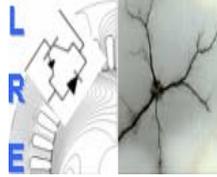


Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



وزارة التعليم العالي
و البحث العلمي
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات



Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Ecole Doctorale de Génie Electrique

Option : Réseaux Electriques et Haute Tension

Mémoire de Magister

Présenté par Mr. BERNOU Aissa

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique à l'USTHB

Thème

***Caractéristiques des systèmes de mise à la terre des
installations HT utilisant CYMGRD et FEMM.
Proposition d'un circuit électrique équivalent dans le
cas des hautes fréquences***

Soutenu publiquement le 15 décembre 2011 devant la commission d'examen :

Président	: Mr. BOUBAKEUR Ahmed	Professeur, E.N.P.
Rapporteur	: Mr. TEGUAR Madjid	Professeur, E.N.P.
Examineurs	: Mr. MEKHALDI Abdelouahab	Professeur, E.N.P.
	Mr. TAHMI Redhouane	Maître de Conférences, E.N.P.
	Mr. NEZLI Lezhari	Maître de Conférences, E.N.P.

Remerciements

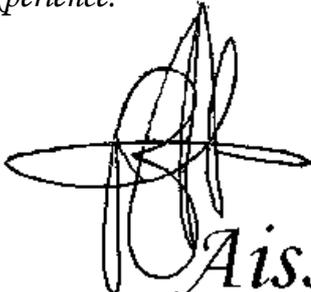
Ces travaux de thèse ont été effectués au sein du laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique à Alger.

Je tiens en premier lieu à remercier Mr. TEGUAR Madjid, Professeur à l'ENP, pour m'avoir encadré pendant toutes ces années. Qu'il soit remercié de la confiance qu'il m'a toujours témoignée en me confiant ces travaux et en acceptant d'être directeur de ces derniers sans jamais douter de moi.

Que l'ensemble des enseignants, Mr A. BOUBAKEUR, Mr. A. MEKHALDI, Mr. L. NEZLI et Mr. R. TAHMI, soit également remercié ainsi que tous ceux qui m'ont de près ou de loin soutenue durant ma carrière d'étudiant.

Enfin, je ne peux oublier mes proches, qui de loin ou de près m'ont soutenu. Merci à ma mère, mon père et ma grande mère, pour m'avoir soutenue et permis d'en arriver là. Toute ma reconnaissance et gratitude vont vers ceux qui je n'aurai jamais pu faire ce travail, mon cher frère Hamza, ma sœurs Imene et son mari Mohamed et ma petite sœur soumia, pour leur présence et soutien permanents et leur aides dans les moments difficiles.

Que toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail et à l'impression de ce mémoire, trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance, je les remercie vivement pour leur aide précieuse et pour avoir mis à ma disposition leur expérience.



Aissa

ملخص :

يتعلق هذا العمل بدراسة سلوك هيكل حديدي يستعمل للتأريض بدون و بأوتاد. من أجل ذلك ، قمنا بعرض محاكاة تحت بيئة CYMGRD. اعتبرنا عدة عوامل تؤثر منها : طول الأوتاد ، عمق الدفن ، عدد الدارات ، الشكل الهندسي للهيكل و طبيعة الأرض (متجانسة و غير متجانسة مكونة من طبقتين). اعتماداً على مقاومة الأرض ، يقوم البرنامج بتقييم ارتفاع كمون الأرض ، توتر اللمس ، توتر الخطوة و المقاومة الكهربائية الأرضية. قمنا بدراسة محاكاة ثنائية ، بالبرنامج FEMM ، لمأخذ أرضي على شكل نصف كروي في الترددات العالية. إقترحنا ، في هذه الحالات ، دارة كهربائية مكافئة.

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

Résumé :

Ce travail porte sur l'étude du comportement des systèmes de mise à la terre sous différentes contraintes. Pour cela, nous avons effectué une simulation en utilisant le code de calcul CYMGRD. Ce dernier permet l'évaluation de l'élévation de potentiel de terre, la résistance du système et les tensions de contact et de pas des grilles de mise à la terre. Plusieurs paramètres d'influence ont été considérés à savoir, la longueur des piquets, la profondeur d'enfouissement, le nombre des mailles, la forme géométrique de ces grilles et la nature du sol (homogène et hétérogène à deux couches). Nous avons effectué une deuxième simulation utilisant le code de calcul FEMM, basé sur la méthode des éléments fins, pour étudier le comportement d'une électrode hémisphérique lors d'un écoulement des courants transitoires (la foudre). Nous avons proposé, dans ces conditions, un circuit électrique équivalent.

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

Abstract:

This work deals with the study of the behavior of earthing systems under various constraints. For this purpose, we carried out a simulation using the computer code CYMGRD. This later allows the evaluation of the ground potential rise, the system resistance and the contact and step voltages of the earthing grids. Several influence parameters are considered such as, the length of rods, the burial depth, the meshnumber, the geometrical shape of these grids and the ground nature (homogeneous and heterogeneous with two layers). We carried out a second simulation using the computer code FEMM, based on the finite elements method, to study the behavior of a hemispherical electrode during the flow of transitory currents (the lightning). In these conditions, we have proposed an equivalent electrical circuit.

Key words: earthing, CYMGRD, FEMM, ground electrode, roasts, stake, contact voltage, step voltage, ground resistance, ground resistivity.

SOMMAIRE

Sommaire

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

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

I.1. Introduction	4
I.2. Définitions	4
I.2.1 Prise de terre	4
I.2.1.1 Prise de terre "profonde"	4
I.2.1.2 Prise de terre de "surface"	4
I.2.2. Mise à la terre	5
I.2.3. Masse	5
I.2.4. Réseau de terre	5
I.3. Défauts affectant les prises de terre	5
I.4. Critères de conception d'une électrode de mise à la terre	6
I.4.1. Adéquation de performance	6
I.4.2. Adéquation de fiabilité et entretien	6
I.4.3. Adéquation des effets sur l'environnement	6
I.5. Matériaux utilisés pour la construction des systèmes de mise à la terre	6
I.6. Régime de neutre et schémas de liaison à la terre en basse tension	8
I.6.1. Schémas de liaison	8
I.6.2. Domaines d'utilisation des régimes de neutre	11
I.6.3. Méthodologie pour choisir le SLT	11
I.7. Régimes de neutre utilisés en haute tension	11
I.7.1. Mise à la terre par neutre isolé	11
I.7.2. Mise à la terre directe	12
I.7.3. Mise à la terre par l'intermédiaire d'une résistance	12
I.7.4. Mise à la terre par l'intermédiaire d'une réactance	12
a) Réactance accordée (bobine de Petersen)	12
b) Réactance de limitation	12
I.8. Différents modes de raccordement du neutre utilisés en haute tension	13
I.9. Contraintes liées aux surtensions	16
I.9.1. Mise à la terre par réactance de limitation	16
I.9.2. Mise à la terre par résistance	17
I.10. Contraintes liées au réseau	17
I.11. Contraintes liées aux récepteurs	17
I.12. Mode de protection de terre	18
I.12.1. Réglage des protections de terre	19
I.12.2. Résistance intermédiaire et courant de défaut I_L pour un réseau de moyenne tension	20
I.13. Réalisation de la mise à la terre du point neutre	21
I.13.1. Mise à la terre avec neutre accessible	21
I.13.2. Mise à la terre avec neutre artificiel	21
I.14. Conclusion	24

Chapitre II : Résistance et résistivité de terre

II.1. Introduction	25
II.2. Réseau de terre	25
II.3. Rôle des systèmes de mise à la terre	25

Sommaire

II.4. Résistance et résistivité de la terre	26
II.5. Répartition de potentiel autour d'un réseau de terre	27
II.6. Résistance d'une électrode hémisphérique	27
II.7. Tension de pas	28
II.8. Evaluation de la résistivité du sol	29
II.9. Sol en plusieurs couches de résistivités différentes	31
II.10. Méthodes de mesures de résistivité de sol	31
II.10.1. Méthode de Wenner	31
II.10.2. Méthode de Schlumberger	32
II.10.3. Méthodes de mesure à 3 pôles	33
II.10.4. Mesures sans piquets de terre	35
II.11. Détermination quelques configurations de mise à la terre	35
II.11.1 Electrode hémisphérique	36
II.11.2. Piquet de terre vertical de forme cylindrique	37
II.11.3. Electrodes en ligne droite	38
II.11.4. Electrodes aux sommets d'un triangle équilatéral	38
II.11.5. Electrodes sur les côtés d'un carré	39
II.11.6. Câble enterrer horizontalement	40
II.11.7. Plusieurs câbles rayonnant de longueur l , enfouis à la même profondeur e	41
II.11.8. Réseau maillé (grille)	41
II.11.8.1. Grille forme disque	41
II.11.8.2. Réseau maillé	42
II.11.9. Boucle enterrée	42
II.11.10. Méthodes conventionnelles dans le cas d'une grille combinée avec des piquets ...	43
II.11.10.1. Méthode de Laurent-Niemann	43
II.11.10.2. Méthode de Sverak	44
II.11.10.3. Méthode de Schwarz	44
II.11.10.4. Méthode De Thapar-Gerez	46
II.11.11. Réduction de la résistivité entourant l'électrode de mise à la terre	47
II.11.12. Sol non homogène	49
II.11.12.1. Résistance d'un piquet de terre dans un sol en deux couches	49
II.11.12.2. Résistance d'une électrode horizontale dans un sol en deux couches	50
II.12. Conclusion	51

Chapitre III : Présentation et validation du code CYMGRD

III.1. Introduction	52
III.2. Présentation de CYMGRD	53
III.2.1. Modules d'analyse du logiciel	54
III.2.2. Types d'électrodes et terminologie	54
III.2.3. Résistivité et évaluation de la sécurité	55
III.2.4. Mesure de la résistivité du sol et modèles de sol	56
III.2.5. Evaluation de la sécurité	57
III.3. Validation du code CYMGRD	58
III.3.1. Validation par les méthodes conventionnelles	58
III.3.2. Validation par le guide IEEE 80-2000	59
III.3.2.1. Principe de conception d'un réseau de terre selon IEEE 80-2000	59
III.3.2.2 Configuration de base	65
III.3.2.3 Configuration améliorée	66

Sommaire

III.4. Conclusion	69
-------------------------	----

Chapitre IV : Caractéristiques des grilles de terre utilisant CYMGRD

IV.1. Introduction	70
IV.2. Étude d'une grille carrée	70
IV.2.1. Influence des mailles sur une grille carrée sans piquets	74
IV.2.1.1. Influence du nombre de mailles	74
IV.2.1.2. Influence de l'espacement entre conducteurs	79
IV.2.2. Influence des piquets cas d'une grille carrée	81
IV.2.2.1. Influence du nombre de piquets	81
IV.2.2.2. Influence de la longueur des piquets	85
IV.2.2.3. Influence de l'emplacement des piquets	89
IV.2.3. Influence de la profondeur d'enfouissement sur une grille carrée	90
IV.2.4. Influence de la forme de la grille	93
IV.3. Conclusion	97

Chapitre V : Modélisation d'une électrode hémisphérique basée sur FEMM et PSpice

V.1. Introduction	98
V.2. Simulation par la méthode des éléments finis dans le domaine fréquentiel	98
V.2.1. Méthodes des éléments finis	98
V.2.2. Fonctionnalités générales du FEMM (Finite Element Method Magnetics)	100
V.3. Circuit équivalent RC	107
V.3.1. Sélection des paramètres R et C pour différentes valeurs de permittivité relative du sol	110
V.3.2. Simulations dans le domaine temporel	111
V.3.3. Calculs autour de l'onde de courant 0,5/20 μ s de valeur crête 100 kA	112
V.3.3.1. Charge écoulée « Q »	113
V.3.3.2. Energie spécifique « Es »	113
V.3.4. Choix du logiciel PSpice	114
V.3.5. Présentation du logiciel PSpice	114
V.3.6. Résultats de simulation	116
V.4. Conclusion	118
Conclusion générale	119
Bibliographie	123

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Pour éviter tout risque d'électrocution ou de détérioration dû à un défaut d'isolement, les équipements électriques doivent être mis à la terre. Il faut s'assurer, par conséquent, que les prises de terre soient de qualité et qu'elles conservent leurs caractéristiques dans le temps. Il existe des instruments spécialisés pour cela. Mais ce qui importe surtout, ce sont les conditions de mesures, c'est-à-dire les caractéristiques de l'installation.

Le rôle des prises de terre est, avant tout, de protéger les personnes contre les éventuels défauts d'isolement des équipements sous tension. La prise de terre assure également la protection des équipements et des installations. Elle accroît la fiabilité des équipements et réduit le risque de détérioration en cas de foudre ou de courant de défaut.

L'importance de la conception de la mise à la terre des lignes de transport d'énergie et des postes de transformation, tient de la nécessité de réduire les coûts associés à l'installation des systèmes de mise à la terre, de protéger le matériel, d'améliorer la qualité du service et de limiter les surtensions nuisibles aux appareils avoisinants et potentiellement dangereuses pour les individus. Les systèmes non reliés à la terre produisent des surtensions plus importantes en cas de défaut.

Afin de pouvoir faire une conception de mise à la terre, plusieurs études ont été déployées pour s'approcher le plus possible des conditions réelles de l'installation, et de façon à prévoir le comportement de la mise à la terre, sous différentes charges rencontrées lors d'un défaut du réseau électrique.

Une prise de terre est caractérisée, à basse fréquence, par une résistance, et dans les hautes gammes de fréquence, par une impédance RC [Visacro et De Conti, 2007]. Plus elle (résistance ou impédance) est faible, mieux c'est. Il est donc important de connaître la valeur de cette résistance (ou impédance), ne serait-ce que pour calibrer les dispositifs de protection différentiels (disjoncteurs ou interrupteurs) dont les courants nominaux sont choisis en fonction des caractéristiques de la prise de terre.

Nous nous proposons d'effectuer ce travail qui consiste à étudier le comportement d'un système de mise à la terre, à géométrie complexe, lors d'un défaut quelconque. En utilisant le code de calcul CYMGRD, nous examinons, à fréquence industrielle (la fréquence limite étant égale à 100 Hz), l'impact des différents paramètres d'une grille (nombre de

mailles, profondeur d'enfouissement, ...) sur les tensions de contact et de pas, l'élévation du potentiel de terre et la résistance du circuit de terre, dans le cas des sols homogène et stratifié horizontalement (hétérogène à deux couches). Par ailleurs, le comportement d'une électrode hémisphérique a été étudié en utilisant le code de calcul FEMM 4.2. Pour cela, nous suivons l'évolution de son impédance en fonction de la fréquence. Cette dernière a été variée de 0 à 10 MHz. Un modèle électrique équivalent a été également proposé.

Ainsi notre mémoire s'articule sur cinq chapitres distincts.

Dans le premier chapitre, nous présentons essentiellement quelques notions sur la conception des systèmes de mise à la terre, ainsi que sur les matériaux utilisés pour leur fabrication. En outre, nous exposons et comparons les différents types de liaison à la terre du neutre, qui se distinguent par leur mode de raccordement du point neutre et leur technique d'exploitation. Les différentes contraintes liées aux surtensions, aux réseaux, et aux récepteurs ainsi que les modes de protections y sont également présentées.

