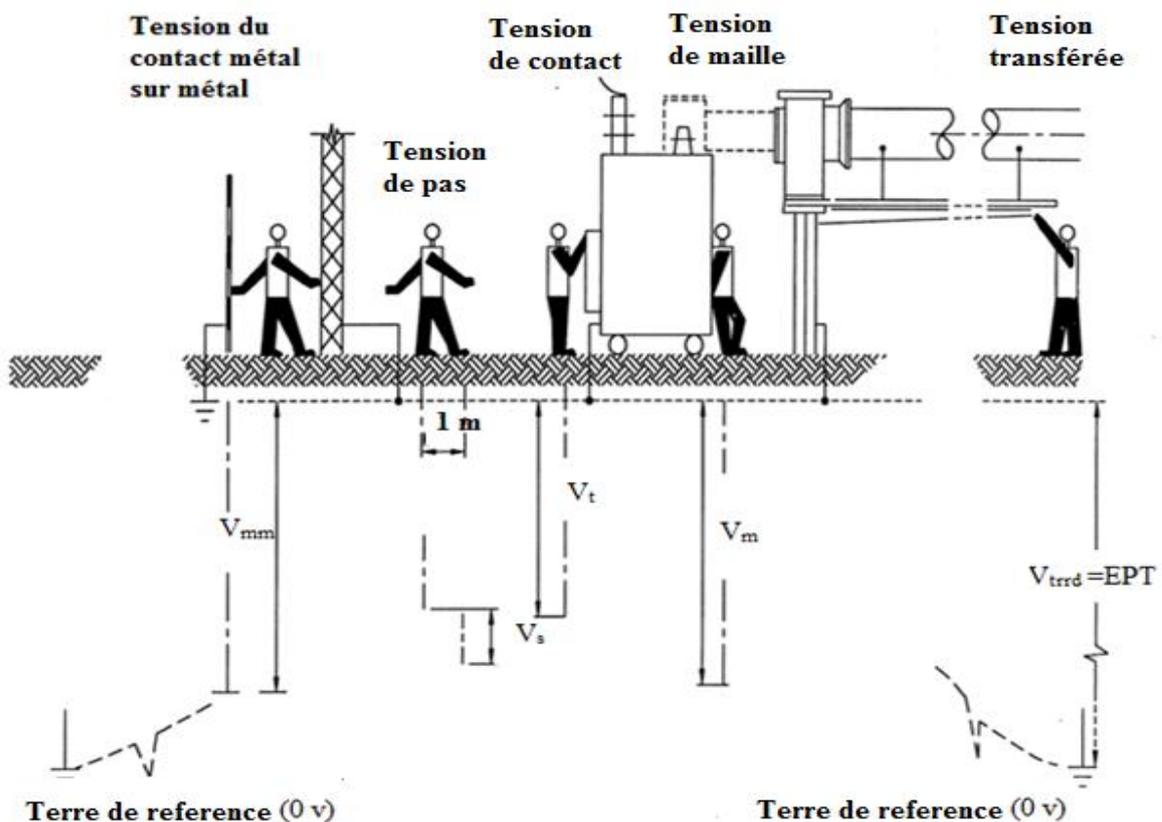


Figure I.4 : Représentation des différentes tensions

I.3. Critères de conception d'une électrode de mise à la terre

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

I.3.1. Adéquation de performance

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

I.3.2. Adéquation de fiabilité

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

I.3.3. Adéquation des effets sur l'environnement

Il est inévitable que l'installation d'un système d'une énorme électrode du 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.

I.4. Environnement : sol et fondations

Le comportement d'un système de mise à la terre dépend beaucoup des caractéristiques électriques de son environnement immédiat, c'est-à-dire du sol et des fondations.

I.4.1. Structure du globe terrestre

Un noyau liquide en ébullition entouré de quatre couches concentriques solides constitue le globe terrestre. Le noyau est situé au centre du globe, entouré de la première couche qui est composée de particules refroidies du noyau, par la suite la deuxième couche appelée le manteau, la troisième couche ou la couche extérieure du manteau et la quatrième couche appelée l'écorce terrestre. La figure 1.5 illustre une section angulaire du globe terrestre.

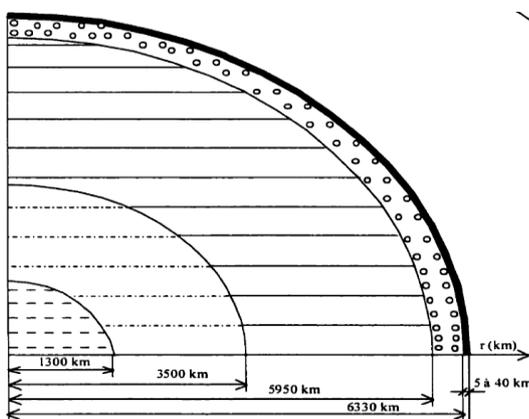


Figure I.5 : Section angulaire du globe terrestre

Le noyau possède un rayon moyen de 1300 km. Il est constitué de métaux lourds en liquide et de résistivité se situant entre 10^{-4} et 10^{-3} Ω .m. La couche externe du noyau s'étend de 1300 à 3500 km du centre de la terre. Elle est constituée de différents métaux à l'état solide et sa résistivité est d'environ 10^{-3} Ω .m. Le manteau s'étend de 3500 à 5950 km du centre de la terre. Il est formé de diverses roches et sa résistivité varie de 10^3 à 10^4 Ω .m. La partie extérieure du manteau est d'épaisseur d'environ 380 km. Elle est composée des roches de résistivité de l'ordre de 10^6 Ω .m. L'écorce terrestre est d'épaisseur variant de 5 à 40 km. Elle est constituée

de diverses roches dont la résistivité varie sur un large éventail de $10^{-1} \Omega.m$ jusqu'à $10^8 \Omega.m$ [Tagg, 1964].

I.4.2. Nature du sol

La nature des sols est très variée puisqu'elle dépend beaucoup de la position géographique. Pour connaître précisément de façon locale la topologie d'un terrain et la nature des différentes couches, on effectue des 'forages'. Ces derniers sont en pratique difficilement exploitables dans le domaine qui nous intéresse (il existe de nombreux types de sol dont les caractéristiques électriques correspondantes ne sont pas évidentes à déterminer). De plus, pour des raisons financières, il n'est pas raisonnable d'envisager de réaliser un forage avant chaque installation ou réhabilitation d'un ouvrage. Pour le dimensionnement d'un système de mise à la terre, on se contente donc en pratique de mesurer localement les paramètres électriques du sol.

I.5. 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 [Sunde, 1968]. 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 [Georges, 2001] :

a) 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.

b) 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.

I.6. 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) [Legrand, 2007].

I.6.1. 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 [Nzuru, 2009 ; Georges, 2001].

- 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 ;
- la température.

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

Une augmentation de la température du sol permet à un électrolyte de mieux se dissocier. Ce qui réduit la résistivité du sol. Par contre, une augmentation de la température à 100°C cause l'évaporation de l'eau du sol et ainsi une augmentation de la résistivité. Lorsque la température tombe au-dessous de 0°C comme le cas des régions froides, la conductivité de l'électrolyte diminue et ainsi un accroissement rapide de la résistivité se produit.

Par ailleurs, l'humidité peut varier sur une large gamme, en fonction de la situation géographique et des conditions atmosphériques, depuis un faible pourcentage dans les régions désertiques, jusqu'à 80% pour les régions marécageuses. La résistivité de terre dépend principalement de ce paramètre. La figure I.6 illustre ce rapport entre la résistivité et l'humidité dans le cas d'une argile. On peut constater que, pour des valeurs d'humidité supérieures à 30%, les variations de ρ sont faibles et non significatives. Cependant, lorsque le sol est sec, c'est-à-dire pour des valeurs d'humidité inférieures à 20%, la résistivité augmente rapidement [Nzuru, 2009 ; Georges, 2001].

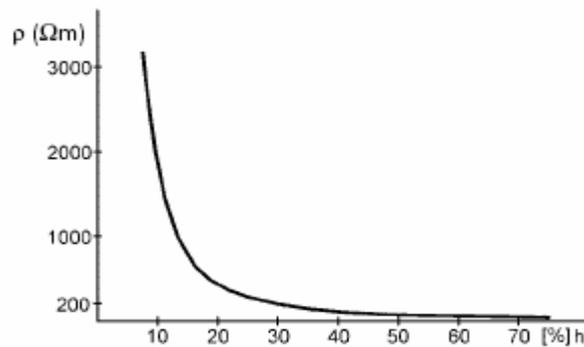


Figure I.6 : Résistivité du sol ρ de l'argile en fonction de l'humidité du sol h

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 [Legrand, 2007].

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 composants 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 [Nzuru, 2009]. 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) [LEM].

Le tableau I.1 donne une indication sur les résistivités des différents types de sol [EDF, 1984].

Nature du sol	Résistivité en Ωm
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

Tableau I.1 : Résistivités moyennes des différents types de sol

I.6.2. Permittivité

La permittivité d'un matériau, notée ϵ , caractérise son comportement diélectrique. Elle est fonction de la permittivité propre des différents composants du sol et de leurs proportions.

Dans la nature, le liquide polarisé 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 [Johnson et al ., 1998]. Pour les agronomes, la mesure de la permittivité apparente est même un excellent moyen de sondage non destructif du taux d'humidité des sols [Stoffregen et al ., 2002].

On dispose de plusieurs méthodes pour mesurer la permittivité apparente du sol, parmi lesquelles les deux plus utilisées sont [Robinson, 2003] :

- 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 :

$$C = \varepsilon g \varepsilon_0 \quad (I.1)$$

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) [Stoffregen et al., 2002].

I.6.3. Perméabilité

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 [Legrand, 2007].

I.7. Propriétés thermiques du sol

Le courant électrique qui circule dans le sol produit un transfert d'énergie par effet Joule sous forme de chaleur, ce qui entraîne une augmentation de la température du milieu [Legrand, 2007]. La puissance dissipée dans le sol par unité de volume est donnée comme suit :

$$P = EJ = \rho J^2 = \frac{E^2}{\rho} \left(\frac{W}{m^3} \right) \quad (I.2)$$

où :

E (V/m) : est le champ électrique dans le sol ;

J (A/m²) : est la densité du courant ;

ρ (Ω.m) : est la résistivité du sol.

Les caractéristiques spécifiques d'un type de sol qui affectent particulièrement le calcul des mises à la terre sont les suivants :

- 1) La chaleur spécifique γ (J/ (m³ °C)) du sol, qu'est la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter de 1°C un volume de 1 m³ de sol.

Cette caractéristique influence d'une façon déterminante la température des prises de terre et du sol environnant lors du passage d'un courant de court-circuit. La valeur de la chaleur spécifique du sol dépend du type du sol et de son contenu d'eau.

Le tableau I.2 présente quelques valeurs relatives à la chaleur spécifique en fonction du type de sol.

Type de sol	Chaleur spécifique γ (J/ (m ³ . °C))		
	Sol sec	Sol saturé d'eau à 50%	Sol saturé d'eau à 100%
Sablonneux	1,26	2,13	3,00
Argileux	1,00	2,22	3,43
Humus	0,63	2,16	3,77

Tableau I.2 : Chaleur spécifique en fonction du type de sol

La chaleur spécifique du sol est habituellement déterminée à l'aide des essais effectués sur des échantillons de sol prélevés à l'emplacement prévu pour l'implantation.

- 2) La conductivité thermique du sol est la quantité d'énergie thermique transportée pendant une seconde sur une distance d'un mètre, pour une différence de température égale à 1°C. Elle dépend du type de sol. Elle augmente avec l'humidité relative dans le sol. Le tableau 1.3 présente quelques exemples de la conductivité thermique de divers types du sol.

Type de sol	Sol sec	Sol saturé d'eau à 100%
Gravier avec sable et limon	0,55	2,55
Sable avec limon et argile	0,43	1,9
Argile avec sable	0,42	1,95
Marne avec sable très fin	0,33	2,3
Sable	0,27	1,65
Terre noire	0,18	1,13
Terre volcanique	0,13	0,62
Aire	0,025	
Neige battue	0,23	
Eau	0,606	
Glace	2,22	
Roches	02-sept	

Tableau I.3 : La conductivité thermique en fonction de type de sol

I.8. Chauffage du sol

Le transfert de chaleur se produit selon les modes suivants :

a) La conduction : c'est un transfert d'énergie thermique résultant du transfert d'énergie cinétique des particules (atomes, électrons, molécules et ions).

b) La convection : c'est le transfert de chaleur résultant de l'écoulement d'un fluide.

La chaleur dégagée par le passage du courant électrique dans le sol par unité de volume est selon la loi de Joules :

$$\frac{q}{v} = J^2 \rho t \quad (I.3)$$

où :

q : est l'énergie thermique dégagée (J) ;

v : est le volume du sol (m³) ;

t : est le temps d'écoulement (sec).

L'énergie dégagée q peut atteindre de grandes valeurs si la résistivité du sol ou la densité du courant sont grandes. La chaleur dégagée est en partie emmagasinée dans le sol et cause une augmentation de la température du milieu. Tandis que la chaleur non emmagasinée se diffuse dans le sol vers les lieux où la température est plus basse. Ainsi, la quantité de chaleur emmagasinée dépend de la chaleur spécifique du sol et la chaleur conduite dépend de la conductivité thermique [Georges, 2001].

I.9. Comportement diélectrique des fondations

I.9.1 Problématique

La tenue mécanique des ouvrages (pylônes, postes, ...) est assurée par des fondations en béton armé (béton dans lequel sont noyées des armatures en acier), comme le présente la Figure I.7. La structure est reliée à des embases métalliques, elles-mêmes noyées dans le béton [Legrand, 2007].

Une question récurrente est la contribution des fondations dans la mise à la terre des structures : les parties métalliques noyées dans le béton participent-elle à l'écoulement du courant dans la terre ou sont-elles isolées par le béton ?

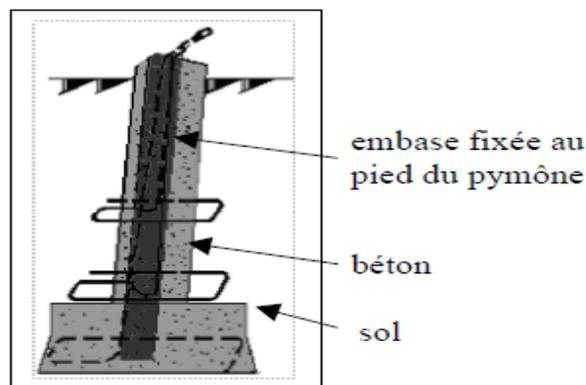


Figure I.7 : Embase et fondation d'un pied de pylône pour les niveaux de tension HTB 225/400 kV et 63/90 kV

I.9.2. Conduction du béton : mise en évidence par la mesure et application

Afin de mettre en évidence le rôle des fondations dans la mise à la terre d'une structure, appuyons nous sur des mesures du courant résiduel (courant ramené par les câbles de garde en régime permanent et en fonctionnement normal) circulant dans chaque pied d'un pylône dont seul un pied est équipé de boucles de mise à la terre (pied C sur la figure I.8).

On remarque, que la quantité de courant qui s'écoule dans les embases et les fondations des pylônes A, B et D n'est pas négligeable : le béton n'isole pas ces parties métalliques, qui font donc partie intégrante de la mise à la terre du pylône. Ce résultat est bien connu en ingénierie civile, depuis Ufer (1964) a obtenu, durant la seconde guerre mondiale, de bonnes mises à la terre pour les bâtiments militaires situés sur un sol de résistivité électrique élevée en utilisant des pieux enrobés de béton. Aujourd'hui, de nombreux pays préconisent de relier tous les renforts de fondations pour améliorer la mise à la terre des bâtiments.

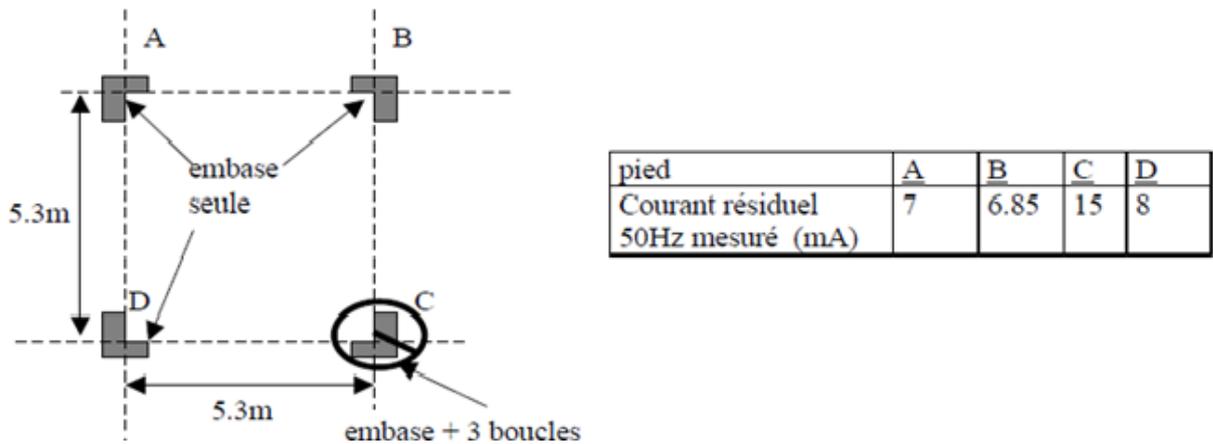


Figure I.8 : Mesure du courant résiduel circulant dans les pieds d'un pylône 90 kV, ligne 'Aurence – Maureix' [Legrand, 2007].

I.9.3. Particularités du phénomène de conduction dans le béton

Comme pour le sol, la conduction électrique dans le béton est principalement de type électrolytique. Pour de grandes densités de courant, il peut y avoir apparition d'étincelles et

d'arcs électriques. On considère, en effet, que les ouvrages sont dimensionnés de telle manière que ces phénomènes n'apparaissent que très rarement, car s'il en était autrement, ils compromettraient gravement la tenue mécanique de l'ensemble [Bogajewski, 1982].

Le béton est naturellement un bon conducteur, en comparaison avec la majorité des sols naturels. Il est, en effet, hygroscopique (tend à s'imprégner d'eau) et son contenu électrolytique est riche. Thapar (1980) note que 'dans la majorité des sols, la résistivité du béton est approximativement la même, ou est inférieure, à celle du sol environnant.' Selon une étude bibliographique [Rowland, 1995], la résistivité du béton est comprise entre 21 $\Omega.m$ et 100 $\Omega.m$

I.10 Conclusion

Le paramètre le plus important dans l'analyse des mises à la terre en fréquence industrielle est la résistance qui doit être la plus faible possible, pour assurer la sécurité des personnes et du matériel. La valeur de la résistance de mise à la terre dépend des propriétés du sol et de la forme géométrique de l'électrode de terre. La résistivité du sol peut varier sur une grande plage, allant de quelques $\Omega.m$ jusqu'à plusieurs milliers d' $\Omega.m$, en fonction notamment du type de sol et de sa structure, ainsi que de son humidité. Ainsi, la mesure de la résistance des sols permet de choisir le meilleur emplacement pour les prises de terre. Par ailleurs, il est préconiser de relier tous les renforts de fondation d'une construction afin d'améliorer sa mise à la terre.

II.1. Introduction

Les propriétés électriques du sol sont caractérisées par la résistivité de la terre ρ . Malgré la définition relativement simple de ρ , la détermination de sa valeur est souvent une tâche compliquée pour deux principales raisons :

- Le sol n'est pas une structure homogène, mais est formé de couches de différentes matières ;
- La résistivité du sol d'un type donné peut varier largement et est très dépendante de l'humidité contenue.

Pour ces raisons, le calcul de la résistance de terre et la conception d'une prise de terre peuvent être réalisés jusqu'à un niveau limité d'exactitude [Berlin et Offenbach, 1995].

II.2. Propriétés électriques d'une prise de terre

Les propriétés électriques d'une prise de terre dépendent essentiellement de deux paramètres :

- la résistance de la terre ;
- la configuration de la prise de terre.

La résistance de terre détermine la relation entre la tension de terre V_E et la valeur du courant circulant dans la terre [Dusseldorf, 1999]. La configuration de la prise de terre détermine la répartition du potentiel à la surface de la terre, qui se présente comme le résultat de la circulation du courant dans la terre. La distribution du potentiel à la surface du sol est une considération importante dans l'évaluation du degré de protection contre les chocs électriques, car cela détermine les tensions de contact et de pas [CEI, 2002]. Ces points sont brièvement abordés ci-dessous.

La résistance de terre a deux composantes [Biddle, 1947] :

- la résistance de dissipation R_D qui est la résistance de la terre située entre la prise de terre et la terre de référence ;
- la résistance R_L des parties métalliques de la prise de terre et du conducteur de terre.

La résistance R_L est normalement plus faible que la résistance de dissipation R_D . La résistance de terre est donc normalement supposée être égale à la résistance de dissipation R_D . Dans la littérature, la "résistance de terre" désigne habituellement la résistance de dissipation [Nzuru, 2009].

N'importe quelle connexion de terre rendue disponible par le distributeur d'énergie, apparaît en parallèle avec la terre fournie localement et l'on peut s'attendre à ce qu'elle ait une impédance plus faible pour l'ensemble du spectre en fréquence. Toutefois, la disponibilité et les caractéristiques de cette connexion sont indépendantes de la maîtrise du concepteur et par conséquent, elle ne peut pas être prise en compte dans la conception d'une prise de terre qui doit être adaptée au besoin du contexte. [Nzuru, 2009].

II.3. Résistance de terre et répartition de potentiel :

Il faut examiner la nature de la propagation des courants dans le sol, c'est-à-dire la répartition des potentiels autour du réseau de terre, avant d'étudier le comportement d'un réseau de terre écoulant un courant [Nzuru, 2009].

Dans un circuit alternatif, on doit essentiellement considérer l'impédance Z_E , entre la prise de terre et la terre de référence à une fréquence d'exploitation donnée. La réactance d'une prise de terre est celle du conducteur de terre et des pièces métalliques constituant la prise de terre. A basses fréquences, la réactance est normalement négligeable comparée à la résistance de terre, mais doit être prise en considération pour les fréquences élevées contenues dans un transitoire de coup de foudre. Ainsi, pour les basses fréquences, il est supposé que l'impédance de terre Z_E est égale à la résistance de dissipation R_D , qui est à son tour supposée approximativement égale à la résistance de terre R :

$$Z_E = R_D = R \tag{II.1}$$

La résistance R d'une prise de terre dépend de la résistivité du sol ainsi que de la géométrie de la prise de terre. Afin d'atteindre de faibles valeurs de R , la densité de courant circulant de l'électrode (piquet) de terre vers la terre devrait être faible, c'est-à-dire que le volume de terre à travers lequel le courant circule est aussi grand que possible. Une fois que la

circulation de courant est répartie depuis le piquet de terre vers le sol, la densité de courant diminue. Si la prise de terre est physiquement petite, par exemple un point, cet effet est important, mais il est fortement réduit pour une plaque dans laquelle la répartition est seulement efficace aux bords, cela signifie que les piquets, tubes ou les conducteurs nus ont un bien plus faible résistance de dissipation que, par exemple, une plaque conductrice ayant la même surface de contact. D'ailleurs, il est bien précisé dans la littérature que la corrosion provoquée en alternatif et en continu augmente avec la densité de courant. Une faible densité de courant augmente la durée de vie de l'électrode [Nzuru, 2009].

Le calcul d'une résistance de terre est normalement exécuté en supposant que la terre est infinie et de structure uniforme avec une valeur de résistivité donnée. Il est possible de déterminer de manière sûre les équations régissant la résistance de terre mais, en pratique, leurs utilités sont très limitées, particulièrement dans le cas de prises de terre complexes et maillées où les relations mathématiques deviennent très compliquées. En outre, même une petite inexactitude dans la valeur de la résistivité a une influence significative sur la valeur réelle de la résistance d'une prise de terre maillée, et il est souvent très difficile de déterminer la résistivité de terre avec la précision requise. C'est pourquoi les équations théoriques précises de la résistance de terre sont utilisées uniquement pour des structures de prise de terre simples afin d'illustrer la relation entre la tension de terre, la distribution du potentiel de terre et le courant de terre. Pour les prises de terre étendues et maillées, des approximations de la résistance de terre sont utilisées [Henryk Markiewicz, 2007].

Le cas le plus simple est celui d'une électrode hémisphérique de rayon r , enterrée dans un sol supposé homogène, de résistivité ρ . Le potentiel à une distance x du centre de l'hémisphère (Figure II.1) parcouru par un courant I est donné par la relation analytique suivante [James, 1947].

$$V(x) = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{x} \right) \quad (\text{II.2})$$

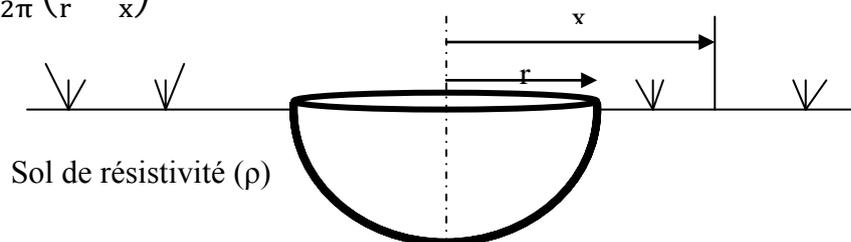


Figure II.1 : Electrode hémisphérique

Nous présentons également une autre modélisation de base d'un hémisphère enfoncée dans le sol modélisation de base (Figure II.2) [Nzuru, 2009].

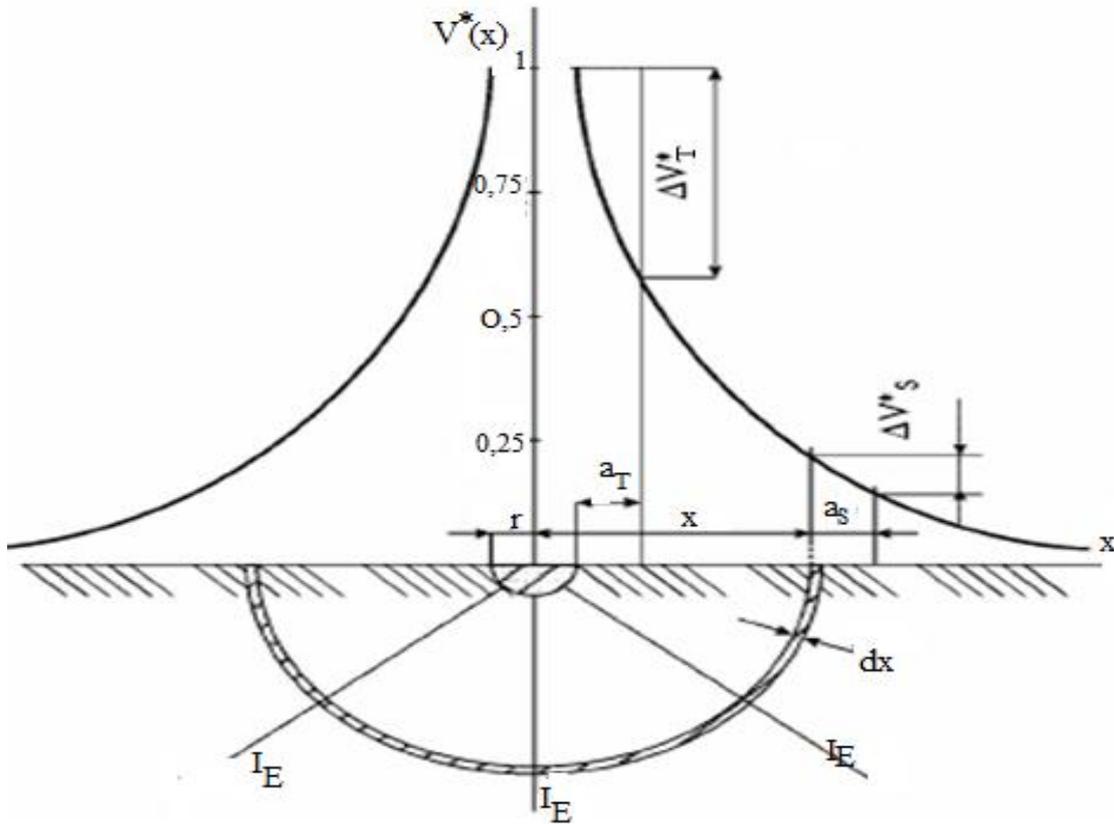


Figure II.2 : Illustration de la notion d'électrode de terre hémisphérique montrant les paramètres requis pour calculer la résistance de terre et la distribution de potentiel à la surface du sol (avec $\rho = \text{constant}$)

ou :

r : rayon d'électrode ;

x : distance à partir du centre de l'électrode ;

a_T, a_S : distances respectives de contact et de pas ;

V^* : valeur relative de la distribution de potentiel ;

$\Delta V_T^*, \Delta V_S^*$: tensions relatives respectives de contact et de pas ;

ρ : résistivité du sol.

Les lignes de courant de terre circulant depuis l'électrode vers la terre sont supposées radiales. La surface de l'hémisphère, ainsi que toutes les coques hémisphériques d'épaisseur de

sol dx , constituent des équipotentiels orthogonales en tout point aux lignes de courant. Dans ces conditions, la résistance d'une coque hémisphérique d'épaisseur dx , à une distance x du centre est déterminée par (en supposant que ρ est constant) :

$$dR = \frac{\rho}{2\pi x^2} dx \quad (\text{II.3})$$

La résistance d'une électrode de terre hémisphérique est donnée par :

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \int_r^\infty \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (\text{II.4})$$

La résistance de terre dépend significativement de la profondeur d'enfouissement de l'électrode dans le sol. Ceci est dû au fait que l'humidité du sol est plus importante et plus stable pour les couches de sol profondes que pour les couches superficielles [Klajn, 2007].

Les couches proches de la surface extérieure sont plus influencées par les variations saisonnières et à court terme sont sujettes au gel. Ce problème est illustré à la figure (II.3), pour les prises de terre constituées par un piquet, où l'on peut voir la diminution considérable de la résistance de terre en fonction de l'augmentation de leurs rayons du piquet [Markiewicz, 2007].

Cependant, il n'est pas toujours possible d'enfouir le piquet à la profondeur désirée pour des raisons géologiques, par exemple lorsque des cailloux ou des obstacles sont près de la surface ou encore lorsque le système de terre couvre une large surface [Nzuru, 2009].

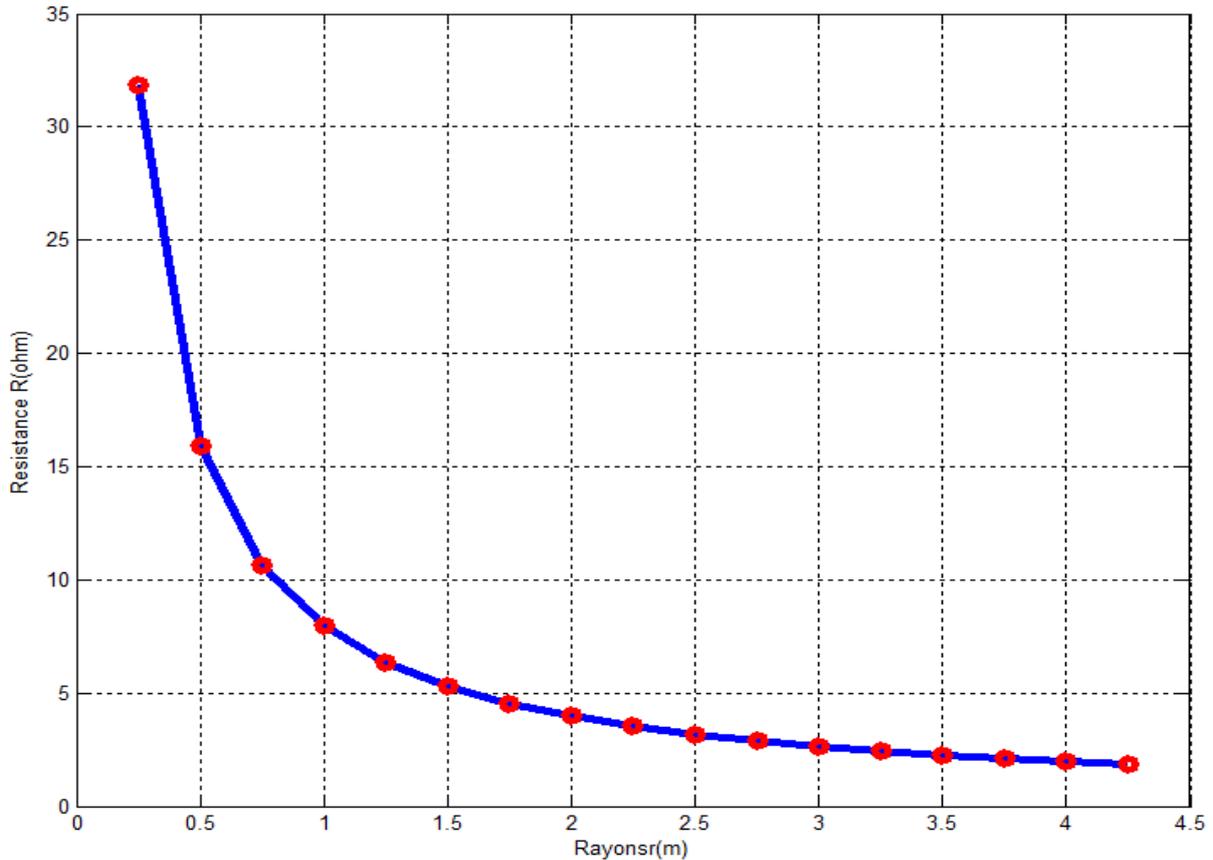


Figure II.3 : Variation de la résistance des électrodes hémisphériques en fonction de leurs rayons pour $\rho = 50 \Omega\text{m}$

On peut distinguer différents types d'électrodes de terre, comprenant :

- ✓ électrode de surface simple constituée d'une plaque ou d'un câble, en forme de méplat ou de boucle ;
- ✓ électrode maillée constituée d'une grille placée horizontalement à faible profondeur;
- ✓ câble avec une gaine métallique exposée, ou blindage se comportant de manière similaire à un piquet de terre de type bande;
- ✓ électrode de terre de fondation formée par une structure conductrice noyée dans le béton des fondations fournissant une large surface de contact avec le sol;
- ✓ électrodes tubulaires qui peuvent être constituées de tubes, de piquets, etc., et sont enfouis à une profondeur supérieure à 1m, et couramment de 3 à 30 m ou plus;

Les quatre premiers systèmes sont des prises de terre de surface qui sont habituellement constituées de conducteurs ou de bandes radiales, en anneaux ou maillées, ou une combinaison

de ces solutions, enterrés à des profondeurs ne dépassant pas 1 m. Un avantage important de cette solution est la distribution de potentiel favorable en surface. Les piquets de terre appartiennent à la famille des prises de terre profondes [Klajn, 2007].

L'avantage de tels piquets est de traverser différentes couches du sol de différentes conductivités et ils sont principalement utilisés lorsque le sol de surface a une mauvaise conductivité. Ainsi, il est aisé d'obtenir une résistance de prise de terre escomptée (Figure II.3). Un autre avantage des piquets de terre est qu'ils peuvent être installés dans des endroits où la surface disponible pour installer une prise de terre est limitée. Cependant, la répartition du potentiel en surface n'est pas bonne avec des piquets de terre et donc, en pratique, des combinaisons de piquets et d'électrodes de surface sont utilisées afin d'obtenir une résistance et une répartition du potentiel en surface désirées [Nzuru, 2009].

II.4. Tension de terre et gradient de potentielle

La tension de terre, comme le gradient de potentiel durant la circulation du courant dans la prise de terre, sont des paramètres importants pour la protection contre les chocs électriques. Les relations de base montrant la modélisation de la terre sont présentées à la figure (II.2).

Le potentiel d'un point quelconque situé à une distance x du milieu de l'électrode de terre, dans laquelle circule un courant I_E , peut être exprimé par l'équation suivante :

$$V_x = \frac{\rho I_E}{2\pi x} \quad (\text{II.5})$$

Sa valeur relative est donnée par :

$$\Delta V_x^* = \frac{V_x}{V_E} \quad (\text{II.5a})$$

:

où V_E est la tension de terre, qui est égale au potentiel de terre (en supposant que le potentiel de la terre de référence est égal à zéro).

Le potentiel de terre peut être exprimé de la manière suivante :

$$V_E = I_E R_E = \frac{\rho I_E}{2\pi r} \quad (\text{II.6})$$

R_E : résistance de terre

La différence de potentiel entre deux points de la surface du sol (l'un situé à une distance x et l'autre situé à une distance $x + a_S$, où a_S est supposée égal à 1 mètre) définit la tension de pas V_S , c'est-à-dire le gradient de potentiel existant entre deux pieds lorsqu'une personne se tient debout sur le sol :

$$V_S = \frac{\rho I_E}{2\pi} \left(\frac{1}{X} - \frac{1}{X+a_S} \right) \quad (\text{II.7})$$

Sa valeur relative est donnée par :

$$\Delta V_S^* = \frac{V_S}{V_E} \quad (\text{II.7a})$$

où $x \geq r$

r : rayon de piquet

Une relation équivalente peut être écrite pour n'importe quelles autres distances x et a . En particulier, pour $x = r$ et $a = a_T = 1$ m. La formule (II.3) permet le calcul de la tension de contact V_T , c'est-à-dire la tension entre la main et le pied d'une personne touchant simplement l'électrode de terre ou une pièce métallique reliée à celle-ci :

$$V_T = \frac{\rho I_E}{2\pi} \left(\frac{1}{X} - \frac{1}{X+a_T} \right) \quad (\text{II.8})$$

et sa valeur relative est telle que :

$$\Delta V_T^* = \frac{V_T}{V_E} \quad (\text{II.8a})$$

Une illustration pratique des tensions de pas et de contact est montrée à la figure (II.4).

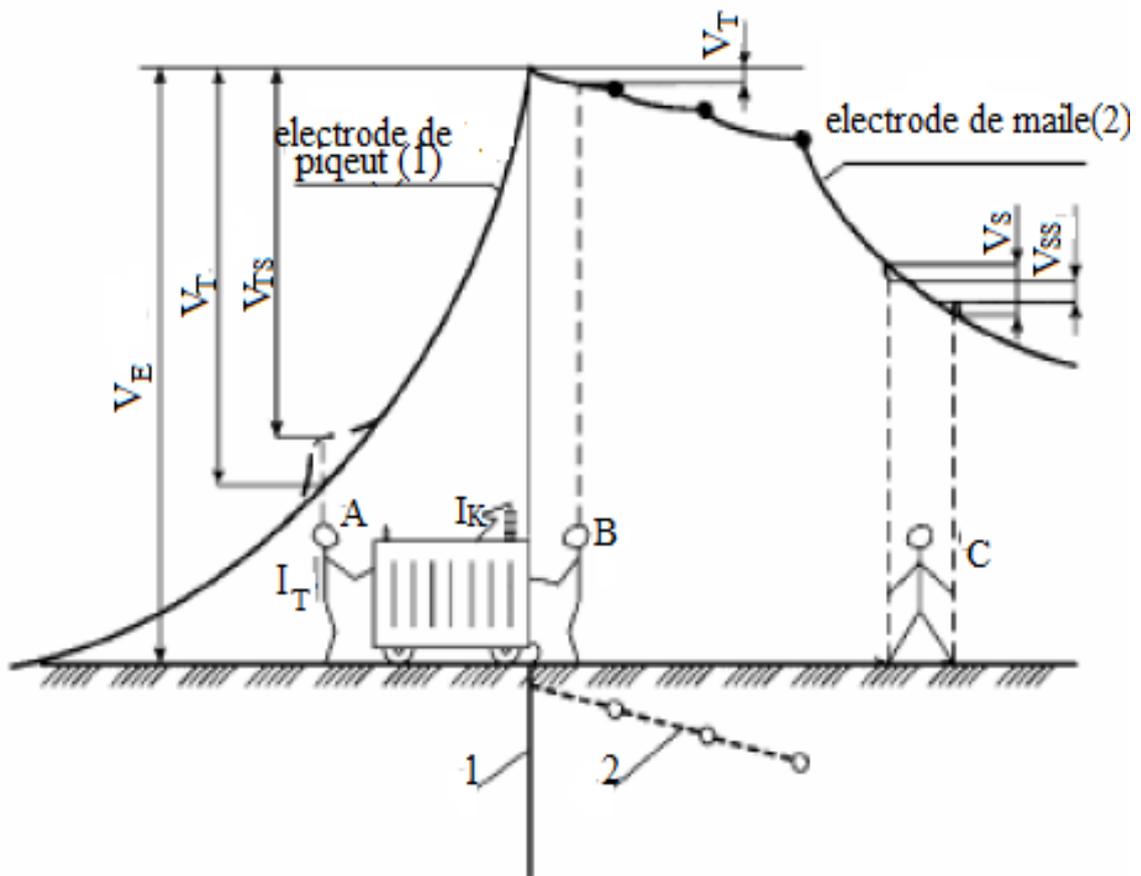


Figure II.4 : Comparaison du gradient de potentiel de la surface de la terre pendant la circulation du courant dans la prise de terre pour deux systèmes d'électrode de terre

avec :

1 : piquet ;

2 : maillage ;

V_E : tension de terre ;

V_T, V_{TS} : tension de contact et tension de choc au touché ;

V_S, V_{SS} : tension de pas et tension de pas de choc ;

I_T ; courant d'électrification ;

I_K : courant de court-circuit équivalent au courant de défaut circulant dans les masses métalliques ;

A, B, C : personnes à des potentiels de terre différents.

Les personnes A et B sont sujettes à la tension de contact tandis que la personne C est sujette à la tension de pas. La tension de contact V_T est parfois différenciée de la tension de choc au touché V_{TS} , (et la tension de pas V_S de la tension de pas de choc V_{SS}). Les tensions V_T et V_S sont les valeurs exactes issues du gradient de potentiel alors que V_{TS} et V_{SS} prennent en considération les légères variations du gradient de potentiel engendrées par la circulation du courant de choc, c'est-à-dire incluant les effets de distorsion du courant circulant à travers une personne. En pratique, la différence entre V_S et V_{SS} ou V_T et V_{TS} est normalement faible, et les mêmes valeurs pour les tensions respectives sont supposées : $V_S \approx V_{SS}$ et $V_T \approx V_{TS}$.

La partie gauche de la figure (II.4) présente le cas d'une électrode de type piquet, tandis que la partie droite montre le cas pour une électrode maillée. Le piquet (1) a une résistance faible mais un gradient de potentiel le plus défavorable. Tandis que le profil du gradient de potentiel du maillage (2) est beaucoup plus aplati. La tension de contact (personne A) est considérablement plus importante pour le piquet (1) que pour le maillage (2) (personne B). La tension de pas (personne C) est également moins dangereuse dans le cas d'un maillage. La résistance de terre détermine la valeur de la tension de terre, alors que la configuration de la prise de terre a une influence significative sur le gradient de potentiel à la surface du sol [Nzuru, 2009].

II.5. Modélisation de la résistivité des sols

En général, les modèles du sol uniforme et en deux couches de résistivités différentes sont les plus utilisés, mais pour plus de précision dans les calculs, on peut appliquer le modèle de sol à plusieurs couches de résistivités différentes.

II.5.1. Sol homogène

Cette modélisation fait l'hypothèse du sol en une seule couche de résistivité ρ . Elle ne peut être utilisée que si les variations des résistivités de différentes couches sont modérées, ce qui n'est pas souvent le cas en réalité. Les calculs des résistances des mises à la terre se basant sur cette modélisation ne donnent que des résultats approximatifs, donc peu précis.

II.5.2. Sol en deux couches de résistivités différentes

La modélisation du sol en deux couches de résistivités différentes est la plus utilisée dans les calculs de mise à la terre. Depuis plusieurs dizaines d'années, les formules simples ont été développées pour calculer la résistance d'une mise à la terre en modélisant le sol en deux couches. La résistivité apparente du sol est alors donnée par la relation suivante établie par Tagg (1964).

$$\rho(a) = \rho_i \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n\frac{e}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n\frac{e}{a}\right)^2}} \right] \quad (\text{II.9})$$

ou :

a : la distance entre les électrodes de terre lors de la mesure ;

n : nombre entier variant de 1 à ∞ ;

e : la profondeur de la couche supérieure de résistivité ρ_1 ;

K : coefficient de réflexion, donné par la relation ;

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (\text{II.10})$$

ρ_2 : la résistivité de la couche profonde du sol.

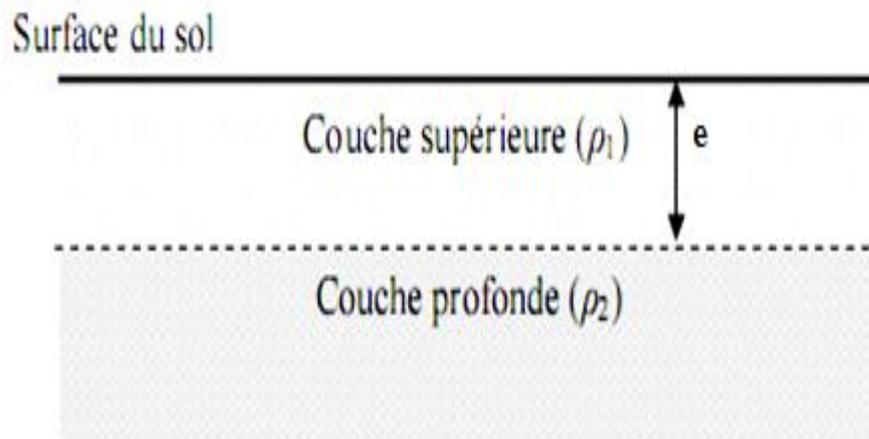


Figure II.5 : Sol en deux couches de résistivités différentes

II.5.3. Sol en plusieurs couches de résistivités différentes

Cette modélisation de sol en différentes couches (pouvant être verticales ou horizontales) requiert des méthodes numériques ou graphiques car les méthodes analytiques sont limitées.

On peut aussi considérer le sol comme uniforme en lieu et place du sol en plusieurs couches de résistivités différentes. La résistivité apparente ρ_a du sol supposée homogène peut, dans ce cas, être trouvée par les deux relations suivantes [IEEE, 2000].

$$\rho_a = \frac{\rho(a_1) + \rho(a_2) + \rho(a_3) + \dots + \rho(a_n)}{n} \quad (\text{II.11})$$

$\rho(a_1), \rho(a_2), \rho(a_3), \dots, \rho(a_n)$ sont les résistivités de n différentes couches du sol mesurées avec la méthode de 4 électrodes.

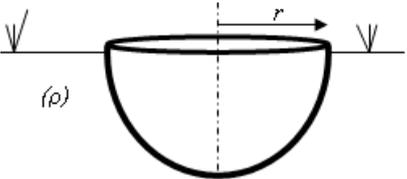
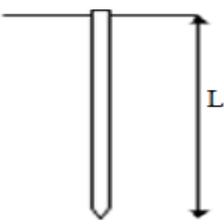
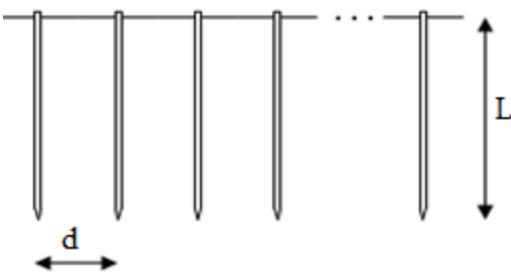
$$\rho_a = \frac{\rho_{a(\max)} + \rho_{a(\min)}}{2} \quad (\text{II.12})$$

$\rho_{a(\max)}$ et $\rho_{a(\min)}$ sont les valeurs respectivement maximale et minimale de la résistivité des différentes couches du sol.

II.6. Détermination de la résistance de quelques configurations de mise à la terre

II .6.1.Sol homogène

Beaucoup d’auteurs ont mis en évidence les méthodes analytiques pour évaluer la résistance de mise à la terre pour différentes configurations d’électrodes. Les relations qui sont données dans le tableau (II.1) suivant supposent une résistivité uniforme du sol (sol homogène). En pratique, pour tenir compte de l’hétérogénéité du sol, on fait souvent l’hypothèse de deux couches de résistivités différentes. Les différentes configurations dépendent de la forme de la prise de terre [EDF, 1984].

Forme de prise de terre	Valeur de la résistance
<p>électrode hémisphérique de rayon r</p> 	$R = \frac{\rho}{2\pi r}$
<p>Piquet de terre de longueur L et de rayon r</p> 	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right)$
<p>Electrodes en ligne droite de longueur L et de rayon r</p> 	<p>$d > l$</p> $R \approx \frac{1}{n} \left[\frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right) + \frac{\rho}{\pi d} \left(\frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} \right) \right]$
<p>Câble enterre horizontalement de longueur L et de rayon r</p>	$R = \frac{\rho}{\pi L} \left(\ln \frac{2L}{\sqrt[4]{2re}} - 1 \right)$

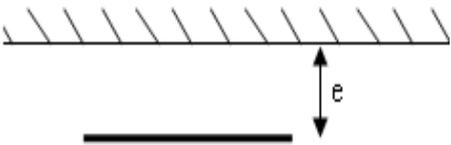
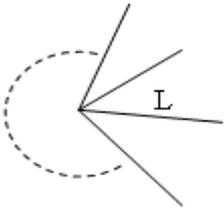
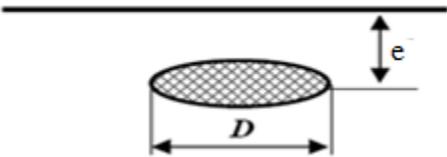
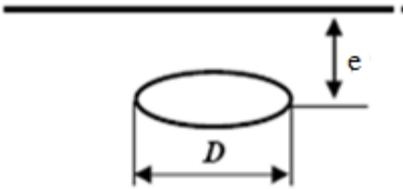
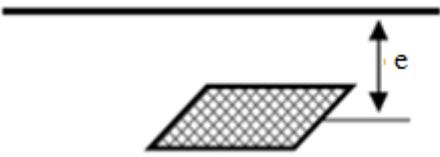
																	
<p>Plusieurs câbles rayonnant de longueur L, enfouis à la même profondeur e</p> 	$R = \frac{\rho}{n\pi L} \left(\ln \frac{2L}{\sqrt{2re}} - 1 + N(n) \right)$ <p>n : nombre de rayons (supposés régulièrement disposés). avec les $N(n)$ donnés par le tableau suivant</p> <table border="1" data-bbox="805 734 1394 846"> <thead> <tr> <th>n</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>6</th> <th>8</th> <th>12</th> <th>100</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>N</td> <td>0,7</td> <td>1,53</td> <td>2,45</td> <td>4,42</td> <td>6,5</td> <td>11</td> <td>116</td> </tr> </tbody> </table>	n	2	3	4	6	8	12	100	N	0,7	1,53	2,45	4,42	6,5	11	116
n	2	3	4	6	8	12	100										
N	0,7	1,53	2,45	4,42	6,5	11	116										
<p>Grille forme disque</p> 	<p>pour $e \ll D$:</p> $R = \frac{\rho}{4D} \left(1 - \frac{4e}{D} \right)$ <p>et pour $e \gg D$:</p> $R = \frac{\rho}{8D} + \frac{\rho}{8\pi e}$																
<p>Boucle enterrée</p> 	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{8D^2}{e r}$																
<p>Réseau maillé</p> 	$R \approx \frac{2\rho}{P}$ <p>P : le périmètre de la grille.</p>																

Figure II.1 : Résistance de quelques configurations en sol homogène [EDF, 1984]

II.6.2. Sol non homogène

II.6.2.1. Résistance d'un piquet de terre dans un sol en deux couches

Tagg (1964) a établi la relation donnant la résistance d'une électrode cylindrique verticale de longueur l et de rayon r dans un sol en deux couches de résistivité ρ_1 et ρ_2 . 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 situe dans la couche supérieure de résistivité ρ_1 (Figure II.6), la résistance correspondante est donnée par :

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left[\left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{k^i}{2} \ln \left(\frac{\frac{iz}{l} + 1}{\frac{iz}{l} - 1} \right) \right] \quad (\text{II.13})$$

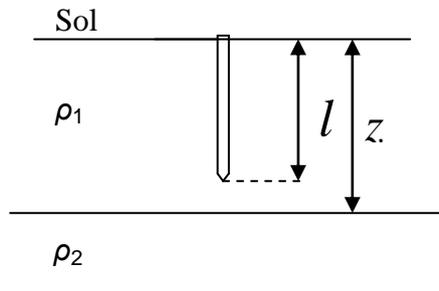


Figure II.6 : Electrode se situant dans la couche supérieure

avec :

l : longueur de l'électrode ;

k : coefficient de réflexion donnée par la relation ;

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (\text{II.14})$$

z : profondeur de la couche de résistivité ρ_1 .

i : nombre entière variée de 1 a ∞

Pour une électrode qui traverse deux couches de résistivités différentes (Figure II.7), la résistance est donnée par :

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \frac{(1+k)}{[(1-k)+2k\frac{z}{l}]} \left[\ln \frac{2l}{r} + \sum_{i=1}^{\infty} k^i \ln \left(\frac{2iz+l}{2z(i-1)+l} \right) \right] \quad (\text{II.15})$$

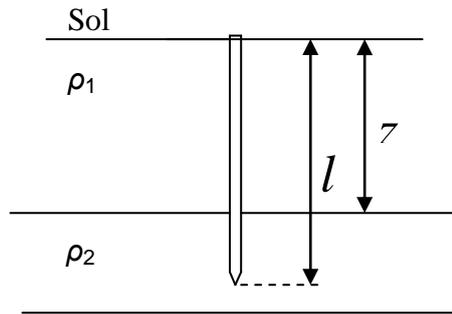


Figure II.7 : Electrode traversant les deux couches

II.6.2.2. Résistance d'une électrode horizontale dans un sol en deux couches

Tagg (1964) a établi la relation donnant la résistance d'une électrode cylindrique horizontale de longueur l et de rayon r , enterrée à une profondeur e ($e < z$) dans un sol en deux couches de résistivité ρ_1 et ρ_2 (Figure II.8) Elle est donnée par la relation [Nzuru, 2009]:

$$R = R_1 + R_a$$

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 [Nzuru, 2009] :

$$R_a = \frac{\rho_1}{2\pi l} \sum_{i=1}^{\infty} k^i \left[4 \ln \left(\frac{1 + \sqrt{\left(\frac{2iz}{l}\right)^2 + 1}}{2i\frac{z}{l}} \right) + 8i\frac{z}{l} - 4\sqrt{\left(\frac{2iz}{l}\right)^2 + 1} \right] \quad (\text{II.16})$$

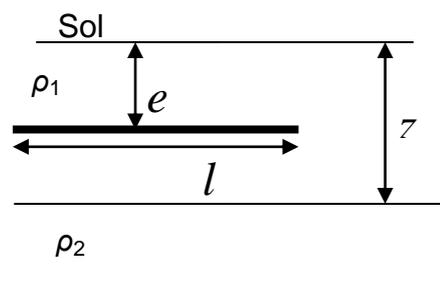


Figure II.8 : Electrode horizontale dans un sol en deux couches

II.7. Principales méthodes de mesure de la résistivité de sol

II.7.1. Méthode de Wenner

Le principe de mesure consiste à utiliser quatre électrodes qui sont disposées en ligne et équidistantes d'une distance a (Figure II.9), 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 [Chauvin, 2010].

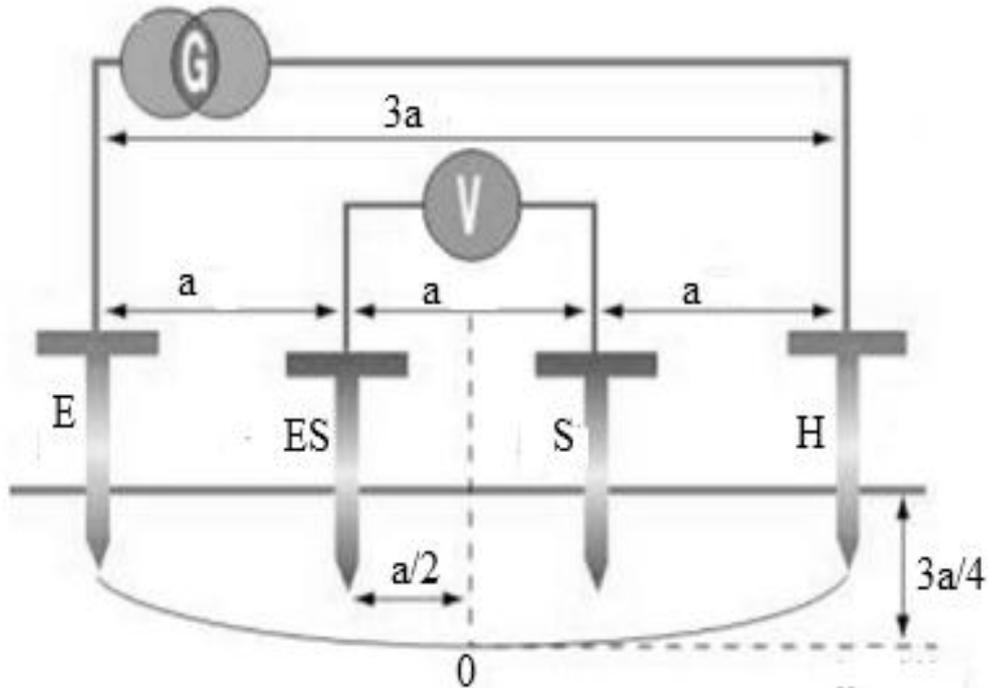


Figure II.9 : Schéma de principe de la méthode de Wenner

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 :

$$\rho = 2 \pi a R \quad (\text{II.17})$$

où :

ρ : résistivité [Ωm] ;

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 [Chouteau et Giroux, 2006].

II.7.2. 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 (Figure II.10) :

- ✓ la distance entre les deux électrodes E et H de courant est $2d$;
- ✓ la distance entre les deux électrodes E et ES de potentiel est a .

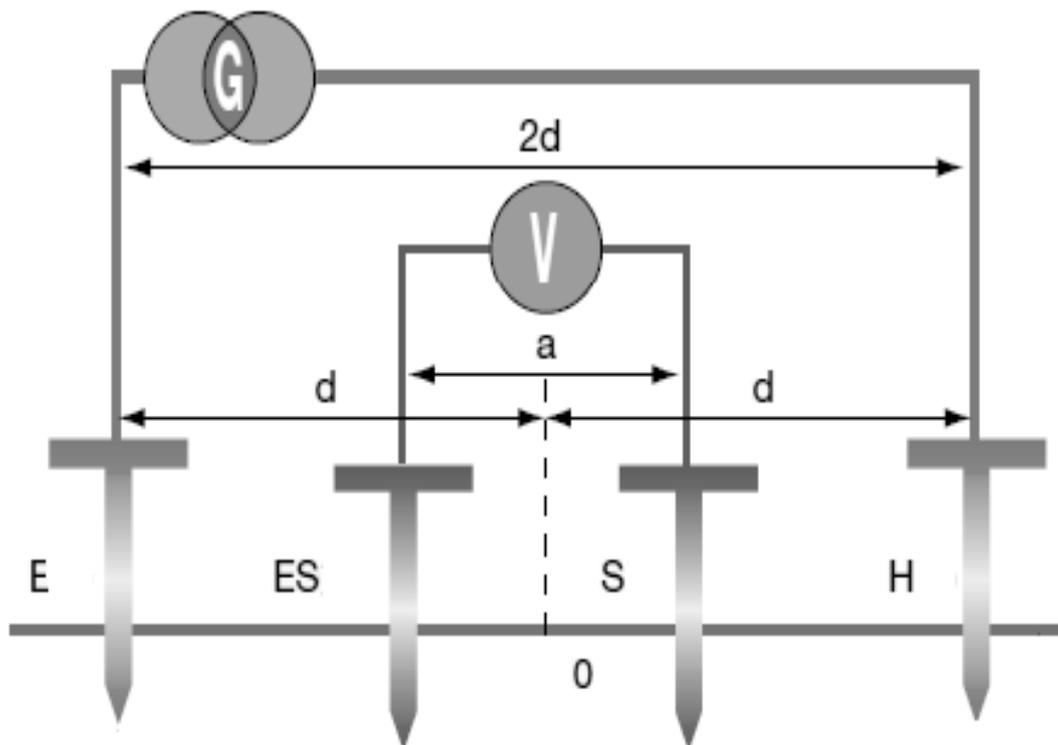


Figure II.10 : Schéma de mesure de la méthode de Schlumberger

La valeur de résistance R lue sur l'ohmmètre permet de calculer la résistivité par la formule [Chauvin, 2010].

$$\rho = \left[\pi \left(d^2 - \frac{a^2}{4} \right) R \right] / 4 \quad (\text{II.18})$$

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 deux électrodes de courant doivent être déplacées, contrairement à la méthode de Wenner nécessitant de déplacer les quatre électrodes en même temps [Chauvin, 2010]. La méthode de Schlumberger est utilisée souvent pour la stratification horizontale des terrains [Chouteau et Giroux, 2006].

II.7.3. Méthodes de mesure à 3 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 II.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 [Demuynck, 2002].

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 ampèremétrique 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 ampèremétrique 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 [Megger, 2010].

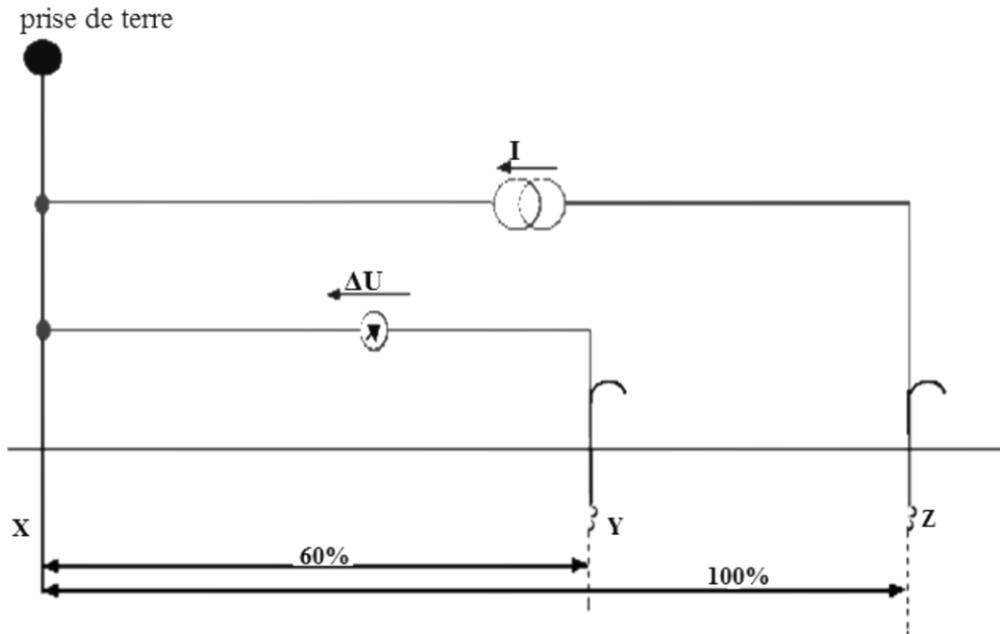


Figure II.11 : Principe de la méthode à 3 pôles

Le principe de la méthode de mesure à trois pôles repose sur trois éléments (Figure II.11). 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 [Megger, 2010].

II.7.4. Mesures sans piquets de terre

La méthode sans piquets consiste à effectuer une mesure de résistance de boucle, sans planter de piquets (Figure II.12). On mesure les différentes résistances de terre sur des installations de mise à la terre complexes à l'aide de deux pinces ampèremétriques. Avec ce

ystème, il n'est plus nécessaire de déconnecter les prises de terre parallèles, ce qui est dangereux et fastidieux, ni de rechercher la meilleure position pour les sondes. La méthode est basée sur le fait que dans les installations disposant de prises de terre multiples en parallèle, la résistance de terre effective globale est nettement inférieure à la résistance de terre individuelle qu'il faut mesurer. La première pince ampèremétrique injecte une tension, tandis que la deuxième pince mesure le courant qui passe effectivement. L'appareil mesure alors la tension et le courant et calcule la résistance en question. Cette méthode n'est donc utilisable que dans le cas d'un réseau maillé. Lorsque le reste du système de mise à la terre n'est pas directement en parallèle de la prise de terre à mesurer, la mesure est impossible [Demuyne, 2002].

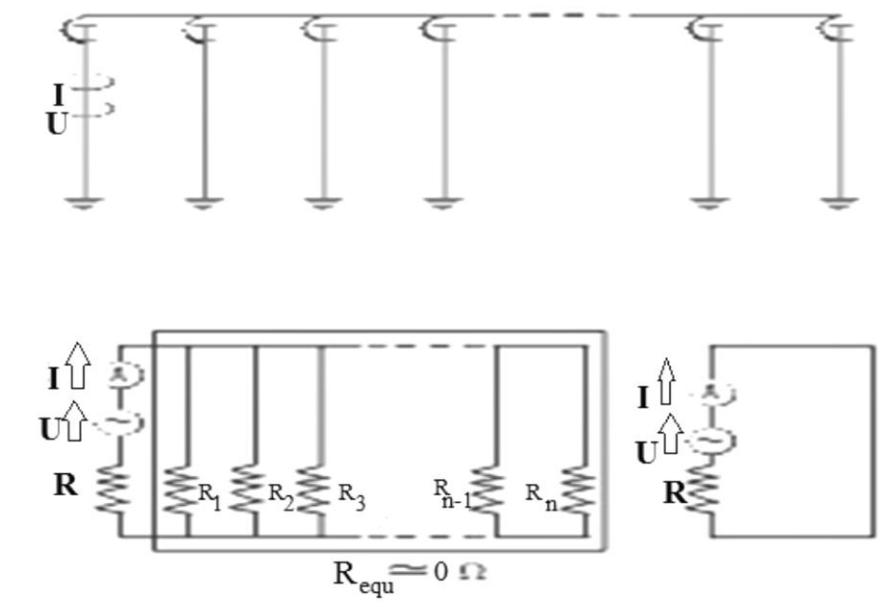


Figure II.12 : Principe de la méthode sans piquets

II.8. Conclusion

La résistance de terre et le gradient de potentiel sont les paramètres majeurs caractérisant les propriétés électriques des prises de terre. Les paramètres électriques des prises de terre dépendent des propriétés du sol et de la forme géométrique de l'électrode de terre se caractérisant par la résistivité de la terre.

Pour obtenir une résistance de terre qui soit à la fois la plus basse possible et en même temps la moins coûteuse, l'utilisateur peut jouer sur différents paramètres des électrodes (la longueur, le rayon, la profondeur, ...). Le sol se présente sous forme de strates (couches géologiques), donc rarement homogène, la résistance varie sensiblement d'une strate à l'autre en fonction de la profondeur. Il peut y avoir des variations considérables.

Il existe une multitude de méthodes de mesure de la résistance de terre la méthode de Wenner et celle de Schlumberger sont utilisées pour la mesure de la résistance du sol, tandis que celle à 3 pôles est employée pour la mesure et/ou la vérification de la résistance de la prise de terre.

La meilleure méthode pour réduire la résistance consiste à utiliser plusieurs prises de terre que l'on branche en parallèle.

III.1. Introduction

La modélisation d'un système de mise à la terre se réalise, en général, par :

- des méthodes expérimentales, consistant à utiliser des équations empiriques obtenues pour différentes formes de système mise à la terre [Legrand, 2007 ; Nzuru, 2009] ;
- des méthodes numériques, nécessitant des recours aux ordinateurs pour obtenir des solutions rapides et optimales. Les différentes méthodes de modélisation numériques, pour les systèmes de mise à la terre, peuvent être classifiées comme suit [Legrand, 2007] :
 - Approche de ligne de transmission.
 - Approche de circuit électrique.
 - Approche de champ électromagnétique.
 -
- des codes de calcul, permettant l'analyse des systèmes de mise à la terre, comme :
 - EMTP (Electromagnetic Transients Program) : utilisé pour le calcul des transitoires sur les réseaux [Legrand, 2007].
 - TRAGSYS (Computer Software for Transient Analysis of Grounding Systems) : conçu pour l'analyse en basse et haute fréquences du comportement transitoire des systèmes de mise à la terre [Legrand, 2007].
 - GetDP (General environment for the treatment of Discrete Problems) : un logiciel scientifique pour la solution numérique des équations integro-différentielles. Il convient aux problèmes physiques (électromagnétiques, thermiques, mécaniques, ...) couplés avec les méthodes numériques (méthode des éléments finis, méthodes intégrales, ...). Il peut traiter des problèmes de diverses dimensions (1D, 2D, axisymétrique ou 3D) [Nzuru, 2009].
 - AutogridPro: employé pour modéliser les mesures sur le terrain (i.e: les résistivités de sol et l'impédance de système), pour interpréter les données mesurées, pour calculer la distribution du courant de défaut entre les fils statiques de ligne de transmission, les fils neutres de ligne de distribution, et la grille de sous-station, et pour simuler un défaut représentatif de la phase-à-terre dans la sous-station afin de calculer la résistance, l'élévation de potentielle

de terre, la tension de contact, la tension de pas, et les potentiels de la terre dans toute la sous-station [AutogridPro, 2006].

- CYMGrd (CYME Ground) : un progiciel développé pour aider les ingénieurs à concevoir des installations efficaces de mise à la terre de postes électriques ou à renforcer des grilles de toute géométrie déjà existante, grâce à des outils intégrés de repérage de zones à risque ou dangereuses et à sa facilité d'utilisation. Ce code, avec ces nombreux avantages, convient bien, comme nous allons le montrer dans ce chapitre, pour l'évaluation d'un réseau de terre de forme de grille [CYMGrd, 2006].

Nous présentons brièvement dans ce qui suit, le code de calcul et de simulation CYMGrd. Afin de valider ce code de calcul, une comparaison dans les mêmes conditions, de nos résultats à ceux trouvés en utilisant la norme IEEE d'une part, est effectuée.

III.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.

III.2.1. Modules d'analyse du code de calcul

CYMGrd fait les analyses en se basant sur l'exécution des quatre modules suivants :

- Le module analyse du sol définit soit un modèle de sol uniforme, stratifié en deux couches ou défini par l'utilisateur. Les tensions maximales de contact et de pas permises sont calculées en se basant sur la norme IEEE 80-2000.
- Le module dimensionnement de l'électrode détermine le calibre minimum requis pour l'électrode de mise à la terre (conducteur et/ou piquet de terre) conformément à la norme IEEE 80-2000. Pour déterminer le calibre de l'électrode, CYMGrd utilise les paramètres du matériau de l'électrode et de la température ambiante. Les utilisateurs peuvent sélectionner un ou plusieurs matériaux disponibles dans la bibliothèque de CYMGrd.
- Le module analyse de la grille calcule le courant diffusé par chaque élément de conducteurs dans la grille de mise à la terre. Les résultats de ce calcul déterminent le potentiel à la surface du sol. Il est possible de définir les conducteurs de la grille individuellement ou par groupes de conducteurs disposés en sous-grilles. Les piquets de mise à la terre peuvent être définis de la même façon que les grilles.
- Les modules de diagramme de contour et diagramme de profil génèrent une représentation graphique des résultats de l'analyse de potentiel dans ces deux diagrammes de contour et de profil. Les diagrammes des contours du potentiel peuvent servir pour représenter les tensions de contact, de pas et de surface. Ces représentations peuvent être codifiées en couleur et affichées en 2D ou 3D. Les diagrammes de profil de potentiel peuvent être utilisés pour représenter les tensions de contact, de pas et de surface, selon un axe donné, dans la direction

désirée. Les variations des tensions et celles maximales permises correspondantes peuvent être affichées simultanément dans le même graphique.

III.2.2. Types d'électrodes et terminologie

CYMGrd supporte trois types d'électrodes, aussi appelées des systèmes de mise à la terre, composés de conducteurs (électrodes de terre horizontales) et de piquets de terre (électrodes de terre verticales).

- Electrode primaire : C'est-à-dire l'électrode qui absorbe le courant de mise à la terre. Il s'agit de la grille de mise à la terre que l'on peut concevoir avec des conducteurs et des piquets de terre. La majorité des études de mise à la terre ne tient compte que de l'électrode primaire, il s'affiche sur l'écran en rouge.
- Electrode de retour : Si, deux grilles sont à proximité l'une de l'autre et que le courant injecté à la terre par la première grille retourne au système par la seconde grille ; cette dernière devient l'électrode de retour. L'électrode de retour devrait seulement être utilisée dans le cas où un courant d'absorption de la grille de la terre existe et que cette électrode est située à proximité de l'électrode primaire activée. L'électrode de retour peut être modélisée par un simple piquet de terre et s'affiche sur l'écran de CYMGrd en bleu. En l'absence d'électrodes de retour, tout le courant absorbé par l'électrode primaire ne peut être diffusé qu'à la terre.
- Electrode distincte : Elle représente des structures conductrices, telles que les conduites ou les fondations des bâtiments, situées près d'une installation de mise à la terre, tout en n'étant pas connectés à un réseau électrique. Elle n'est raccordée ni à l'électrode primaire, ni à celle de retour, mais subit l'influence de leurs champs électriques. Elle s'affiche en vert sur l'écran.