Le deuxième chapitre regroupe les définitions relatives à un système de mise à la terre, son but et rôle, sa répartition de potentiel et sa tension de pas ainsi que l'évaluation de la résistivité du sol. Nous citons par la suite, les principales méthodes utilisées pour la mesure de la résistivité du sol et de la résistance de prise de terre. Nous exposons aussi quelques modèles d'électrodes de terre utilisées dans les systèmes de mise à la terre.

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 [IEEE, 2000] d'une part, et les principales méthodes conventionnelles d'autre part. Une très bonne concordance a été obtenue.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation des grilles de mise à la terre avec et sans piquets. Nous nous intéressons plus particulièrement à la détermination des différents paramètres d'un système de mise à la terre à fréquence industrielle. A partir de l'analyse du sol, basée sur la mesure de sa résistivité, ce code permet d'évaluer l'élévation du potentiel de

terre, la résistance du système de mise à la terre, les tensions de contact et pas, et de repérer les zones à risque ou dangereuses à l'intérieur des aires d'intérêt.

Dans le cinquième et dernier chapitre, nous étudions le comportement de l'impédance de terre d'une électrode hémisphérique, dans les hautes fréquences, en utilisant le logiciel FEMM 4.2. Nous proposons aussi un circuit RC équivalent, pour représenter la configuration hémisphérique de mise à la terre pour l'étude des surtensions de foudre dans les lignes de distribution.

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

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES

SYSTEMES DE MISE A LA TERRE

I.1. Introduction

La mise à la terre d'un réseau électrique de haute tension peut être réalisée de différentes manières. Dans ce chapitre, nous analysons particulièrement les contraintes liées aux différents paramètres de l'installation (surtensions, réseaux, récepteurs) et nous présentons les régimes de neutres utilisés en basse et haute tensions. Différents modes de protection sont décrits, ainsi que les réglages à prévoir compte tenu des exigences souhaitées.

I.2. Définitions

I.2.1 Prise de terre

Corps conducteur enterré, ou ensemble de conducteurs enterrés et connectés, assurant une liaison électrique avec la terre (câble, piquet, grille) [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.2.1.1 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.2.1.2 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.2.2. Mise à la terre

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

I.2.3. Masse

C'est la partie conductrice d'un matériel électrique, qui n'est pas normalement sous tension, mais qui peut le devenir en cas de défaut d'isolement des parties actives de ce matériel [EDF, 1997 ; Lefouili, 2007].

I.2.4. Réseau de terre

Il est constitué d'un ensemble de conducteurs enterrés, en contact direct avec le sol et reliés électriquement entre eux [Lefouili, 2007].

I.3. Défauts affectant les prises de terre

Les défauts affectant les réseaux de mise à la terre peuvent être dus à l'agression mécanique (coup de pioche ou de pelleteuse), à la corrosion ou au vieillissement.

Les courants de foudre ont un grand effet sur le réseau de mise à la terre. En effet, un courant de foudre important peut avoir des conséquences thermiques destructives sur la structure de mise à la terre (décomposition, fusion, carbonisation) [Lefouili, 2007].

La protection des électrodes de terre contre la corrosion est assurée par une couche de zinc recouvrant l'électrode fabriquée en cuivre ou en acier. L'aluminium n'est pas utilisé dans la fabrication d'électrodes à cause de l'oxydation de sa surface, ce qui détériore sa conductivité [Georges, 2001].

Il faut placer les prises de terre dans une zone où la température est constante. La présence d'eau et de sels dans les sols ayant une impédance très faible, est souvent à l'origine d'une importante corrosion au niveau des prises de terre et de leurs bornes. Dans ce cas, il faut faire une vérification pour l'installation de mise à la terre au moins une fois par an [LEM].

I.4. 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, de la facilité de l'entretien et des effets sur l'environnement.

I.4.1. 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.4.2. Adéquation de fiabilité et entretien

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.4.3. 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.5. Matériaux utilisés pour la construction des systèmes de mise à la terre

Le tableau (I.1) illustre les matériaux des systèmes de protection contre la foudre et conditions d'utilisation [CEI, 2006].

D'autres produits sont disponibles sur le marché pour ce faire. Dans tous les cas, il faut éviter toute solution tendant à réduire les performances de la mise à la terre avec le

temps. C'est souvent le cas en pratique, les produits à base de sel permettent d'obtenir des faibles résistivités des sols mais perdent leurs caractéristiques dans le temps [Nzuru, 2009].

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

Note 1 : Ce tableau ne donne que des indications générales, dans des conditions particulières, à des considérations sur l'immunité contre la corrosion est requise.

Note 2 : Les conducteurs torsadés sont plus vulnérables à la corrosion que les conducteurs massifs. les conducteurs torsadés sont aussi vulnérables s'ils entrent ou sortent du béton ou du sol. C'est pourquoi les conducteurs torsadés galvanisés ne sont pas recommandés dans le sol.

Note 3 : L'acier galvanisé peut être corrodé dans des sols argileux ou humides.

Tableau I.1 : Matériaux des systèmes de protection contre la foudre et conditions d'utilisation.

I.6. Régime de neutre et schémas de liaison à la terre en basse tension

I.6.1. Schémas de liaison

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

Le schéma de liaison à la terre représente tout simplement la manière dont les neutres du transformateur d'alimentation et des masses des récepteurs sont (ou pas) reliés à la terre ou au neutre du réseau d'alimentation. On distingue trois schémas possibles TT (Figure I.1), IT (Figure I.2) et TN (TN-C ou TN-S) (Figure I.3). Ces différentes codifications sont données selon les normes NF C 15-100, NF C 13-100 et NF C13-200 et définies comme suit [Lefouili, 2007 ; Prévé, 2005] :

- **La première lettre** caractérise le point neutre du transformateur ou de la source ;
 - **T** : liaison directe du neutre à la **Terre** ;
 - **I** : liaison est **I**solée ou relie à la terre par l'intermédiaire d'une **I**mpédance (1 à 2 k Ω).

- **La deuxième lettre** caractérise les masses électriques des récepteurs ;
 - **T** : liaison des masses à une prise de **Terre** ;
 - **N** : liaison des masses au **N**eutre.

- **La troisième lettre** : concerne le régime TN
 - **C** : dans ce cas, le conducteur de protection PE et le conducteur neutre N sont **C**onfondus ; il est appelé PEN ;
 - **S** : dans ce cas, le conducteur de protection PE et le conducteur Neutre sont **S**éparés.

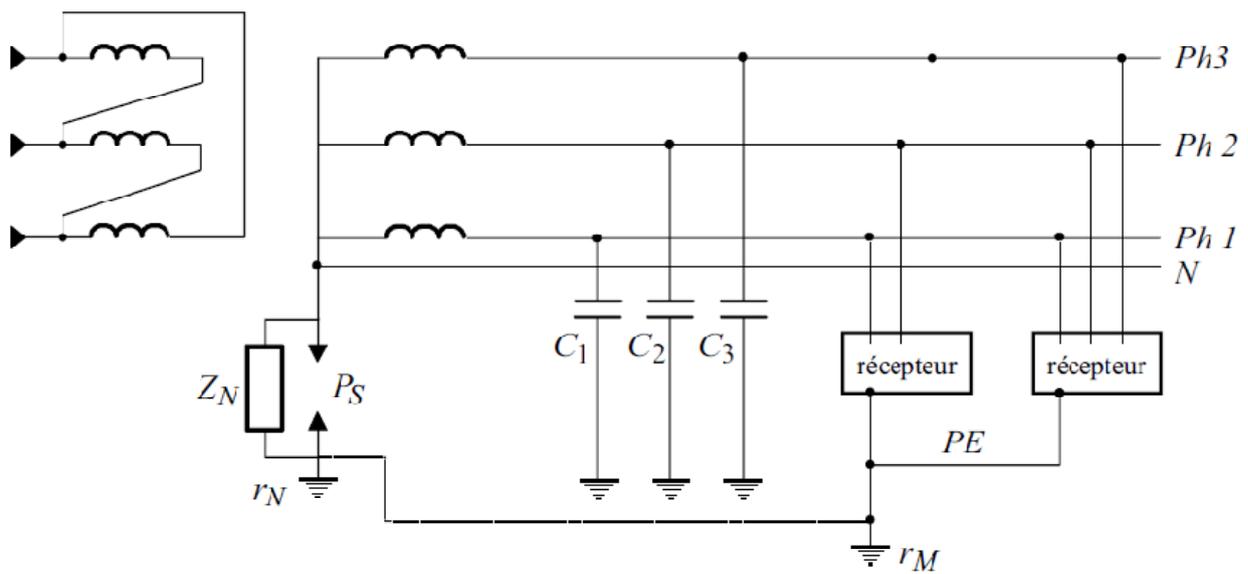


Figure I.1 : Schéma de liaison à la terre en basse tension : TT.

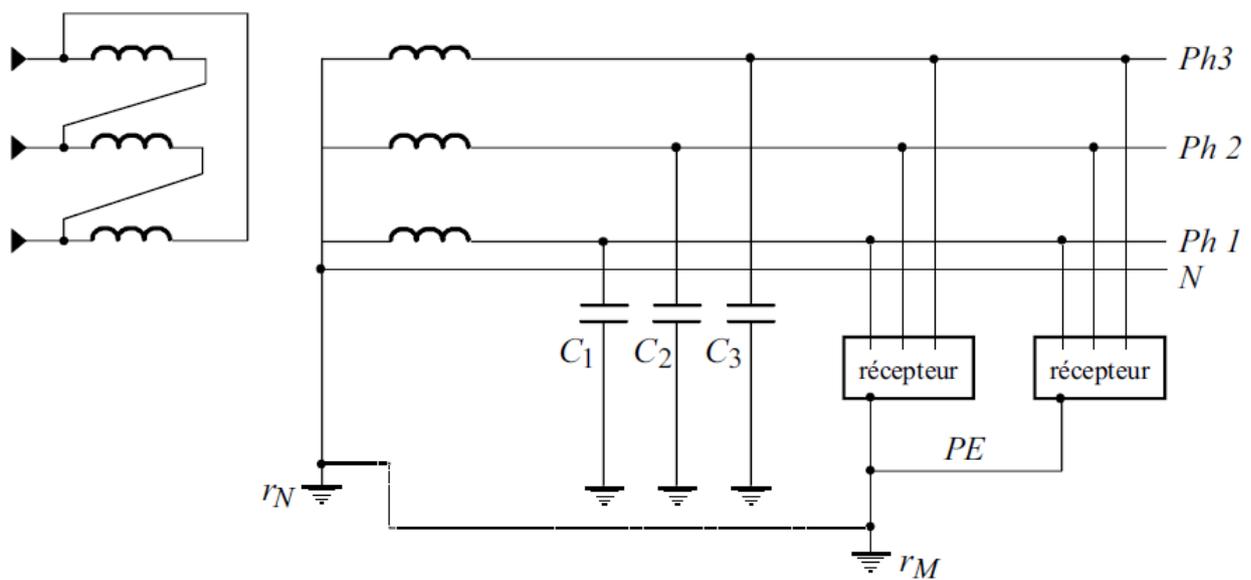


Figure I.2 : Schéma de liaison à la terre en basse tension : IT.

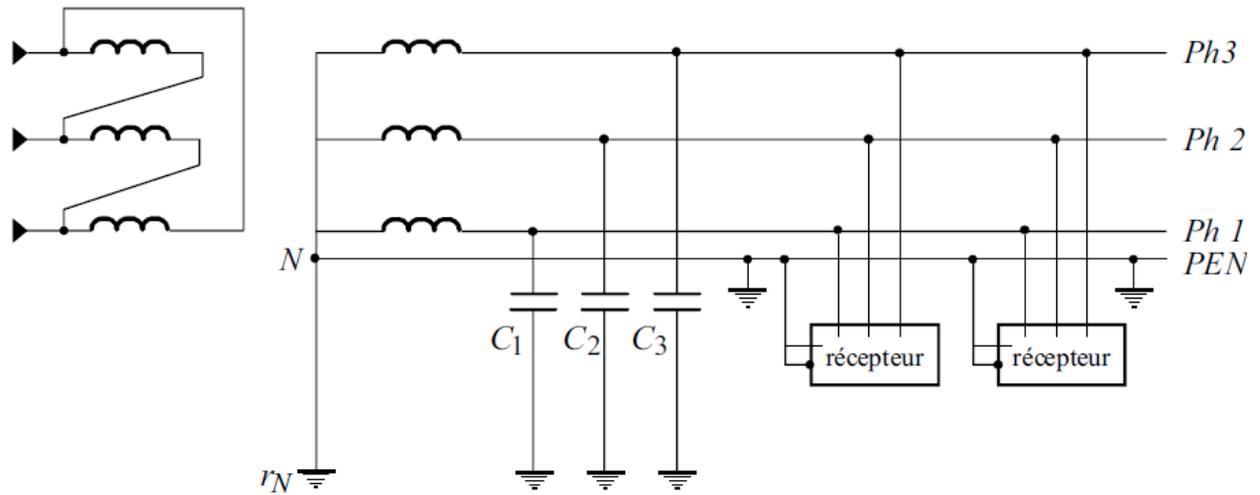


Schéma TN-C.

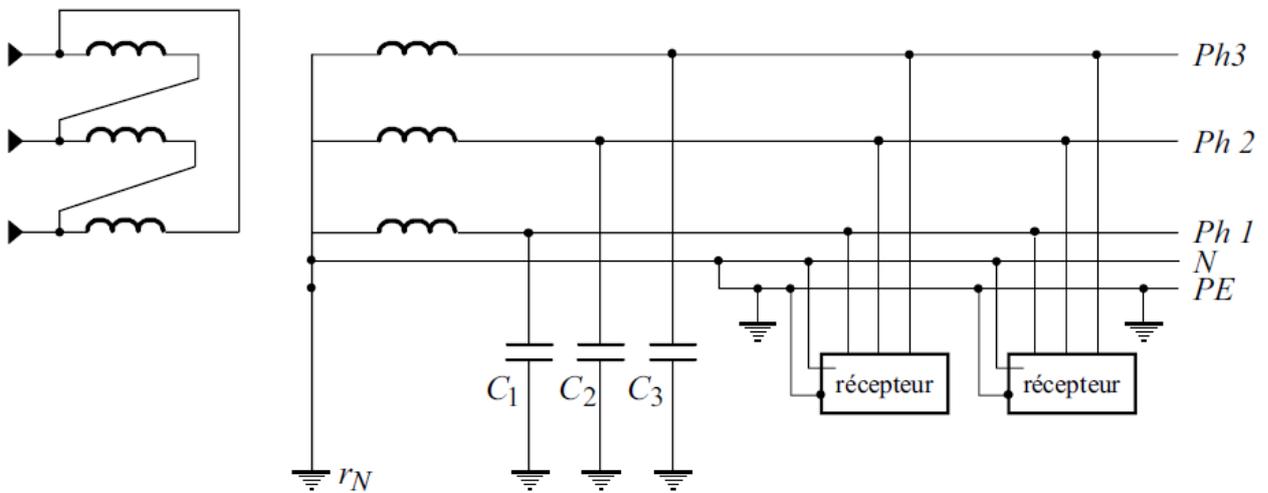


Schéma TN-S.