Si, la clôture d'un poste n'est pas reliée à la grille de mise à la terre, il faut la modéliser comme étant une électrode distincte. Sinon, elle est modélisée comme faisant partie de l'électrode primaire. Cependant, les électrodes de retour et distincte ne font pas souvent partie du système de mise à la terre, mais il faut parfois les représenter. Dans notre étude, seule l'électrode primaire est prise en considération.

III.2.3. Résistivité et évaluation de la sécurité

Le code CYMGrd possède une interface de données pour les mesures de la résistivité du sol, ainsi que des algorithmes pour les analyser. En se basant sur ces résultats, le code permet à l'utilisateur d'estimer les tensions maximales permises de pas et de contact, à des conditions de surface et d'exposition de la victime données, par une analyse de la sécurité.

III.2.4. Mesure de la résistivité du sol et modèles de sol

Le sol ambiant peut avoir une résistivité uniforme à une profondeur donnée, mais le plus souvent on retrouve des sols stratifiés, c'est-à-dire constitués de couches de résistivités différentes. En général, l'identification de façon précise d'une stratification de sol constitue une tâche ardue. Plusieurs méthodes ont été énoncées au fil des ans, du point de vue graphique et analytique, mais plus souvent qu'autrement on doit plutôt faire appel à notre bon sens pour arriver à un modèle pratique du sol. On compte présentement des techniques pour interpréter une série de mesures de résistivité du sol en tant que modèle de sol multicouches. CYMGrd offre le choix entre des modèles de sol « uniforme » ou « constitués de deux couches ». Les modèles « multicouches » ne sont pas supportés à l'heure actuelle par CYMGrd. Par ailleurs, CYMGrd ne supporte que le type de stratification horizontal du sol. La stratification verticale n'est pas prise en compte.

Dans un modèle à deux couches, la couche supérieure a une épaisseur définie et la couche inférieure a une épaisseur infinie et une résistivité différente. Cette méthode est pratique et a été utilisée pendant de nombreuses années dans la pratique de la mise à la terre des postes électriques. La seule méthode pour mesurer la résistivité du sol supportée par le logiciel CYMGrd est celle de Wenner, selon laquelle la distance (a) entre chaque paire d'électrodes est égale.

Un courant de mesure I est injecté et la tension V qui en résulte est mesurée par un voltmètre. La résistivité apparente (mesurée) ρ_a est donnée selon l'équation :

$$\rho_a = \frac{4\pi a(V/I)}{\left[1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2+4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}\right]} \quad (\text{II.1})$$

où

b : est la longueur de l'électrode.

Si, on considère que $a \gg b$, on obtient l'équation simplifiée :

$$\rho_a = 2\pi a(V/I) \quad (\text{II.2})$$

CYMGrd utilise des techniques de gradients réduits pour calculer le modèle optimisé et minimiser l'erreur moyenne quadratique (er). Cette erreur est déterminée par :

$$er = \sqrt{\frac{\sum_i^N \text{erreur}^2(i)}{N}} \quad (\text{II.3})$$

N : le nombre de valeurs mesurées.

L'erreur quadratique moyenne est une mesure de la dispersion des points autour d'un centre. Mathématiquement, c'est l'équivalent spatial de l'écart type [Wiater, 2007]. Elle est calculée pour indiquer le degré de correspondance entre le modèle calculé du sol et les valeurs mesurées.

III.2.5. Evaluation de la sécurité

L'évaluation de la sécurité permet à l'utilisateur d'estimer les tensions maximales permises de pas et de contact ($V_{T \max}$ et $V_{S \max}$), à des conditions de surface et d'exposition données. Pour estimer ces deux tensions, CYMGrd utilise les équations extraites de la norme IEEE 80-2000.

III.2.5.1. Courant toléré du corps humain

Une conception efficace de réseaux de terre a deux objectifs principaux :

- 1) assurer la sûreté d'une personne dans la localité. Une telle sûreté est assurée tant que la quantité d'énergie susceptible d'être absorbée durant le période d'exposition de la victime, demeure inférieure à la valeur critique supportée par le corps humain. Pour

assurer la sûreté, la durée du courant conduit par un corps humain devraient être moins que la valeur qui peut causer la fibrillation ventriculaire du cœur.

- 2) fournir un chemin pour évacuer les courants électriques dans la terre, dans des conditions normales et de défaut.

On assume que le courant de fibrillation est une fonction de poids corporel individuel [Dalziel] et comme montré par Dalziel et al. (1956), le courant de non fibrillation I_b de durées s'étendant de 0,03 à 3,0 s, est lié à l'énergie absorbée par le corps comme décrit par l'équation suivante :

$$S_B = (I_b)^2 t_C \quad (\text{III.4})$$

où :

I_b est le courant toléré qui traverse le corps humain en (A) ;

t_C est la durée de l'exposition courante en (s) ;

S_B est la constante empirique liée à l'énergie de décharge électrique tolérée par un certain pourcentage de population donnée.

Dalziel et al. (1941,1956) ont constaté que l'énergie de choc qui peut être survécue par 99,5% de personnes pesant approximativement 50 kilogrammes, a comme conséquence une valeur de S_B de 0,0135, ($\sqrt{S_B} = 0,116$) et pour 70 kilogrammes a comme conséquence une valeur de S_B de 0,0246, ($\sqrt{S_B} = 0,157$).

Les limites courantes de corps tolérables pour les poids corporels de la victime de choc égal 50 kg et 70 kg sont données respectivement par les équations (III .5) et (III .6) suivantes :

$$I_b = \sqrt{\frac{S_B}{t_C}} = \frac{0,116}{\sqrt{t_C}} \quad (\text{A}) \quad (\text{III.5})$$

$$I_b = \sqrt{\frac{S_B}{t_C}} = \frac{0,157}{\sqrt{t_C}} \quad (\text{A}) \quad (\text{III.6})$$

III.2.5.2. Circuits accidentels équivalents

Le courant tolérable de corps I_b donné par l'équation (III.5) ou l'équation (III.6), est employé pour définir les tensions maximales de contact et de pas.

III.2.5.2.1. Circuit accidentel de la tension de contact

La figure (III.1) montre le courant de défaut I_f étant déchargé à la terre par le système de mise à terre de la sous-station et une personne touchant une structure métallique reliée au sol en point H. Les différentes impédances du circuit sont montrées sur la figure (III.2)

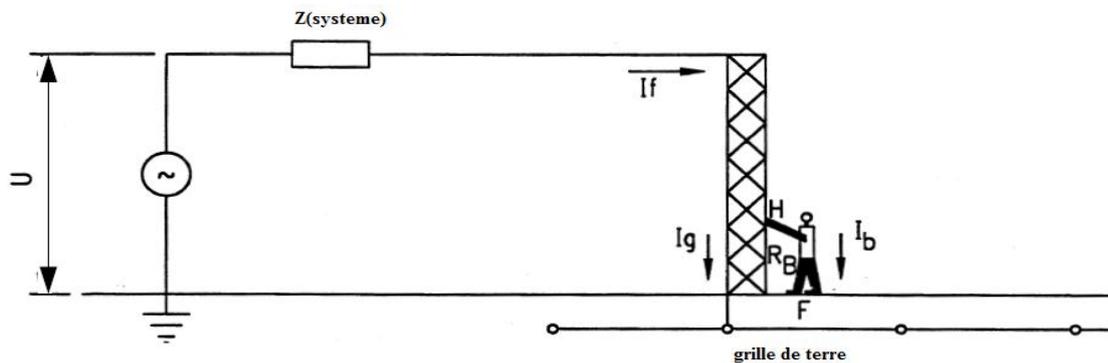


Figure III.1 : Exposition à la tension de contact

où

I_f : courant de défaut total en A ;

I_b : Le courant tolérable de corps humain en A;

I_g : Courant maximum de la grille ;

R_B : est la résistance du corps humain en Ω est égale 1000Ω [IEEE, 2000] ;

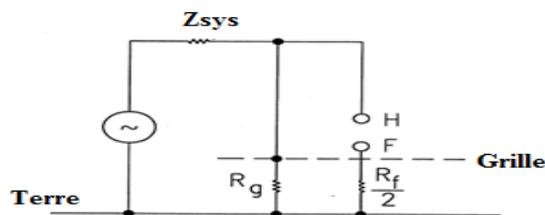


Figure III.2 : Impédances du circuit de la tension de contact

où :

R_g : résistance du réseau de terre en Ω ;

R_f : est la résistance d'une portion de terre correspondante à la plante d'un pied de la personne en Ω .

La borne H est un point dans le système au même potentiel que la grille dans laquelle le courant de défaut circule et la borne F est le petit secteur sur la surface de la terre qui est en contact avec les deux pieds de la personne.

Le courant I_b circule de point H à la terre au point F à travers le corps de la personne. Le théorème de Thevenin nous permet de représenter ces deux bornes (H, F) par le circuit de la figure (III.3) [Dawalibi et al., 1990].

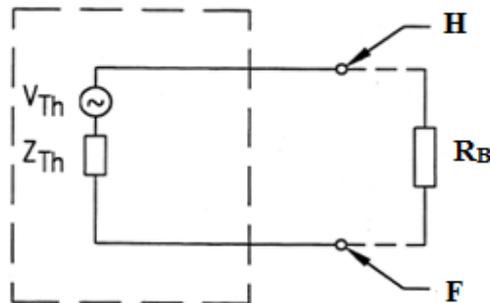


Figure III.3 : Circuit de la tension de contact

où :

$V_{Th} = V_T$: tension de contact ;

$Z_{Th} = R_f/2$: l'impédance de Thevenin ;

R_B : est la résistance du corps humain en Ω est égale 1000Ω [IEEE, 2000] ;

R_f : est la résistance d'une portion de terre correspondante à la plante d'un pied en Ω .

La tension de Thevenin V_{Th} est la tension entre les bornes H et F quand la personne n'est pas présente. L'impédance de Thevenin Z_{Th} est celle du système vue des points H et F en court-circuitant la source de tension du système. Le courant I_b passe par le corps de la personne de H à F est donné par :

$$I_b = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_B} \quad (III.7)$$

III.2.5.2.2. Circuit accidentel de la tension de pas

La figure (III.4) montre le courant de défaut I_f étant déchargé à la terre par le système de terre de la sous-station. Le courant I_b s'écoule du pied F_1 à travers le corps de la personne à l'autre pied F_2 . Les bornes F_1 et F_2 sont les secteurs sur la surface de la terre qui sont en contact avec les deux pieds, respectivement.

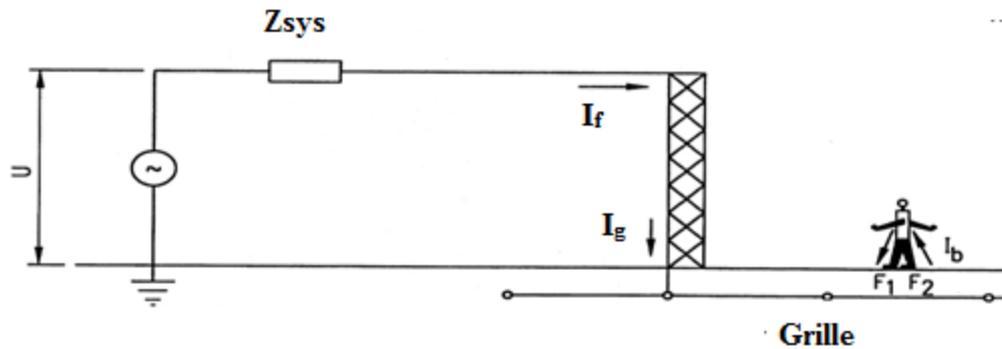


Figure III.4 : Exposition de la tension de pas

Le théorème de Thevenin nous permet de représenter ces deux bornes F_1 et F_2 sur la figure (III.5). La tension de Thevenin V_{Th} est la tension entre les bornes F_1 et F_2 quand la personne n'est pas présente. L'impédance de Thevenin Z_{Th} est celle du système vue des bornes F_1 et F_2 en court-circuitant la source de tension du système. Le courant I_b s'écoule par le corps d'une personne est donné également par l'équation (III.7).

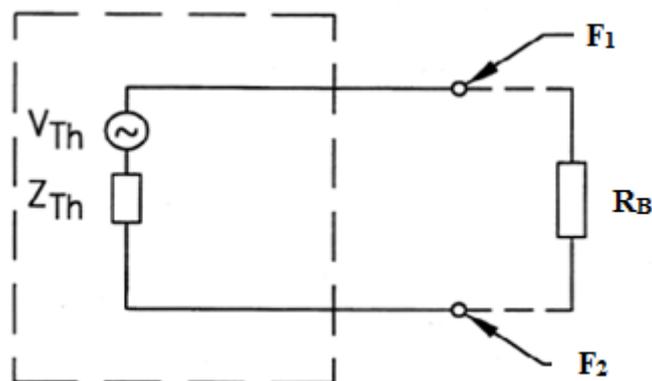


Figure III.5 : Circuit de la tension de pas

où :

$V_{Th} = V_S$: est la tension de pas en V ;

$Z_{Th} = 2R_f$: l'impédance de Thevenin en Ω ;

R_B : la résistance du corps humain en Ω est égale 1000 Ω [IEEE, 2000] .

La plante d'un pied humain est généralement représentée par un disque métallique et la résistance de contact des chaussures, chaussettes, etc., est négligée. La résistance de terre en ohms d'un disque métallique du rayon b (m) sur la surface d'une terre homogène de la résistivité ρ ($\Omega.m$) est indiquée par l'équation de Laurent (1951) suivante :

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \quad (III.8)$$

Traditionnellement, le disque métallique représentant le pied est pris comme plat circulaire avec un rayon de 0,08 m.

III.2.5.3. Tensions de contact et de pas maximale les permises ($V_{T \max}$ et $V_{S \max}$)

En faisant une légère approximation, l'équation de Z_{Th} peut être obtenue en forme numérique et être exprimée en termes de ρ comme suit [IEEE-80, 2000] :

– Pour le circuit accidentel de la tension de contact : $Z_{Th} = 1,5 \rho$ (III.9)

– Pour le circuit accidentel de la tension de pas : $Z_{Th} = 6,0 \rho$ (III.10)

Basé sur la recherche rapportée par Dawalibi et al., (1993) Meliopoulos et al. (1993) et Thapar et al. (1994), les tensions équivalentes permises (tolérables) de contact et de pas sont données par les équations (III.11) et (III.12) suivantes :

$$V_{S \max} = (R_B + 2R_f)I_b \quad (III.11)$$

$$V_{T \max} = (R_B + \frac{R_f}{2})I_b \quad (III.12)$$

– Pour le poids corporel de la victime de choc égal à 50 kg :

$$V_{T \max 50} = (1000 + 1,5C_S\rho_S) \frac{0,116}{\sqrt{t_c}} \quad (III.13)$$

$$V_{S \max 50} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_c}} \quad (\text{III.14})$$

– Pour le poids corporel de la victime de choc égal à 70 kg :

$$V_{T \max 70} = (1000 + 1,5C_s \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_c}} \quad (\text{III.15})$$

$$V_{S \max 70} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_c}} \quad (\text{III.16})$$

avec

$$C_s = 1 - \frac{0,09(1-\frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s+0,09} \quad (\text{III.17})$$

où :

I_b : le courant tolérable par le corps humain en A ;

R_B : la résistance du corps humain en Ω ($R_B=1000 \Omega$) ;

R_f : la résistance de terre d'un pied en Ω ;

t_c : la durée du choc pour déterminer le courant tolérable I_b traverse le corps humaine en s ;

ρ_s : la résistivité du matériau de surface en Ωm ;

C_s : le facteur de réduction (derating factor) en présence de matériau de haute résistivité à la surface ;

ρ : la résistivité de la terre sous le matériau de la couche de surface de haute résistivité en Ωm ;

h_s : l'épaisseur du matériau de la couche de surface de haute résistivité en m.

III.3. Validation du code CYMGrd

Le réseau de terre doit vérifier deux principes fondamentaux :

- être équipotentiel, c'est-à-dire minimiser les différences de potentiel auxquelles les équipements du poste et les personnes sont susceptibles d'être soumis ;
- avoir une résistance de terre faible afin de favoriser l'écoulement dans le sol du courant engendré par les défauts.

Cette partie illustre l'application des équations, des tableaux, et des graphiques pour concevoir le réseau de terre d'un ouvrage électrique en présence d'un défaut dans le cas d'un transformateur 115 kV /13 kV raccordé en triangle - étoile. Les objectifs principaux visés par cette étude est de :

- a) montrer l'application des principales équations du guide IEEE-80 (2000) ;
- b) illustrer les différences typiques à prévoir entre les résultats obtenus en utilisant le calcul simplifié de ce guide et des solutions plus rigoureuses d'ordinateur ;
- c) illustrer les états de conception du réseau de terre ;
- d) vérifier la fiabilité de ce réseau car l'utilisation des calculs simplifiés peut ne pas donner une conception exacte, du moment que certaines équations doivent être utilisées avec prudence

En raison de ces objectifs, on se base sur la norme IEEE 80-2000 pour valider le code CYMGrd. Pour cela, nous proposons la conception des différents formes de grilles (carrée, rectangle, L et U), pour le quelles nous utilisons les formules analytiques de la norme IEEE 80-2000, et une simulation par le code CYMGrd.

Les données de conception du réseau de terre dans IEEE 80 (200) sont montrées dans le tableau (III.1)

Surface des grilles	$A=4900 \text{ m}^2$
Résistivité de la couche superficielle du sol (pierre concassée)	$\rho_s =2500 \Omega\text{m}$
Épaisseur de la couche superficielle	$e_s =0,102 \text{ m}$
Durée du défaut	$t_c= t_f =0,5 \text{ s}$
Résistivité uniforme du sol	$\rho =400 \Omega\text{m}$
Facteur de coupure S_f	$S_f =1$
Profondeur d'enfouissement	$e= 0,8 \text{ m}$
Impédance directe équivalent de système (côté 115 kV)	$Z_d=4,0+j10 \Omega$
Impédance homopolaire équivalent de système (côté 115 kV)	$Z_0=10+j40 \Omega$
Impédance transformé (Z_d et Z_0) du côté de 13 kV	$0,0340+j1, 014 \Omega$

Tableau III.1 : Données de la conception des grilles de surface 4900 m^2 sans piquets

III.3.1.1. Principe de conception d'un réseau de terre selon IEEE 80-2000 :

La démarche à suivre peut se faire selon l'organigramme de la figure (III.6), constitué de douze étapes [IEEE, 2000].

Nous détaillons, par la suite, les calculs relatifs à une telle conception dans le cas d'une grille carrée.

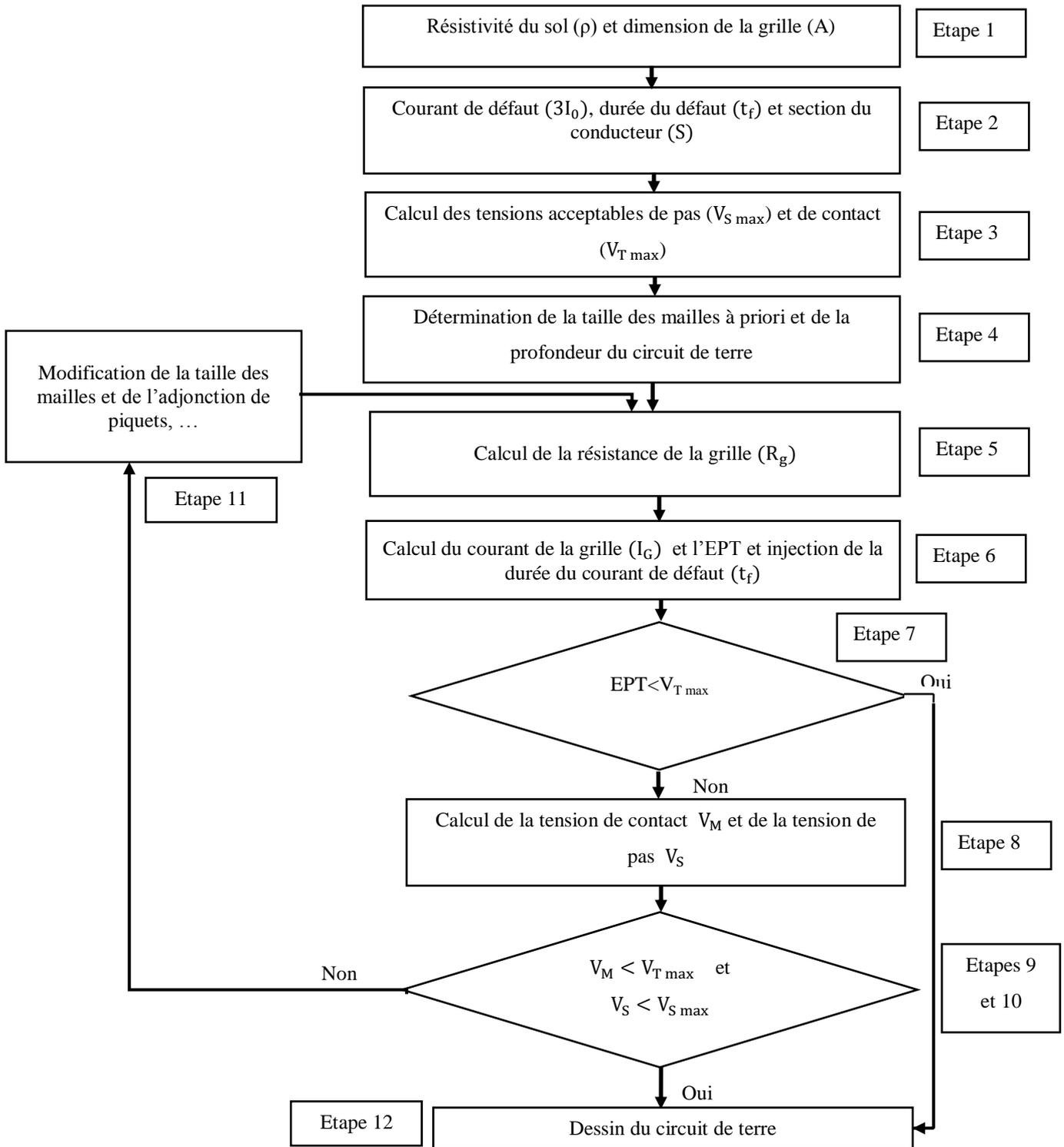


Figure III.6 : Organigramme de la conception d'un circuit de terre selon IEEE 80-2000

- **Étape 1 : Etude géologique**

La conception du réseau de terre commence nécessairement par une étude géologique du sol (structure physique hétérogénéité, mesures de résistivités, variations saisonnières de la résistivité de deux couches du sol,...) où sera implantée l'installation. En plus, elle nécessite de connaître la structure générale du circuit de terre (la surface, la forme, ...), car le but recherché est d'obtenir un réseau de terre efficace, même dans les périodes les plus défavorables.

- **Étape 2 : Détermination de la section du conducteur**

1. **Calcul du courant de défaut $I_f = 3I_0$**

Le courant de défaut (ligne-terre) $3I_0$, donné par l'équation (III.18), devrait être le courant maximum de défaut prévu, qui sera conduit par n'importe quel conducteur dans le système de mise à la terre. Pour estimer la taille du conducteur de terre :

$$I_0 = \frac{V}{3R_{df} + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (\text{III.18})$$

R_{df} : est la résistance estimée du défaut (supposée nulle) ;

R_0, R_d, R_i : Les résistances homopolaire, direct et inverse lors d'un défaut dissymétrique (Ω);

X_0, X_d, X_i : Les réactances homopolaire, direct et inverse lors d'un défaut dissymétrique (Ω) ;

V : la tension simple phase-neutre (V).

En utilisant les données présentées dans le tableau III.1, le courant de défaut du côté de 115 kV est :

$$3I_0 = \frac{3(115000/\sqrt{3})}{3(0) + (4 + 4 + 10) + j(10 + 10 + 40)}$$

$$|3I_0| = 3180 \text{ A}$$

Avant de calculer le courant de défaut du côté de 13 kV, nous devons déterminer les impédances. Pour cela, les impédances équivalentes de défaut du côté de 115 kV doivent être transférées au côté de 13 kV du transformateur. Il convient de noter qu'en raison du raccordement du montage en triangle – étoile (115 kV /13 kV) du transformateur, seulement les impédances directe et inverse de défaut du côté de 115 kV sont transférées. Ainsi :

$$Z_d = \left(\frac{13}{115}\right)^2 (4,0 + j10,0) + 0,034 + j1,014 = 0,085 + j1,142$$

$$Z_0 = 0,034 + j1,014$$

Dans ces conditions, le courant de défaut est tel que :

$$3I_0 = \frac{3(13000/\sqrt{3})}{3(0) + (0,085 + 0,085 + 0,034) + j(1,142 + 1,142 + 1,014)}$$

$$|3I_0| = 6814 \text{ A}$$

2. Détermination du facteur de décroissement D_f

Facteur de décroissement (ou de décroissance) : un facteur d'ajustement utilisé en conjonction avec le paramètre « courant de défaut de terre symétrique » dans les calculs de mise à la terre de sécurité orientée. Il détermine l'équivalent du RMS de l'onde de courant asymétrique pour une durée t_f de défaut représentant l'effet du décalage continu initial et de son atténuation pendant le défaut

En utilisant le tableau (III.2) pour une durée de défaut de 0,5 s, le facteur du décroissement D_f est approximativement égal à 1. Ainsi, le courant de défaut asymétrique RMS est également 6814 A. Cette intensité du courant de défaut du côté de 13 kV (plus grande que celle du côté de 115 kV) sera employée pour déterminer le diamètre minimum des conducteurs enterrés.

Durée de défaut (s)	D_f			
	X/R=10	X/R=20	X/R=30	X/R=40
0,00833	1,576	1,648	1,675	1,688
0,05	1,232	1,378	1,426	1,515
0,1	1,125	1,323	1,316	1,378
0,2	1,064	1,125	1,181	1,232
0,3	1,043	1,085	1,125	1,163
0,4	1,033	1,064	1,095	1,125
0,5	1,026	1,052	1,077	1,101
0,75	1,018	1,035	1,052	1,068
1	1,013	1,026	1,039	1,052

Tableau III.2 : Valeurs typiques de D_f

Le tableau (III.3) illustre les différentes caractéristiques des matériaux utilisées dans la conception du réseau de terre.

Matériau	T_m (°C)	K_f
Copper anneal soft-drawn	1083	7.00693
Copper commercial hard-drawn	1084	7.06809
Copper_clad steel wire 40(%)	1084	10.5419
Copper_clad steel wie 30(%)	1084	12.062
Aluminum EC Grade	657	12.1204
Aluminum 5005 Alloy	652	12.4188
Aluminum 6001 ALLoy	654	12.4752
Aluminum_clad steel wire	657	17.2066

Tableau III.3 : Caractéristiques des matériaux

Supposons un réseau de terre constitué du cuivre et une durée de défaut de 0,5 s, l'équation employée pour déterminer la section (S) en kcmil est :

$$S_{\text{kcmil}} = 3I_0 K_f \sqrt{t_c} \quad (\text{III.19})$$

$$S_{\text{kcmil}} = 6,814 \times 7,06 \times \sqrt{0,5} = 34,02 \text{ kcmil} = 17,2 \text{ mm}^2$$

$$(S \text{ mm}^2 = \pi d^2 / 4; \text{ ce qui donne } d = 4,7 \text{ mm})$$

K_f : est une constante déterminée à partir du tableau (III.3).

Étape 3 : Tensions de contact et de pas maximales admissible

Les tensions tolérables de contact et de pas sont déterminées à partir des équations (III.15) et (III.16) pour un poids de 70 kg. Le choix du temps (t_c) est basé sur le jugement du concepteur.

1. Détermination du facteur de réflexion k

Ce facteur est calculé lors de l'utilisation du modèle de sol à deux couches. Il est donné par l'équation suivante :

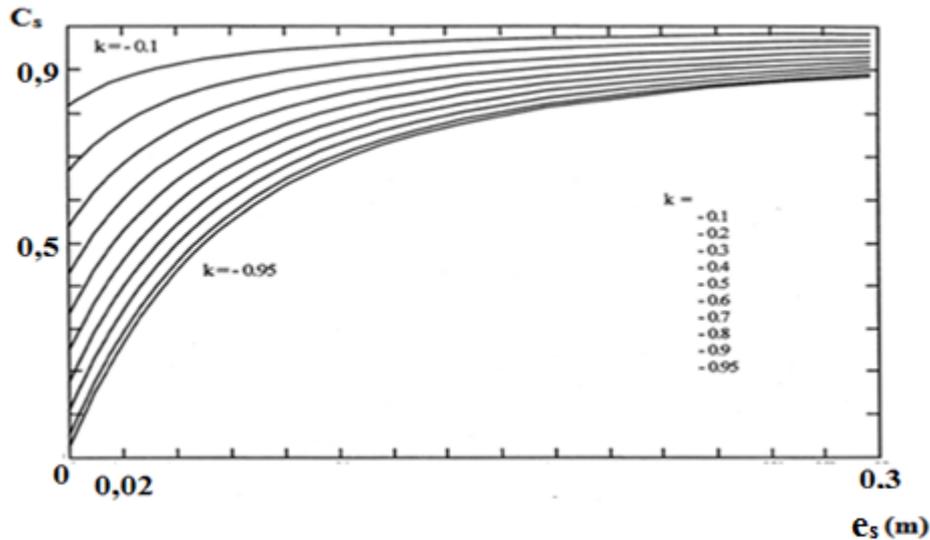
$$k = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (\text{III.20})$$

$$\text{dans notre cas : } k = \frac{400 - 2500}{400 + 2500} = -0.72$$

2. Détermination du facteur C_s

La figure (III.7) indique que pour $k = -0,72$, la résistivité des pierres concassées doit être sous-sollicité par un facteur de réduction $C_s = 0,74$. Cette valeur est très proche à celle calculée en utilisant l'équation (III.17) :

$$C_s = 1 - \frac{0,09(1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2hs + 0,09} = 1 - \frac{0,09(1 - \frac{400}{2500})}{2(0,102) + 0,09} = 0,743$$


 Figure III.7 : Représentation du C_s en fonction de e_s

En supposant que, pour la station particulière, l'emplacement des installations de mise à la terre au sein de la propriété clôturée est telle que le poids de la personne devrait être au moins 70 kg, l'équation (30) et l'équation (33) peuvent être utilisés pour calculer les tensions de pas et de contact tolérables respectivement comme suit :

$$V_{S_{\max 70}} = [(1000 + 6(0,74)2500)]0,157 / \sqrt{0,5} = 2686,6 \text{ V}$$

$$V_{T_{\max 70}} = [(1000 + 1.5(0,74)2500)]0,157 / \sqrt{0,5} = 838,2 \text{ V}$$

- **Etape 4 : Conception initiale**

La conception préliminaire débute par une boucle de conducteurs, entourant la surface du poste et des conducteurs en travers, formant ainsi un réseau maillé, pour le raccordement des équipements au système. Les évaluations initiales d'espacement entre le conducteur et l'emplacement des piquets, devraient être basées sur le courant maximal de la grille I_G et la surface de la sous-station.

Dans cette démonstration, nous supposons une disposition préliminaire d'une grille carrée de $70 \text{ m} \times 70 \text{ m}$ (Figure III.6), avec l'espacement entre deux conducteurs successifs donné par l'équation (III.20) et une profondeur d'enterrement de grille $e = 0,8 \text{ m}$.

$$D = \frac{2L_0L_{01}}{L_C - L_0 - L_{01}} \quad (\text{III.21})$$

où

- L_C : longueur totale des conducteurs de terre égale à $2 \times 11 \times 70 = 1540$ m ;
- L_0 : longueur du poste égale à 70 m ;
- L_{01} : largeur du poste égale à 70 m.

Dans ces conditions, D est donné par : $D = \frac{2.70.70}{1540 - 70 - 70} = 7$ m

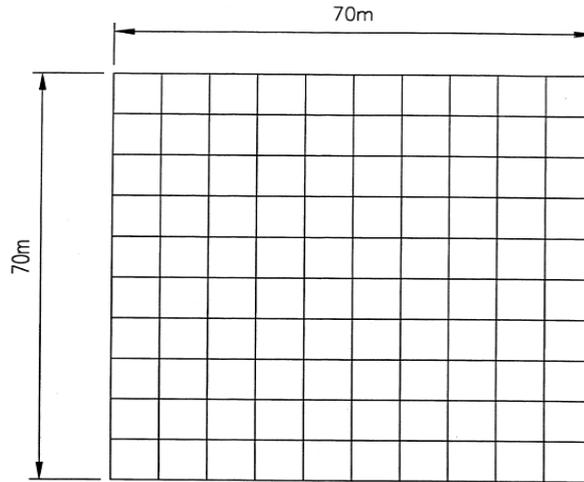


Figure III.8 : Grille carrée de 4900 m²

• **Etape 5 : Détermination de la résistance de la grille.**

L'évaluation préliminaire de la résistance du système de mise à la terre R_g peu être déterminée par l'équation suivante :

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+e\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (\text{III.22})$$

Dans notre cas : $R_g = 400 \left[\frac{1}{1540} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 4900}} \left(1 + \frac{1}{1+0,5\sqrt{20/4900}} \right) \right] = 2,78 \Omega$

où :

ρ : résistivité du sol en $\Omega.m$;

L_T : longueur totale des conducteurs de réseau de terre en m ;

e : profondeur d'enfouissement en m ;

A : surface de la grille en m².

- **Etape 6 : Courant maximum I_G de la grille**

Le courant I_G est déterminé selon l'équation (III.23). Seulement cette partie de tout le courant de défaut $3I_0$, qui traverse la grille vers la terre éloignée, devrait être employée à la conception de la grille

$$I_G = D_f S_f (3I_0) \quad (\text{III.23})$$

où :

D_f : facteur de décroissance pour la durée du défaut t_c ;

S_f : facteur de division du courant de défaut ($S_f=1$).

Bien que la valeur 6814 A du courant de défaut dans la barre de 13 kV est supérieure à celle 3180 A du courant de défaut dans la barre de 115 kV, il est rappelé (de l'article 15 de la norme IEEE 80) que l'enroulement de mise à la terre en étoile du transformateur de 13 kV est une source locale de courant de défaut et ne contribue pas dans l'EPT. Ainsi, le courant de grille maximal est basée sur 3180 A. En effet : $I_G = (1)(1)(3180) = 3180$ A.

- **Etape 7 : Elévation du potentiel de terre (EPT)**

Si, après la conception préliminaire, l'EPT (Elévation du Potentiel de terre) est au-dessous de la tension de contact tolérable, aucune analyse approfondie n'est nécessaire. La conception préliminaire a besoin seulement des améliorations exigées permettant de relier les équipements au système de mise à la terre. Notons que l'EPT est liée à I_G par la relation :

$$\text{EPT} = I_G R_g \quad (\text{III.24})$$

Dans notre cas, $\text{EPT} = 3180 \times 2,78 = 8840,4$ V

Il est clair que cette dernière valeur (8840,4 V) dépasse de loin 838 V, déterminée dans l'étape 3 comme étant valeur maximale permise, ($V_{T_{\max 70}}$) de la tension de contact.

- **Etape 8 : Tensions de maille et de pas**

Nous rappelons que par définition la tension de maille est le maximum de la tension de contact.

Les calculs de la tension de maille et celle de pas, relatives à la grille, peuvent être évaluées en utilisant les équations suivantes :

$$V_M = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L_M} \quad (\text{III.25})$$

$$V_S = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L_s} \quad (\text{III.26})$$

avec :

L_M : longueur totale des conducteurs et piquets enterrés $L_M = L_C + L_R$ (m) ;

L_C : longueur totale des conducteurs (m) ;

L_R : longueur totale des piquets de terre (m) ;

K_m : facteur de correction géométrique du circuit permettant de déterminer la tension de maille, donné par l'équation suivante :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{D^2}{16ed} + \frac{(D+2+e)^2}{8De} - \frac{e}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[\frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \right] \quad (\text{III.27})$$

où :

K_{ii} est donnée par l'équation (III.28) :

$$K_{ii} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} & \text{sans piquets} \\ \text{et} & \\ 1 & \text{avec piquets} \end{array} \right\} \quad (\text{III.28})$$

Par ailleurs, K_h est tel que :

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{e}{e_0}} \quad (\text{III.29})$$

e : profondeur d'enfouissement (m) ;

$e_0 = 1$ m : profondeur de référence (m) ;

D : espacement entre les conducteurs parallèles de la grille (m) ;

n : facteur géométrique ;

d : diamètre des conducteurs de la grille (m) ;

K_s : facteur de correction géométrique du circuit permettant de déterminer la tension de pas pour des profondeurs de la grille ne dépassant pas 2,5 m est donné par :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{1}{2e} + \frac{1}{D+e} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2})} \quad (\text{III.30})$$

K_i : coefficient d'irrégularité de la grille exprimé par la relation suivante :

$$K_i = 0,644 + 0,148n \quad (\text{III.31})$$

n : facteur géométrique déterminé par l'équation suivante :

$$n = n_a \times n_b \times n_d \times n_c \quad (\text{III.32})$$

où :

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} \quad (\text{III.33})$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad (\text{III.34})$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \times L_y}{A} \right]^{\frac{0.7 \times A}{L_x L_y}} \quad (\text{III.35})$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (\text{III.36})$$

A : surface de la grille (m^2) ;

L_p : longueur périphérique de la grille (m) ;

L_x : longueur maximale de la grille en direction de x(m) ;

L_y : longueur maximale de la grille en direction de y(m) ;

L_s : longueur efficace enfouie dans la terre pour une grille (avec ou sans piquets), donnée par :

$$L_s = 0,75 \times L_c + 0,85L_R \quad (\text{II.37})$$

Dans ce qui suit, nous allons faire une application numérique dans le cas de la grille carrée que nous avons adoptée. Nous commençons par calculer le facteur géométrique n donnée par l'équation (III.32). Pour cela, nous déterminons :

$$n_a = \frac{2Lc}{Lp} = \frac{2 \times 1540}{280} = 11$$

$n_b = 1$ pour grille carrée

$n_c = 1$ pour grille carrée

$n_d = 1$ pour grille carrée

$$n = 11 \times 1 \times 1 \times 1 = 11$$

Par ailleurs :

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} = \frac{1}{(2 \times 11)^{2/11}} = 0,57$$

et

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} = \sqrt{1 + \frac{0,5}{1,0}} = 1,225$$

D'où le facteur de correction géométrique du circuit permettant la détermination de la tension de maille :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{7^2}{16 \times 0,5 \times 0,01} + \frac{(7 + 2 + 0,5)^2}{8 \times 0,5 \times 7} - \frac{0,5}{4 \times 0,01} \right] + \frac{0,57}{1,225} \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \times 11 - 1)} \right] \right]$$

$$= 0,86$$

et le coefficient d'irrégularité de la grille donnée par l'équation (III.31) :

$$K_i = 0,644 + 0,148 \times n = 0,644 + 0,148 \times 11 = 2,272$$

D'où la tension de maille donnée par l'expression (III.25):

$$V_M = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M} = \frac{400 \times 3180 \times 0,86 \times 2,272}{1540} = 1613,88V$$

Nous remarquons que $V_M (= 1613,88 \text{ V})$ est supérieure à $V_{T_{\max 70}} (= 838,2 \text{ V})$, ce qui exige l'amélioration de la conception initiale.

Le facteur de correction géométrique du circuit permettant la détermination de la tension de pas est :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times 0,5} + \frac{1}{7 + 0,5} + \frac{1}{7} (1 - 0,5^{11-2}) \right] = 0,41$$

et la longueur efficace enfouie dans la terre est :

$$L_s = 0,75 \times 1540 = 1155 \text{ m}$$

D'ou la tension de pas :

$$V_S = \frac{400 \times 0,41 \times 2,272 \times 3180}{1155} = 1016,66 \text{ V}$$

Nous remarquons, cette fois à, que $V_S (= 1016.66 \text{ V}) < V_{S_{\max 70}} (= 2686.6 \text{ V})$.

Les mêmes étapes ont été appliquées pour les autres formes de la grille de prise à la terre à savoir, rectangulaire, en L et en U. Les résultats obtenus sont données dans le tableau (III.4).

Forme de la grille	Facteur de réduction C_s	Tension maximale de pas admissible $V_{S_{\max 70}} \text{ (V)}$	Tension de contact maximale permis $V_{T_{\max 70}} \text{ (V)}$	Elévation du potentiel de terre EPT (V)	Résistance de terre calculée (Ω)	Tension de pas $V_S \text{ (V)}$	Tension de maille $V_M \text{ (V)}$
Carrée	0,743	2686,6	838,2	8840,4	2,78	1016,66	1613,88
Rectangulaire	0,743	2686,6	838,2	8808,6	2,77	969,4609	1552,7
en L	0,743	2686,6	838,2	8808,6	2,77	1063,1	1667,8
en U	0,743	2686,6	838,2	8776,8	2,76	1012,6	1595
Étapes		étape 3		étapes 5 à 7		étape 8	

Tableau III.4 : Comparaison des résultats pour les différentes grilles utilisant le guide IEEE

D'après ce tableau, nous constatons que

- ✓ Les valeurs de l'EPT et de la résistance de terre, les plus faibles sont obtenues dans le cas de la grille en forme (U), relativement aux autres formes.
- ✓ le facteur de réduction C_s , la tension maximale de pas admissible et la tension maximale de pas admissible sont indépendants de la forme de la grille.
- ✓ la tension de pas V_S est inférieure à la tension de pas maximale admissible, et ce pour toutes les formes choisies.
- ✓ Pour les quatre formes adoptées, la tension de maille V_M est supérieure à la tension de contact maximale admissible.
- ✓ La tension de contact la plus basse est obtenue lors de l'utilisation d'une grille rectangulaire pour une même superficie. Cette forme est plus adaptée à une telle sous-station car elle présente en générale les meilleurs résultats.

- **Etape 9 et 10 : comparaisons entre différentes tensions**

Si, les deux tensions de contact et de pas sont au-dessous des celles maximales, la conception a besoin seulement des améliorations exigées pour relier les équipements au système. Sinon, une modification de l'espacement de conducteurs (la taille des mailles, l'adjonction de piquets, la profondeur du circuit de terre, etc.) devrait être faite.

- **Etape 11 : amélioration de la configuration initiale**

Si, la vérification des tensions exige des modifications, la révision de la conception de grille est nécessaire. Ces révisions peuvent se faire sur l'espacement des conducteurs, pour satisfaire les limites des tensions de pas et de contact.

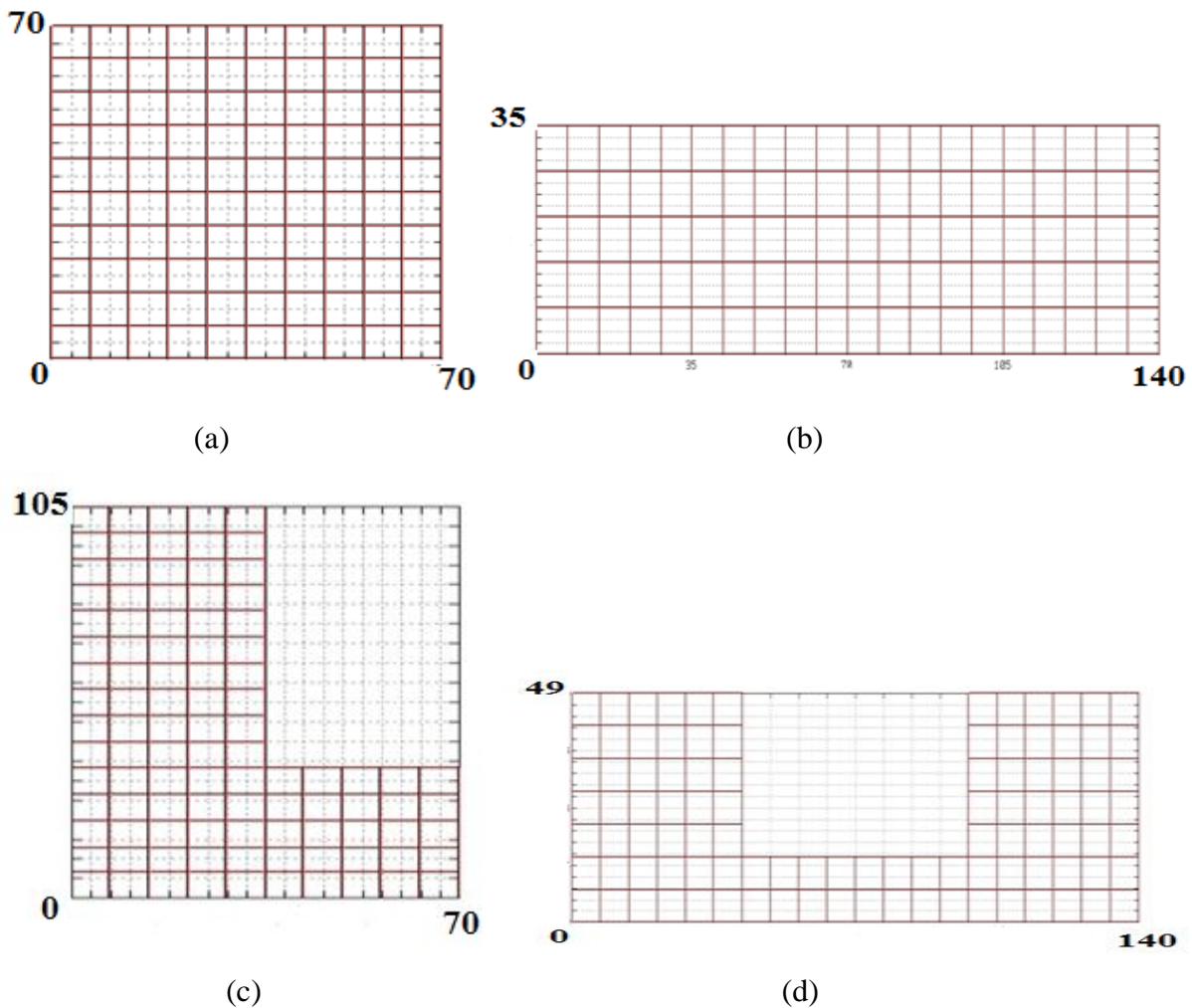
- **Etape 12 : configuration finale**

En respectant les limites des tensions de pas et de contact, la conception finale peut être réalisée.

III.3.2. Principe de conception d'un réseau de terre selon CYMGrd

III.3.2.1 Configuration de base

Afin de comparer nos résultats concernant les tensions maximales (de contact et de pas autorisées), l'EPT, le facteur de réduction C_s et la résistance de la grille R_g , à ceux obtenus en utilisant le guide IEEE 80-2000, nous considérons les quatre configurations de base ayant une même surface (4900 m^2), et même nombre (100) et même forme (carrée de 7m de côté) de mailles. Ces quatre configurations sont représentées sur la figure (III.9).



(a) Grille carrée (70 m x 70) m

(c) Grille en L

(b) Grille rectangulaire 140 m x 35 m

(d) Grille en U

Figure III.9 : Représentation des différentes configurations de la grille de surface de 4900 m^2

Les données d'une telle conception sont montrées dans le tableau (III.5) suivant.

Poids corporel	70 kg
Résistivité de la couche superficielle du sol (pierre concassée)	2500 Ω m
Épaisseur de la couche superficielle	0,102 m
Durée du choc	0,5 s
Résistivité uniforme du sol	400 Ω m
Courant de défaut LG	3180 A
Facteur de coupure S_f	1
Matériau conducteur	Cuivre dur allié
Température ambiante	40 °C
Diamètre des conducteurs	0,01 m

Tableau III.5: Données de conception des grilles de surface 4900 m² sans piquets

Les résultats obtenus en utilisant le code CYMGrd sont donnés dans le tableau (III.6)

Modèle de la grille	Facteur C_s de réduction	Tension maximale de pas admissible (V)	Tension de contact maximal permis (V)	Élévation du potentiel de terre (V)	Résistance de terre calculée (Ω)	Potentiel de surface (V)	Tension de pas (V)	Tension de contact (V)
Carrée	0,742868	2696,13	840,56	8755,09	2,64268	8219,13	354,89	1955,03
Rectangulaire	0,742868	2696,13	840,56	7951,84	2,40016	7434,99	304,67	1823,38
en L	0,742857	2696,1	840,55	8165,39	2,46464	7659,14	313,63	5426,52
En U	0,742868	2696,13	840,55	7408,35	2,23608	6867,75	351,94	2559,72
Étapes		étape 3		étapes 5 à 7		étape 8		

Tableau III.6 : Comparaison des résultats lors de l'utilisation des différentes formes de grilles en utilisant le code CYMGrd

En comparant les tableaux (III.4) et (III.6), nous observons que les valeurs de la tension maximale de contact autorisée, la tension maximale de pas autorisée, le facteur de réduction du courant C_s , la résistance de la grille, et l'élévation de potentiel de terre (EPT) sont très proches. Ceci est prévisible, puisque le code de calcul CYMGrd se repose sur la

norme IEEE 80-2000. Par ailleurs une nette différence à été constatée dans le calcul de la tension de contact et celle de pas.

Sur la figure (III.10), nous illustrons les diagrammes de contour de potentiel en 3D représentant la tension de contact obtenue lors de l'utilisation des différentes formes de la grille.

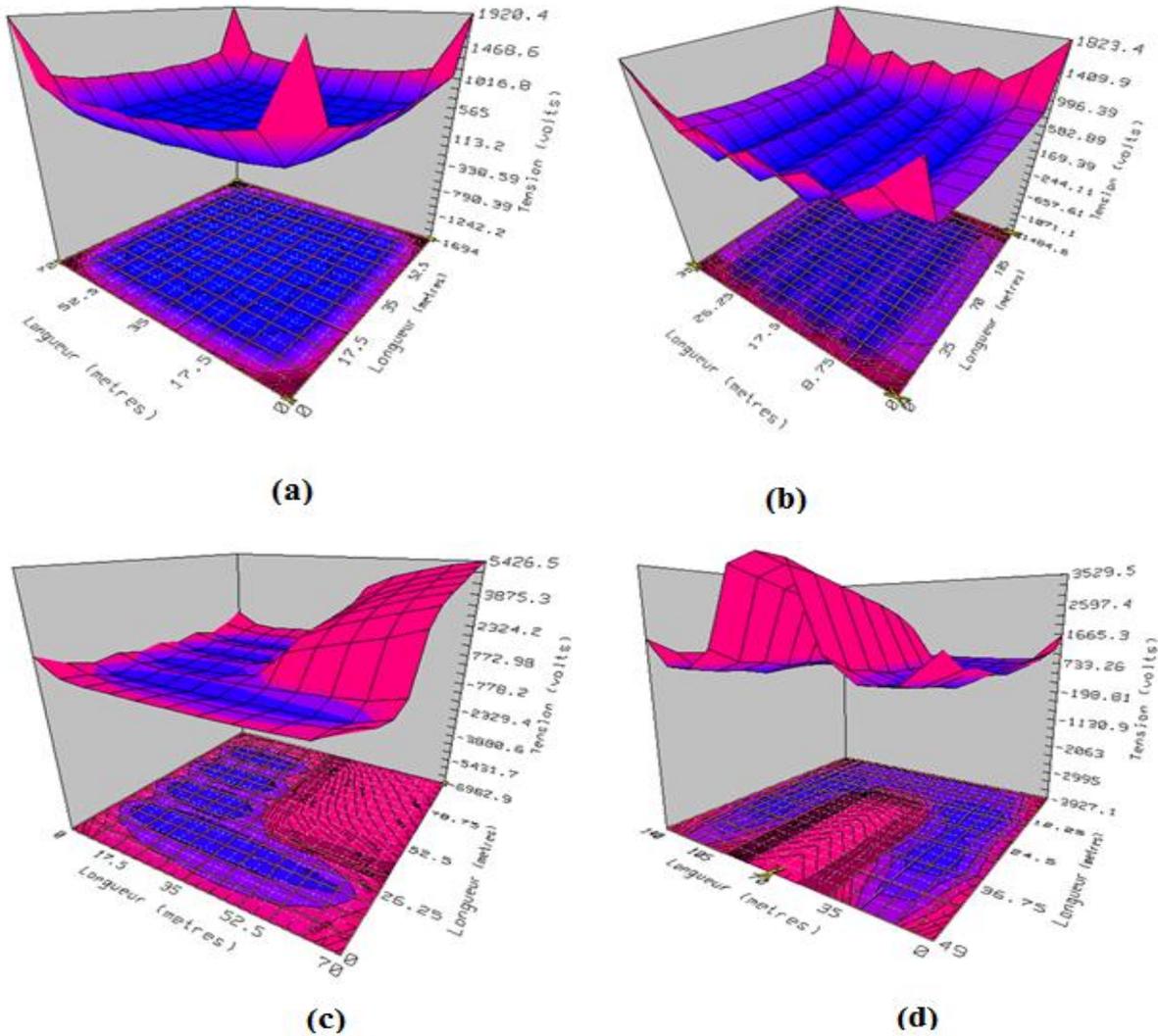


Figure III.10 : Diagramme de contour de potentiel en 3D :

- (a) Grille carrée
- (b) Grille rectangulaire
- (c) Grille en L
- (d) Grille en U

La figure III.10 nous montre que la tension, dans les quatre coins de la grille, est supérieure à celle de contact tolérable ($V_{T \max} = 838,2 \text{ V}$). Chose qui nous mène à modifier cette conception. Pour cela nous rajoutons des piquets placés d'une manière alternée, autour

du périmètre de la grille. Avec le rajout de ces derniers, la tension de contact est devenue inférieure à celle de contact tolérable.

Étant donné que la tension du coin des mailles calculée, dans le cas de la configuration améliorée, est inférieure à la tension tolérable de contact ($652 \text{ V} < 838.2 \text{ V}$), nous pouvons exécuter les étapes restantes (10 à 12).

III.4. Conclusion

La méthode algorithmique, basée sur les éléments finis, permet à CYMGRD d'analyser les systèmes de mise à la terre d'agencement symétrique ou non, avec ou sans piquets.

Pour les mêmes caractéristiques d'une grille de mise à la terre, considérée par la norme IEEE 80-2000, nous avons comparé dans le cas où le sol est homogène, nos résultats, concernant l'élévation du potentiel, la résistance de la terre, les tensions maximales de contact et de pas, à ceux trouvés en utilisant la norme IEEE 80-2000. Une très bonne concordance a été obtenue.

IV.1. Introduction

L'ouvrage de LABREG (situant à la wilaya de Khenchela) consiste en une centrale à turbine à gaz (TG) d'une puissance nominale d'environ 2×140.5 MW. Son système de mise à la terre (Figure IV.1), déjà existant, est très complexe et coûteux. Cette présente étude est faite dans le but de trouver à la dite centrale, un autre système de mise à la terre à la fois, simple, performant, optimisé et moins coûteux.

En se basent sur les caractéristiques réelles de la centrale de LABREG d'une part (établies à partir des paramètres contractuels imposés par la SONELGAZ en se basant sur un cahier de charge), et sur les mesures réelles de la résistivité du sol d'autre part, et en utilisant le code de calcul CYMGrd, nous proposons plusieurs systèmes (grilles de différentes formes : rectangulaire et en L) de mise à la terre à la dite centrale. A partir de la forme présentant les meilleurs résultats (faibles valeurs de la tension de pas, la tension de contact, l'élévation du potentiel, etc.), nous proposons un système optimisé ne présentant pas de risque ou de zones dangereuses, en jouant plus particulièrement sur le maillage et en éliminant les parties inutiles.

IV.2. Présentation succincte de l'ouvrage énergétique de LABREG

Dans cette section, nous présentons brièvement l'ouvrage énergétique de LABREG, le fonctionnement des différents organes qui le composent, ses équipements, ses différents niveaux de tension ainsi que ses différents régimes de neutre.

IV.2.1. Situation géographique et Superficie de la centrale de LABREG:

✓ Les limites :

Au Nord : Terrain vague

Au Sud : Terrain vague

A l'Est : Terrain vague

A l'Ouest : Terrain vague

✓ Coordonnées géographiques

Latitude : $34^{\circ}30'14,43''$ N

Longitude : $6^{\circ}58'47,45''$ E

✓ **Wilaya plus proches :**

- TEBESSA
- BATNA

IV.2.2. Equipements et Données de base :

La centrale à turbine à gaz (TG) de LABREG, d'une puissance nominale d'environ 2×140.5 MW, est constituée de deux tranches identiques de production d'électricité. Chaque tranche est composée par les équipements suivants :

✓ Une turbine à combustion utilisant le gaz naturel et le fuel liquide comme combustible.

- Type de centrale : Turbine à gaz ;
- Nombre de groupes : 02 ;
- Puissance totale : 2×140.5
- Combustible principal : Gaz Naturel ;
- Combustible de secours : Fuel (Stockage pour une autonomie de 6 jours) ;
- Localisation : LABREG (Wilaya de Khenchela);
- Evacuation de l'énergie : vers le poste 220 kV de LABREG.

✓ Un alternateur synchrone.

✓ Les auxiliaires mécaniques nécessaires au groupe turbo-alternateur :

- Système d'admission d'air ;
- Pompage et filtration de fioul ;
- Système gaz ;
- Protection incendie groupe ;
- Système d'admission d'air et d'échappement de gaz chauds y compris la cheminée ;
- Système de refroidissement du groupe turbo-alternateur.

✓ Les auxiliaires électriques du groupe turbo-alternateur :

- Transformateur principal ;
- Disjoncteur principal ;
- Transformateur de soutirage ;

- Centre de contrôle des moteurs.

- ✓ Les auxiliaires mécaniques en communs entre les deux tranches :
 - Lavage du compresseur TG à l'arrêt et en fonctionnement ;
 - Poste gaz ;
 - Protection incendie site ;
 - Traitement d'eau ;
 - Système d'air comprimé ;

- ✓ Les auxiliaires électriques en communs entre les deux tranches :
 - Transformateur des auxiliaires site ;
 - Un tableau moyen tension ;
 - Un groupe électrogène 6.6 kV ;
 - Un tableau d'alimentation alternative basse tension ;
 - Un tableau d'alimentation courant continu ;
 - Un système d'alimentation permanent.

- ✓ Les équipements de contrôle "commande et informatique" :
 - Un speedtronic mark VIe pour la commande globale et supervision auxiliaires site ;
 - Un speedtronic mark VIe dédié au contrôle commande de la TG et ses auxiliaires ;
 - Un système d'analyse de vibration ;
 - Un système d'analyse des fumées ;
 - Un oscilloperturbographe.

IV.2.3. Régimes du neutre et niveaux de tension dans l'ouvrage énergétique de LABREG :

IV.2.3.1. Régimes du neutre utilisés en haute tension

a. Mise à la terre par neutre isolé : Il n'existe aucune liaison électrique intentionnelle entre le point neutre et la terre, à l'exception des appareils de mesure ou de protection. C'est

une solution souvent utilisée pour les réseaux industriels nécessitant la continuité de service [Schneider, 2008].

b. 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. [Sautriau, 1991 ; Schneider, 2008].

c. 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 [M. Gerin, 2005].

IV.3.3.2. Niveaux de tension

Le schéma unifilaire représenté dans la figure IV.2 montre les différents niveaux de tension dans la centrale :

a. Niveau de tension 220 kV : Les bornes du point neutre des enroulements des transformateurs principaux de groupe sont reliées directement au réseau principal de la mise à la terre au moyen d'un sectionneur et d'un parafoudre.

b. Niveau de tension 15,5 kV: Le système est constitué par les jeux de barres sous gaines, l'alternateur, et le transformateur principal, le transformateur de soutirage et le disjoncteur de groupe. Le point neutre de l'installation est mis à la terre au moyen d'une résistance limitative de courant (environ 10 A). Pour le calcul du réseau de terre, le système est considéré isolé.

c. Niveau de tension 6 kV pour les tableaux M.T.: Les points neutres des enroulements secondaires des transformateurs de soutirage et des groupes électrogènes sont mis à la terre avec résistance limitant le courant à 600 A pour 10 s.

d. Niveau de tension 380 V pour les tableaux B.T: Les points neutres des enroulements secondaires des transformateurs auxiliaires sont isolés.

e. Niveau de tension 400/230 V pour le système d'éclairage: Les points neutres des enroulements secondaires des transformateurs d'éclairage sont mis à la terre.

f. Niveau de tension 230 V pour les systèmes de sécurité (onduleurs): Les systèmes sont isolés.

g. Niveau de tension 220 V courant continu: Les systèmes sont isolés.

h. Niveau de tension 48 V courant continu: Les systèmes sont isolés.

Les systèmes du point (b) au point (h) sont installés totalement dans le réseau de terre de la centrale. Toutes les parties métalliques des appareillages (les passerelles à câbles et leurs supports, tuyaux, bâches, structures, etc.) de ces installations, sont raccordées au réseau de la mise à la terre.

En cas de défaut de mise à la terre d'une installation isolée (avec le point neutre non lié à la terre), le réseau de mise à la terre pourvoit une route de retour à basse résistance, allant jusqu'au point neutre de l'installation concernée.

Pour les systèmes avec point neutre isolé, le courant de défaut qu'on doit considérer pour le dimensionnement des conducteurs de liaison au réseau de terre, est le courant de défaut biphasé (défaut de deux phases vers la terre). Dans ce cas aussi, le courant, entre les deux points de défaut, retourne par les conducteurs du réseau de terre.

Dans ces conditions, le passage du courant entre le réseau de terre et le terrain environnant est négligeable. En effet, aucun potentiel dangereux ne pourra se produire entre les structures et/ou parties métalliques des appareillages et le terrain environnant.

Dans le cas de défaut de mise à la terre des installations de 220 kV, les conditions sont complètement différentes, s'agissant dans ce cas d'un courant très élevé entre le réseau de mise à la terre et le terrain. Par conséquent, en ce qui concerne les tensions de pas et de

contact, on ne prendra en considération que le dérangement qui pourrait se produire sur l'installation de 220 kV.

Notons que dans ces divers secteurs (niveaux de tension de 220 kV, 15.5 kV, 6 kV et 0.4 kV), on doit concevoir des installations électriques en vue de limiter les risques liés à leur exploitation : électrocution des personnes et des animaux, avaries matérielles, dégradation de l'environnement, etc. Dans les sous-stations électriques de grande puissance, les surtensions engendrées par des défauts aléatoires tels que les courts-circuits ou les coups de foudre, pourraient atteindre, en l'absence de circuits de terre, des valeurs rédhibitoires. La fonction essentielle d'un circuit de terre consiste donc à limiter l'élévation du potentiel du sol à des valeurs admissibles.

IV.2.4. Données réelles du réseau de terre de l'ouvrage de LABREG

IV.2.4.1. Paramètres contractuels

Ces paramètres consistent en :

- ✓ durée de court-circuit : $t_f = 0.5$ s ;
- ✓ courant de court-circuit triphasé : $I_{cc} = 31.5$ kA ;
- ✓ Profondeur d'enfouissement du conducteur de terre : $e = 0.8$ m ;
- ✓ Résistance de réseau de terre $< 1 \Omega$.

IV.2.4.2. Hypothèses et paramètres de calculs

Les hypothèses sont fournies par le constructeur après étude du dossier relatif à la conception d'un réseau de terre basée sur les paramètres contractuels (contrat) :

- ✓ Epaisseur du matériau de surface (Gravier) : $e_s = 0.1$ m ;
- ✓ Résistivité du matériau de surface (Gravier) : $\rho_s = 4000 \Omega.m$;
- ✓ Nombre de départ lignes 220 kV : $n_a = 3$;
- ✓ Température maximale admissible par un conducteur en cuivre $T_m = 1083^\circ C$;
- ✓ Coefficient thermique de résistivité : $\alpha_r = 0.00393$;
- ✓ Facteur de chaleur spécifique : $TCAP = 3.422$ J/cm³/°C ;
- ✓ Température ambiante : $T_a = 40^\circ C$;
- ✓ Résistivité du conducteur à 20°C : $\rho_r = 1.7241 \mu\Omega/cm^3$;
- ✓ Coefficient thermique de conductivité du conducteur à 0°C : $K_0 = 234$;

- ✓ Poids de la victime : 50 kg ;
- ✓ Le courant maximal s'écoulant dans la grille : $I_G = 14900 \text{ A}$.

IV.3. Mesures de la résistivité du terrain environnant le système de mise à la terre de l'ouvrage de LABREG

Les mesures ont été effectuées par le constructeur dans plusieurs positions (p1 à p10) et à plusieurs profondeurs (1, 10 et 20 m). La méthode de mesure qui a été utilisée est celle de Wenner. Les valeurs de résistivité prise en considération pour l'élaboration du modèle du sol représentent la moyenne arithmétique de différentes valeurs mesurées dans les diverses positions susmentionnées, pour chaque profondeur. Les résultats de la mesure sont indiqués dans le tableau IV.1 [étude géotechnique LGE 007/S/2007] :

Profondeur (m)	p1	P2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	Moyenne (m)
1	30	60,3	8,8	7,54	142	33,9	106	14	117	11,9	53,06
10	9	10,5	21	16,1	15	14,4	14,7	6,8	11,2	12,8	13,18
20	7,7	7,3	11,1	10,5	11,5	7,52	7,07	6,1	6,97	10,7	8,64

Tableau IV.1 : Mesure de résistivités du terrain

IV.3. Configurations de mise à la terre proposées pour l'ouvrage énergétique de LABREG

Dans ce qui va suivre, nous proposons quelques grilles de mise à terre. Diverses formes et différents maillages ont été considérés. Le choix de telles configurations est effectué selon plusieurs critères (sécuritaire, économique, contractuel, etc.).

En se basant sur les différentes données réelles de l'ouvrage (paramètres de calculs contractuels et ceux fournis par le constructeur), et les mesures de la résistivité de terre, et en utilisant le code de calcul CYMGrd, nous simulons de tels systèmes et présentons les différents résultats correspondants.

IV.3.1. Première Configuration : Grille rectangulaire

IV.3.1.1. Présentation

Nous considérons une grille rectangulaire de la figure IV.2. Les dimensions adoptées pour la dite grille est de 435 m de longueur et 300 m de largeur. Ces dimensions correspondent exactement à celles réelles du système de mise à la terre de l'ouvrage de LABREG. Les paramètres de simulation supposés pour notre étude sont ceux présentés dans le paragraphe IV.3.

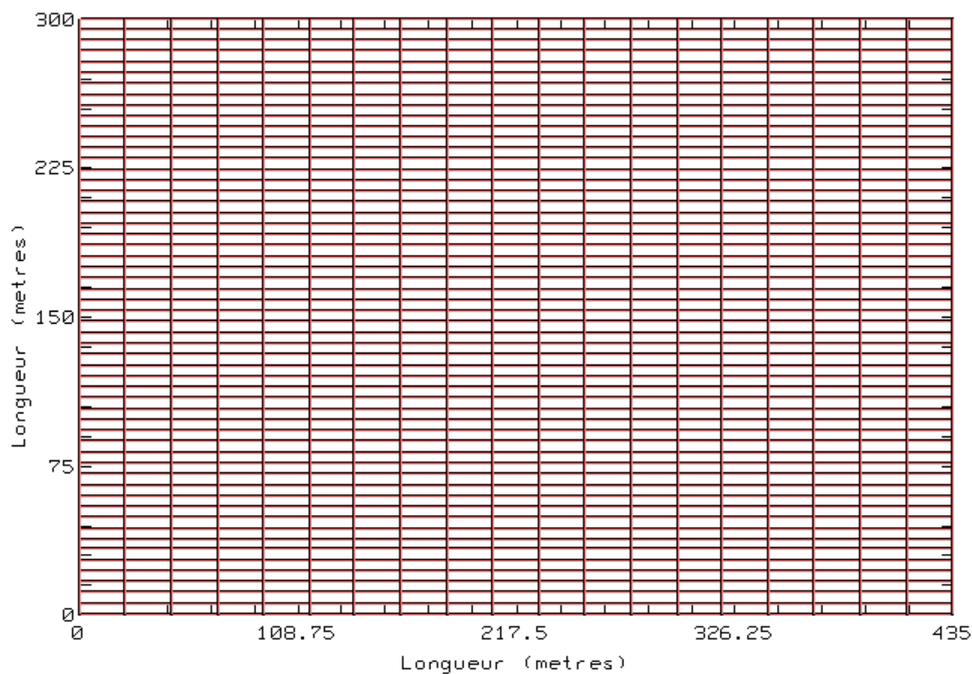


Figure IV.3: Première Configuration (Grille rectangulaire)

IV.3.1.2. Analyse du sol

En introduisant dans le code CYMGrd, les valeurs mesurées de la résistivité apparente du terrain ainsi que les différents paramètres (données réelles) caractérisant l'ouvrage en question, le module d'analyse du sol donne les résultats suivants :

- ✓ Epaisseur de la couche supérieure est 3.45 m ;

- ✓ Résistivité de la couche supérieure est 53.67 $\Omega.m$;
- ✓ Résistivité de la couche inférieure est 8.08 $\Omega.m$.

IV.3.1.3. Dimensionnement des électrodes

Le module dimensionnement des électrodes de terre donne les sections minimales des différents conducteurs de différents matériaux sélectionnés dans le code CYMGrd. Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau IV.2 [CYMGrd]. En outre de la section (Aire), ce tableau présente la température T_m de fusion et le coefficient K_F .

Matériau		T_m (°C)	K_F	Aire (mm ²)
Copper anneal soft-drawn	Cuivre Recuit doux	1083	7,00693	41,1765
Cuivre commercial dure (hard-drawn)	Cuivre commercial Dur	1084	7,06809	41,5359
Aluminum EC Grade	Aluminium Grade EC	657	12,1204	71,226
Aluminum 5005 Alloy	Alliage d'aluminium 5005	652	12,4188	72,9798
Aluminum 6001 ALLOY	Alliage d'aluminium 6001	654	12,4752	73,311

Tableau IV.2 : Section minimale des différents conducteurs selon [CYMGrd].

IV.3.1.4. Résultats de simulation :

Les différents résultats de simulation donnés par CYMGrd sont :

- ✓ Longueur totale des conducteurs primaires enterrée : 30360 m ;
- ✓ Résistance de terre calculée : $0.0125802 \Omega \ll 1\Omega$;
- ✓ Elévation du potentiel de terre : $EPT=206.376 \text{ V}$;
- ✓ Contact maximum permis : $V_{T \max 50}=177.26 \text{ V}$;
- ✓ Tension maximum de pas admissible : $V_{S \max 50}=216.88 \text{ V}$;
- ✓ Potentiels de surface : $V_{SURF}=178.97 \text{ V}$;
- ✓ Potentiels de pas : $V_S=9.17 \text{ V}$;
- ✓ Potentiels de contact : $V_T=76.6057 \text{ V}$.

Il est clair que les tensions de contact et de pas sont largement inférieures à celles de contact et de pas maximales admissibles ($V_T = 76.6057 \text{ V} \ll V_{T \max 50} = 177.26 \text{ V}$ et $V_S = 9.17 \text{ V} \ll V_{S \max 50} = 216.88 \text{ V}$). De même, la résistance de la grille est largement inférieure à celle exigée ($R_g = 0.0125 \Omega \ll 1 \Omega$). Par ailleurs, le diagramme de contour du potentiel de contact en 3D, représenté à la figure IV.4 montre qu'aucun dépassement n'est affiché. Dans ces conditions, le système ainsi proposé est sécurisé.