Figure I.3 : Schémas de liaison à la terre en basse tension : TN.

I.6.2. Domaines d'utilisation des régimes de neutre

Les trois SLT, mondialement utilisés et normalisés par la CEI 60364-5-54 [CEI, 2002], ont pour objectif commun la recherche de la meilleure sûreté. Sur le plan de la protection des personnes, les 3 régimes sont équivalents si l'on respecte toutes les règles d'installation et d'exploitation. Etant donné les caractéristiques spécifiques à chaque régime, il ne peut donc être question de faire un choix à priori. Ce choix doit résulter d'une concertation entre l'utilisateur et le concepteur de réseau (Bureaux d'études, installateur...) sur [Bensoam, 2003]:

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

I.6.3. Méthodologie pour choisir le SLT

Les trois SLT peuvent coexister dans une même installation électrique, ce qui est une garantie pour obtenir la meilleure réponse aux besoins de sécurité et de disponibilité. Ensuite, s'assurer que le choix n'est pas recommandé ou imposé par les normes ou la législation (décrets, arrêtés ministériels ...). Puis, dialoguer avec l'utilisateur pour connaître ses exigences et ses moyens [Bensoam, 2003] :

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

I.7. Régimes de neutre utilisés en haute tension

Lorsque l'on considère, sans distinction, les réseaux de distribution publique et les réseaux privés industriels ou tertiaires, on rencontre tous les principes de mise à la terre du point neutre, à savoir [Schneider, 1997 ; Sautriau, 1991] :

I.7.1. 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 (≤ 15 kV) nécessitant la continuité de service [Schneider, 2008].

I.7.2. 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 maximales et le danger pour le personnel est important pendant la durée du défaut.

Cette solution n'est pas utilisée pour la distribution en haute tension. Elle peut être utilisée quand la puissance de court-circuit de la source est faible [Sautriau, 1991 ; Schneider, 2008].

I.7.3. 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 [EDF, 1959 ; MG, 2005].

I.7.4. Mise à la terre par l'intermédiaire d'une réactance

a) Réactance accordée (bobine de Petersen)

Cette solution est parfois utilisée sur les réseaux HT de distribution publique. Elle est peu utilisée en distribution industrielle. Des relais de protection sensibles à la composante active du courant homopolaire sont nécessaires pour obtenir la sélectivité [Sautriau, 1991 ; Schneider, 2008].

b) Réactance de limitation

Cette solution peut provoquer des surtensions sévères. Elle n'est applicable que si l'impédance de limitation a une valeur faible [Sautriau, 1991 ; Schneider, 2008].

I.8. Différents modes de raccordement du neutre utilisés en haute tension

Pour récapituler, les différents modes de raccordement du point neutre à la terre sont indiqués sur le tableau I.2 [Schneider, 1997].

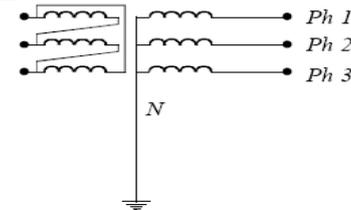
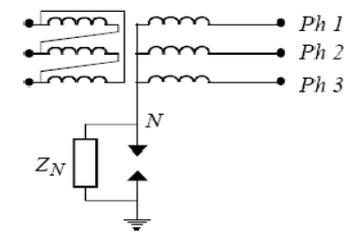
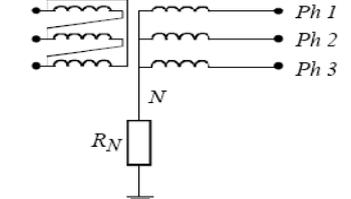
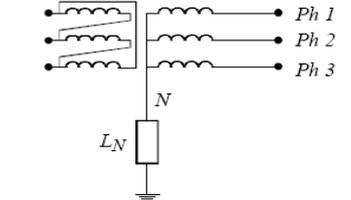
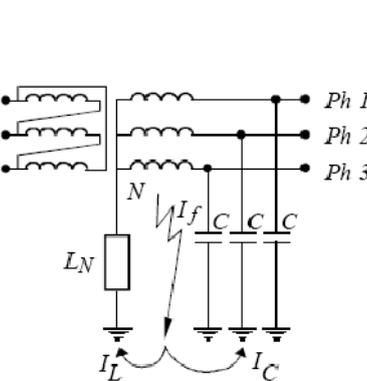
Type	Schéma
<p>Neutre mis directement à la terre Une liaison électrique est réalisée intentionnellement entre le point neutre et la terre.</p>	
<p>Neutre isolé Il n'existe aucune liaison électrique entre le point neutre et la terre, à l'exception des appareils de mesure ou de protection. Neutre fortement impédant Une impédance de valeur élevée est intercalée entre le point neutre et la terre.</p>	
<p>Neutre mis à la terre par résistance Une résistance est intercalée volontairement entre le point neutre et la terre</p>	
<p>Neutre mis à la terre par réactance Une réactance est intercalée volontairement entre le point neutre et la terre</p>	
<p>Neutre mis à la terre par bobine d'extinction de Petersen Une réactance accordée sur les capacités du réseau est volontairement intercalée entre le point neutre et la terre de sorte qu'en présence d'un défaut à la terre, le courant dans le défaut est nul.</p> <p>$\vec{I}_f = \vec{I}_L + \vec{I}_C = \vec{0}$ I_f : courant de défaut ; I_L : courant dans la réactance de mise à la terre du neutre ; I_C : courant dans les capacités phase-terre.</p>	

Tableau I.2 : Modes de raccordement du point neutre.

Sur le plan normatif, la norme NF C 13-200 [AFNOR, 1987] donne une définition précise des régimes du neutre et établit leurs règles de mise en œuvre, ils sont définis par un code à trois lettres :

La première lettre précise la situation du point neutre par rapport à la terre

On distingue :

- Les installations dont le point neutre est relié directement à la terre, installations désignées par la première lettre T ;
- Les installations dont le point neutre est isolé ou relié à la terre par l'intermédiaire d'une impédance, installations désignées par la première lettre I.

La deuxième lettre précise la situation des masses

On distingue :

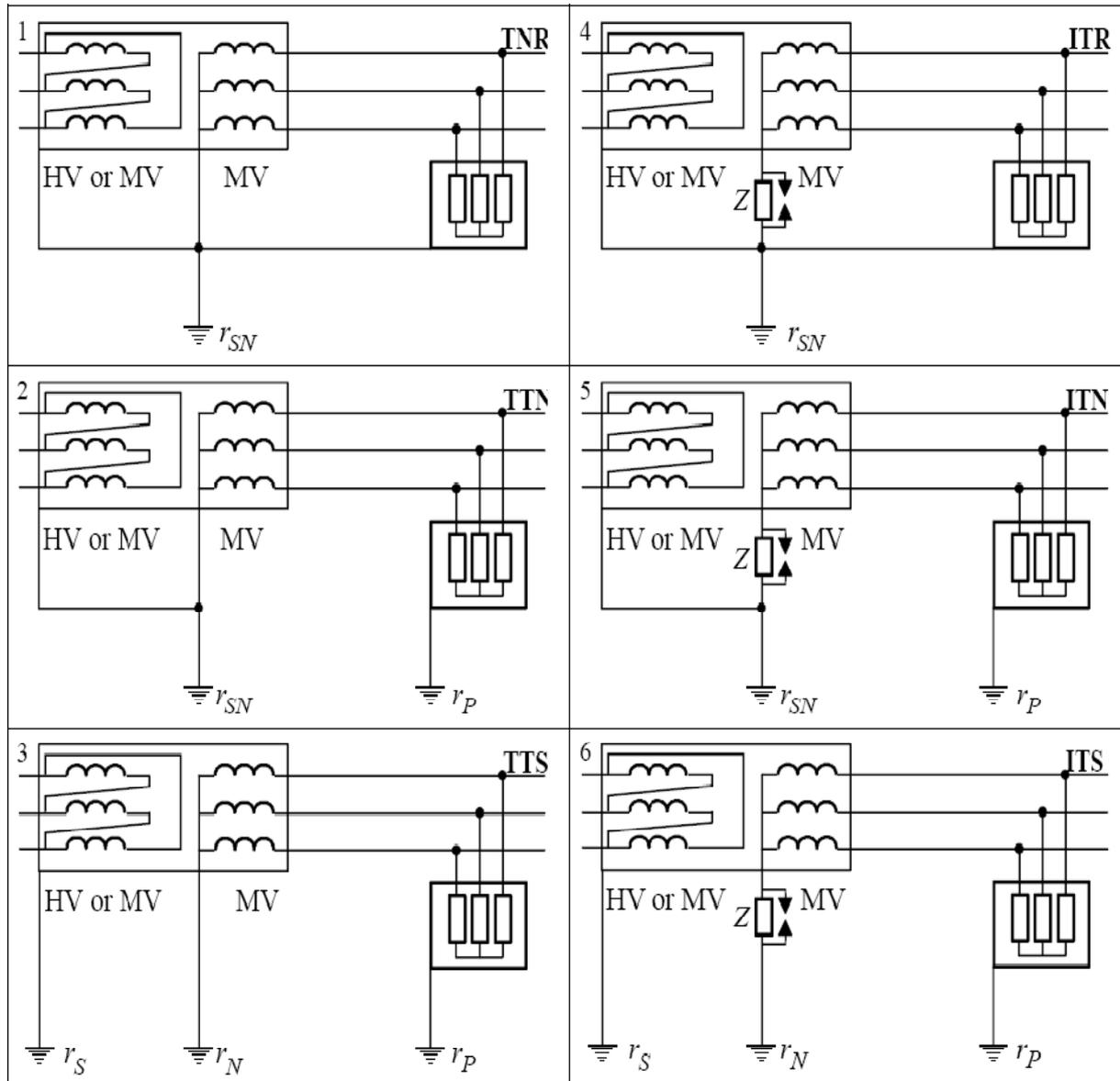
- Les installations dont les masses sont reliées directement au point neutre mis à la terre, installations désignées par la deuxième lettre N ;
- Les installations dont les masses sont reliées directement à la terre, indépendamment de la mise à la terre éventuelle du neutre, installations désignées par la deuxième lettre T.

La troisième lettre précise les liaisons éventuelles entre les masses du poste, le point neutre et les masses de l'installation

On distingue :

- Les installations dont les masses du poste d'alimentation sont reliées à une prise de terre commune au neutre et aux masses de l'installation, installations désignées par la troisième lettre R ;
- Les installations dont les masses du poste d'alimentation sont reliées à une prise de terre du neutre, les masses de l'installation étant reliées à une prise de terre séparée, installations désignées par la troisième lettre N ;
- Les installations dont les masses du poste d'alimentation, le neutre et les masses de l'installation sont reliées à des prises de terre séparées, installations désignées par la troisième lettre S.

En pratique la norme NF C13-200 n'a retenu que les six schémas représentés par le tableau I.3.



r_{SN} : résistance de la prise de terre commune aux masses du poste et au neutre ;

r_N : résistance de la prise de terre du neutre ;

r_S : résistance de la prise de terre des masses du poste ;

r_P : résistance de la prise de terre des masses de l'installation.

Tableau I.3 : Régimes du neutre en haute tension.

I.9. Contraintes liées aux surtensions

I.9.1. Mise à la terre par réactance de limitation

L'étude des surtensions, lors de l'élimination des courts-circuits sur les réseaux dont le neutre est mis à la terre par une réactance, conduit aux résultats suivants [Sautriau, 1991] :

- soit $L_0\omega$ la réactance de limitation du courant de défaut à la terre ;
- soit $L\omega$ la réactance de court-circuit triphasé du réseau.

La surtension entre neutre et terre, lors de l'élimination des courts-circuits, est :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{L_0\omega}{L\omega}}$$

L_0 et L : impédances de limitation du courant de défaut à la terre et de court-circuit triphasé du réseau ;

ω : pulsation du réseau ;

ΔV : différence entre la surtension et la tension du réseau V .

d'où, pour un réseau de câbles à champ radial :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{L_0}{L}} \quad (I.1)$$

pour les autres cas.

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_0}{L}} \quad (I.2)$$

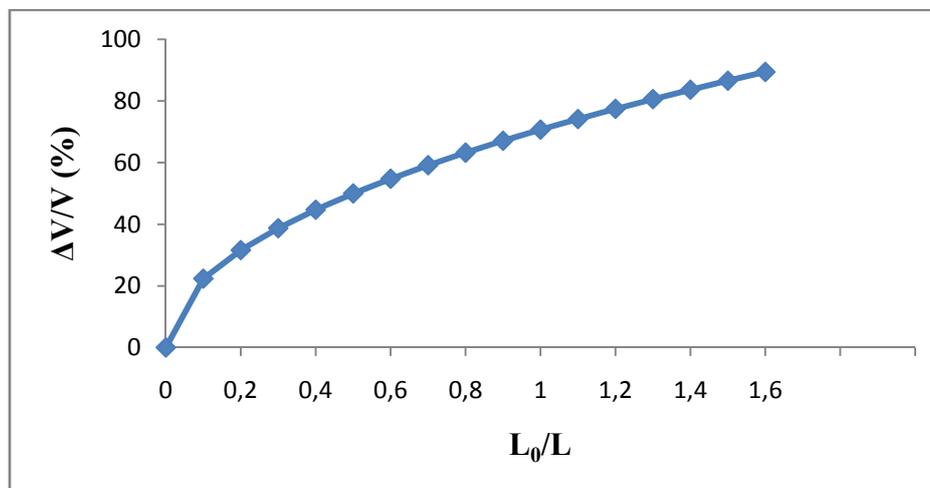


Figure I.4 : Variation de la surtension pour les mises à la terre par réactance.

I.9.2. Mise à la terre par résistance

Pour les réseaux des groupes hydrauliques, on adopte une valeur r de résistance correspondant à une puissance active totale dissipée $\frac{U^2}{3r}$ égale ou supérieure à la puissance capacitive ($2 C \omega U^2$) en présence d'un défaut phase-terre, soit [Sautriau, 1991] :

$$\frac{U^2}{3r} \geq 2C\omega U^2 \quad (I.3)$$

En divisant par $\frac{U}{\sqrt{3}}$, on obtient :

$$\frac{U}{r\sqrt{3}} \geq 2 \left(3C\omega \frac{U}{\sqrt{3}} \right) \quad (I.4)$$

où

- $\frac{U}{r\sqrt{3}}$ est la valeur du courant de défaut terre I_L dans la mise à la terre ;
- $3 C \omega \frac{U}{\sqrt{3}}$ est la valeur du courant capacitif I_C du réseau en cas de défaut terre.

D'où la relation $I_L \geq 2 I_C$.

I.10. Contraintes liées au réseau

Le critère précédent permet de définir la limite inférieure du courant de défaut franc phase-terre.