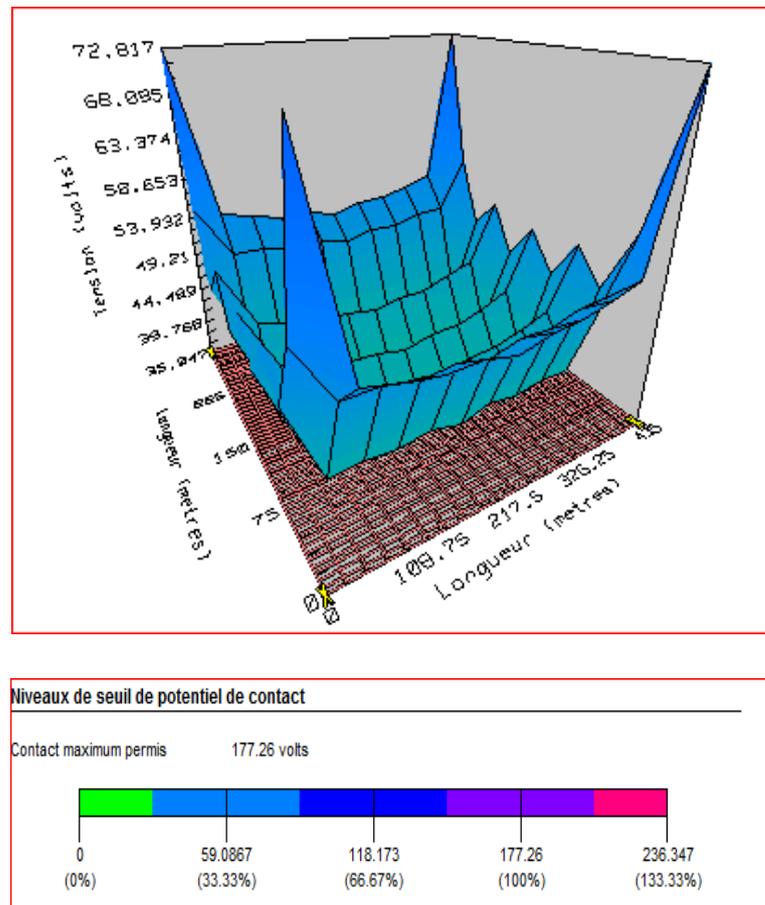


Figure IV.4 : Diagrammes de contour du potentiel de contact en 3D

IV.3.1.5. Effets de la longueur totale et de la profondeur de la grille

Bien que la grille rectangulaire proposée ne présente pas de zones à risque ou dangereuses, nous tenons quand même à étudier, dans cette section, l'effet de deux principaux paramètres à savoir la longueur totale des conducteurs et la profondeur sur le comportement de la grille rectangulaire de mise à la terre que nous avons proposée pour l'ouvrage énergétique de LABREG.

IV.3.1.5.1. Effet de la longueur totale de la grille

Pour la même grille, nous examinons l'influence de la longueur totale des conducteurs en cuivre sur l'élévation de potentiel (EPT), la résistance de la grille (R_g) et les tensions de pas (V_S) et de contact (V_T).

Pour cela, nous gardons les différents paramètres site en paragraphe (IV.2.3) et nous diminuons (graduellement) la quantité (et donc la longueur totale) du cuivre de 10% à 80% par palier de 10 % de la quantité (de la longueur) totale du cuivre utilisée dans la configuration initiale.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau IV.3. Notons qu'il est tout à fait évident que la variation de la longueur en question affecte le nombre total de mailles.

L'espace (D) entre les conducteurs parallèles est déterminé par la formule (III.21) citée au chapitre III. Les résultats ainsi trouvés sont représentés dans le tableau (IV.3) suivant.

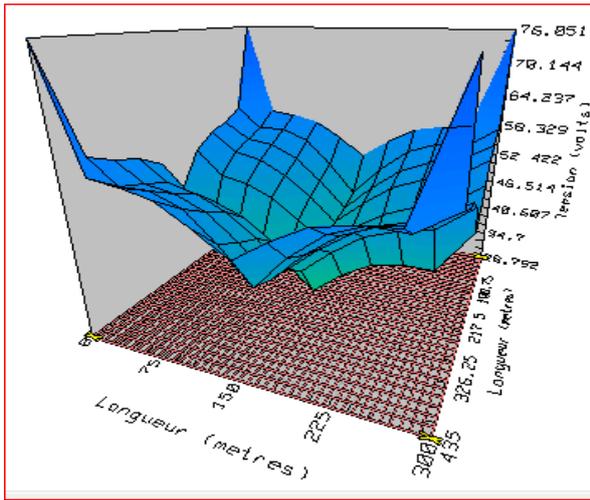
%	L_T (m)	D (m)	R_G (Ω)	EPT (V)	V_{SURF} (V)	V_S (V)	V_T (V)
0	30360	x=7,8 ; y=15	0.0125802	206.376	178.97	9.17	76.6057
10	27324	9.82	0.0128674	211.087	182.14	9.77	85.9074
20	24288	11.10	0.0131539	215.788	180.43	10.11	92.3376
30	21252	12.72	0.0135341	222.024	190.16	10.87	100.734
40	18216	14.90	0.0140467	230.433	194.36	10.81	111.413
50	15180	18.00	0.0147266	241.587	196.46	13.24	124.247
60	12144	22.90	0.0158032	259.248	219.94	17.34	143.528
70	9108	31.20	0.0176343	289.288	212.90	15.47	174.838
80	6072	48.90	0.0213710	350.586	295.09	30.21	236.416

Tableau IV.3 : Variation des différents paramètres en fonction de la longueur totale des conducteurs

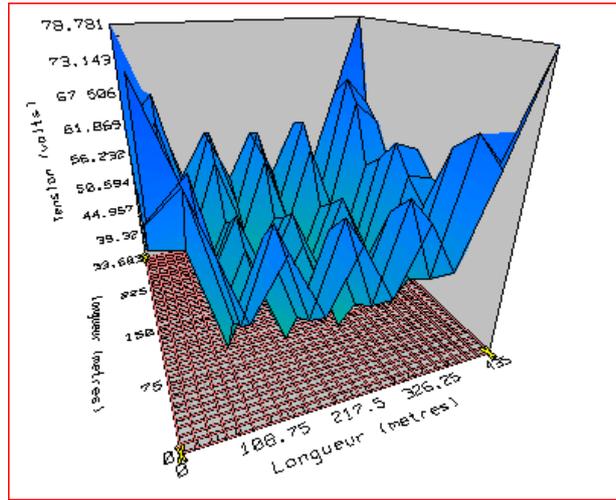
Ce tableau nous montre que la diminution de la longueur totale des conducteurs enfouis dans la terre, engendre l'augmentation de tous les paramètres de simulation. Cependant, les tensions de contact et de pas maximales admissibles restent invariables, car elles sont indépendantes de la longueur totale des conducteurs de terre.

Nous observons également que nous pouvons à priori diminuer la longueur du cuivre utilisé dans la conception initiale de notre réseau de terre (grille rectangulaire) tant que les tensions de pas et de contact restent strictement inférieures à celles admissibles permises et la résistance de la grille demeure également inférieure à 1 Ω . En effet, la longueur critique pour laquelle le système de terre reste sécurisé (ne présente pas de danger) est de 9108 m correspondant à un taux d'enlèvement de conducteurs de 70%.

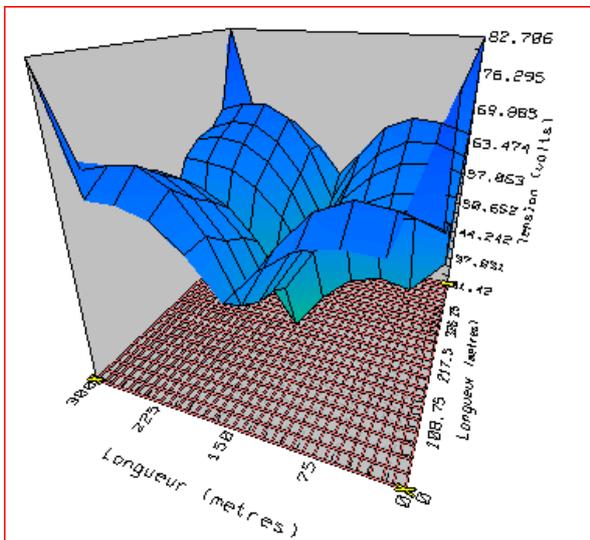
Dans le but de confirmer ces résultats, nous présentons sur la figure IV.5, les différents diagrammes de contour du potentiel du contact en 3D pour différents longueurs de conducteurs (variant de 10% à 80% par pas de 10%). La codification couleur du code de calcul CYMGrd montre bien que la tension de contact obtenue pour une diminution de 80% de longueur totale des conducteurs de terre est supérieure à celle admissible permise.



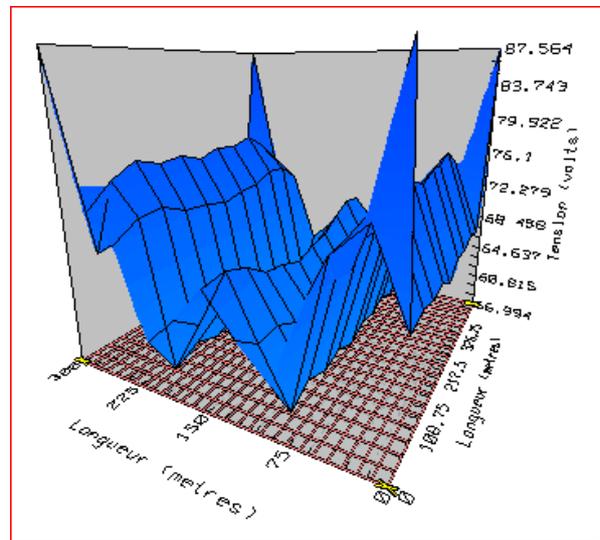
(a) Diminution de 10%



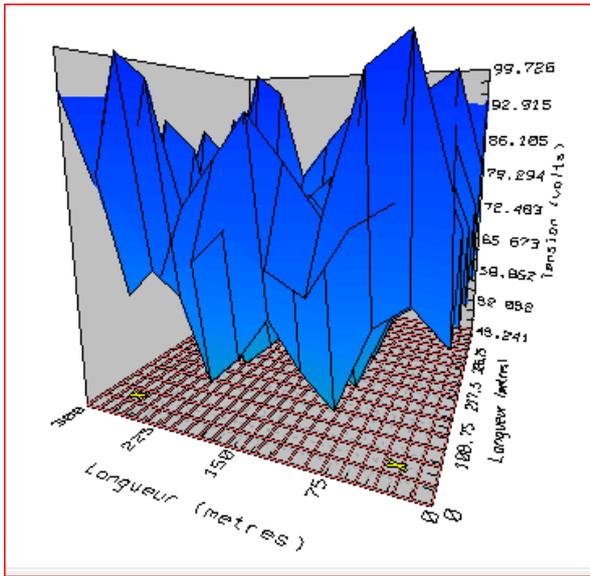
(b) Diminution de 20%



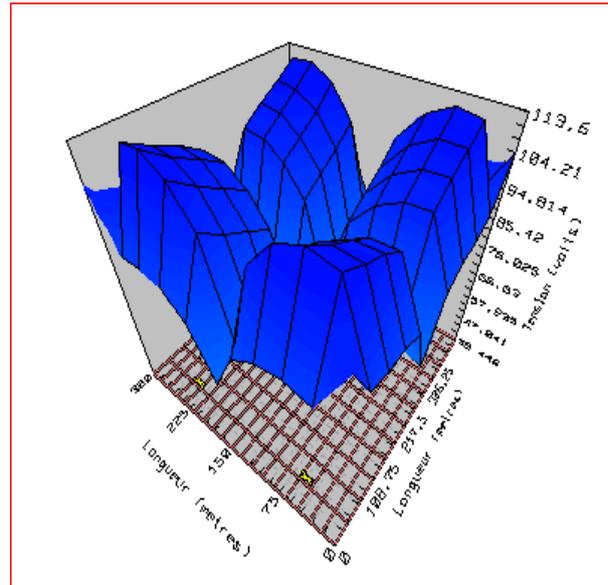
(c) Diminution de 30%



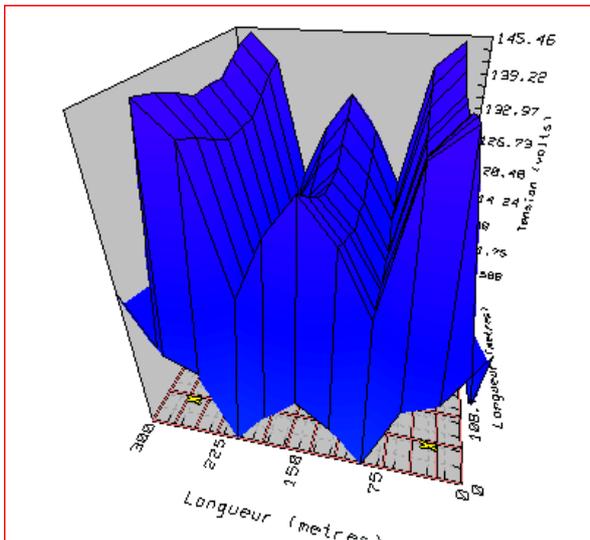
(d) Diminution de 40%



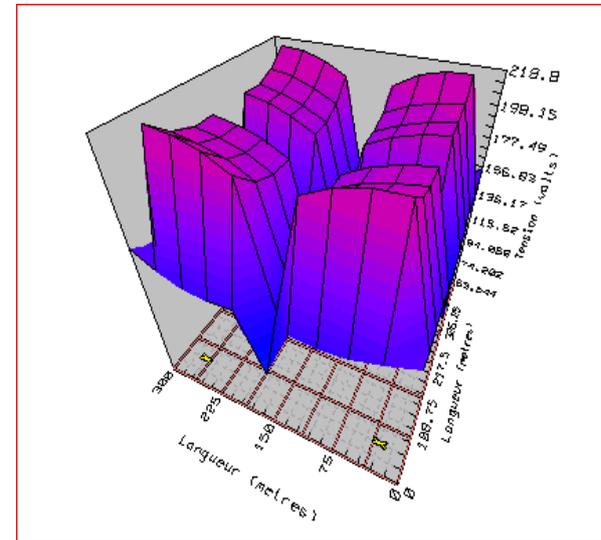
(e) Diminution de 50%



(f) Diminution de 60%



(g) Diminution de 70%



(h) Diminution de 80%

Figure IV.5 : Diagrammes de contour du potentiel de contact en 3D

Nous traçons maintenant les différentes caractéristiques (Figures IV.6 à IV.10) donnant la variation de l'élévation du potentiel de terre, la résistance de la grille, la tension de pas et celle de contact en fonction de la longueur totale de la grille de terre.

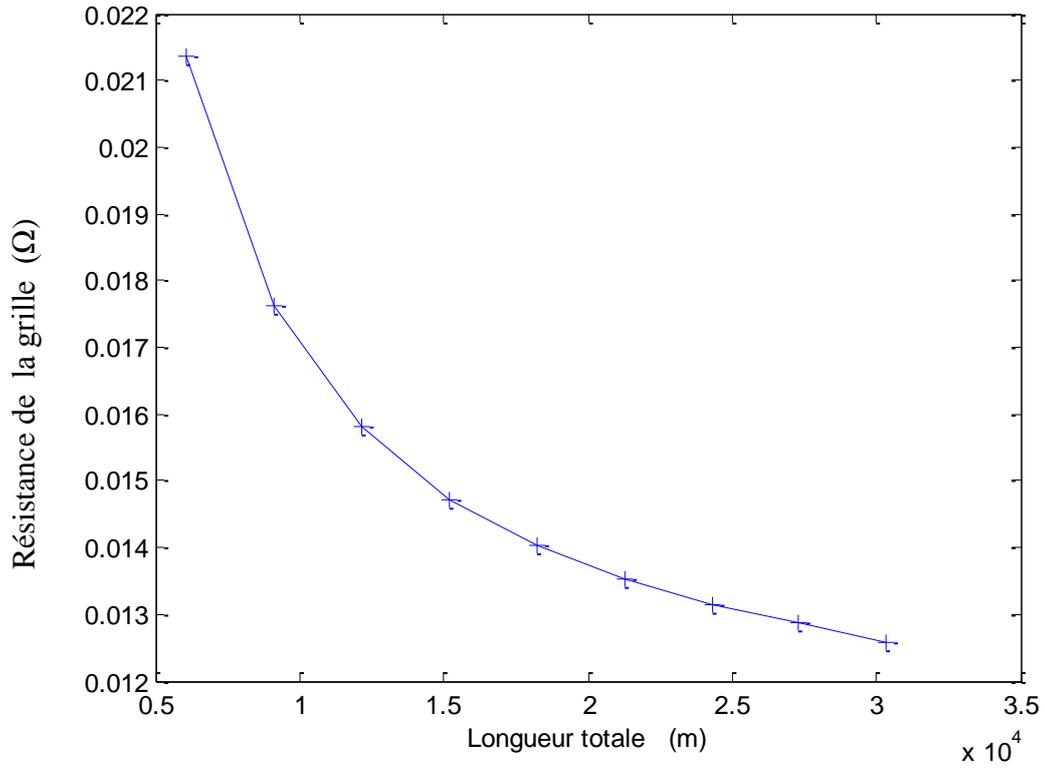


Figure IV.6 : Résistance de la grille en fonction de la longueur totale

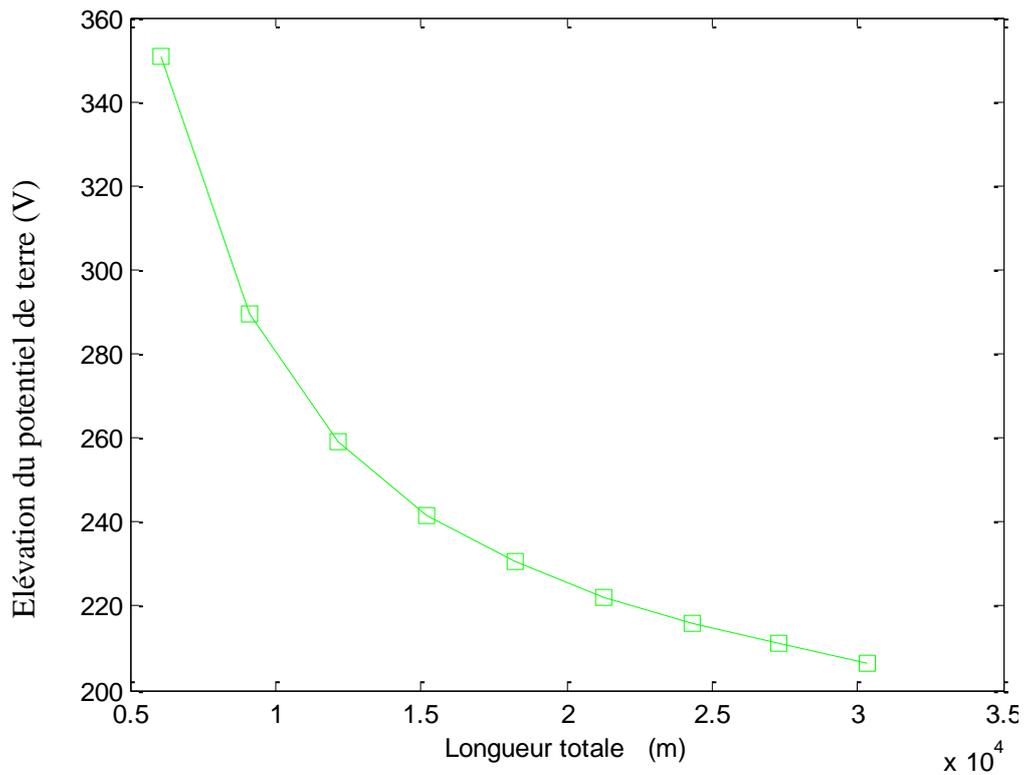


Figure IV.7 : Elévation du potentielle de terre en fonction de la longueur totale

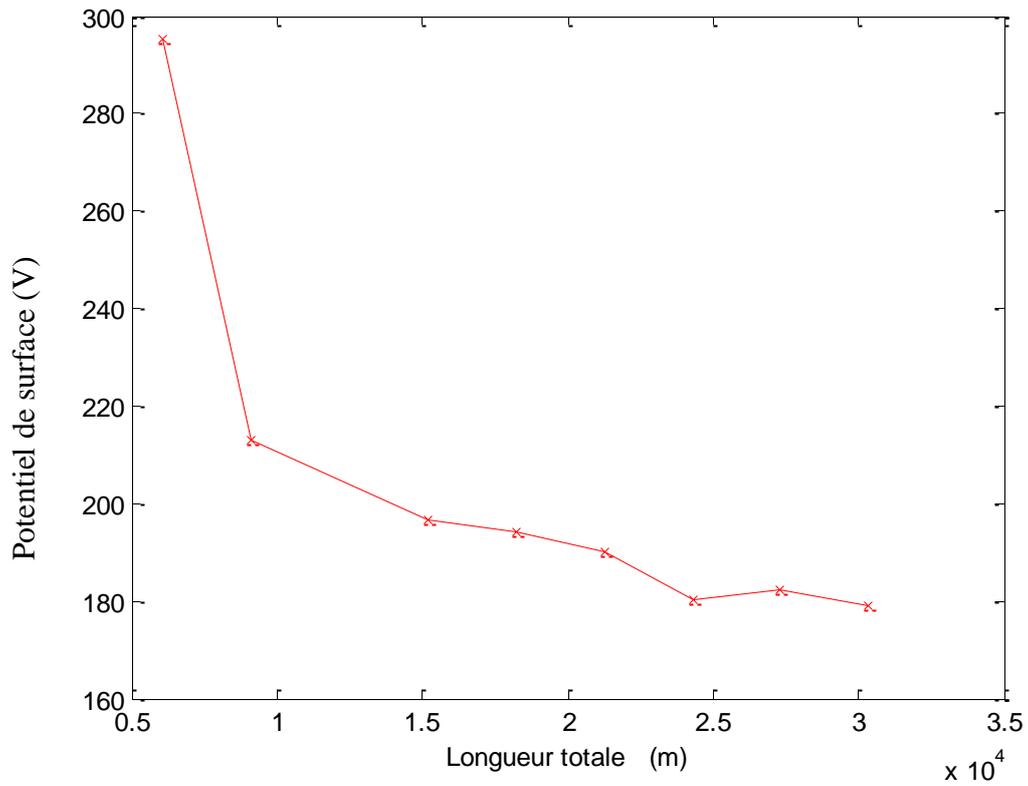


Figure IV.8 : Potentiel de surface en fonction de la longueur totale

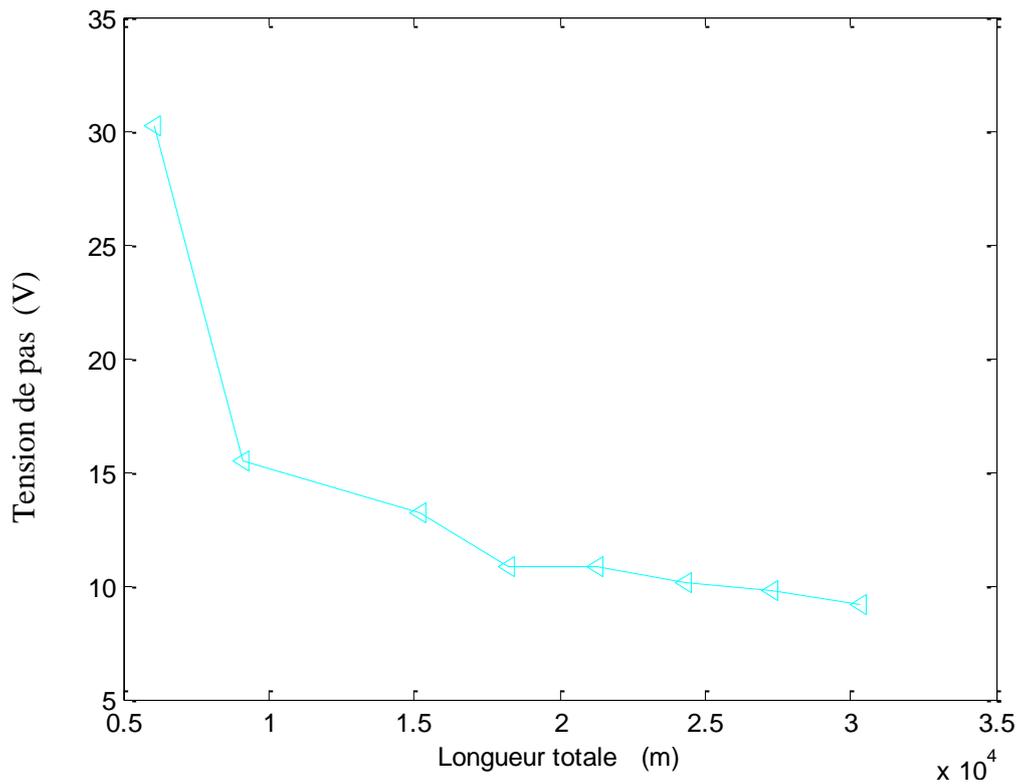


Figure IV.9 : Potentiel de pas en fonction de la longueur totale

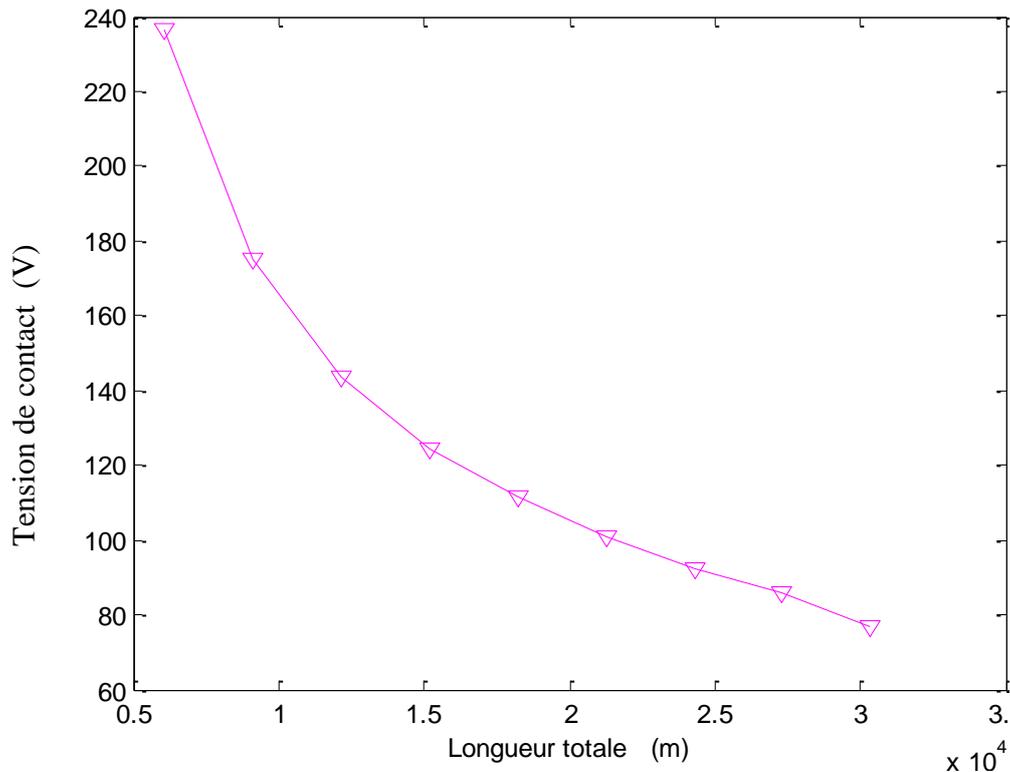


Figure IV.10 : Potentiel de contact en fonction de la longueur totale

D'après le tableau IV.3 et les figures IV.6 à IV.10, nous pouvons conclure qu'avec l'augmentation de la longueur totale des conducteurs (et donc l'augmentation du nombre de mailles) la résistance de la grille de terre, l'élévation du potentiel de terre, ainsi que les tensions de contact et de pas diminuent pour les longueurs inférieures à 20000 m, et lentement ailleurs. Les grandeurs électriques susmentionnées tendent vers un palier constant.

IV.3.1.5.2. Effet de la profondeur du réseau de terre

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à étudier l'effet de la profondeur selon laquelle la grille rectangulaire est enfouie sur le comportement de celle-ci. Conformément à la norme IEEE 80-2000, nous avons adopté les profondeurs comprises entre 0.25 m et 2.5 m. La longueur totale des conducteurs choisie est celle critique ($L_{TC}=9108$) ; les autres paramètres demeurent invariables.

Les résultats trouvés dans ces conditions sont représentés dans le tableau IV.4 et sur les figures (IV.11) à (IV.15).

e (m)	$R_G(\Omega)$	EPT (V)	$V_{SURF}(V)$	$V_S(V)$	$V_T(V)$
0.25	0.0190746	312.915	248.21	41.34	198.205
0.40	0.0183771	301.472	231.17	26.28	186.732
0.60	0.0179518	294.496	221.25	20.02	179.866
0.80	0.0176343	289.288	212.91	15.47	174.838
1.00	0.0173735	285.008	205.78	12.52	170.818
1.20	0.0171461	281.278	199.22	10.61	167.398
1.40	0.0169393	277.885	193.51	9.12	164.315
1.80	0.0165567	271.609	183.56	6.58	158.869
2.00	0.0163692	268.533	179.86	6.20	156.263
2.40	0.0159762	262.087	172.82	5.00	150.947

Tableau IV.4 : Variation des différents paramètres en fonction de la profondeur de la grille de terre

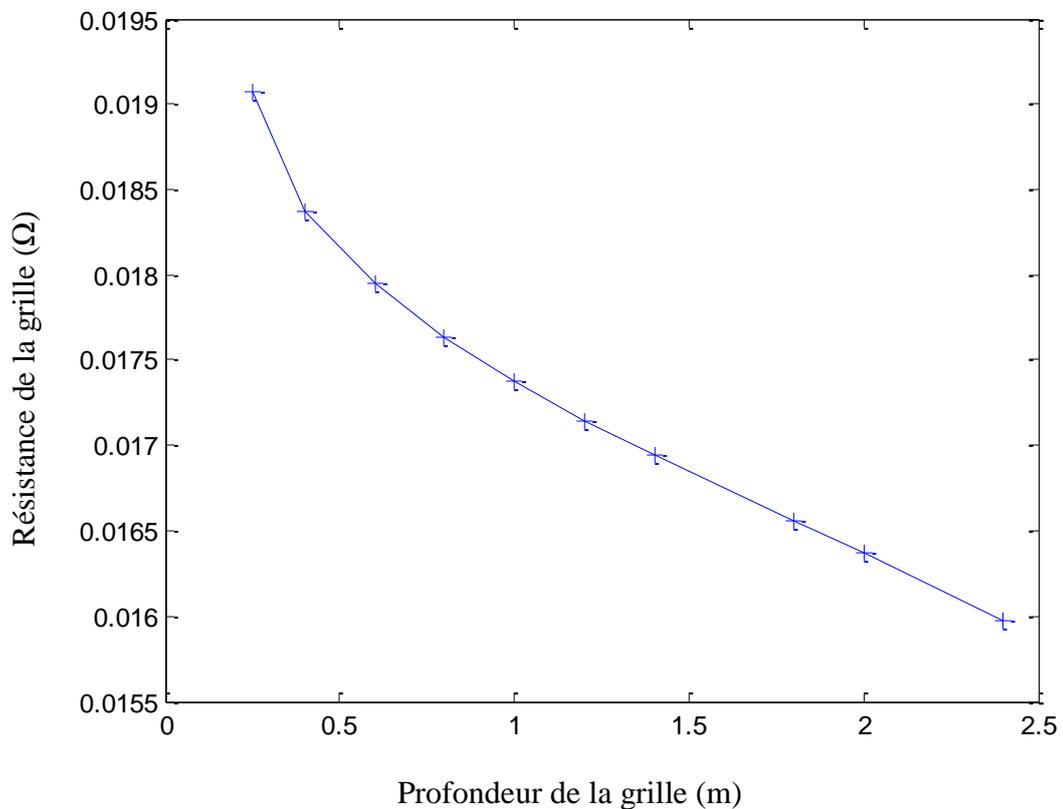


Figure IV.11 : Résistance de la grille en fonction de la de la profondeur

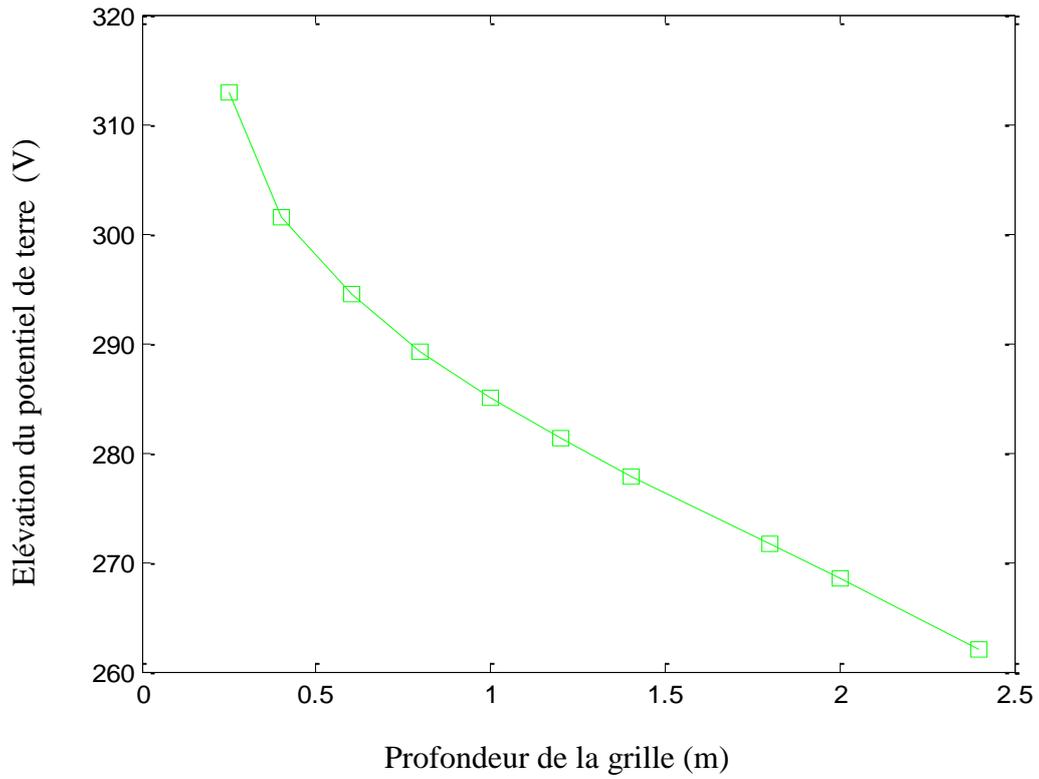


Figure IV.12 : Elévation de potentiel de terre en fonction de la de la profondeur