Pour le choix de la limite supérieure, il convient de s'assurer que le courant de défaut ne provoque pas de dégâts sur le trajet qu'il emprunte et particulièrement dans les écrans de câbles. L'intensité maximale supportée par les écrans de câbles peut être précisée par les constructeurs, en général de 500 à 3000 A pendant 1 seconde [Sautriau, 1991].

I.11. Contraintes liées aux récepteurs

Dans les réseaux HT de distribution, les récepteurs sont des transformateurs qui ne présentent pas d'exigences particulières vis-à-vis de la mise à la terre du neutre du réseau d'alimentation [Sautriau, 1991].

Mais les réseaux industriels HT peuvent alimenter des machines tournantes sous des tensions allant de 3 kV jusqu'à 15 kV; il est alors souhaitable que l'intensité du défaut masse n'excède pas 20 A, afin d'éviter la brûlure des tôles des machines. En effet, si le rebobinage est une réparation assez courante lorsqu'un enroulement est défaillant, la remise en état d'un appareil est beaucoup plus longue et onéreuse quand les tôles sont atteintes [Sautriau, 1991].

I.12. Mode de protection de terre

La valeur de l'impédance de mise à la terre réagit sur la méthode de protection nécessaire contre les défauts phase-terre.

D'une façon générale, plus les courants de défaut sont importants, plus ils sont faciles à détecter ; et plus ils sont faibles, plus leur détection est délicate et sensible à des phénomènes parasites. D'autre part, il est souhaitable sinon indispensable de réaliser cette protection, non pas en un point seulement, mais sur les différentes artères du réseau, le fonctionnement des relais étant sélectif [Schneider, 2008 ; Kimplaire et al, 2005].

La protection des défauts phase-terre se fait par des relais à maximum d'intensité alimentés par le courant de terre. La mesure de ce courant peut se faire :

- soit par un transformateur tore traversé par les trois conducteurs de phase et détectant directement la somme de leurs intensités (nulle en l'absence de défaut terre) (Figure I.5);
- soit par trois transformateurs d'intensité dont les secondaires sont connectés de façon à réaliser un conducteur neutre traversé par la somme des trois intensités.

La solution «transformateur tore» est la plus précise mais, si des raisons d'installation la rendent possible sur des câbles, elle n'est pas applicable sur les liaisons en barres ou aériennes [Schneider, 2008 ; Kimplaire et al, 2005].

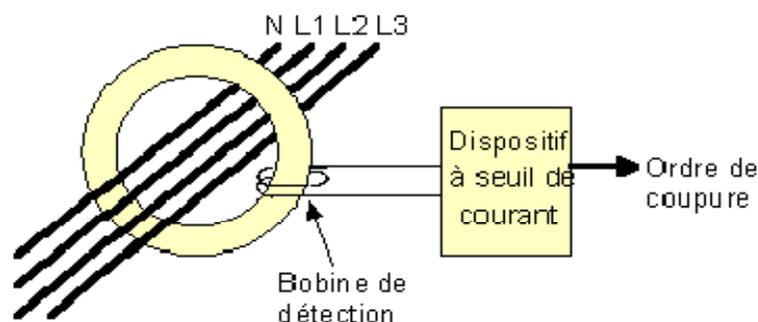


Figure I.5 : Transformateur tore traversé par les trois conducteurs de phase et le neutre.

I.12.1. Réglage des protections de terre

Il doit être choisi en fonction de la précision des mesures, assurer le maximum de protection et autoriser la sélectivité.

Si la mesure est réalisée en faisant la somme des courants secondaires de 3 TI, cette dernière est entachée par la dispersion des TI. En particulier, on mesure un courant homopolaire en l'absence de défaut de terre, lorsque les TI se saturent. Cette saturation est due à l'amplitude excessive du courant de phase mais surtout à la composante continue qui apparaît dans un courant de court-circuit ou d'enclenchement asymétrique [Sautriau, 1991].

Il faut noter que, pendant le régime transitoire, la composante continue peut provoquer la saturation des TI bien que la valeur de crête du courant transitoire soit de l'ordre de 10 fois inférieure à la valeur de saturation pour un courant symétrique établi.

Une protection de terre alimentée par 3 TI doit donc être temporisée pour éviter les déclenchements intempestifs résultant des régimes transitoires. Le seuil de réglage ne doit pas être inférieur à 6% du calibre de TI dans le meilleur des cas, ou à 15 ou 20% du calibre des TI dans les cas défavorables.

D'autre part, si un défaut de masse apparaît dans un enroulement étoile au voisinage du point neutre, le courant maximum de défaut n'est qu'une faible partie de la limite imposée par l'impédance de mise à la terre du neutre. D'où un réglage habituel du seuil à 20% du courant maximum limité par la mise à la terre du neutre, afin de protéger 80% des enroulements. Mais comme l'indique le calcul, lors d'un défaut, les parties saines du réseau sont parcourues par un courant capacitif homopolaire. Aussi, afin que la protection d'une artère saine ne déclenche pas intempestivement, le réglage du seuil doit être supérieur de 30% au courant capacitif qui s'écoule dans cette artère lorsqu'un court-circuit phase-terre affecte le réseau. De plus, il y a lieu de prendre éventuellement en compte la présence d'harmoniques de tension qui produisent dans les capacités des courants d'autant plus importants que leur rang est élevé. A noter que les harmoniques 3 et multiples de 3 s'ajoutent même en régime équilibré. Enfin, les caractéristiques de l'impédance de mise à la terre du neutre et les protections doivent être coordonnées de façon que cette impédance ne soit pas elle-même détériorée par le courant de défaut avant son élimination [Sautriau, 1991].

Il convient de préciser qu'il n'est question ici que des protections des circuits et non de la protection des personnes.

I.12.2. Résistance intermédiaire et courant de défaut I_L pour un réseau de moyenne tension

Lorsque le régime de neutre à la terre est choisi pour un réseau de moyenne tension, il est souhaitable d'adopter une mise à la terre par résistance de préférence aux autres systèmes.

La détermination de cette résistance r et du courant maximum $I_L = \frac{U}{r\sqrt{3}}$ se fait en fonction des contraintes suivantes [Sautriau, 1991] :

- Le courant I_L doit être supérieur ou égal au double du courant capacitif du réseau en cas de défaut terre $I_L \geq 2 I_C$ afin de limiter les surtensions ;
- Le courant I_L doit être inférieur à la surintensité maximale que peuvent tenir les écrans de câbles, en général de 500 à 3000 A, suivant la section du câble ;
- Dans un réseau comportant des moteurs HT, il faut de préférence respecter la relation $5A \leq I_L \leq 20A$. Cependant, en cas d'incompatibilité avec la première condition, I_L peut atteindre 50A ;
- Pour assurer une bonne protection au niveau des récepteurs, il faut que les réglages de seuils I_r ne dépassent pas $0,2 I_L$, soit $I_r \leq 0,2 I_L$;
- Pour obtenir la sélectivité vis-à-vis des protections des liaisons saines, il faut respecter la relation $I_r \geq 1,3 I_C$, I_C étant le courant capacitif de la liaison protégée en cas de défaut phase-terre ;
- Si la mesure du courant de terre se fait par 3TI de calibre I_n , il faut avoir $I_r \geq 0,06 I_n$;
- La tenue thermique de la résistance r doit permettre le passage du courant I_L pendant la durée maximale d'élimination du défaut phase-terre (1 à 1,5s) ou, réciproquement, l'élimination du défaut phase-terre doit être suffisamment rapide pour ne pas détériorer la résistance r .

I.13. Réalisation de la mise à la terre du point neutre

I.13.1. Mise à la terre avec neutre accessible

La résistance est raccordée à la borne de sortie du neutre et à la prise de terre, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un transformateur monophasé chargé au secondaire par une résistance équivalente. C'est le cas pour les réseaux alimentés par un transformateur, dont le secondaire est en étoile avec le neutre sorti, et pour les alternateurs à neutre sorti (Figure I.6).

Lorsque le réseau est alimenté par plusieurs transformateurs ou alternateurs, il est préférable que la mise à la terre du neutre soit unique pour éviter que la valeur du courant maximum de défaut phase-terre varie avec le nombre de sources en service [Schneider, 1997].

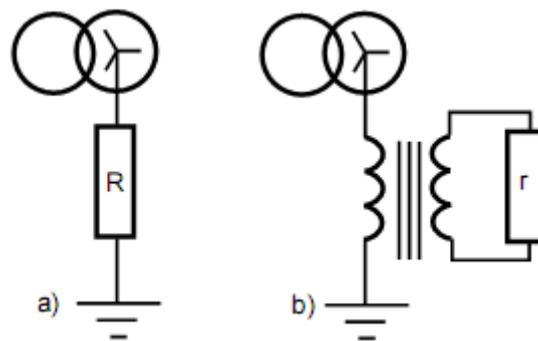


Figure I.6 : Mise à la terre du neutre, au secondaire d'un transformateur à étoile avec neutre sorti, par une résistance soit (a) raccordée directement ou (b) raccordée par l'intermédiaire d'un transformateur monophasé.

I.13.2. Mise à la terre avec neutre artificiel

Quand le neutre de la source n'est pas accessible (enroulements en triangle) ou quand il y a plusieurs sources en parallèle, la mise à la terre peut être faite par un neutre artificiel (Figure I.7), aussi appelé générateur homopolaire.

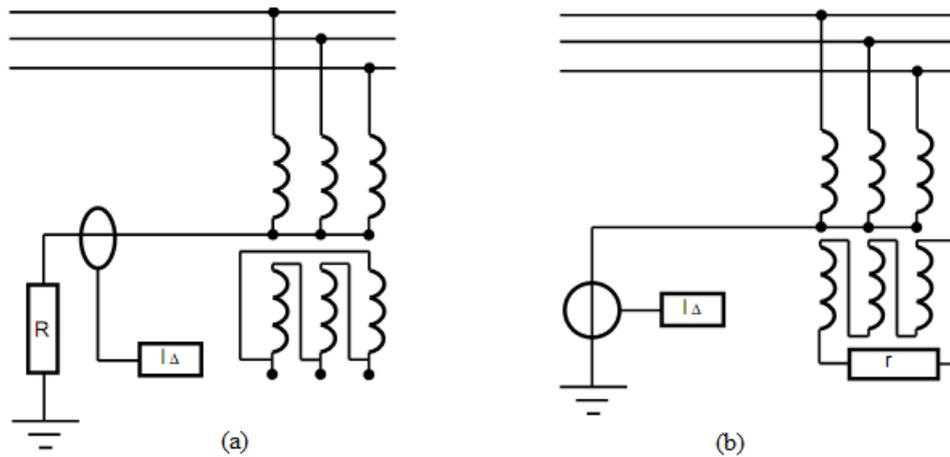


Figure I.7 : Mise à la terre du neutre d'un réseau avec un transformateur à couplage étoile-triangle associé à : (a) une résistance placée côté haute tension, dans ce cas le secondaire du transformateur peut alimenter des auxiliaires ; (b) une résistance placée en série dans le secondaire.

Plusieurs schémas sont possibles, avec [Schneider, 1997] :

- un transformateur à couplage étoile/ triangle associé à une résistance ;
- une bobine zigzag (Figure I.8), ce schéma est utilisé dans le cas où le courant maximum de défaut terre est limité à des valeurs supérieures à 100 A ;
- ou un transformateur spécial, car pour réaliser un neutre artificiel il peut s'avérer économique d'utiliser le transformateur nécessaire à l'alimentation des auxiliaires basses tensions du poste (Figures I.9 et I.10).

L'impédance résultante $r_0 + jL_0\omega$ est assimilable à une résistance si $r_0 \geq 2L_0\omega$, avec r_0 et L_0 ramenées à la même tension.

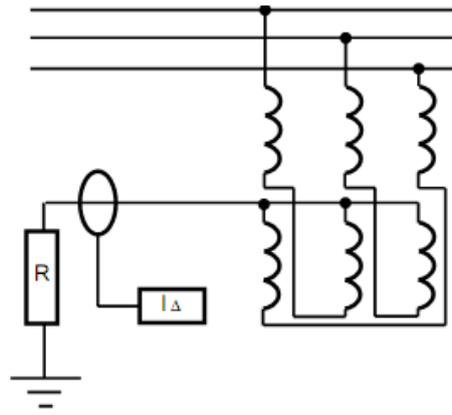


Figure I.8 : Mise à la terre du neutre d'un réseau avec une bobine zigzag.

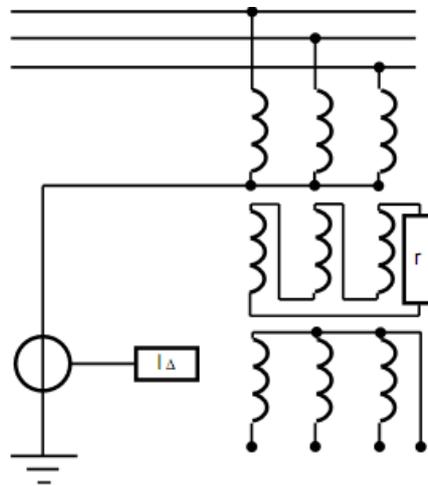


Figure I.9 : Mise à la terre d'un transformateur à couplage étoile-étoile, et comportant des enroulements tertiaires en triangle fermé sur une résistance.

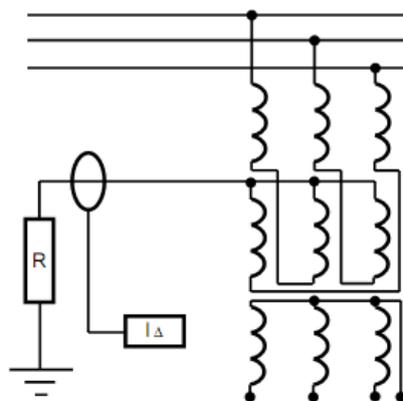


Figure I.10 : Mise à la terre du neutre d'un réseau avec un transformateur à couplage zigzag.

I.14. Conclusion

Lors de la conception d'un réseau électrique HT industriel, il faut choisir un schéma de liaison du neutre à la terre : le neutre peut être soit isolé, soit relié intentionnellement à la terre.

Le schéma à neutre isolé en HT peut autoriser une continuité de service intéressante en ne déclenchant pas au premier défaut, mais il implique que la capacité du réseau n'entraîne pas un courant de défaut à la terre prohibitif dangereux pour le personnel et les machines.

En contrepartie, le neutre isolé entraîne :

- des risques de surtensions élevées qui favorisent l'apparition de défauts multiples,
- l'emploi de matériels isolés,
- une surveillance de l'isolement obligatoire,
- une protection contre les surtensions sur le point de devenir obligatoire,
- la réalisation d'une protection sélective complexe contre les défauts à la terre ne pouvant généralement pas être effectuée par de simples relais ampèremétriques.

Le schéma à neutre mis à la terre entraîne très généralement un déclenchement obligatoire au premier défaut mais, par contre :

- il amortit les surtensions,
- il conduit à des protections simples, sélectives et fiables,
- il autorise l'emploi de matériel et en particulier de câbles ayant un niveau d'isolement plus réduit que pour le neutre isolé.

CHAPITRE II
RESISTANCE ET RESISTIVITE
DE TERRE

II.1. Introduction

Plusieurs références détaillent, depuis plusieurs dizaines d'années, les mises à la terre des installations électriques. Le problème de mise à la terre est plus complexe qu'on ne le pense, à cause de plusieurs facteurs qui interviennent dans le développement analytique des paramètres en jeu.

II.2. 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'écouler, dans le sol, les courants de défaut à la terre et de foudre ;
- d'assurer et maintenir, à tout moment, la sécurité des biens et des personnes ;
- de maintenir un potentiel de référence.

A fréquence industrielle, l'étude du comportement d'un réseau de terre nécessite l'analyse préalable de la répartition du potentiel dans le sol qui l'entoure. Cette répartition est fonction des caractéristiques électriques du terrain, c'est-à-dire de sa résistivité (dans une moindre mesure, sa permittivité aussi), des caractéristiques géométriques du réseau de terre et de la source. La conception d'un réseau de terre doit donc être précédée d'une étude géologique du sol.

II.3. Rôle des systèmes de mise à la terre

Les guides [IEEE, 2000] et [EDF, 1984] définissent le rôle et les objectifs des systèmes de mise à la terre. D'une manière générale, il s'agit de relier les masses à la terre par l'intermédiaire d'un ou plusieurs conducteurs, afin de permettre aux courants permanents et aux courants de défaut de s'y écouler.

Une bonne mise à la terre doit assurer [Legrand, 2007] :

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

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

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

Un système de mise à la terre peut être composé d'un ou plusieurs sous-systèmes qui ne sont pas nécessairement connectés directement mais sont mutuellement influencés par couplage électromagnétique [Legrand, 2007].

II.4. Résistance et résistivité de la terre

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 résistivité du sol est une quantité variable et la seule manière de la connaître avec précision est de la mesurer. Elle varie en fonction de plusieurs facteurs : la nature des sols, le taux d'impuretés, la salinité, le taux d'humidité, la température, ...

Le tableau II.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 II.1 : Résistivités moyennes des différents types de sol.

La résistance d'une mise à la terre est directement proportionnelle à la résistivité du sol, si celle-ci peut être considérée comme homogène. 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, ... [Nzuru, 2009].

II.5. Répartition de potentiel autour d'un réseau de terre

D'après la référence [Nzuru, 2009], 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.

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 [James et Biddle, 1947] :

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

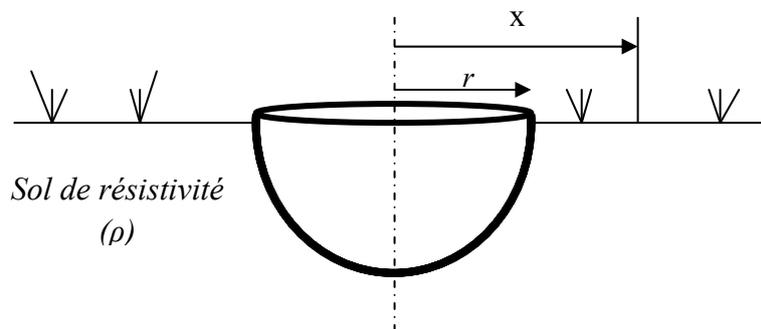


Figure II.1 : Electrode hémisphérique.

II.6. Résistance d'une électrode hémisphérique

La résistance R de l'électrode hémisphérique est calculée à partir de la relation :

$$R = \frac{V}{I}$$

On aura donc :

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

Si $x \rightarrow \infty$ alors :

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (\text{II.3})$$

La relation (II.3) est la plus simple expression qui représente la résistance d'une mise à la terre réalisée avec une électrode hémisphérique [Nzuru, 2009]. L'hypothèse $x \rightarrow \infty$ donne un résultat autant précis que x est très grand.

II.7. Tension de pas

Comme représenté à la figure II.2, la tension de pas $(\Delta V)_p$ 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 maximum [Nzuru, 2009].

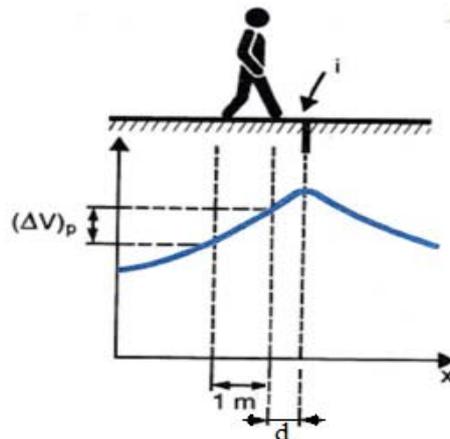


Figure II.2 : Tension de pas.

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.

A une distance "d" de l'impact d'un courant de foudre au sol, en considérant un sol homogène de résistivité ρ et une répartition purement résistive de potentiel, elle est donnée par la relation :

$$(\Delta V)_p = U_p = \rho \frac{I}{2\pi(d+1)d} \quad (\text{II.4})$$

La courbe de la figure II.3 donne la tension de pas en fonction de la distance pour $\rho = 100 \Omega\text{m}$ et $\rho = 300 \Omega\text{m}$ ($I = 50 \text{ kA}$).

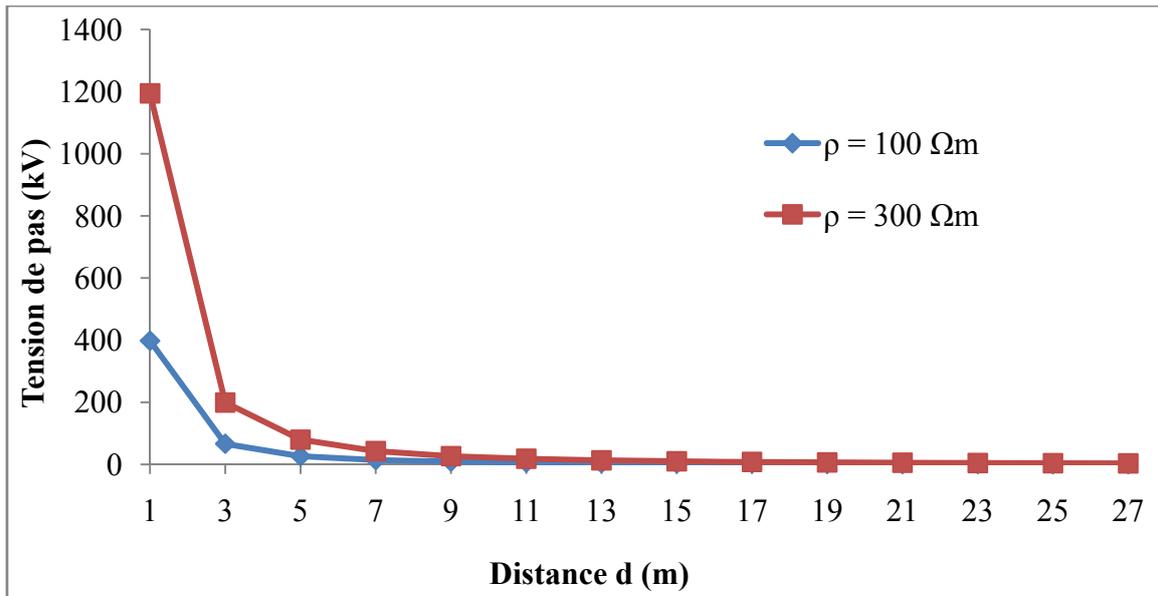


Figure II.3 : Tension de pas en fonction de la distance à l'impact ($I = 50 \text{ kA}$).

La figure II.3 qualifie bien la diminution de la tension de pas avec l'éloignement du point d'écoulement du courant à la terre. Dans notre cas, la tension de pas qui valait 398 kV, pour une résistivité $\rho = 100 \Omega m$, à 1 m du point d'impact, tombe à 856 V à une distance de 30 m et à 312 V à 50 m. En rapport avec la norme CEI 60479-1 de la Commission Electrotechnique Internationale [CEI, 2005], cette tension cessera d'être dangereuse pour un être humain à 126 m du point d'impact. Tandis que, pour une résistivité de $300 \Omega m$, cette distance sera de 690 m, dans un sol sec.

II.8. Evaluation de la résistivité du sol

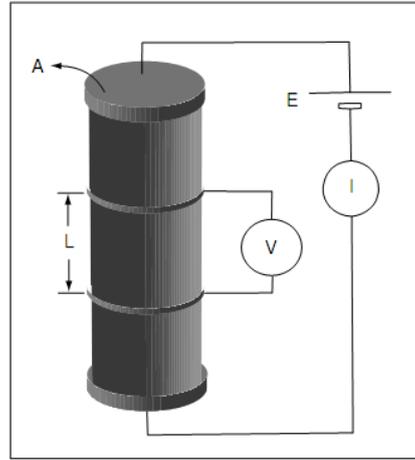
La résistance mesure l'opposition au passage d'un courant électrique, et peut permettre de caractériser un matériau. La loi d'Ohm stipule que la résistance électrique R est donnée par le quotient du potentiel V appliqué aux bornes d'un matériau par le courant I qui circule, soit :

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{II.5})$$

Cependant, en prospection électrique la notion de résistance n'a pas vraiment de signification puisque si on prend deux échantillons de longueur différente du même matériau, ils n'auront pas la même résistance, tandis que deux échantillons de matériaux différents peuvent présenter la même valeur. Puisque la résistance dépend de la géométrie du corps, on doit se baser sur une propriété qui, tout en caractérisant la facilité de laisser passer le courant,

est indépendante de la géométrie de l'échantillon choisi. Cette propriété s'appelle la résistivité électrique ρ et est liée à la résistance par [Chouteau et Giroux, 2006] :

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (\text{II.6})$$



A : la section du cylindre ;
L : la longueur du cylindre.

Figure II.4 : Mesure de la résistivité en laboratoire.

Pour un cylindre de longueur L et de section A (figure II.4). L'inverse de la résistivité est appelée la conductivité électrique ($\sigma = 1/\rho$) et ses unités des Ω^{-1}/m ou siemens/m.

Notons que la loi d'Ohm sous la forme exprimée à l'équation (II.5), est une forme simplifiée de la forme générale qui s'écrit :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.7})$$

où \vec{J} est la densité de courant (courant par unité de surface traversée $\vec{J} = I/A$ (ampères/m²)), et \vec{E} est le champ électrique.

Par définition \vec{E} est le gradient du potentiel V (V est une fonction scalaire) [Chouteau et Giroux, 2006] :

$$\nabla V = \frac{\partial V}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{k} = -\vec{E} \quad (\text{II.8})$$

Si on récrit la loi d'Ohm pour le cylindre de la figure II.4, on a alors $\vec{E} = V/L$, d'où :

$$\begin{aligned} V &= RI \\ \vec{E} &= \frac{RA}{L} \vec{j} \end{aligned} \quad (\text{II.9})$$

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{RA}{L} \\ \rho &= \frac{\vec{E}}{\vec{j}} \end{aligned} \quad (\text{II.10})$$

II.9. Sol en plusieurs couches de résistivités différentes

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

La résistivité apparente ρ_a du sol supposée homogène peut, dans ce cas, être trouvée par les deux relations (II.11) et (II.12) [IEEE, 2000].

$$\rho_a = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} \quad (\text{II.11})$$

$\rho_{a(1)}, \rho_{a(2)}, \rho_{a(3)}, \dots, \rho_{a(n)}$ sont les résistivités de n différentes couches du sol mesurées avec la méthode de 4 électrodes [IEEE, 2000].

En fonction des deux valeurs extrêmes (maximale et minimale) des résistivités, la résistivité apparente devient [IEEE, 2000]:

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

$\rho_{a(max)}$: résistivité apparente pour la distance entre électrodes la plus petite ;

$\rho_{a(min)}$: résistivité apparente pour la distance entre électrodes la plus grande.

II.10. Méthodes de mesures de résistivité de sol

II.10.1. Méthode de Wenner

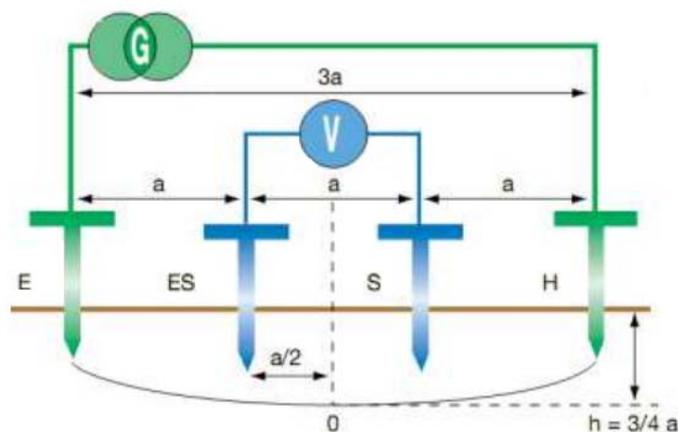


Figure II.5 : Schéma de principe de la méthode de Wenner.

Le principe de mesure consiste à utiliser quatre électrodes qui sont disposées en ligne sur le sol, équidistantes d'une longueur a (Figure II.5). 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 ; Nzuru, 2009].

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 $h = \frac{3}{4}a$, par l'expression simplifiée suivante obtenue dans le cas d'un sol homogène :

$$\rho = 2 \pi a R \quad (\text{II.13})$$

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.10.2. Méthode de Schlumberger

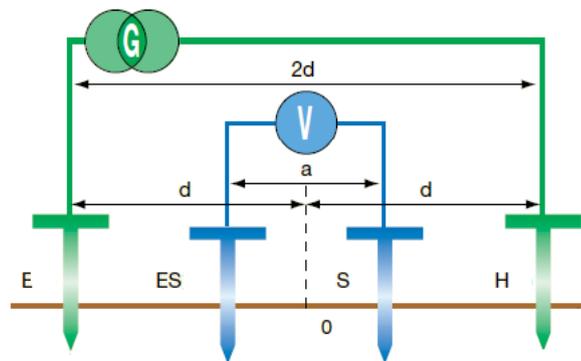


Figure II.6 : Schéma de mesure de la méthode de Schlumberger.

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.6) :

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

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

$$\rho = \left[\pi \left(d^2 - \frac{a^2}{4} \right) R \right] / 4 \quad (\text{II.14})$$

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 extérieures 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.10.3. 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 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 cette 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. Il existe une méthode où il n'est plus nécessaire de déconnecter la résistance de terre qu'on appelle méthode de mesure sélective [Demuyne, 2002 ; Megger, 2010].

La 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 [Demuynck, 2002 ; Megger, 2010].