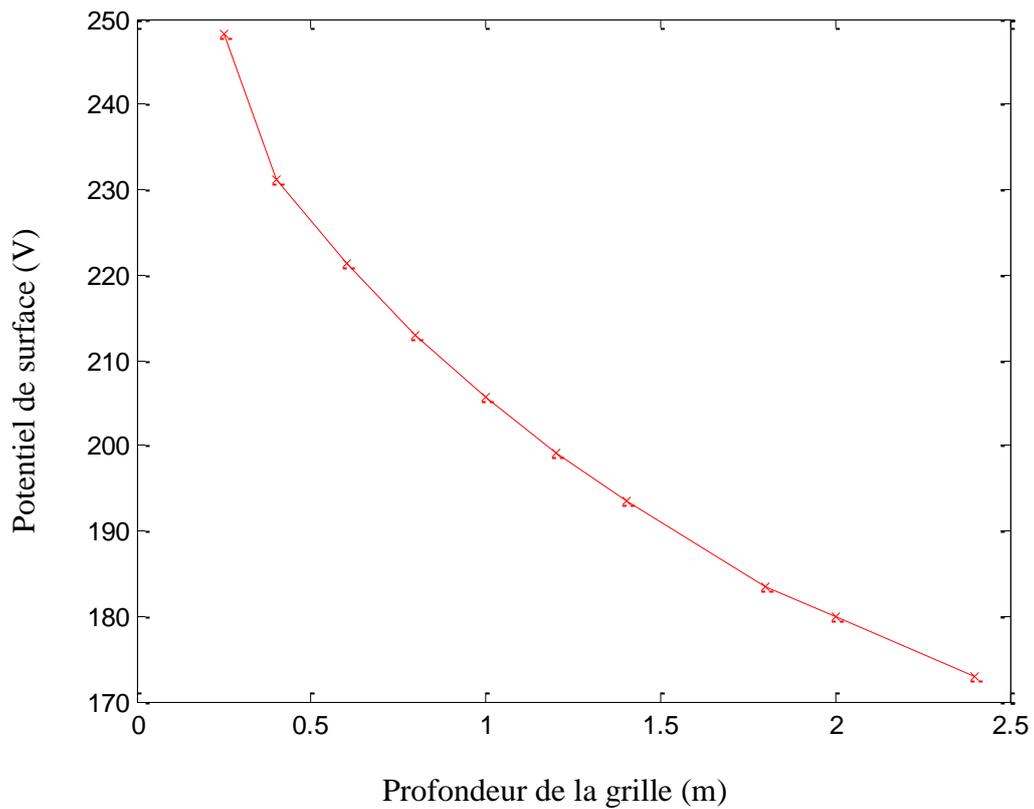


Figure IV.13 : Potentiel de surface en fonction de la de la profondeur

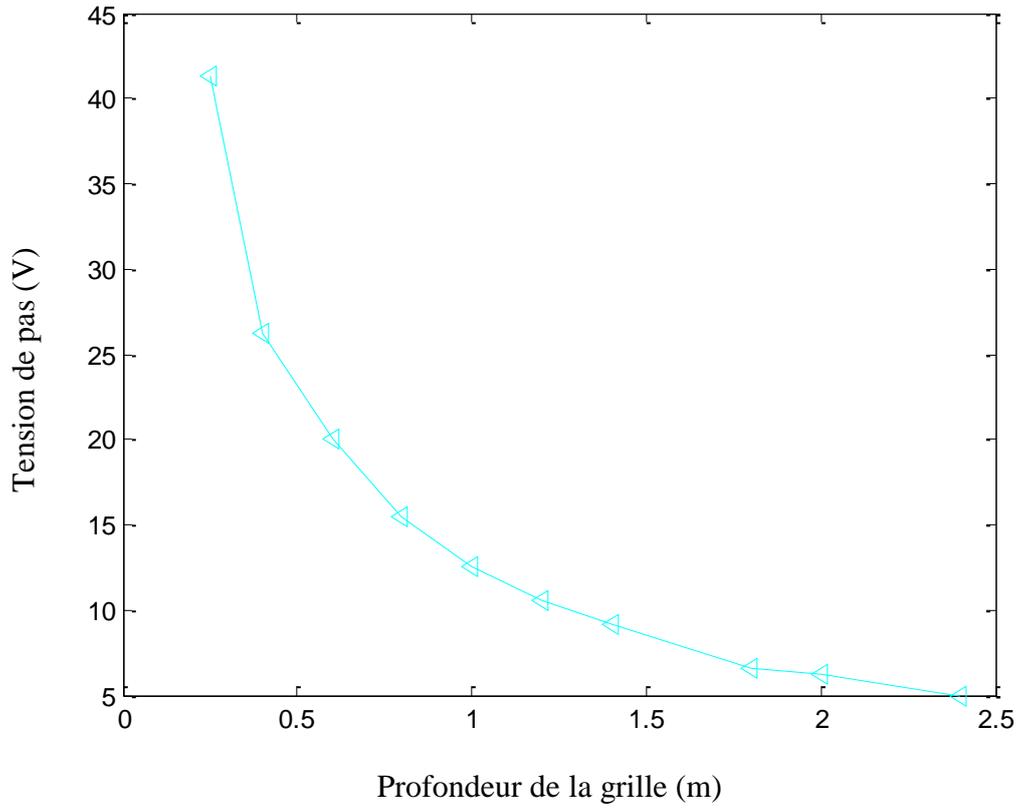


Figure IV.14 : Potentiel de pas en fonction de la de la profondeur

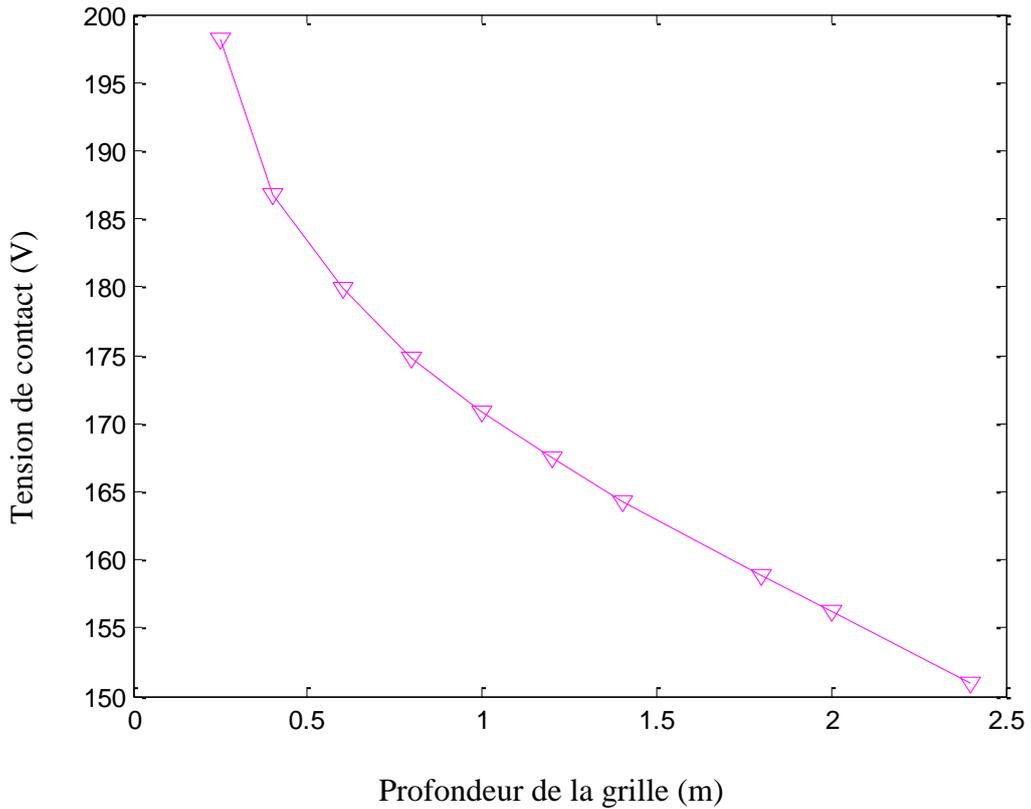


Figure IV.15 : Tension de contact en fonction de la de la profondeur

Uniquement pour récapituler les caractéristiques précédentes, nous les rassemblons et présentons sur la figure IV.16. Etant donné l'aspect physique de chaque paramètre électrique caractérisant la grille rectangulaire, nous ne pouvons en aucun cas comparer les uns aux autres.

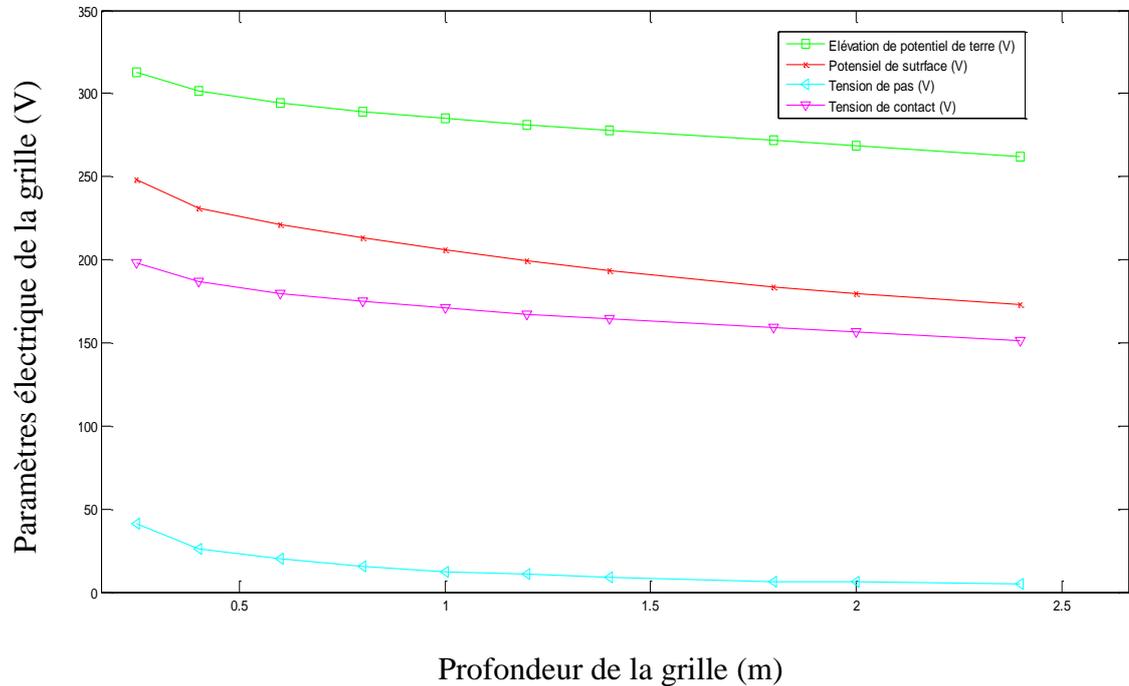


Figure IV.16 : Association les différents tensions en fonction de la de la profondeur

Le tableau (IV.4) ainsi que les caractéristiques représentées aux figures (IV.11) à (IV.16) indiquent que :

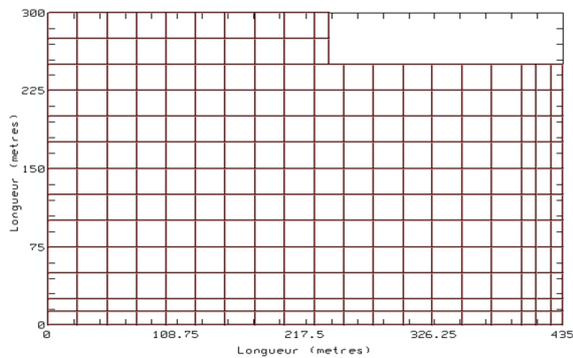
- ✓ L'augmentation de la profondeur de l'emplacement de la grille de terre contribue considérablement dans l'affaiblissement de l'élévation du potentiel de terre, de la résistance du système de mise à la terre et de la tension de pas et celle de contact ;
- ✓ L'intervalle de la profondeur entre [0.5m, 1.2 m] correspond à la valeur minimale de R_g .

IV.3.2. Deuxième configuration : Grille en forme de L inversé

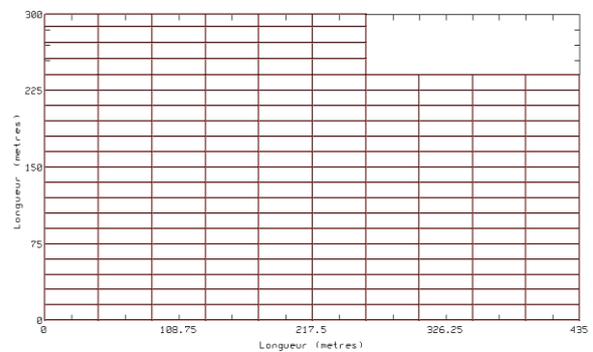
IV.3.2.1. Présentation et résultats

En se basant sur le plan d'arrangement des équipements de l'ouvrage énergétique de LABREG et en éliminant les parties inutiles de la configuration précédente, nous obtenons la forme « L inversé » illustrée à la figure (IV.17).

Pour une telle forme, nous étudions les deux cas de maillage à savoir carré (Figure IV.18.a) et rectangulaire (Figure IV.18.b). Ceci nous permettra de préciser le cas où la longueur totale critique est minimale. Une fois le cas et longueur déterminés, nous examinons l'impact d'un certain nombre de paramètres (ajout des piquets, longueurs des piquets et l'emplacement des piquets) sur le comportement du système de terre adopté.



(a) maillage carré



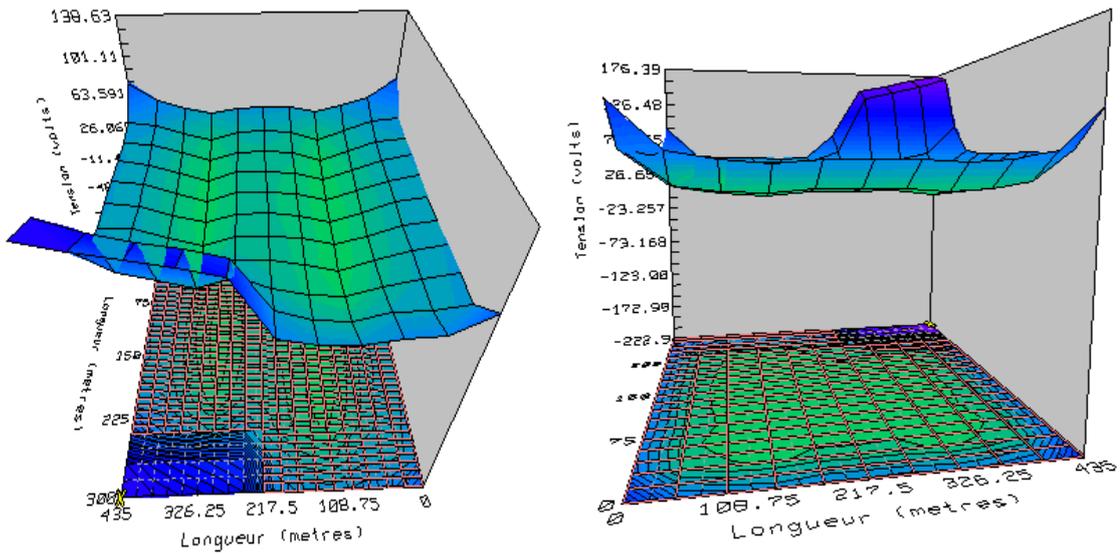
(b) maillage rectangulaire

IV.18. Grille en L inversé

Les résultats de calcul sont présentés dans le tableau (IV.5) et le diagramme de potentiel de contact sur la figure IV.19.

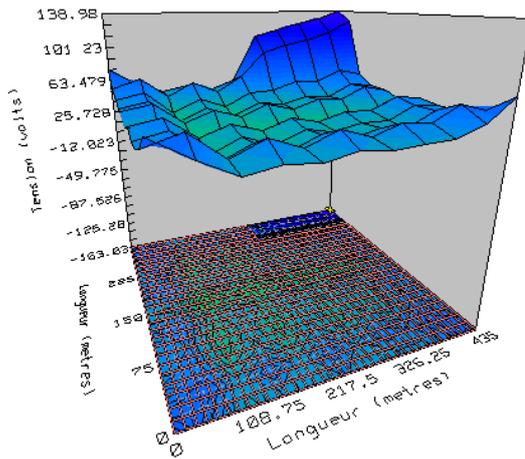
	Maillage rectangulaire		Maillage carré	
	Configuration initiale	Configuration critique	Configuration initiale	Configuration critique
x(m)	7.5	43.5	12.5	25.0
y(m)	25.6	16.0	12.5	25.0
L_T (m)	23035	11499	20085	11255
R_G (Ω)	0.0139	0.0164	0.0141	0.0166
EPT (V)	213.847	251.975	216.783	253.481
V_{SURF} (V)	198.26	231.69	198.58	219.17
V_S (V)	8.95	19.59	11.59	17.16
V_T (V)	138.637	176.385	138.983	174.751

Tableau IV.5 : Variation des différents paramètres en fonction de la forme du maillage de grille en forme de L inversé

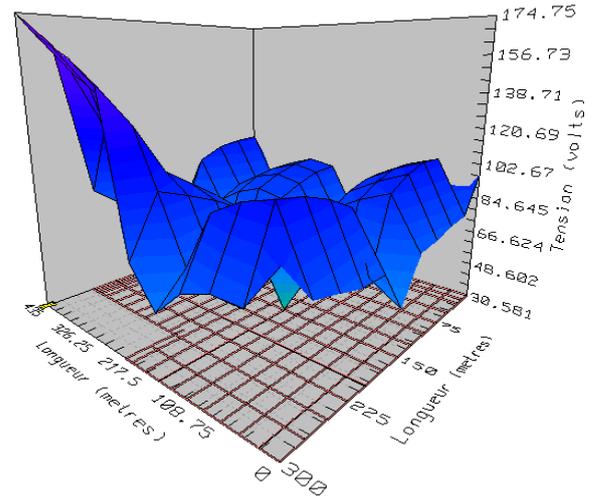


(a) Maillage rectangulaire (c. initiale)

(b) Maillage rectangulaire (c. critique)



(c) Maillage carrée (cas initiale)



(d) Maillage carrée (cas critique)

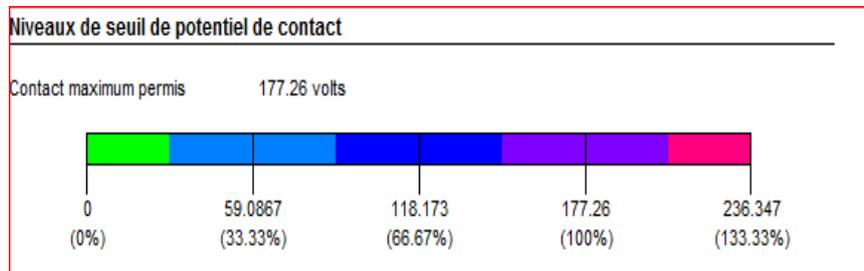


Figure IV.19 : Diagrammes de contour du potentiel de contact en 3D

Selon les résultats ainsi obtenus et présentés dans le tableau (IV.5) et la figure (IV.19), les systèmes des configurations initiales (maillages carré et rectangulaire) sont largement sécurisés. Ceci est évident car la configuration en L inversé a été inspirée de celle rectangulaire.

Les systèmes de terre correspondant aux deux configurations critiques ont été obtenus en diminuant la longueur totale des conducteurs. Ces deux systèmes sont également sécurisés. Cependant, une nouvelle diminution de la longueur des conducteurs les rend non sécurisés ; d'où l'utilisation du mot « critique ».

IV.3.2.2. Influence de l'ajout des piquets de terre

IV.3.2.2.1. Influence du nombre et de l'emplacement des piquets de terre

Nous considérons le cas d'une grille de terre en forme de L inversé, ayant un maillage carré (Figure IV.18.a). Cette grille est implantée à une profondeur de 0.8 m. Nous renforçons cette grille en ajoutant des piquets conducteurs dont les caractéristiques sont :

- ✓ Ils sont perpendiculaires aux conducteurs de la grille ;
- ✓ Ils ont une longueur de 3 m
- ✓ Ils possèdent un diamètre de 12,7 mm

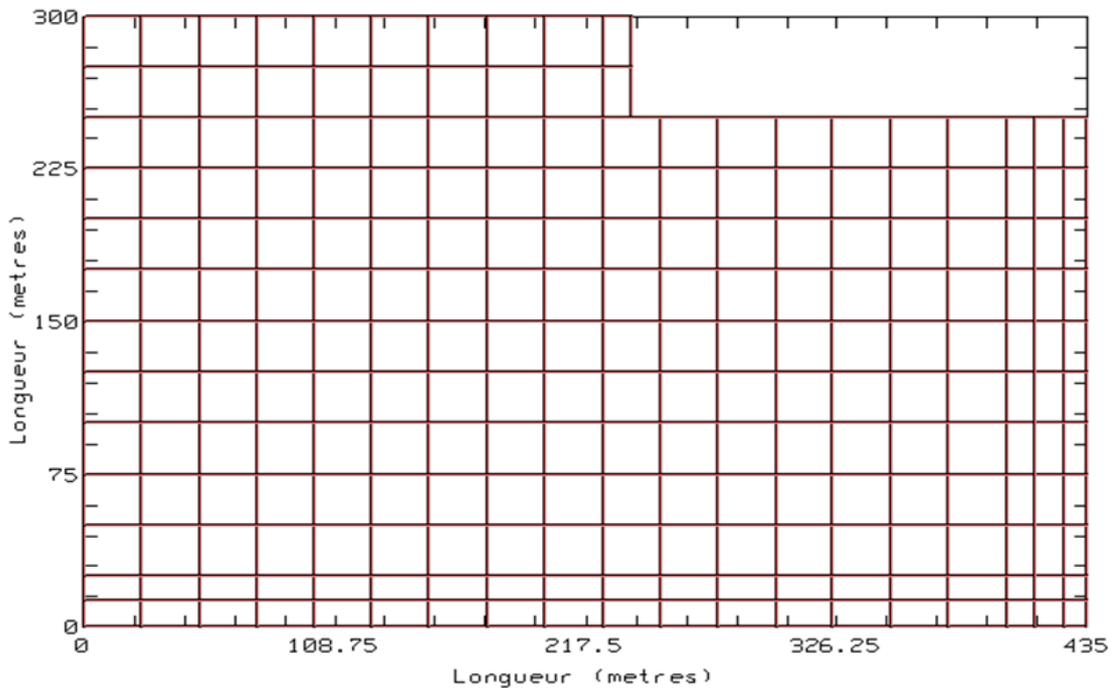


Figure IV.18.a : Configuration de la grille

Trois emplacements des piquets ont été considérés :

- ✓ Piquets ajoutés sur le périmètre de la grille (Figure IV.20) ;
- ✓ Piquets ajoutés horizontalement (Figure IV.21) ;
- ✓ Piquets ajoutés verticalement (Figure IV.22).

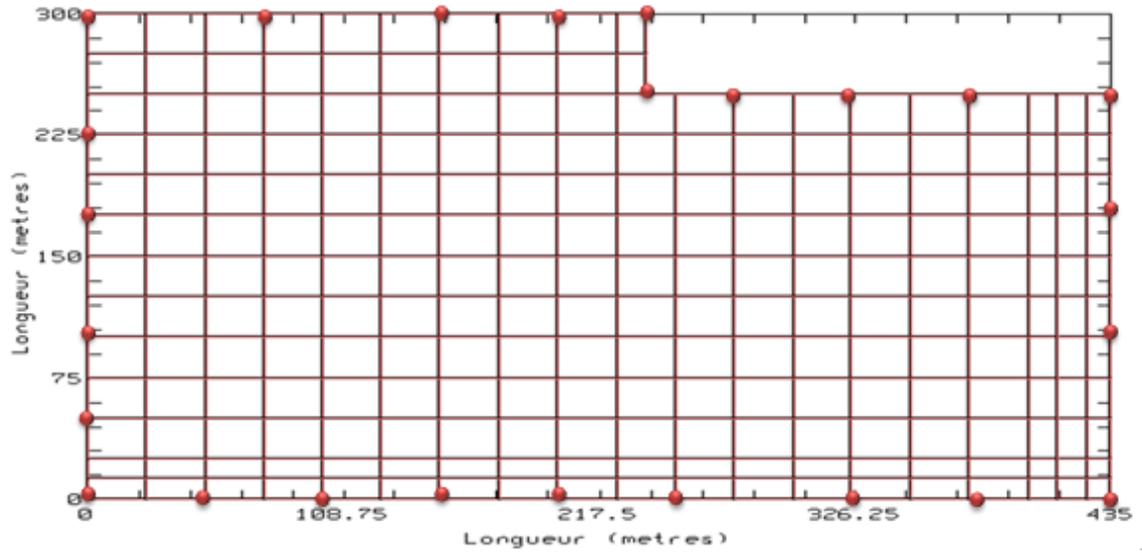


Figure IV.20 : Distribution des piquets de terre sur le périmètre de la grille

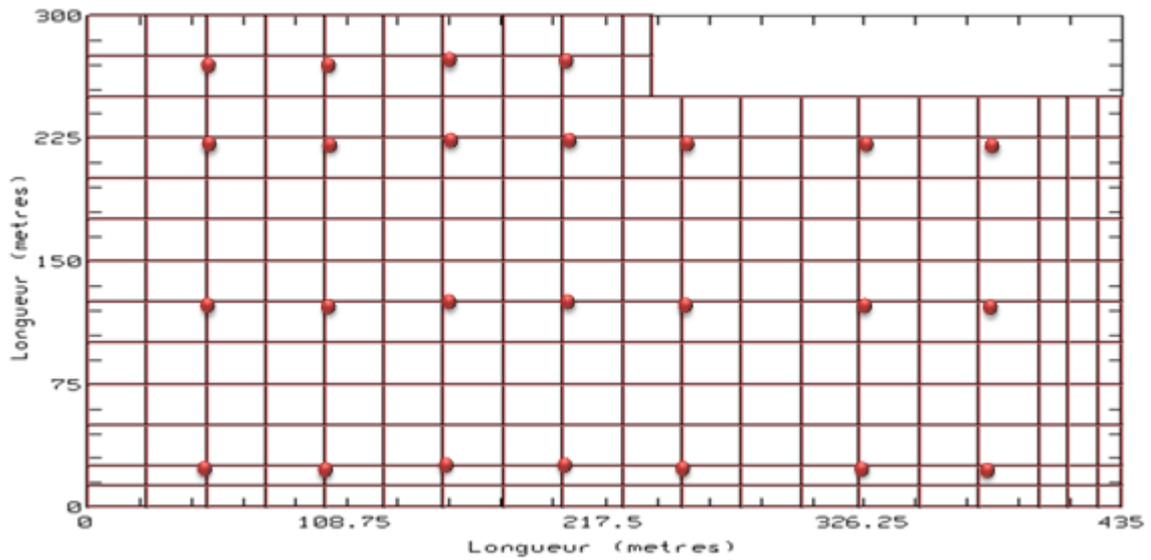


Figure IV.21 : Distribution horizontale (ou selon l'axe des X) des piquets de terre

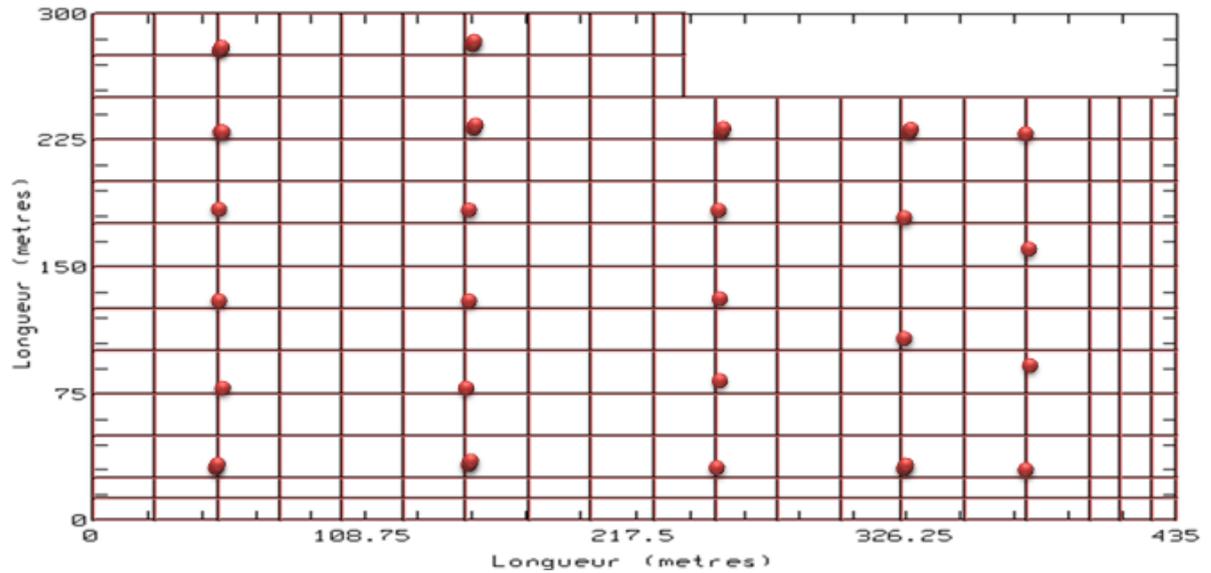


Figure IV.22 : Distribution verticale (ou selon l'axe des Y) des piquets de terre

Pour les trois cas susmentionnés, nous avons varié le nombre des piquets de 10 à 150. Après l'analyse des telles configurations en utilisant le code de calcul CYMGrd, nous obtenons les résultats des différentes tensions ainsi que la résistance de terre en fonction du nombre de piques. Ces résultats sont illustrés sur les figures (IV.22) à (IV.26).

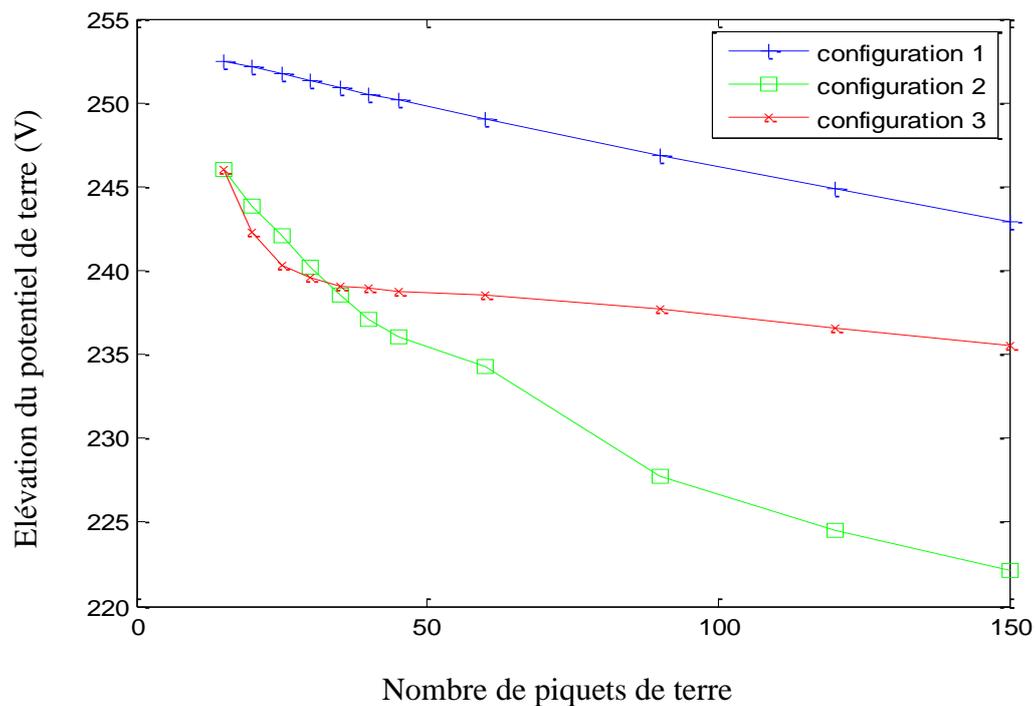


Figure IV.22 : Variation de l'élévation du potentiel de terre en fonction du nombre des piquets

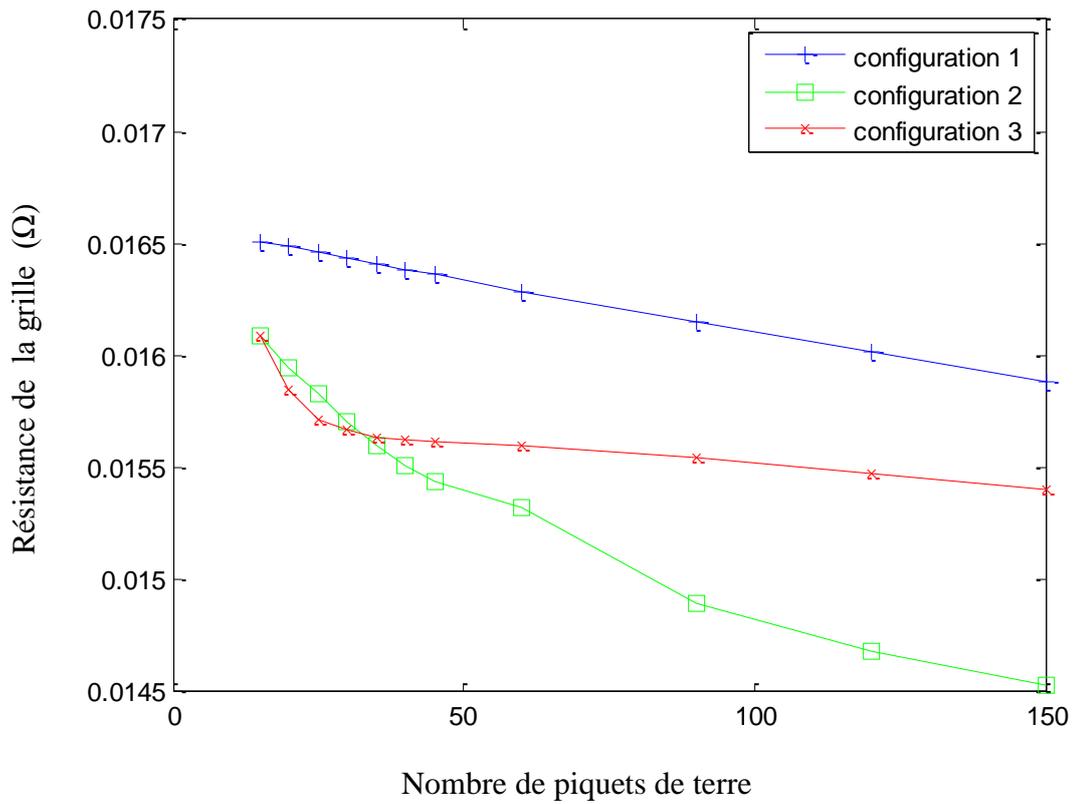


Figure IV.23 : Variation de la résistance de la grille en fonction du nombre des piquets

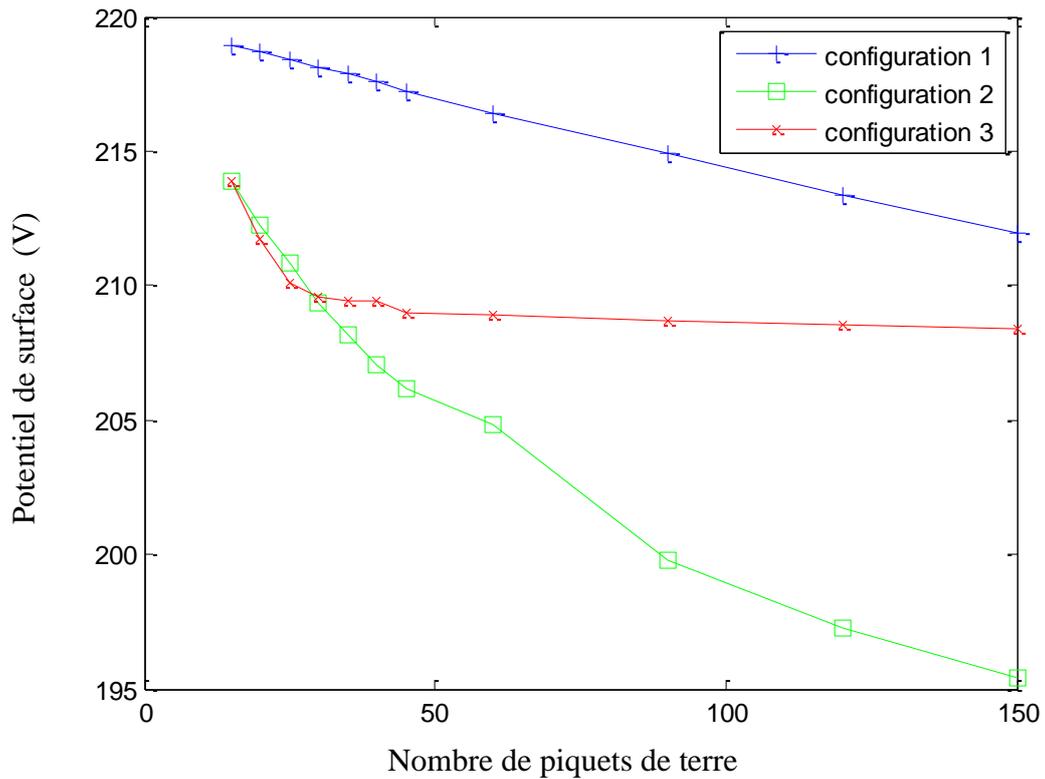


Figure IV.24 : Variation du potentiel de surface en fonction du nombre des piquets

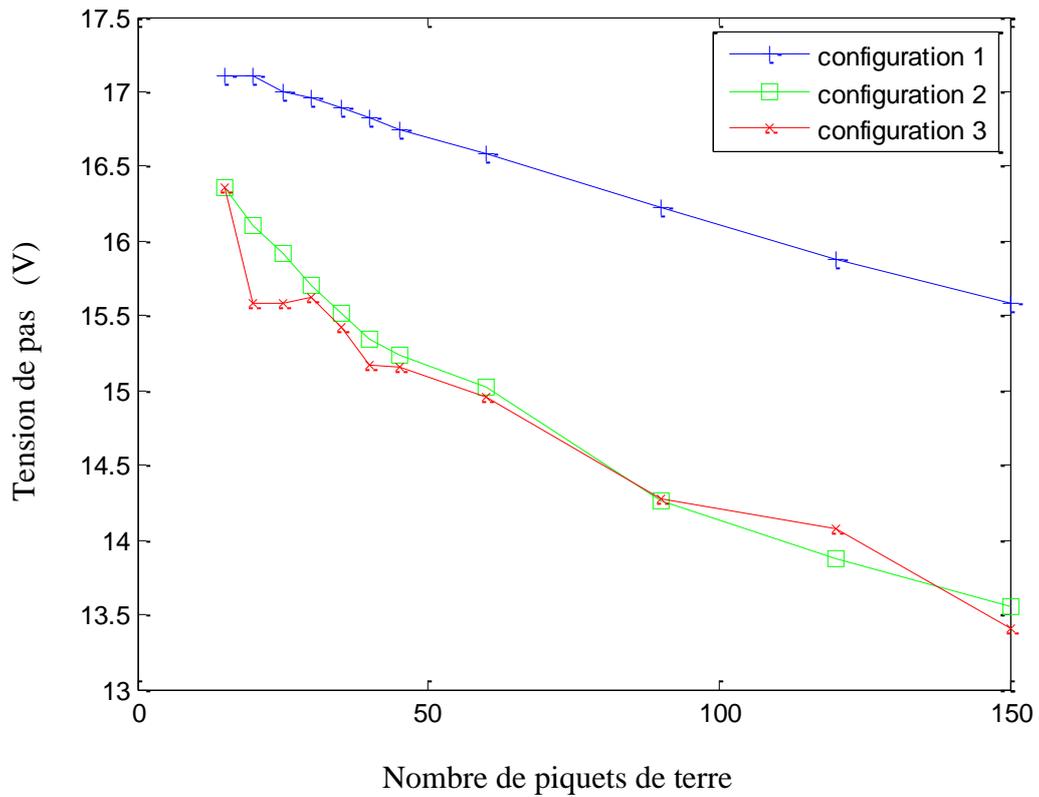


Figure IV.25 : Variation de la tension de pas en fonction du nombre des piquets

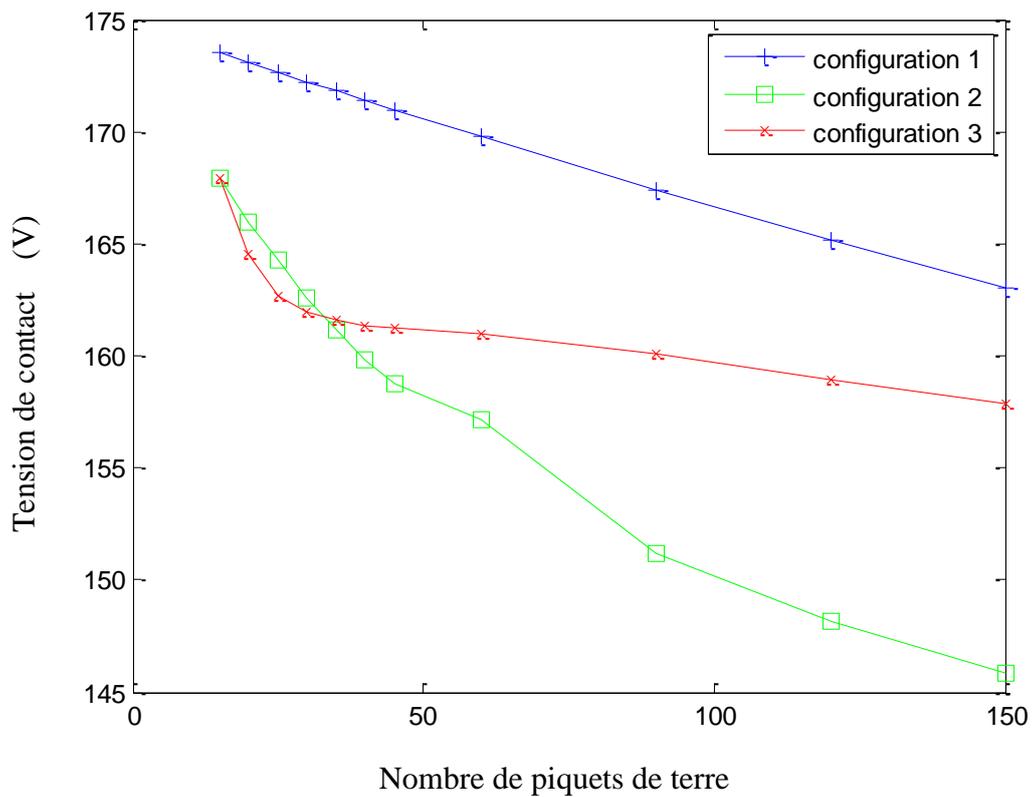


Figure IV.26 : Variation de la tension de contact en fonction du nombre des piquets

D'après ces caractéristiques, deux principales conclusions sont à retenir :

- ✓ Pour une configuration donnée, l'ajout des piquets à une grille entraîne la diminution de toutes les grandeurs électriques simulées à savoir l'élévation du potentiel, la résistance de terre, le potentiel de surface, la tension de pas et celle de contact.
- ✓ Pour un nombre donné de piquets, l'emplacement de ceux-ci perpendiculairement à la surface de la grille affecte notablement les différents paramètres du réseau de terre suscités. Ces paramètres présentent les valeurs les plus faibles lorsque les piquets ajoutés sont distribués horizontalement (configuration 2).

IV.3.2.2.2. Influence de la longueur des piquets

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que l'introduction des piquets ayant une longueur constante, a considérablement amélioré nos résultats de simulation. Dans cette partie, nous avons effectué une simulation pour différentes longueurs des piquets, dans le cas d'une grille en L ayant 15 piquets répartis sur le périmètre (Figure IV.20). En effet, cette longueur a été variée de 3 à 30 m.

Après l'analyse des configurations choisies, nous illustrons les résultats relatifs aux différents paramètres électriques en fonction de la longueur des piquets sur les figures (IV.27) à (IV.31).

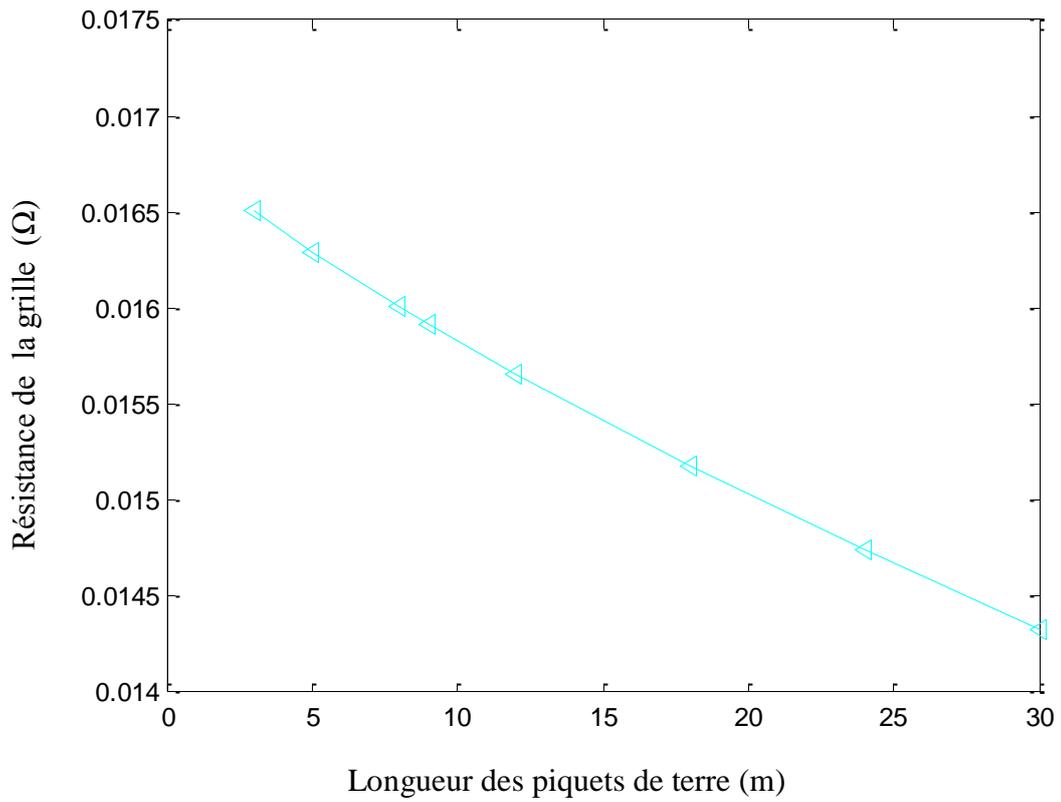


Figure IV.27: Variation de la résistance en fonction de la longueur des piquets

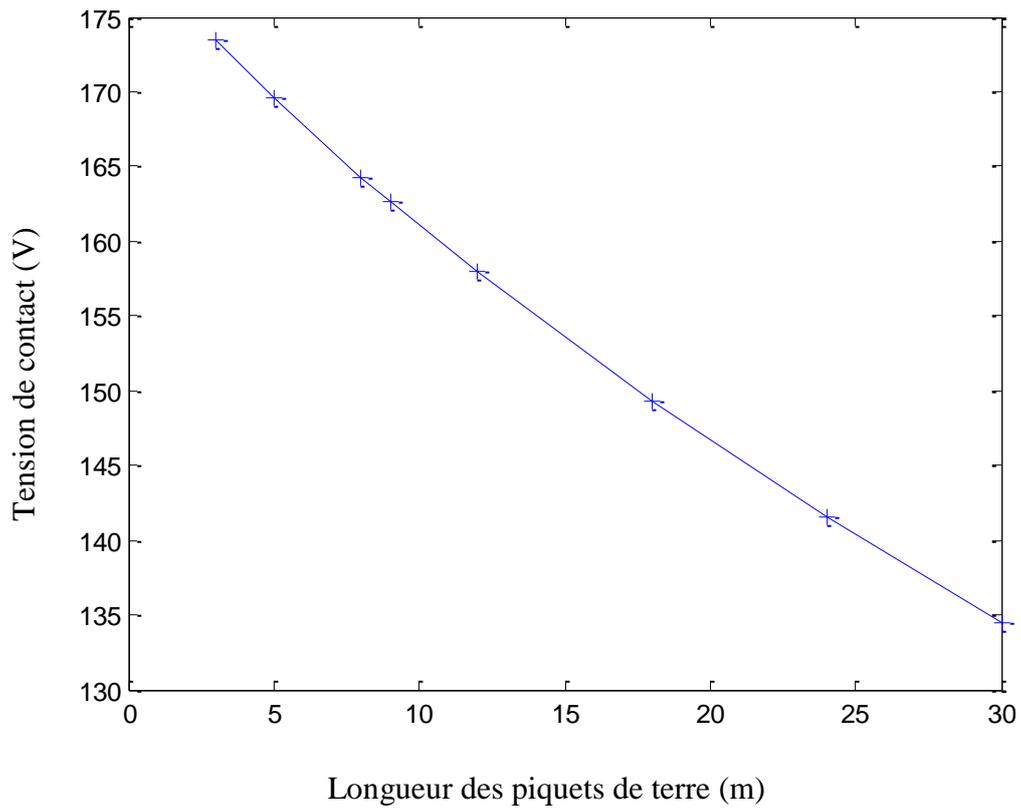


Figure IV.28 : Variation de la tension de contact en fonction de la longueur des piquets

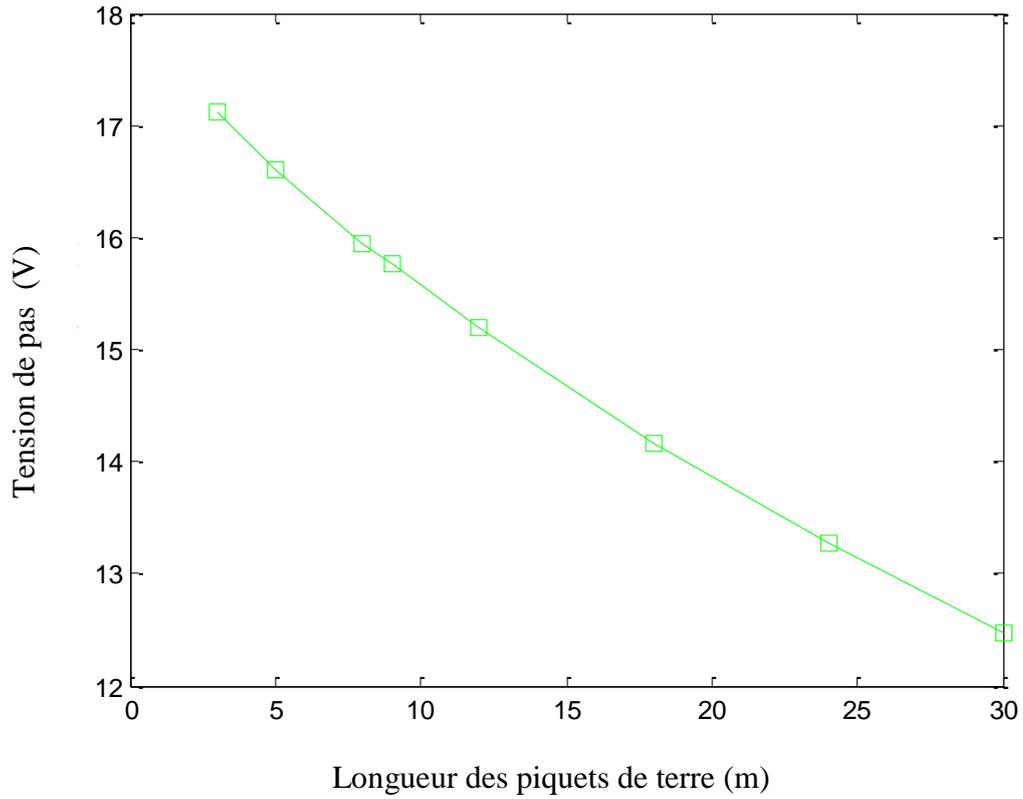


Figure IV.29 : Variation de la tension de pas en fonction de la longueur des piquets

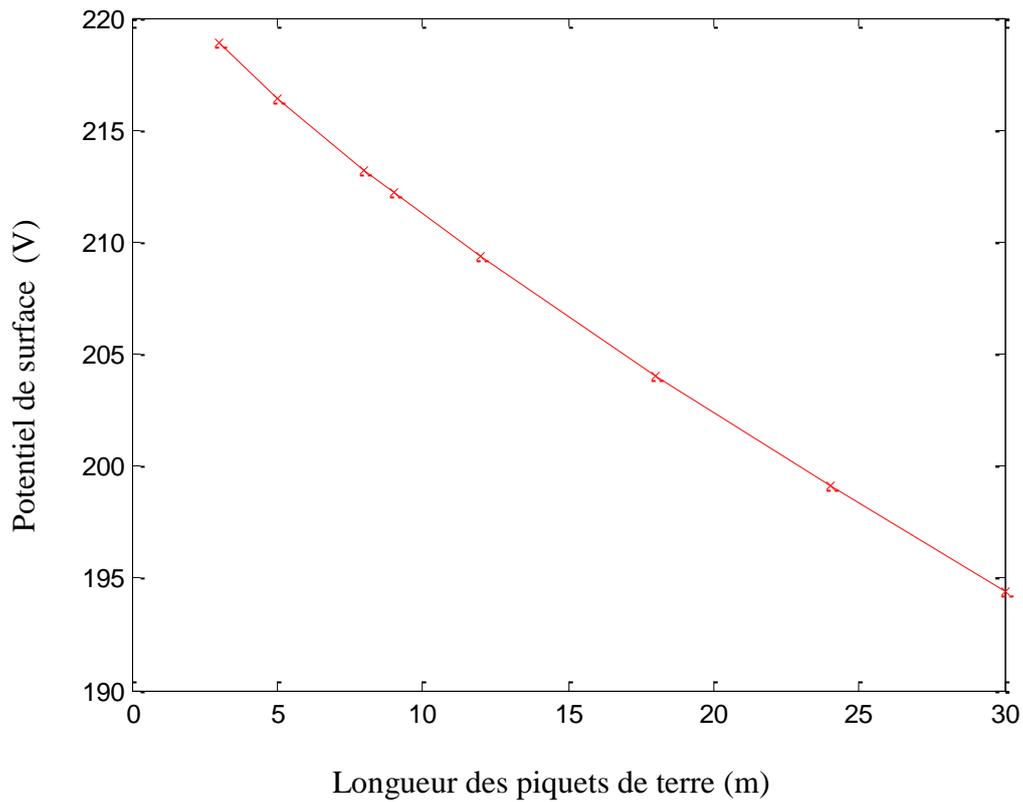


Figure IV.30 : Variation du potentiel de surface en fonction de la longueur des piquets

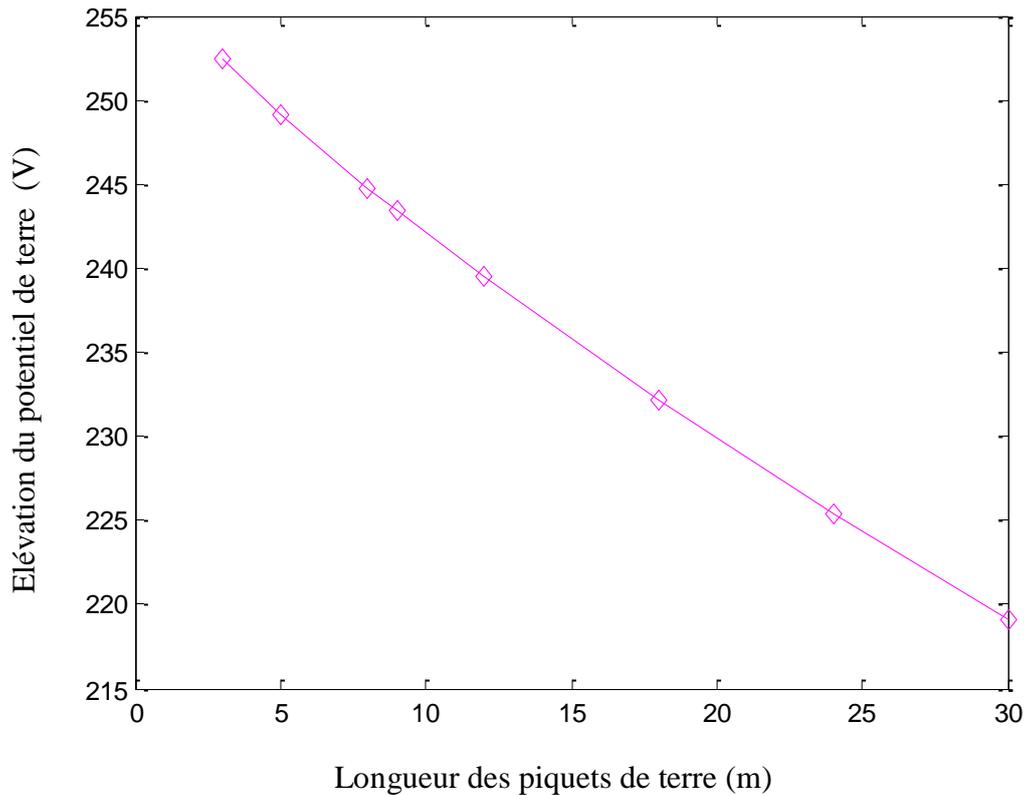


Figure IV.31 : Variation de l'élévation du potentiel en fonction de la longueur des piquets

Selon les caractéristiques des figures (IV.27) à (IV.31), nous concluons que l'augmentation de la longueur des piquets engendre une diminution considérable de tous les paramètres électriques à savoir l'élévation du potentiel de terre, les tensions de contact et de pas ainsi que la résistance du système de mise à la terre.

IV.3.2.2.3. Détermination du paramètre prépondérant entre la longueur totale et le nombre des piquets

Dans cette section, nous essayons de déterminer le paramètre prépondérant ayant plus d'influence sur le comportement des systèmes de mise à la terre ; il s'agit du facteur affaiblissant de plus les grandeurs électriques citées.

Nous avons considérés deux cas distincts ayant une même quantité de cuivre donc une même longueur totale des conducteurs. Dans le premier, seule la longueur des piquets qui varie (de 3 m à 30 m) ; le nombre de piquets étant égal à 15. Dans le deuxième cas, nous faisons varier uniquement le nombre de piquets (de 15 à 150 piquets) ; la longueur des

piquets étant égale à 3 m. Pour cela, nous adoptons le cas où les piquets sont répartis suivant le périmètre (configuration 1). Les évolutions des différents paramètres électriques sont suivies en fonction de la longueur totale du cuivre et (donc la même quantité du cuivre). Les résultats ainsi obtenus sont présentés sur les figures (IV.32) à (IV.36).

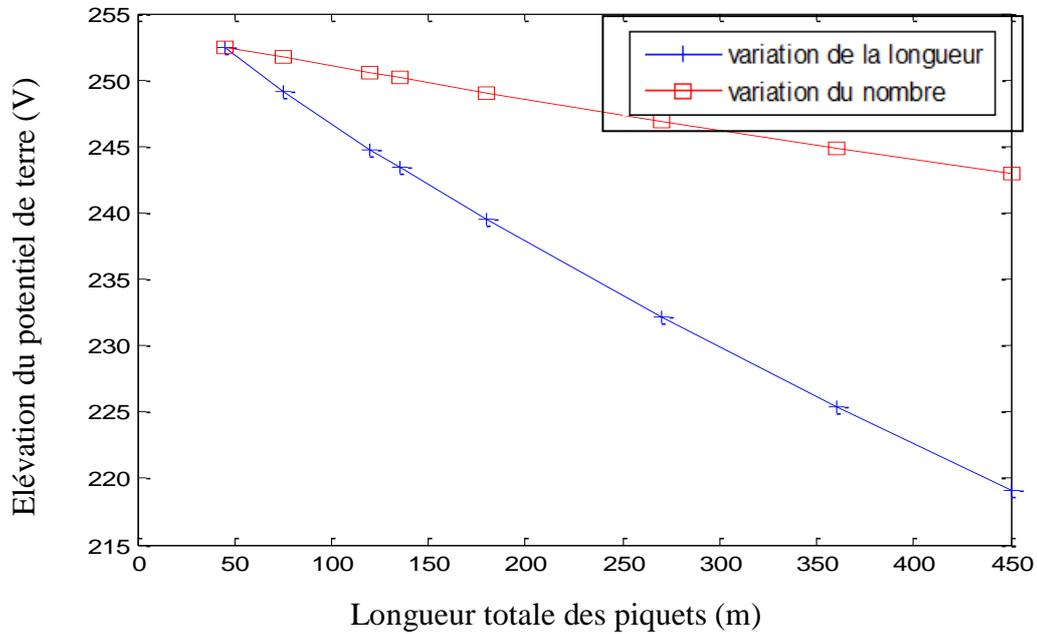


Figure IV.32 : Variation de l'élévation du potentiel de terre en fonction de la longueur totale des piquets

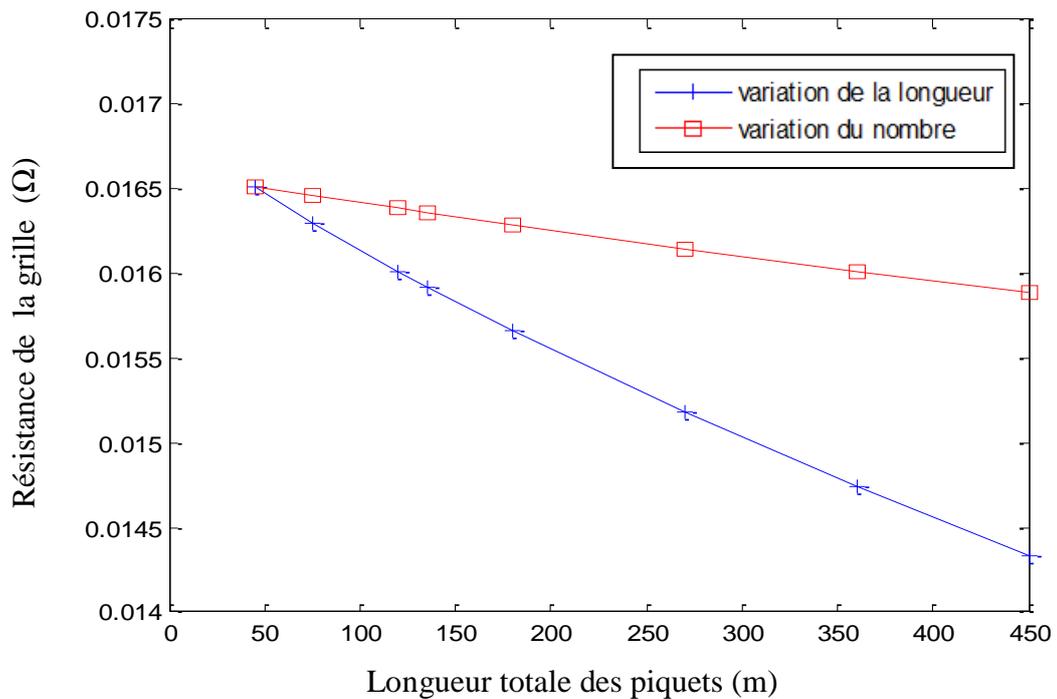


Figure IV.33 : Variation de la résistance de la grille en fonction de la longueur totale des piquets

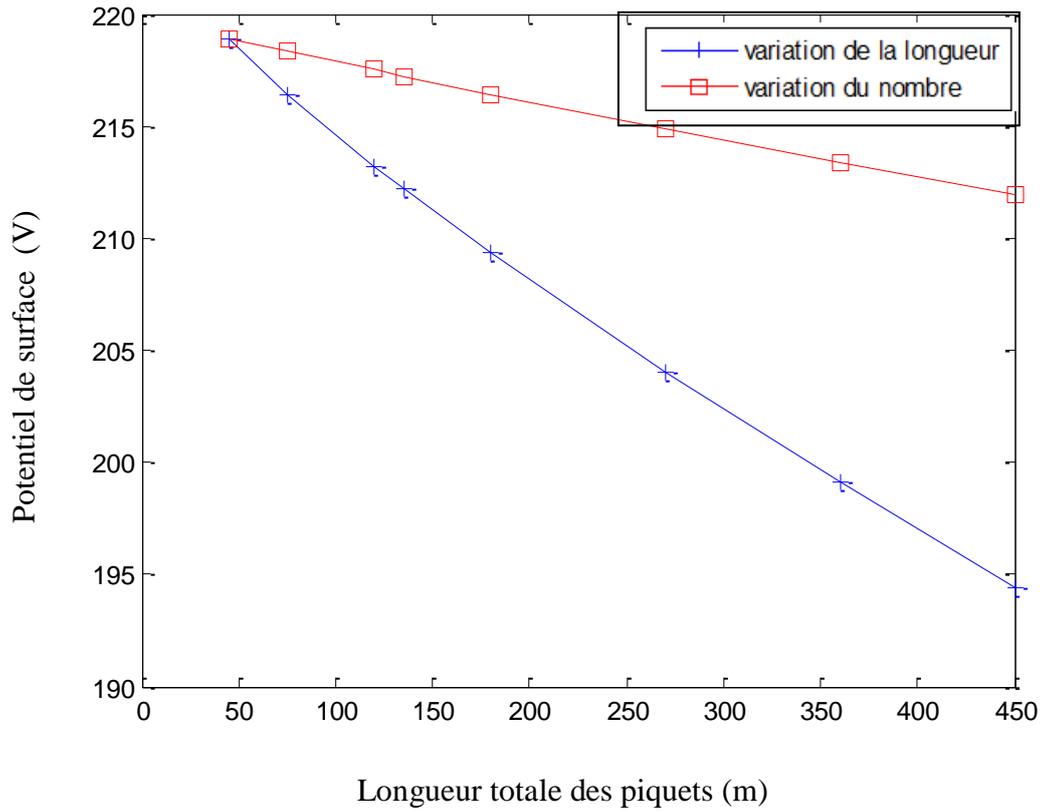


Figure IV.34 : Variation du potentiel de surface en fonction de la longueur totale des piquets

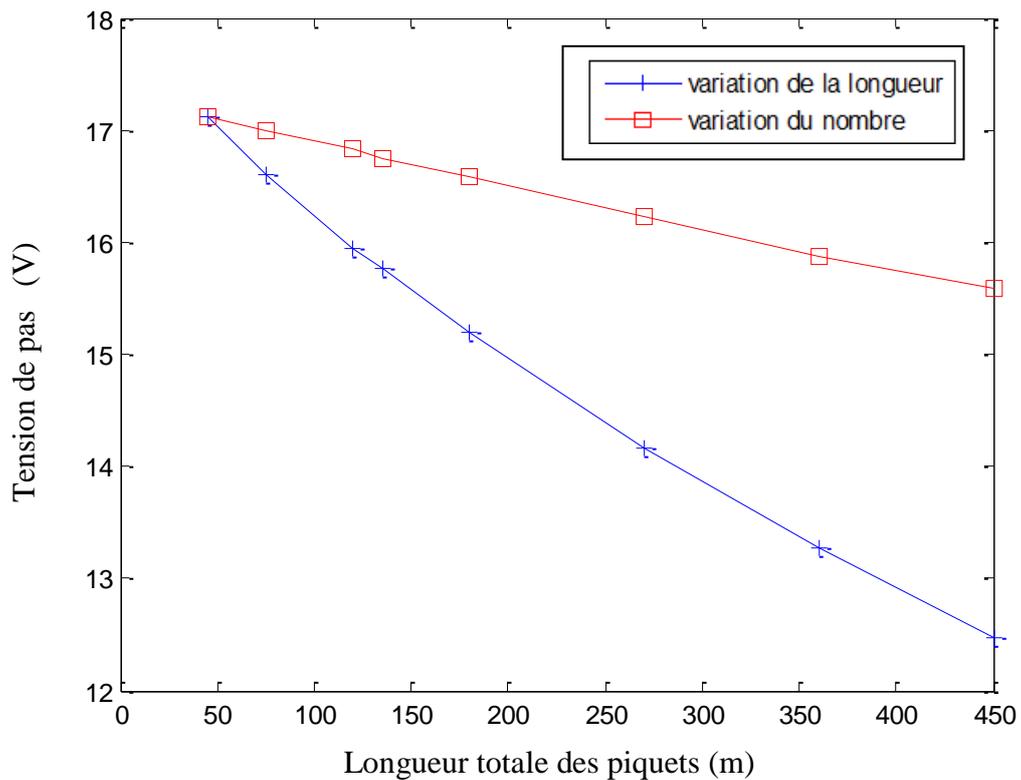


Figure IV.35: Variation de la tension de pas en fonction de la longueur totale des piquets

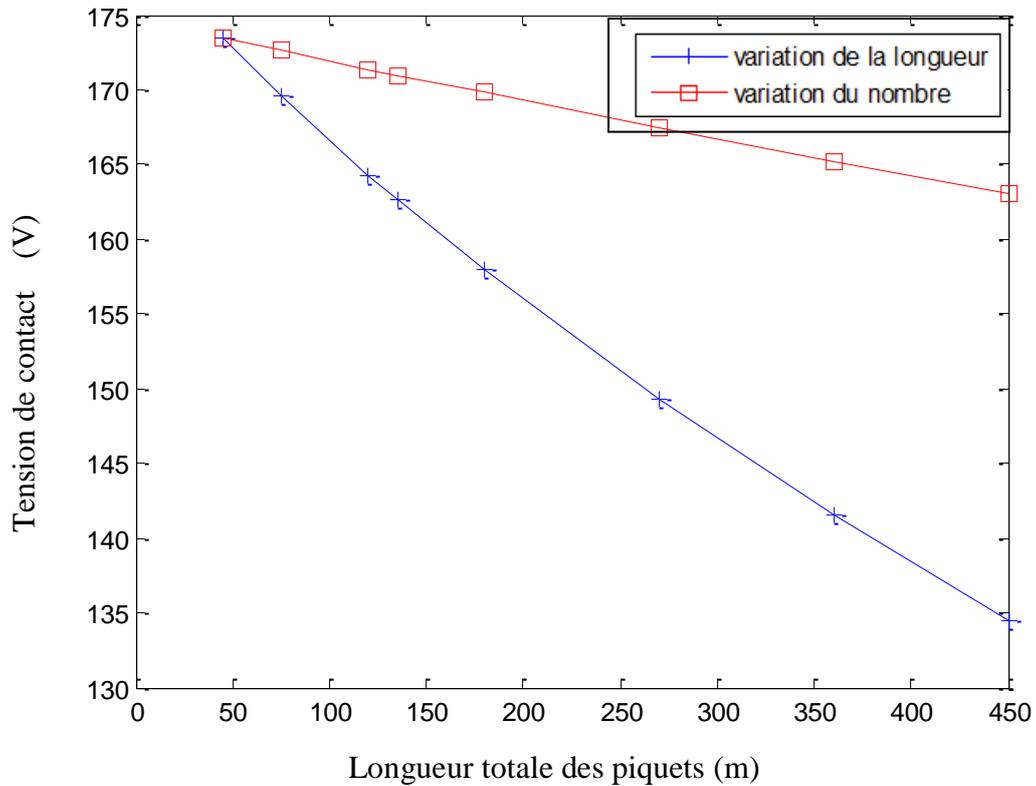


Figure IV.36 : Variation de la résistance de la grille en fonction de la longueur totale des piquets

Il est clair que d'après les différentes caractéristiques que nous avons obtenues que, pour une même longueur totale des conducteurs soit une même quantité du cuivre et donc un même coût, il est préférable d'augmenter la longueur que le nombre des piquets.

IV.3.2.3. Traitement de la couche superficielle du sol

Pour des raisons technico-économiques, la sécurité des exploitants et des équipements contre les phénomènes décrits auparavant est assurée par la conjugaison de deux solutions complémentaires à savoir l'ajout des piquets perpendiculairement au système de mise à la terre ; point traité aux paragraphes précédents, et le traitement surfacique en agissant sur la composition de la couche superficielle de l'enceinte de l'ouvrage à étudier (modification de la résistance de la couche superficielle). Le traitement surfacique est assuré par deux techniques à savoir le traitement par variation de la résistivité ou par variation de l'épaisseur.

IV.3.2.3.1. Traitement par la modification de la résistivité

Afin d'étudier l'impact du traitement surfacique du terrain, nous faisons varier la résistivité de la couche superficielle du sol avoisinant le système de mise à la terre de $0 \Omega.m$ à $4000 \Omega.m$. Nous supposons, pour ce faire, que l'épaisseur de la couche superficielle (e_s) est de $0.1 m$. Nous considérons, pour cette section une grille de terre en forme de L inversé, sans piquet de terre ayant un maillage carré (Figure IV.16). Cette grille est implantée à une profondeur de $0.8 m$. Nous nous intéressons plus particulièrement aux variations du facteur de réduction du courant de défaut (C_S), de la tension de contact maximale et celle de pas maximale. Les résultats que nous avons obtenus sont présentés sur les figures (IV.37) à (IV.39).