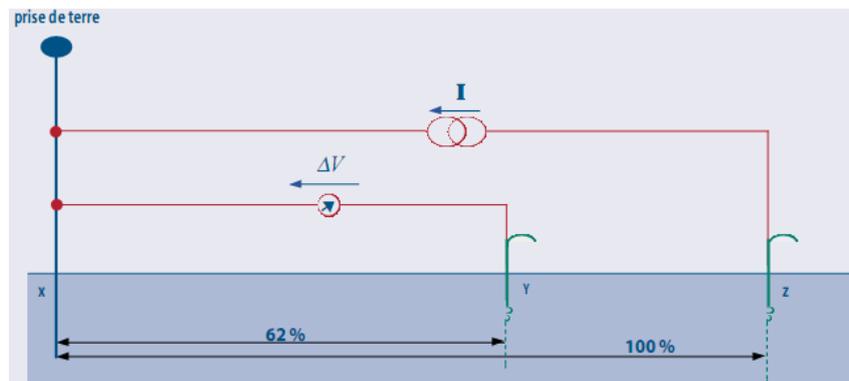


Figure II.7 : Principe de la méthode à 3 pôles.

Le principe de la méthode de mesure à trois pôles repose sur trois éléments (Figure II.7). 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 [Demuynck, 2002 ; Megger, 2010].

II.10.4. Mesures sans piquets de terre

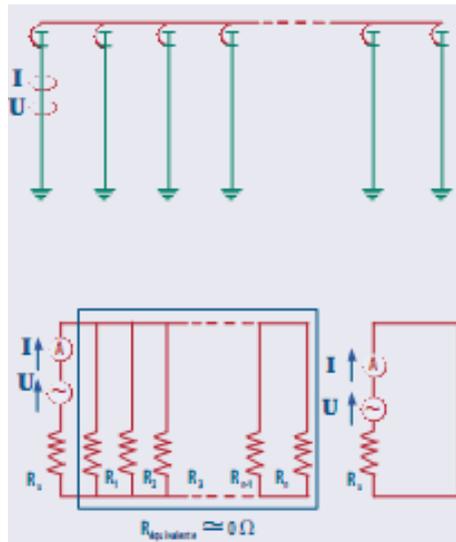


Figure II.8 : Principe de la méthode sans piquets.

La méthode sans piquets consiste à effectuer une mesure de résistance de boucle, sans planter de piquet (Figure II.8). 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 système, 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 [Demuynck, 2002 ; Megger, 2010].

II.11. Détermination quelques configurations de mise à la terre

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 les paragraphes qui suivent supposent une résistivité uniforme du sol (sol homogène) sauf pour le paragraphe §II.11.12, qui expose deux cas de sol. 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.

II.11.1 Electrode hémisphérique

C'est la forme la plus générale d'une prise de terre. Comme on l'a montré dans le paragraphe §II.5, où le sol est homogène de résistivité ρ , la résistance d'une prise de terre hémisphérique est donnée par la relation (II.3) [Nzuru, 2009].

Toutes les autres configurations se rapportent à une électrode hémisphérique équivalente qui donnerait la même résistance que la prise de terre considérée [Nzuru, 2009].

La figure II.9 illustre la variation de la résistance de l'électrode hémisphérique en fonction du rayon de l'électrode pour $\rho = 50 \Omega\text{m}$. Cette figure nous montre qu'avec l'augmentation du rayon de l'électrode, la résistance de l'électrode de terre diminue brutalement pour les rayons compris entre 0,25 et 1,5 m, et lentement ailleurs.

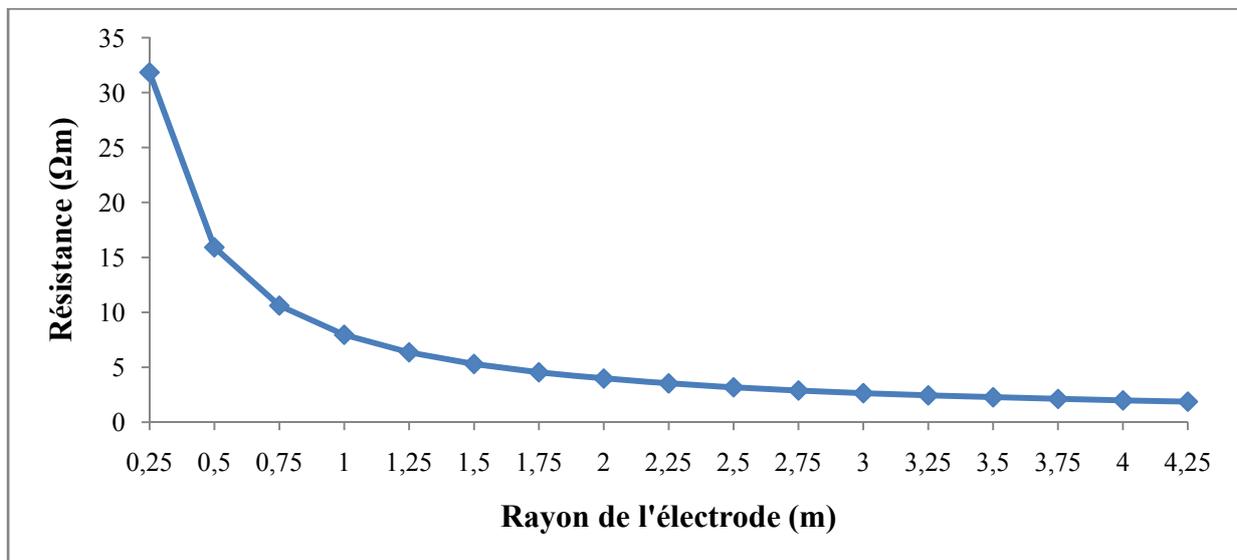


Figure II.9 : Variation de la résistance des électrodes hémisphériques en fonction de leurs rayons pour $\rho = 50 \Omega\text{m}$.

II.11.2. Piquet de terre vertical de forme cylindrique

L'utilisation d'une tige comme électrode de mise à la terre (Figure II.11), a permis d'établir les expressions de Rudenberg (II.15), de Dwight-Sunde (II.16) et de Liew-Darveniza (II.17), permettant la détermination de la résistance d'un piquet de terre vertical, de forme cylindrique [Laforest et al, 1989 ; Chong, 2000 ; Kiessling, 2003] :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{d} \right) \quad (\text{II.15})$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (\text{II.16})$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{r+1}{r} \right) \quad (\text{II.17})$$

avec

d : le diamètre de l'électrode ;

ρ : la résistivité du sol ;

r : le rayon de l'électrode ;

l : la longueur de l'électrode.

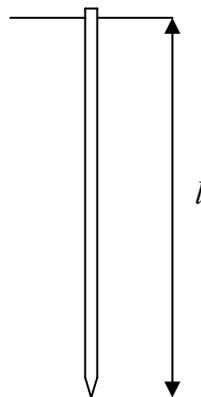


Figure II.10 : Electrode cylindrique verticale.

Il est assez important de connaître le rayon équivalent de l'hémisphère qui aurait la même résistance qu'un piquet de terre. C'est le rayon équivalent. Il est donné par la relation [Nzuru, 2009] :

$$r_{eq} = \frac{\rho}{2\pi R_p} \quad (\text{II.18})$$

R_p est la résistance du piquet.

II.11.3. Electrodes en ligne droite

En général, pour N électrodes (Figure II.11) en ligne droite, pour $d > L$ et $N > 1$, la résistance équivalente est donnée par la relation approchée suivante [EDF, 1984] :

$$R \approx \frac{1}{N} \left[\frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \frac{\rho}{\pi d} \left(\frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{N} \right) \right] \quad (\text{II.19})$$

d : la distance entre les électrodes ;

ρ : la résistivité du sol ;

r : le rayon de l'électrode ;

l : la longueur de l'électrode.

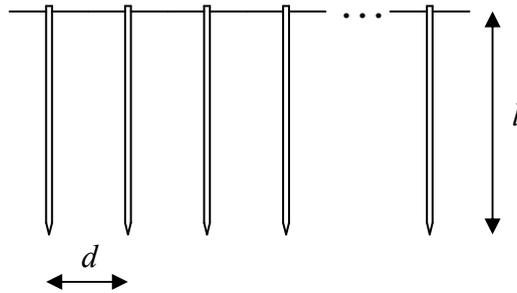


Figure II.11 : N électrodes en ligne droite.

II.11.4. Electrodes aux sommets d'un triangle équilatéral

Si trois électrodes sont placées aux sommets d'un triangle équilatéral de côté d (Figure II.12), la résistance équivalente est donnée par la relation suivante [Nzuru, 2009] :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\frac{1+2\alpha}{3} \right) \quad (\text{II.20})$$

avec $\alpha = \frac{r}{d}$

d : la distance entre les électrodes ;

ρ : la résistivité du sol ;

r : le rayon de l'électrode ;

l : la longueur de l'électrode.

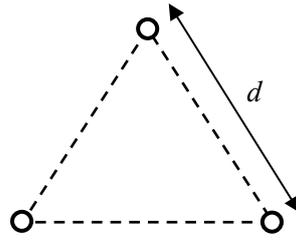


Figure II.12 : Electrodes aux sommets d'un triangle équilatéral.

II.11.5. Electrodes sur les côtés d'un carré

Soit N électrodes placées sur les côtés d'un carré comme le montre la figure II.13. La résistance équivalente dans ces conditions, est donnée par la relation [Nzuru, 2009] :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\frac{1+k\alpha}{N} \right) \quad (\text{II.21})$$

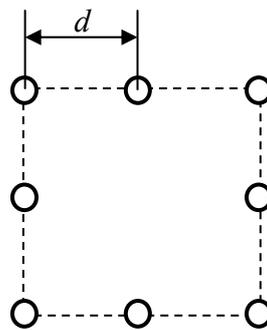


Figure II.13 : Electrodes sur les côtés d'un carré.

avec $\alpha = \frac{r}{a}$

d : la distance entre les électrodes ;

ρ : la résistivité du sol ;

r : le rayon de l'électrode ;

l : la longueur de l'électrode.

Les coefficients k sont donnés par le tableau II.2 :

Nombre d'électrode par côté	Nombre total d'électrodes	k
2	4	2,7071
3	8	4,2583
4	12	5,3939
5	16	6,0072
6	20	6,4633
7	24	6,8363
8	28	7,1479
9	32	7,4195
10	36	7,6551

Tableau II.2 : Coefficients k pour des électrodes sur les côtés d'un carré

II.11.6. Câble enterre horizontalement

La résistance d'un câble de longueur L et de rayon r , enterré horizontalement à une profondeur e (Figure II.14) est donnée par [EDF, 1984] :

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left(\ln \frac{2L}{\sqrt{2re}} - 1 \right) \quad (\text{II.22})$$

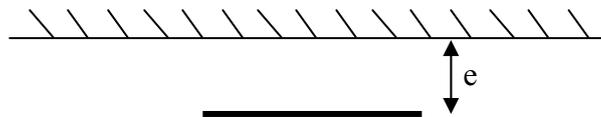


Figure II.14 : Câble enterre horizontalement.

Si l'on dispose de deux câbles horizontaux en parallèle, écartés d'une distance d ($d \ll L$), enfouis à la même profondeur e , la résistance devient :

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left(\ln \frac{2L}{\sqrt[4]{2redd'}} - 1 \right) \quad (\text{II.23})$$

avec $d' = \sqrt{d^2 + 4e^2}$.

II.11.7. Plusieurs câbles rayonnant de longueur l , enfouis à la même profondeur e

La figure II.15 présente plusieurs câbles rayonnant de longueur l , reliés entre eux, enfouis à la même profondeur e .

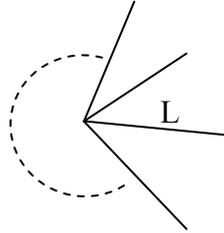


Figure II.15 : Plusieurs câbles rayonnant de longueur l .

La résistance équivalente relative à la figure II.15 est donnée par la relation [EDF, 1984] :

$$R = \frac{\rho}{n\pi l} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2}re} - 1 + N(n) \right) \quad (\text{II.24})$$

n : nombre de rayons (supposés régulièrement disposés).

avec les $N(n)$ donnés par le tableau suivant :

n	2	3	4	6	8	12	100
N	0,7	1,53	2,45	4,42	6,5	11	116

Tableau II.3 : Coefficients $N(n)$ pour n électrodes rayonnant.

II.11.8. Réseau maillé (grille)

II.11.8.1. Grille forme disque

La résistance d'une grille en forme de disque illustrée sur la figure II.16 est la suivante [EDF, 1984]:

pour $h \ll D$:

$$R = \frac{\rho}{4D} \left(1 - \frac{4h}{D} \right) \quad (\text{II.25})$$

et pour $h \gg D$:

$$R = \frac{\rho}{8D} + \frac{\rho}{8\pi h} \quad (\text{II.26})$$

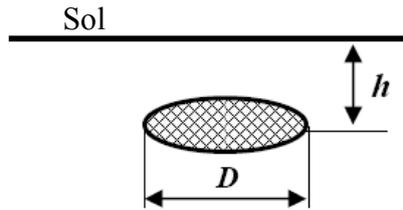


Figure II.16 : Grille forme disque.

II.11.8.2. Réseau maillé

Pour h faible devant les dimensions de la grille (Figure II.17), la résistance de terre est [EDF, 1984] :

$$R \approx \frac{2\rho}{P} \quad (\text{II.27})$$

Avec P le périmètre de la grille.

h est petit devant les dimensions de la grille.

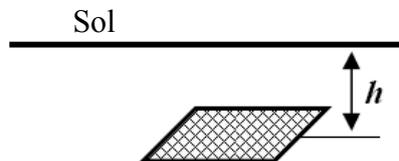


Figure II.17 : Réseau maillé.

II.11.9. Boucle enterrée

La résistance de la boucle enterrée (Figure II.19) est donnée par la relation [EDF, 1984] :

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{8D^2}{hr} \quad (\text{II.28})$$

D : le diamètre de la boucle ;

h : la profondeur d'enfouissement ;

ρ : la résistivité du sol ;

r : le rayon du conducteur.

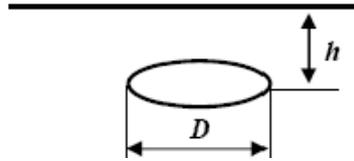


Figure II.19 : Boucle enterrée.

II.11.10. Méthodes conventionnelles dans le cas d'une grille combinée avec des piquets

Les méthodes de calcul de la résistance du sol, pour une grille combinée avec des piquets (Figure II.20), sont données par IEEE 80-2000. Cette fiche technique inclut et définit quelques méthodes parmi celle-ci Les plus généralement utilisées sont [IEEE, 2000] :

- ✓ Méthode de Laurent-Niemann.
- ✓ Méthode de Sverak.
- ✓ Méthode de Schwarz.
- ✓ Méthode De Thapar-Gerez.

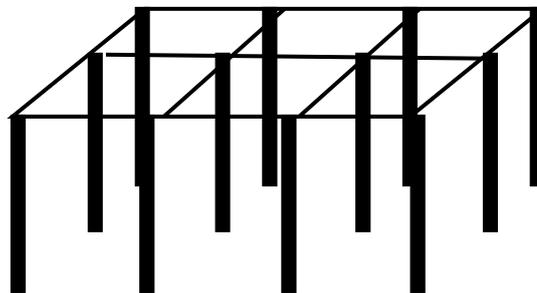


Figure II.20 : Grille combinée avec des piquets.

II.11.10.1. Méthode de Laurent-Niemann

La relation de Laurent-Niemann pour estimer la résistance du sol est exprimée par :

$$R = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T} \quad (\text{II.29})$$

avec :

A : aire de la grille ;

L_T : la longueur totale des conducteurs donnée par la relation (II.30) [IEEE, 2000] :

$$L_T = L_c + n_R L_p \quad (\text{II.30})$$

L_c : la longueur totale des conducteurs primaires ;

n_R : le nombre des piquets existant dans la grille ;

L_p : la longueur du piquet.

II.11.10.2. Méthode de Sverak

Cette méthode peut être comme une forme intégrée de méthode de Laurent-Niemann. Des travaux sont effectués relatifs à l'effet significatif de la profondeur sur la variation de la résistance, d'où l'équation (II.31) réarrangée de l'équation de Laurent-Niemann et inclue ce paramètre dans la relation (II.29) [IEEE, 2000] :

$$R = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (\text{II.31})$$

avec h : la profondeur d'enfouissement.

D'après la relation de Sverak, il peut facilement comprendre que la résistance est directement proportionnelle à la résistivité et inversement proportionnel à la longueur totale des conducteurs. La résistance est également inversement proportionnelle à la racine carrée du secteur.

L'importance de cette relation c'est le résultat que la résistance du sol diminue par l'augmentation de la longueur des conducteurs. Ceci pour mener d'une valeur de résistance du sol désirée pour la conception de la grille admis cette solution souhaitée ne sera pas assez faisable de point de vue économique [IEEE, 2000].

II.11.10.3. Méthode de Schwarz

Schwarz a développé l'ensemble suivant d'expressions, afin de déterminer la résistance d'un sol uniforme. Ces expressions de Schwarz se composent de trois équations et d'une quatrième pour fusionner les trois. L'équation principale est donnée par :

$$R = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (\text{II.32})$$

R_1 est la résistance de conducteurs de la grille ;

R_2 est la résistance des piquets de terre ;

R_m est la résistance mutuelle entre la grille et les piquets de terre.

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (\text{II.33})$$

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n l} \left[\ln \left(\frac{4l}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 l}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right] \quad (\text{II.34})$$

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{l} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (\text{II.35})$$

ρ est la résistivité du sol ;

L_c est la longueur totale de tous les conducteurs de la grille ;

$a' = \sqrt{a \cdot 2h}$ si la grille est enterrée à une profondeur h ;

$a' = a$ si la grille est sur la surface du sol ;

a est le rayon des conducteurs de la grille ;

A est l'aire occupée par les conducteurs ;

k_1 et k_2 sont des coefficients données selon les figures II.21 et II.22.

l est la longueur des piquets ;

b est le rayon des piquets ;

n est le nombre de piquets.

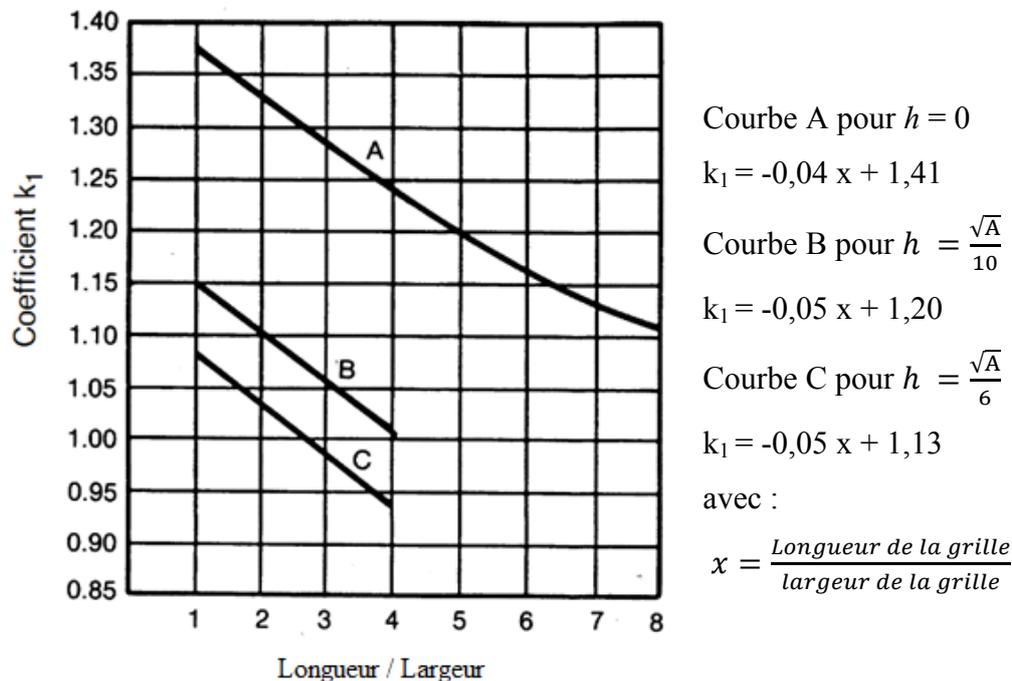


Figure II.21 : Coefficients k_1 .

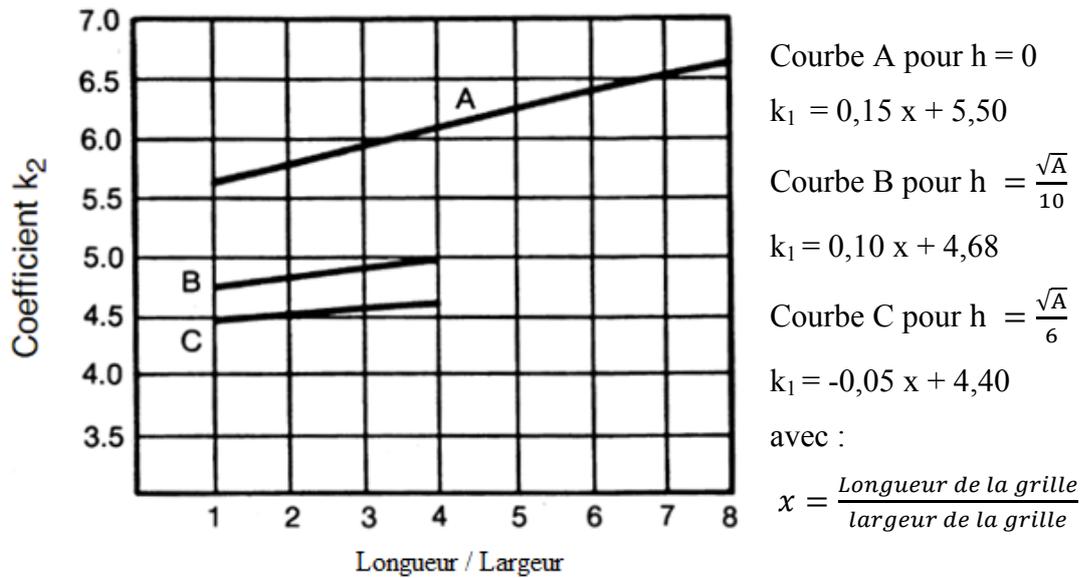


Figure II.22 : Coefficients k_2 .

II.11.10.4. Méthode De Thapar-Gerez

Thapar et Gerezont ont déterminé une équation empirique pour calculer la résistance du système de mise à la terre. Ils ont validé leur équation par la détermination de la résistance du circuit de terre pour plus de 100 grilles de différentes dimensions, de différentes configurations et des différentes tailles (Figure II.23). L'expression de Thapar- Gerez est donnée par la relation suivante [IEEE, 2000] :

$$R = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \cdot 1,52 \left[2 \ln \left(L_h \sqrt{2/A} \right) - 1 \right] \frac{\sqrt{A}}{L_h} \quad (\text{II.37})$$

avec L_h est la longueur du périmètre de la grille.

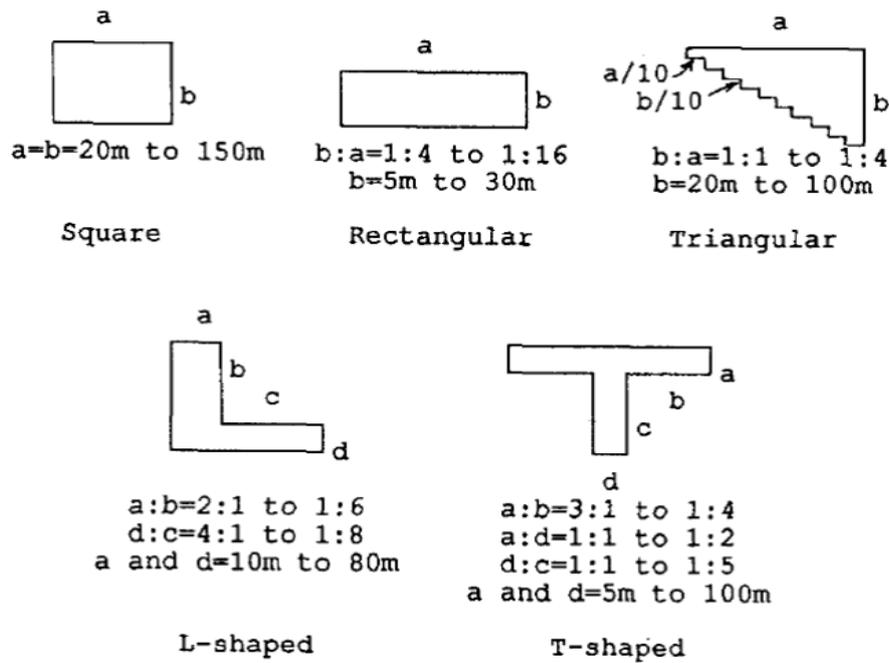


Figure II.23 : Les différents formes de grille proposées par Thapar et Gerez.

Toutes ces quatre méthodes assument des solutions dans les modèles uniformes de sol. En outre chacune des quatre méthodes est inversement proportionnelle aux paramètres primaires tels que la longueur des conducteurs totaux (L_T) utilisés dans la grille et le domaine couvert par la grille (A). Les différences de ces méthodes sont les paramètres secondaires utilisés comme la profondeur de la grille (h), du diamètre du conducteur (r), du diamètre et de la longueur (L_p) des piquets. Des comparaisons et des résultats de simulations numériques sont donnés dans le dernier chapitre.

II.11.11. Réduction de la résistivité entourant l'électrode de mise à la terre

Cette technique permet d'entourer l'électrode de terre d'une couche de matière peu résistive, tel que présenté sur la figure II.24 [Fagan et Lee, 1970] :

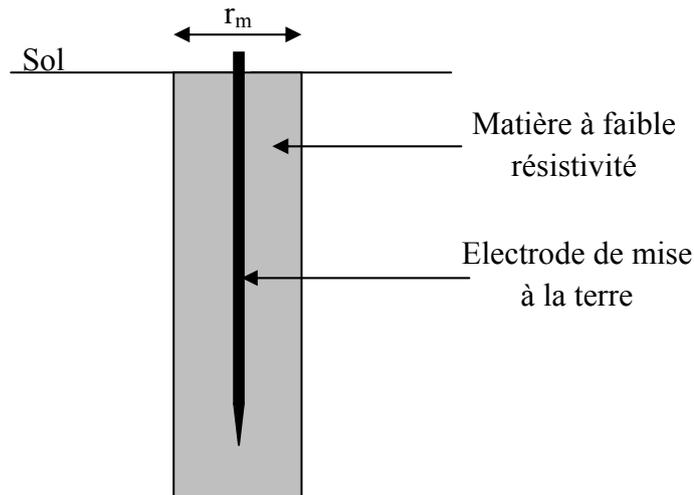


Figure II.24 : Ajout d'une matière de faible résistivité autour de l'électrode.

Cette matière ne devra pas causer une corrosion aux piquets métalliques (qui sont souvent en cuivre ou en acier inoxydable). Plusieurs produits de faible résistivité sont utilisés (la bentonite, poussier de coke, ...). La matière qui conviendrait et coûte moins cher dans les régions tropicales est le charbon de bois. Cette pratique est déjà expérimentée et la relation analytique (II.37), utilisée par la référence [Fagan et Lee, 1970] a été donnée, pour évaluer la résistance d'une telle électrode verticale.

$$R_m = \frac{1}{2\pi l} \left\{ \rho_m \left[\ln \left(\frac{r_m}{r} \right) \right] + \rho \left[\ln \left(\frac{4l}{r_m} \right) - 1 \right] \right\} \quad (\text{II.37})$$

où l est la longueur du piquet, ρ la résistivité du sol, ρ_m est la résistivité de la matière autour de l'électrode, r le rayon de l'électrode et r_m le rayon de la matière autour de l'électrode. Les conditions pour cette relation sont :

- $\rho \gg \rho_m$;
- $r_m > \frac{4l}{e}$, où $e = 2,7$ est la constante de Neper.

II.11.12. Sol non homogène

II.11.12.1. Résistance d'un piquet de terre dans un sol en deux couches

Tagg [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 [Chong, 2000 ; Nzuru, 2009].

Pour une électrode se situe dans la couche supérieure de résistivité ρ_1 (Figure II.25), la résistance correspondante est donnée par :

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left[\left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{2} \ln \left(\frac{\frac{nz}{l} + 1}{\frac{nz}{l} - 1} \right) \right] \quad (\text{II.38})$$

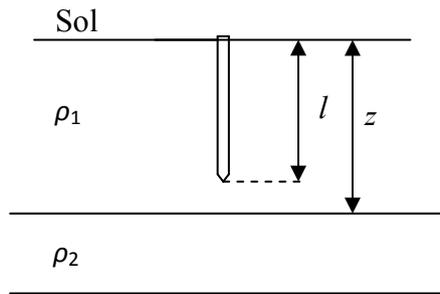


Figure II.25 : Electrode se situe dans la couche supérieure.

avec :

l : longueur de l'électrode ;

k : coefficient de réflexion donnée par la relation

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (\text{II.39}) ;$$

z : profondeur de la couche de résistivité ρ_1 .

Pour une électrode qui traverse deux couches de résistivités différentes (Figure II.26), la résistance est donnée par :

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \frac{(1+k)}{[(1-k) + 2k\frac{z}{l}]} \left[\ln \frac{2l}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \ln \left(\frac{2nz+l}{2z(n-1)+l} \right) \right] \quad (\text{II.40})$$

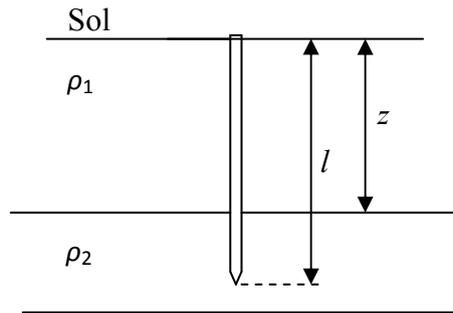


Figure II.26 : Electrode traverse les deux couches.