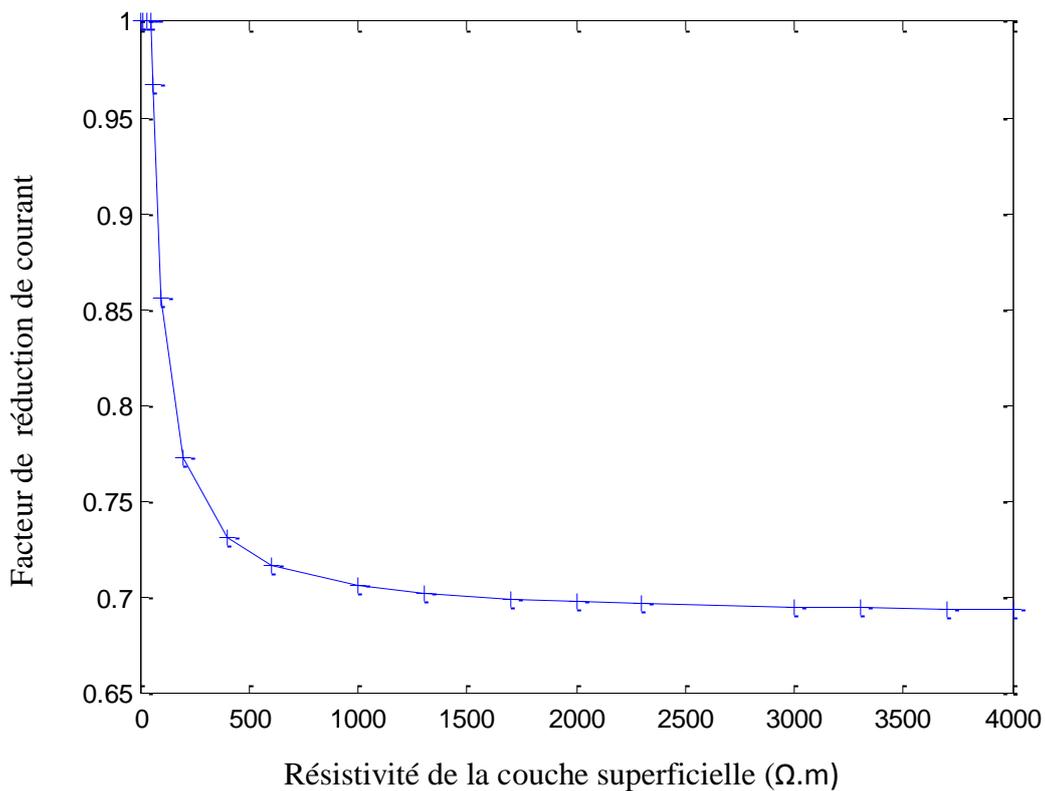


Figure IV.37 : Impact de la résistivité de la couche superficielle sur le facteur de réduction de courant

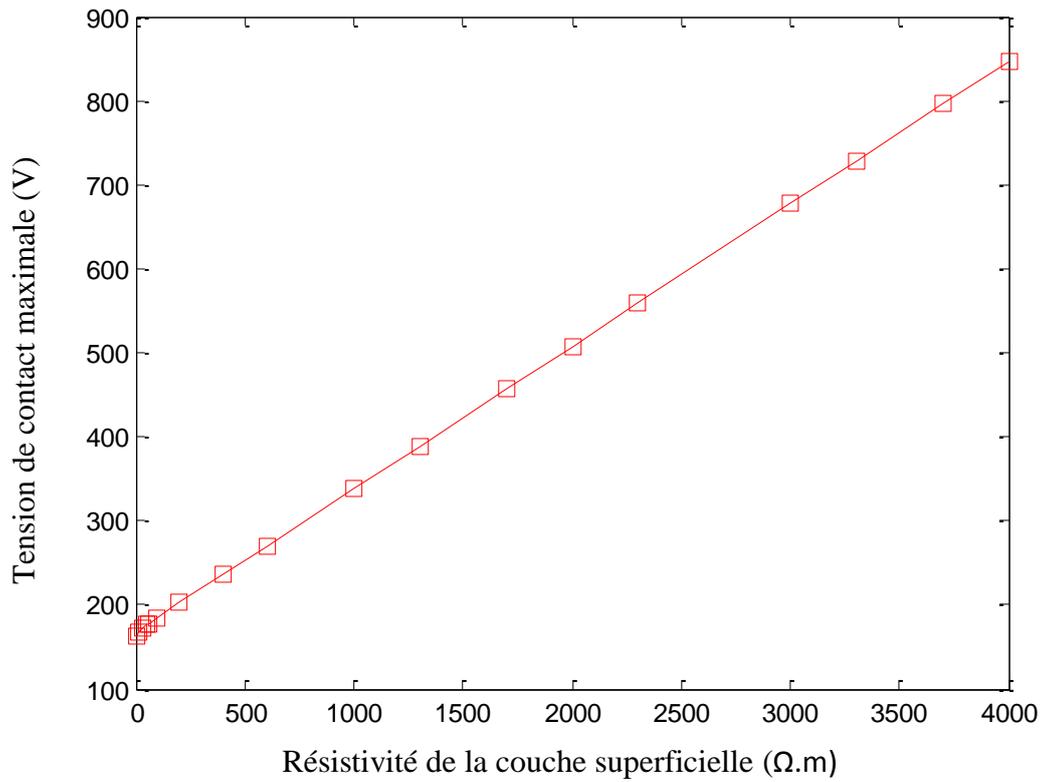


Figure IV.38 : Impact de l'épaisseur de la couche superficielle sur la tension de contact maximale

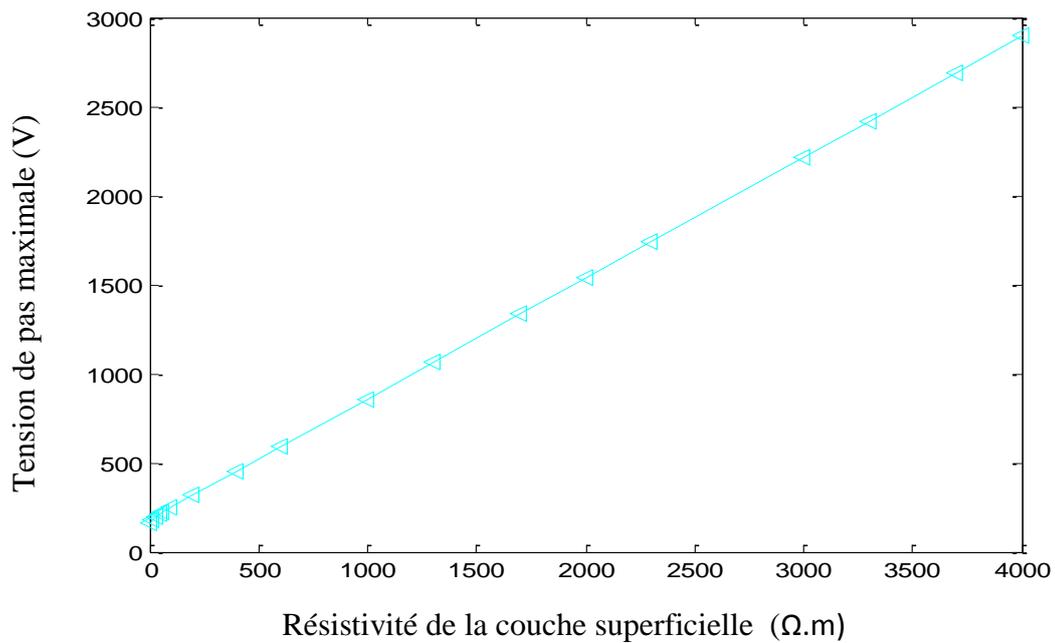


Figure IV.39 : Impact de l'épaisseur de la couche superficielle sur la tension de pas maximale

D'après ces caractéristiques, nous constatons qu'avec l'augmentation de la résistivité de la couche superficielle, le facteur de réduction C_s diminue rapidement pour les résistivités

inférieures à 600 $\Omega.m$ environ, et lentement ailleurs en tendant vers un palier constant. Ce palier avoisine 0.7.

Par ailleurs, les tensions de pas et de contact maximales augmentent linéairement avec la résistivité de la couche superficielle. Elles sont par conséquent proportionnelles à la résistivité. Notons que plus ces deux tensions sont élevées, plus la sécurité des personnes et des équipements est bonne.

IV.3.2.3.2. Traitement par variation de l'épaisseur

Dans cette section, nous nous sommes intéressés au traitement par variation de l'épaisseur de la couche superficielle. Cette épaisseur a été variée de 0 à 1 m. La résistivité de la couche en question a été fixée à 2000 $\Omega.m$. Après l'analyse des différentes configurations, nous obtenons les résultats présentés sur les figures (IV.40) à (IV.42).

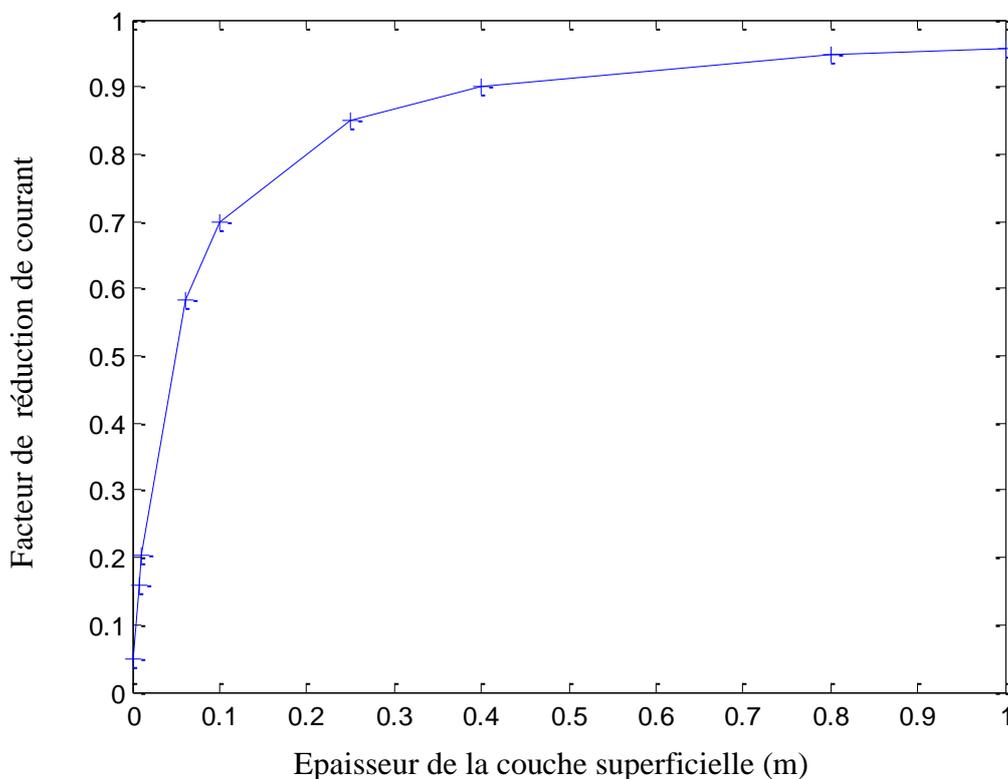


Figure IV.40 : Impact de l'épaisseur de la couche superficielle sur le facteur de réduction de courant C_s .

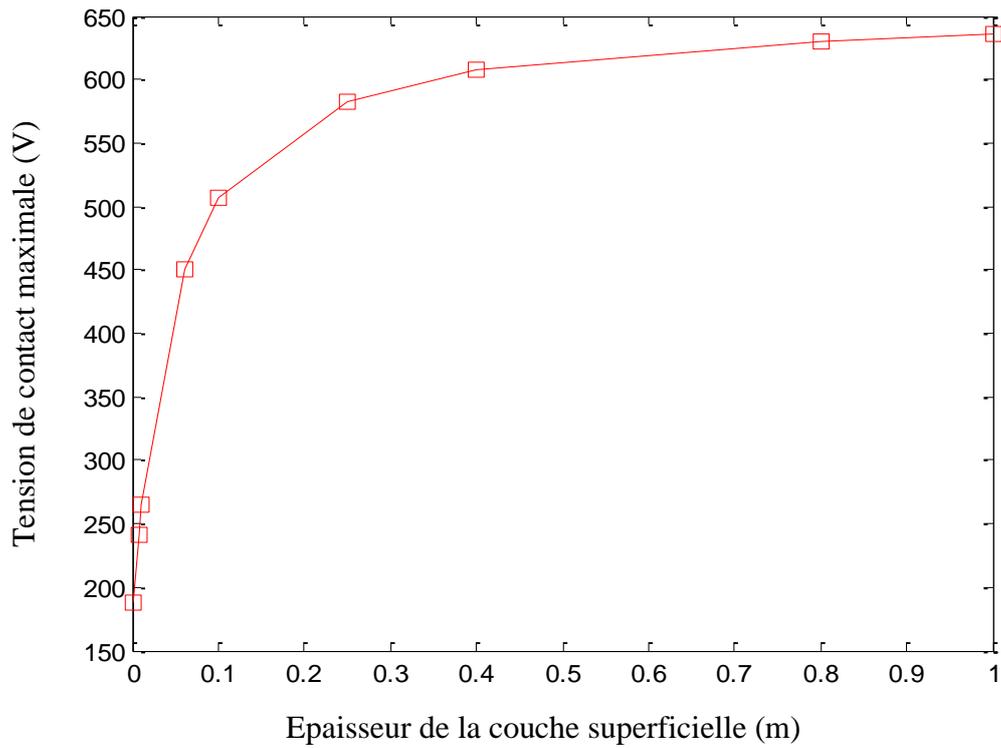


Figure IV.41 : Impact de l'épaisseur de la couche superficielle sur la tension de contact maximale

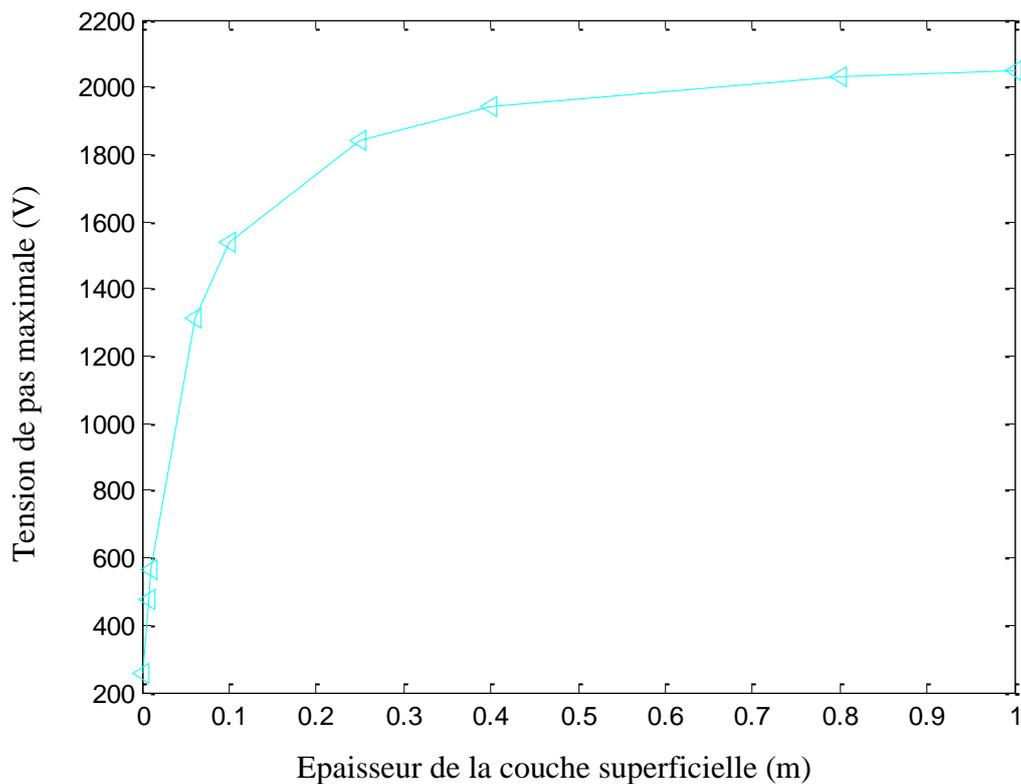


Figure IV.42 : Impact de l'épaisseur de la couche superficielle sur la tension de pas maximale

D'après les caractéristiques précédentes, nous constatons que l'épaisseur de la couche superficielle contribue considérablement dans l'augmentation du facteur de réduction C_s et tensions maximales de pas $V_{S_{max}}$ et de contact $V_{T_{max}}$. Avec l'augmentation de l'épaisseur en question, ces grandeurs suscités augmentent rapidement pour les épaisseurs comprises entre 0 et 0.2 m, et lentement ailleurs, en tendant vers un palier constant. Il est important de noter que pour une valeur de l'épaisseur e_s avoisinant 0.1 m, la valeur du facteur de réduction C_s a atteint la valeur optimale (trouvée auparavant). Cette dernière avoisine 0.7 . Ces deux valeurs relatives à l'épaisseur et facteur de réduction vont être prises en compte lors de la mise en œuvre du réseau de terre optimisé.

IV.3.3. Configuration optimale

Nous avons étudié dans les parties précédentes l'impact des différents paramètres (longueur totale de conducteurs de terre, profondeur de la grille forme de maillage, l'emplacement et l'ajout et la longueur des piquets de terre), sur l'efficacité de système de mise à la terre. Nous nous intéressons maintenant à la détermination de la configuration finale et optimale en se basant sur les résultats déjà obtenus.

Pour cela, nous considérons une grille de terre en forme de L inversé, sans piquets de terre ayant un maillage carré (Figure IV.20.a). Cette grille est implantée à une profondeur de 0.8 m, que l'épaisseur de la couche superficielle (e_s) est de 0.1 m, la résistivité de la couche superficielle est de 3000 $\Omega.m$.

Nous renforçons la grille par des conducteurs et des piquets dans les endroits de l'emplacement des groupes turbo-alternateurs et des transformateurs. Les figures (IV.43) et (IV.44) représentent respectivement les différents renforcements par ajout des conducteurs et de piquets. Dans le premier, nous avons fixé une longueur totale des conducteurs primaires enterrés à 12495 m. Par ailleurs, nous avons considérés 32 piquets, de longueur 10 m et diamètre 12.7 mm.

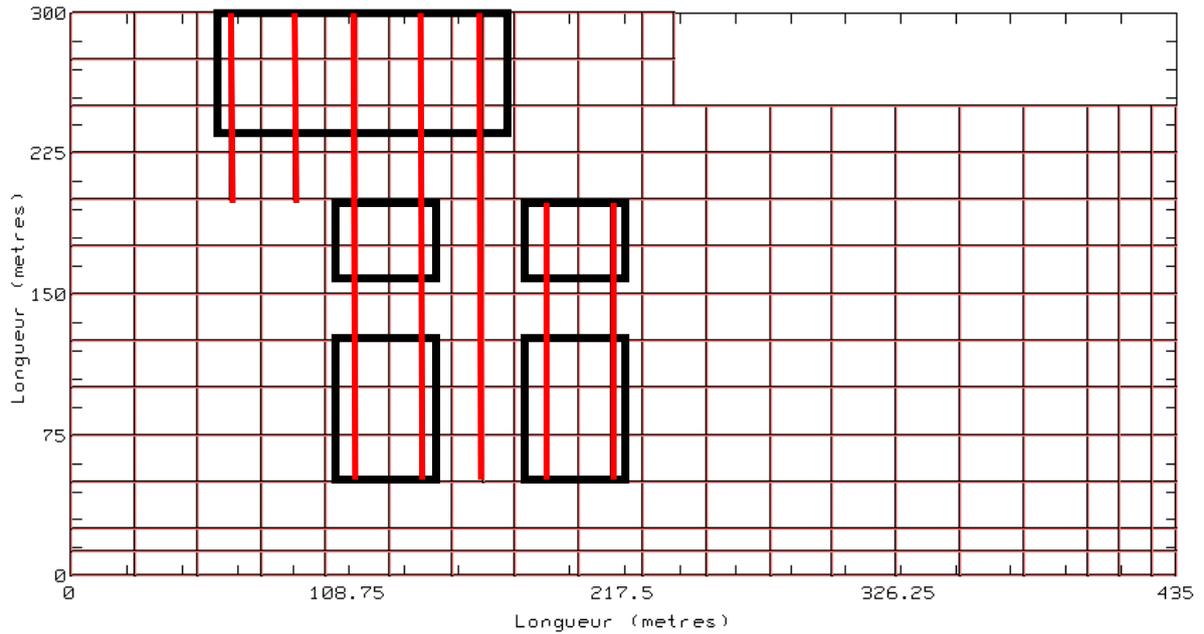


Figure IV.43 : Renforcement de la grille par des conducteurs

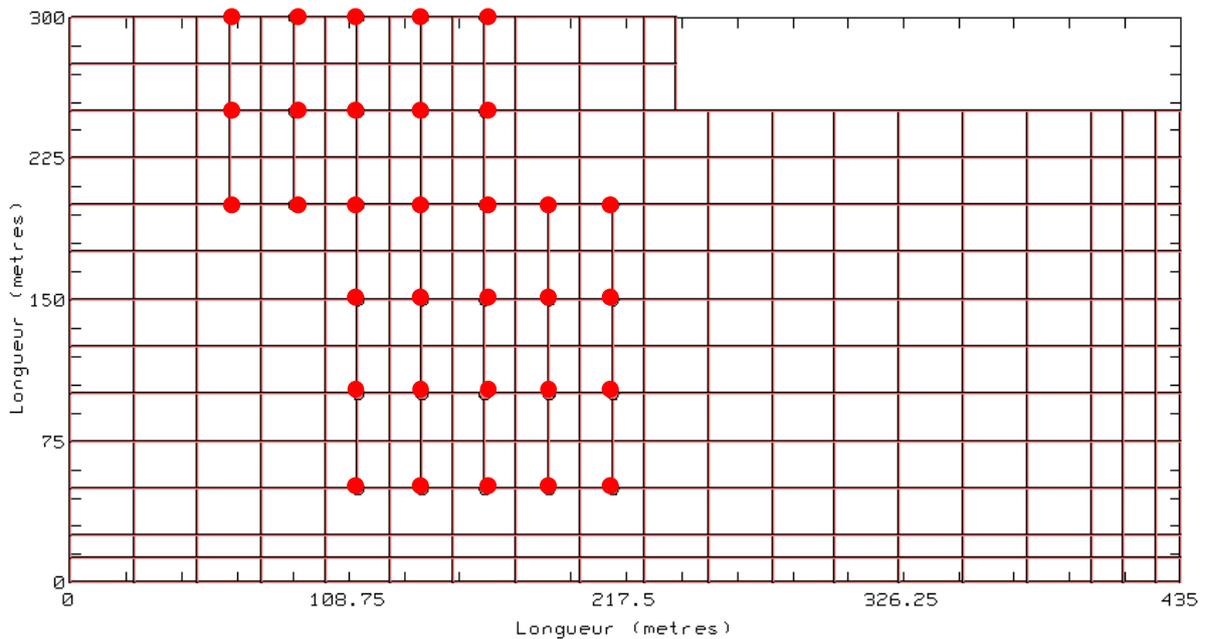


Figure IV.44 : Renforcement de la grille par des piquets de terre

Les différents résultats de simulation obtenus lors du renforcement par ajout des conducteurs sont :

- ✓ Longueur totale des conducteurs primaires enterrée : 12495 m ;
- ✓ Résistance de terre calculée : $0.0161262 \Omega \ll 1\Omega$;

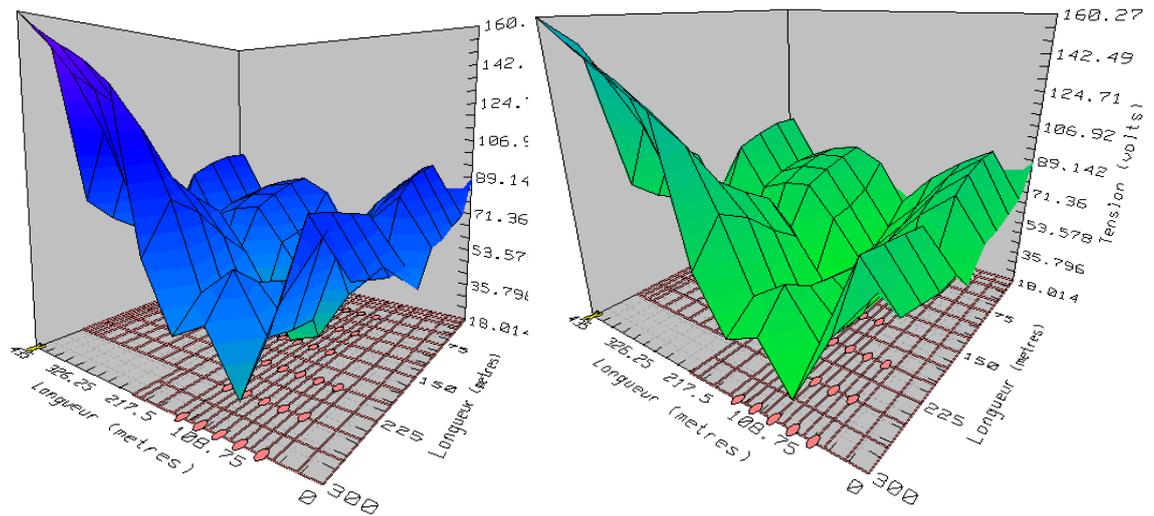
- ✓ élévation du potentiel de terre : $EPT=246.572 \text{ V}$;
- ✓ Contact maximum permis : $V_{T \max 50}=177.26 \text{ V}$;
- ✓ Tension maximum de pas admissible : $V_{S \max 50}=216.88 \text{ V}$;
- ✓ Potentiels de surface : 214.25 V ;
- ✓ Potentiels de pas : $V_S=16.54 \text{ V}$;
- ✓ Potentiels de contact : $V_T=168.792 \text{ V}$.

Par ailleurs, les différents résultats relatifs au renforcement par ajout des piquets sont les suivants :

- ✓ Longueur totale des conducteurs primaires enterrée : 12495 m ;
- ✓ Longueur totale des piquets primaires enterrée : 320 m ;
- ✓ Résistance de terre calculée : $0.0154945 \text{ } \Omega \ll 1 \text{ } \Omega$;
- ✓ élévation du potentiel de terre : $EPT=236.912 \text{ V}$;
- ✓ Contact maximum permis : $V_{T \max 50}=177.26 \text{ V}$;
- ✓ Tension maximum de pas admissible : $V_{S \max 50}=216.88 \text{ V}$;
- ✓ Potentiels de surface : 210.44 V ;
- ✓ Potentiels de pas : $V_S=15.49 \text{ V}$;
- ✓ Potentiels de contact : $V_T=160.272 \text{ V}$.

Nous pouvons également jouer sur la constitution de la couche superficielle pour renforcer davantage le système de mise à la terre. Nous présentons les résultats de simulation obtenus pour une épaisseur e_s de $0,1\text{m}$, et une résistivité ρ_s de $3000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$:

- ✓ Longueur totale des conducteurs primaires enterrée : 12495 m ;
- ✓ Longueur totale des piquets primaires enterrée : 320 m ;
- ✓ Résistance de terre calculée : $0.0154945 \text{ } \Omega \ll 1 \text{ } \Omega$;
- ✓ élévation du potentiel de terre : $EPT=236.912 \text{ V}$;
- ✓ Contact maximum permis : $V_{T \max 50}= 677.26 \text{ V}$;
- ✓ Tension maximum de pas admissible : $V_{S \max 50}=2216.91 \text{ V}$;
- ✓ Potentiels de surface : 210.44 V ;
- ✓ Potentiels de pas : $V_S=15.49 \text{ V}$;
- ✓ Potentiels de contact : $V_T=160.272 \text{ V}$.



(a) sans couche superficielle

(b) avec couche superficielle

Figure IV.45 : Diagrammes de contour du potentiel de contact en 3D

Selon les résultats obtenus, il est recommandé d'opérer selon l'ordre de priorité suivant :

- ✓ Traitement de la couche superficielle ;
- ✓ Renforcement de la grille par ajout des piquets ;
- ✓ Renforcement de la grille par ajout des conducteurs.

IV.4. Conclusion

Il ressort de cette étude les principales conclusions suivantes :

- ✓ L'augmentation de la longueur totale des conducteurs enfouis dans la terre entraîne une diminution de l'élévation du potentiel, de la résistance de la grille et des tensions maximales de contact et de pas.
- ✓ L'ajout des piquets ainsi que leur positionnement engendrent une diminution considérable des paramètres électriques susmentionnés caractérisant la grille de mise à la terre. L'emplacement des piquets d'une manière horizontale est le plus recommandé.

- ✓ Pour une même longueur totale des conducteurs, il est préférable d'augmenter la longueur que le nombre des piquets.
- ✓ La profondeur optimale pour le système de mise à terre est proche de 0.8 m.
- ✓ Les différentes grandeurs électriques simulées peuvent être également réduites en réalisant un traitement de la couche superficielle du sol.
- ✓ Pour des raisons économiques (longueur totale critique de conducteurs enterrés minimale), le maillage de forme carrée est recommandé que celui rectangulaire.

Conclusion générale

La centrale à turbine à gaz (TG) de LABREG, constituant de deux tranches identiques de production d'électricité, possède une puissance nominale de 2×140.5 MW. Chaque tranche est composée d'une turbine à combustion à gaz, un alternateur synchrone, ainsi que des auxiliaires mécaniques et électriques nécessaires au groupe turbo-alternateur et en communs entre les deux tranches. Son système de mise à la terre, déjà existant, est donc très complexe, sur-dimensionner et couteux. Cette présente étude est une contribution permettant de proposer à cet ouvrage un autre système de mise à la terre à la fois, simple, sécurisé, optimisé et donc moins coûteux.

Pour cela, divers grilles de mise à la terre de formes ayant les mêmes dimensions (longueur et largeur) que celles réelles, et en L inversé obtenue en éliminant les parties inutiles de la configuration rectangulaire, ont été considérées. Le choix de telles configurations est effectué selon plusieurs critères (sécuritaire, économique, contractuel, etc.). Pour chaque configuration, deux maillages carré et rectangulaire ont été choisis. En se basant aussi bien sur les différentes données réelles de l'ouvrage (paramètres de calculs contractuels et ceux fournies par le constructeur), que sur la mesure de la résistivité du sol, et en utilisant le code de calcul CYMGrd, nous avons de tels systèmes et présentons les différents résultats correspondants. La configuration présentant les meilleurs résultats (faibles valeurs de la tension de pas, la tension de contact, l'élévation du potentiel, etc.) a été optimisée.

Nous avons retenu les conclusions suivantes :

- ✓ La concordance entre les valeurs de l'élévation du potentiel, la résistance de la terre, les tensions maximales de contact et de pas obtenues en utilisant à la fois le code de calcul CYMGRD et la norme IEEE 80-2000, valide l'utilisation de ce code de calcul.

- ✓ Avec l'augmentation de la longueur totale des conducteurs, les paramètres électriques a savoir, la résistance de la grille de terre, l'élévation du potentiel de terre, ainsi que les tensions de contact et de pas, diminuent rapidement pour les longueurs inférieures à 20000 m, et lentement ailleurs en tendent vers un palier constant.
- ✓ L'augmentation de la profondeur d'enfouissement, l'ajout des piquets, l'augmentation de la longueur et du nombre de tels piquets engendre une diminution considérable de toutes les grandeurs électriques ainsi étudiées.
- ✓ La longueur des piquets est le paramètre prépondérant que le nombre de piquets, car son influence est plus significative. Il est donc préférable d'augmenter la longueur que le nombre des piquets.
- ✓ Les configurations de mise à la terre initiales sont largement sécurisés. Ceux critiques les sont également. Cependant, une nouvelle diminution de la longueur des conducteurs rend ces derniers non sécurisés.
- ✓ Avec l'accroissement de la résistivité de la couche superficielle, le facteur de réduction diminue rapidement pour les résistivités inférieures à 600 $\Omega.m$, et lentement ailleurs en tendant vers une valeur avoisinant 0.7.
- ✓ Les tensions de pas et de contact maximales augmentent linéairement avec la résistivité de la couche superficielle, ce qui augmente la sécurité des personnes et des équipements.
- ✓ Avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche superficielle, tensions maximales de pas et de contact ainsi que le facteur de réduction augmentent rapidement pour les épaisseurs comprises entre 0 et 0.2 m, et lentement ailleurs, en tendant vers limite. La valeur de l'épaisseur permettant l'obtention d'un facteur de réduction de 0.7, avoisine 0.1 m.

- ✓ Le traitement de la couche superficielle par modification de la résistivité et/ou l'épaisseur contribue donc considérablement au renforcement des systèmes de mise à la terre,
- ✓ Longueur totale critique de conducteurs est minimale dans le cas d'un maillage carré. En effet, sur le plan économique, ce maillage est recommandé que celui rectangulaire.

Bibliographie

Bogajewski, F. Dawalibi, Y. Gervais, D. Mukhedkar, "Effects of Sustained Ground Fault Current on Concrete Poles", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems vol. PAS-101, pp 2686-2693, 1982.

Berlin & Offenbach., « Mise à la Terre, Aspects Fondamentaux de Construction, Section 6 : CEM et Mise à la Terre », Rudolph W., Winter O. EMV nach VDE 0100. VDE-Schriftenreihe 66. VDE-Verlag GmbH. Berlin, Offenbach, 1995

Biddle C., « Manual of Ground Resistance Testing », Megger, Ground testers, Catalogue de produits, December 1947.

Bonnefoy M. & Lepeut P., « Risques Physiques : Les Schémas de Liaisons à la Terre ou Les régimes des neutres », 2008, www.cnam.fr/physique/.../LES_REGIMES_DES_NEUTRES_2008_JJB.pdf

CEI (Commission Electrotechnique Internationale), « Electrical installations of buildings-Part 5 :Selection and erection of electrical equipment – chapitre 54 : Earthing arrangements and protective conductors», CEI 60364-5-54, 2ème édition 2002-06.

Chauvin Arnoux Group, « Guide de la Mesure de Terre : Contrôleurs de Terre et/ou de Résistivité », Catalogue de produits, Première édition 2010. Site internet : www.chauvin-arnoux.fr

Chouteau M. & Giroux B., « Géophysique appliquée II : Méthodes électriques », Notes de cours, Ecole Polytechnique de Montréal, pp. 148, 2006.

CYMGRD 6.3, « User's Guide And Reference Manual », Manuel d'utilisation, Copyright CYME International T&D Inc., October 2006.

Dalziel, C. F., and Massogilia, F. P., «Let-go currents and voltages,» AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems », vol. 75, part II, pp. 49–56, 1956.

Dawalibi, F. P., Southey, R. D, and Baishiki, R. S., "Validity of conventional approaches for calculating body currents resulting from electric shocks," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 2, pp.613–626, 1990.

Demuyneck 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.

Dusseldorf., « Mise à la Terre, Aspects Fondamentaux de Construction, Section 6 : CEM et Mise à la Terre », ABB Switchgear Manual, 10th edition, Cornelsen Verlag 1999.

EDF (Electricité De France), « Principes de conception et de réalisation des mises à la terre», Electricité de France, Centre de Normalisation, H 115, Janvier 1984.

EDF (Electricité De France), « Prises de Terre pour Réseaux Electriques de Distribution », Electricité de France, Centre de Normalisation, HN 64-S-55, Avril 1997.

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

Bibliographie

Sol Résistif », Thèse de Doctorat, Département de Génie Electrique, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, Montréal, Septembre 2001.

IEEE Standard 80-2000, « IEEE guide for safety in AC substation grounding », Revision of IEEE Std 80-1986, New York, USA, 2000.

James G., « Manual of Ground Resistance Testing », Megger, Ground testers, Catalogue de produits, December 1947.

Johnson.R, K. Kreiter, J. Zhu, B. Russo, T. Saarenketo, « éElectrical properties of water in clay and silty soils», Elsevier, Journal of Applied Physics 40, pp 73- 88, 1998.

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. www.leonardo-energy.org

Lefouili M., « Caractérisation Numérique d'une Prise de Terre à Géométrie Complexes », Thèse de Doctorat, Département d'Electrotechnique, Université de Ferhat Abbas, Setif, Juillet 2007.

Legrand X., « Modélisation des systèmes de mise a la terre des lignes électriques soumis a des transitoires de foudre », Thèse de Doctorat en Sciences, l'Ecole Doctorale Electronique, Electrotechnique et Automatique de Lyon, 2007.

LEM Instruments Palmers strasse 2, « Mesures de mise à la terre », Document No A 99415 F, Autriche. Site Internet : www.lem.com[LEM].

LGE 2007, «étude géotechnique », Document No LGE 007/S/2007. SONELGAZ ,2007 .

Megger, « Getting down to earth: A practical guide to earth resistance testing », Cathalogue de produits, 2010.Site Internet: www.megger.com

M. Gerin (Merlin Gerin), « Choix techniques : Régimes de neutre », Merlin Gerin, Catalogue distribution électrique HT/BT, 2005.

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.

Richard S., « GroundRod-AC Substation Earting Tutorial »,ERA Technology Ltd: www.cobham.com

Robinson. D.A, C.M.K. Gardner, J.D. Cooper, «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.

W. Rowland, “Industrial System Grounding for Power, Static, Lightning, and Instrumentation, Practical Applications”, IEEE Transactions on Industry Applications, nov. 1995.

Bibliographie

Sautriau F., « Mise à la terre du neutre dans un réseau industriel haute tension », Cahier Technique Merlin Gerin n° 62, édition septembre 1991.

Schneider Electric Industries, « Protection des réseaux électriques : Guide de la protection », ART.065191, France, première édition, 2008. Site internet : www.schneider-electric.com

Stoffregen.H, U. Yamamanci, T. Zenker, G. Wessolek, “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.

Sunde E.D., «Conduction Effects in Transmission Systems, New York», Dover Publications Inc, 1968.

Tagg G.F., « Earth resistances », George Newnes Limited, London, first published, 1964.

Thapar B., “Impulse Impedance of Grounding Grids”, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, pp 2357-2352, 1980.

Ufer. H.G, «Investigation and testing of footing-type grounding electrodes for electrical installations» , IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 83, pp 1024-1048, 1964.

Wiater J., « Determination an Equivalent Ground Structure Model on the High Voltage Substation », XVII International Conference, Bialystok Technical University, pp.10.3.1-10.3.3, Poland, September 2007.