II.11.12.2. Résistance d'une électrode horizontale dans un sol en deux couches

Tagg [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.27) [Nzuru, 2009]. Elle est donnée par la relation :

$$R = R_l + R_a$$

R_l est la résistance de l'électrode horizontale dans un sol homogène de résistivité ρ_1 (voir la relation (II.22)) ; R_a est la résistance additionnelle due au changement de la résistivité du sol. Elle est donnée par la relation suivante :

$$R_a = \frac{\rho_1}{2\pi l} \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left[4 \ln \left(\frac{1 + \sqrt{\left(\frac{2nz}{l}\right)^2 + 1}}{2n\frac{z}{l}} \right) + 8n\frac{z}{l} - 4\sqrt{\left(\frac{2nz}{l}\right)^2 + 1} \right] \quad (\text{II.41})$$

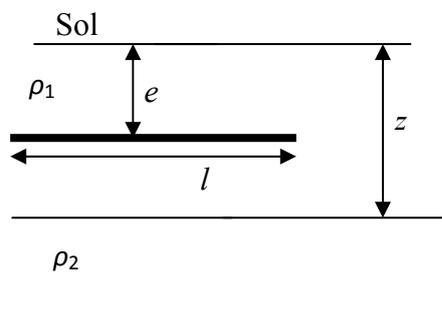


Figure II.27 : Electrode horizontale dans un sol en deux couches.

II.12. Conclusion

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. On peut par exemple, augmenter le diamètre de l'électrode de mise à la terre, bien que cela n'entraîne qu'une réduction minime de la résistance. Ou bien, il existe une méthode plus efficace. Elle consiste à enfoncer davantage l'électrode dans le sol. Celui-ci se présentant sous forme de strates (couches géologiques), la résistance varie sensiblement d'une strate à l'autre en fonction de la profondeur. En augmentent la longueur de l'électrode, on obtient en général une diminution de la résistance du sol. Le sol constitué de strates est donc rarement homogène. Il peut y avoir des variations considérables. La meilleure méthode pour réduire la résistance consiste à utiliser plusieurs prises de terre que l'on branche en parallèle.

CHAPITRE III
PRESENTATION ET VALIDATION
DU CODE CYMGRD

III.1. Introduction

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

- des méthodes expérimentales, qui consistent à utiliser des équations empiriques obtenues pour différentes formes de mise à la terre [Legrand, 2007 ; Nzuru, 2009] ;
- des méthodes numériques, qui sont indispensables pour résoudre les problèmes de la physique. En effet, ces problèmes, souvent très complexes, nécessitent des recours aux ordinateurs pour obtenir des solutions rapides et optimales. Ces ordinateurs ont accéléré presque tous les domaines de recherche, en matière de scientifique et technique, en résolvant des problèmes pratiques complexes basés sur les diverses méthodes numériques puissantes.

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.
- Approche hybride.
- 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].
 - CYMGRD (CYME Ground) : est 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 des caractéristiques électrostatiques et électromagnétiques d'un réseau de terre de forme de grille [CYMGRD, 2006].

Dans cette section, nous présentons brièvement, le code de calcul et de simulation CYMGRD utilisé dans notre étude. Nous comparons, par la suite, dans les mêmes conditions, nos résultats obtenus à ceux trouvés en utilisant la norme IEEE d'une part, et les différents modèles conventionnels rapportés dans la littérature, d'autre part. Ceci nous permet de valider le code CYMGRD.

III.2. Présentation de CYMGRD

Ce programme peut effectuer des analyses de résistivité du sol. Il peut tracer la résistivité mesurée et calculée sur le même graphique, pour permettre la vérification facile de la qualité du modèle de sol. 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 supporte l'analyse du sol uniforme ou stratifié horizontalement en deux couches de résistivités différentes (le programme 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.

En plus, il calcule le dimensionnement des électrodes de terre et l'élévation de potentiel à la surface du sol de l'installation (EPI). Il peut également déterminer la résistance équivalente des grilles de mise à la terre, de configuration arbitraire, constituée 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 mise sous tension, peuvent être modélisées, afin d'évaluer les effets de proximité.

CYMGRD calcule en outre, les gradients de potentiel de contact et de surface dans n'importe quel point d'intérêt de la zone d'étude. Le programme peut également produire les contours équipotentiels des potentiels de contact et de surface, ainsi que les profils des tensions de pas et de contact dans n'importe quelle direction. La codification couleur permet de visualiser les résultats 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.

III.2.1. Modules d'analyse du logiciel

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 ces calculs 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 rectangulaires. Les piquets de mise à la terre peuvent être définis de la même façon que la grille.
- Les modules de diagramme de contour et diagramme de profil : génèrent une représentation graphique des résultats de l'analyse du potentiel dans des diagrammes de contour et de profil. Les diagrammes des contours du potentiel peuvent servir pour représenter la tension de contact 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 et de pas, selon un axe donné, dans la direction désirée. Les variations de tension et les tensions 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, puisqu'ils sont composés de conducteurs et de piquets de terre.

- L'électrode 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 mise à la terre. La majorité des études de mise à la terre ne tient compte que de l'électrode primaire, il s'affiche à l'écran en rouge.
- L'électrode 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 grille de la terre existe et est située à proximité de l'électrode primaire activée. Cette électrode peut être modélisée par un simple piquet de terre et s'affiche dans CYMGRD en bleu. En l'absence d'électrode de retour, tout le courant absorbé par l'électrode primaire ne peut être diffusé à la terre.
- L'électrode 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 distinctes ne font pas souvent partie du système de mise à la terre, mais il faut parfois les représenter. Dans notre étude, nous avons pris en considération que l'électrode primaire.

Dans CYMGRD, « Conducteur » veut dire électrode de terre horizontale et « Piquet » veut dire électrode de terre verticale.

III.2.3. Résistivité et évaluation de la sécurité

Le logiciel 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 programme permet à l'utilisateur d'estimer les tensions maximales permises de pas et de contact, à des conditions de surface et d'exposition 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, identifier de façon précise 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.

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 la méthode 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 :

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

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

$$\rho_a = 4\pi a(V/I) \quad (\text{III.2})$$

Il faut trouver les valeurs de ρ_1 , ρ_2 , et h afin que CYMGRD puisse der la fonction suivante:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\rho_a(i) - \rho(i)}{\rho_a(i)} \right]^2 \quad (\text{III.3})$$

où

b : est la longueur de l'électrode ;

ρ_1 : la résistivité de la couche supérieure ;

ρ_2 : la résistivité de la couche inférieure ;

h : l'épaisseur de la couche supérieure;

a : l'écartement des électrodes;

$\rho_a(i)$: la résistivité mesurée du sol selon une distance a_i entre les électrodes ;

$\rho(i)$: la résistivité calculée du sol selon une distance a_i entre les électrodes.

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

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_i^N erreur^2(i)}{N}} \quad (III.4)$$

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 ($V_{contact}$ et V_{pas}), à des conditions de surface et d'exposition données. Pour estimer ces deux tensions, CYMGRD utilise les équations suivantes, extraites de la norme IEEE 80-2000 :

$$V_{pas} = (R_{corps} + 2R_{pas})I_{corps} \quad (III.5)$$

$$V_{contact} = (R_{corps} + \frac{R_{pas}}{2})I_{corps} \quad (III.6)$$

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

$$V_{contact} = (1000 + 1.5 \times C_S \rho_S) \times \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (III.7)$$

$$V_{pas} = (1000 + 6 \times C_S \rho_S) \times \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (III.8)$$

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

$$V_{contact} = (1000 + 1.5 \times C_S \rho_S) \times \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (III.9)$$

$$V_{pas} = (1000 + 6 \times C_S \rho_S) \times \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (III.10)$$

où :

I_{corps} : le courant tolérable par le corps humain en A ;

R_{corps} : la résistance du corps humain en Ω ;

R_{pas} : la résistance de terre d'un pied en Ω ;

t_s : la durée du choc pour déterminer le courant permis au corps humaine en s ;

ρ_s : la résistivité du matériau de surface en Ωm ;

C_s : le facteur de réduction (derating factor) en la présence de matériau de haute résistivité à la surface, qui peut être calculé par :

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \times (1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0.09} \quad (\text{III.11})$$

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.

Les données d'évaluation de la sécurité sont définies au même titre que les données du modèle de sol dans la même boîte de dialogue. Le but du calcul est d'arriver à un facteur de réduction qui laissera tirer profit de la couche de surface de haute résistivité, permettant à une tension plus élevée de contact d'être tolérée. Les résultats du module d'analyse de la sécurité apparaissent dans le rapport d'analyse du sol.

III.3. Validation du code CYMGRD

III.3.1. Validation par les méthodes conventionnelles

Comme nous l'avons déjà cité dans le deuxième chapitre, quatre principales méthodes conventionnelles, permettant la détermination de la résistance du système de mise à la terre, se présentent. Il s'agit des équations de Laurent-Niemann (Equation (II.29)), Sverak (Equation (II.31)), Schwarz (Equation (II.32)) et Thapar-Gerez (Equation (II.37)). Dans cette section, nous comparons nos résultats de calcul de la résistance du système de mise à la terre trouvés dans le cas d'un sol homogène, à ceux obtenus en appliquant les équations conventionnelles susmentionnées. Pour cela, plusieurs grilles de formes géométriques diverses (carrée et rectangulaire) et de tailles différentes sans et avec piquets, ont été considérées. Les caractéristiques de circuit de terre adoptées sont les suivantes :

- ✓ Durée du défaut $t_c = 0.5$;
- ✓ Résistivité de du sol $\rho = 100 \Omega\text{.m}$;
- ✓ Résistivité de la couche superficielle $\rho_s = 2500 \Omega\text{.m}$;
- ✓ Profondeur d'enfouissement $h = 0.8 \text{ m}$;
- ✓ Diamètre des conducteurs $d = 12 \text{ mm}$.

Les différents résultats sont donnés dans le tableau (III.1).

Dimensions de la grille (m ²)	Nombre de mailles	Longueur des conducteurs primaires (m)	Longueur des piquets (m)	Laurent-Niemann	Sverak	Schwarz	Thapar-Gerez	CYMGRD
				R _g (Ω)				
20 x 20	16	200	0	2,7156	2,5664	2,4055	2,4047	2,2959
20 x 20	16	200	32	2,6466	2,4974	2,3898	2,3400	2,1661
40 x 10	16	250	0	2,6156	2,4664	2,0420	2,1834	2,0235
40 x 10	16	200	32	2,5702	2,4210	2,0326	2,1432	1,9268
60 x 60	36	840	0	0,8576	0,8434	0,8014	0,7902	0,7953
60 x 60	36	840	48	0,8511	0,8370	0,7999	0,7842	0,7821
90 x 40	36	910	0	0,8484	0,8343	0,7520	0,7684	0,7609
90 x 40	36	910	48	0,8429	0,8288	0,7507	0,7634	0,7492

Tableau III.1 : Résistance du système de mise à la terre cas d'un sol homogène.

III.3.2. Validation par le guide IEEE 80-2000

III.3.2.1. Principe de conception d'un réseau de terre selon IEEE 80-2000

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.

La démarche à suivre peut se faire selon l'organigramme de la figure III.1. Cet organigramme est constitué des étapes suivantes [IEEE, 2000] :

- Etape 1

La conception du réseau de terre commence nécessairement par une étude géologique (structure physique, mesures de résistivité, variations saisonnières de la résistivité, l'hétérogénéité 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.

- Etape 2

La section de conducteur (S) est déterminée par l'équation (III.12). Le courant de défaut $3I_0$, donné par l'équation (III.13), 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 de conducteur de terre, le temps t_f devrait refléter le temps maximum d'élimination du défaut.

$$S = I_G \sqrt{\frac{t_c \alpha_r \rho_r}{TCAP \cdot 10^{-4} \ln \left[1 + \frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right]}} \quad (III.12)$$

$$3I_0 = \frac{V}{3R_g + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (III.13)$$

avec :

t_c : la durée normalisée de court-circuit (s) ;

I_G : le courant maximum de la grille (kA) ;

I_0 : la composante homopolaire du courant de défaut (A) ;

T_m : la température maximale admissible par le conducteur en °C ;

α_r : le coefficient thermique de résistivité ;

$TCAP$: le facteur de chaleur spécifique ($J/cm^3/^\circ C$) ;

T_a : la température ambiante en °C ;

ρ_r : la résistivité du conducteur à 20°C en $\mu\Omega.cm^3$;

K_0 : le coefficient thermique de conductivité du conducteur à 0°C ;

R_g : la résistance de la grille (Ω) ;

R_0, R_1, R_2 : les résistances homopolaire, direct et inverse lors d'un défaut dissymétrique (Ω) ;

X_0, X_1, X_2 : les réactances homopolaire, direct et inverse lors d'un défaut dissymétrique (Ω) ;

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

- Etape 3

Les tensions tolérables de contact et de pas sont déterminées à partir des équations de (III.5) et (III.6). Le choix du temps (t_s) est basé sur le jugement du concepteur.

- Etape 4

La conception préliminaire débute par une boucle de conducteur, 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 I_G et la surface de la sous-station.

- Etape 5

Les évaluations préliminaires de la résistance du système de mise à la terre R_g peuvent être déterminées.

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (\text{III.14})$$

ρ : résistivité de sol ;

L_T : longueur totale des conducteurs de la grille ;

h : profondeur d'enfouissement ;

A : surface de la grille.

- Etape 6

Le courant I_G est déterminé selon l'équation (III.15). 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.

$$I_G = D_f S_f (3I_0) \quad (\text{III.15})$$

où :

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

S_f : facteur de division du courant de défaut.

- Etape 7

Si, après la conception préliminaire, le EPI (Elévation de Potentiel à la surface du sol de l'Installation) 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.

$$EPI = I_G R_g \quad (III.16)$$

- Etape 8

Les calculs de la tension de maille et celle de pas, relatives à la grille, peuvent être faits en utilisant les équations (III.17) et (III.18) :

$$V_{maille} = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L_T} \quad (III.17)$$

$$V_{pas} = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L_T} \quad (III.18)$$

avec :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2+h)^2}{8Dh} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[\frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \right] \quad (III.19)$$

où :

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} \quad (III.20)$$

et :

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{k_0}} \quad (III.21)$$

h : profondeur d'enfouissement ;

$h_o = 1$ m : profondeur de référence ;

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

d : diamètre des conducteurs de la grille ;

n : facteur géométrique ($n = 11$ pour une grille carrée) ;

K_i : coefficient d'irrégularité de la grille ;

K_m : facteur de correction géométrique du circuit pour déterminer la tension de maille ;

K_s : facteur de correction géométrique du circuit pour déterminer la tension de pas ;

L_T : longueur totale des conducteurs et tous les piquets de terre utilisés dans le système (m).

- Etape 9

Si, la tension calculée de maille est au-dessous de la tension tolérable de contact, la conception peut être complétée pour relier les équipements au système de mise à la terre. Sinon, la conception préliminaire devrait être modifiée (modification de la taille des mailles, de la profondeur du circuit ou de l'adjonction des piquets).

- Etape 10

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 conducteur (la taille des mailles, l'adjonction de piquets, la profondeur du circuit de terre, etc.) devrait être faite.

- Etape 11

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 de conducteur, pour satisfaire les limites de tensions de pas et de contact.

- Etape 12

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

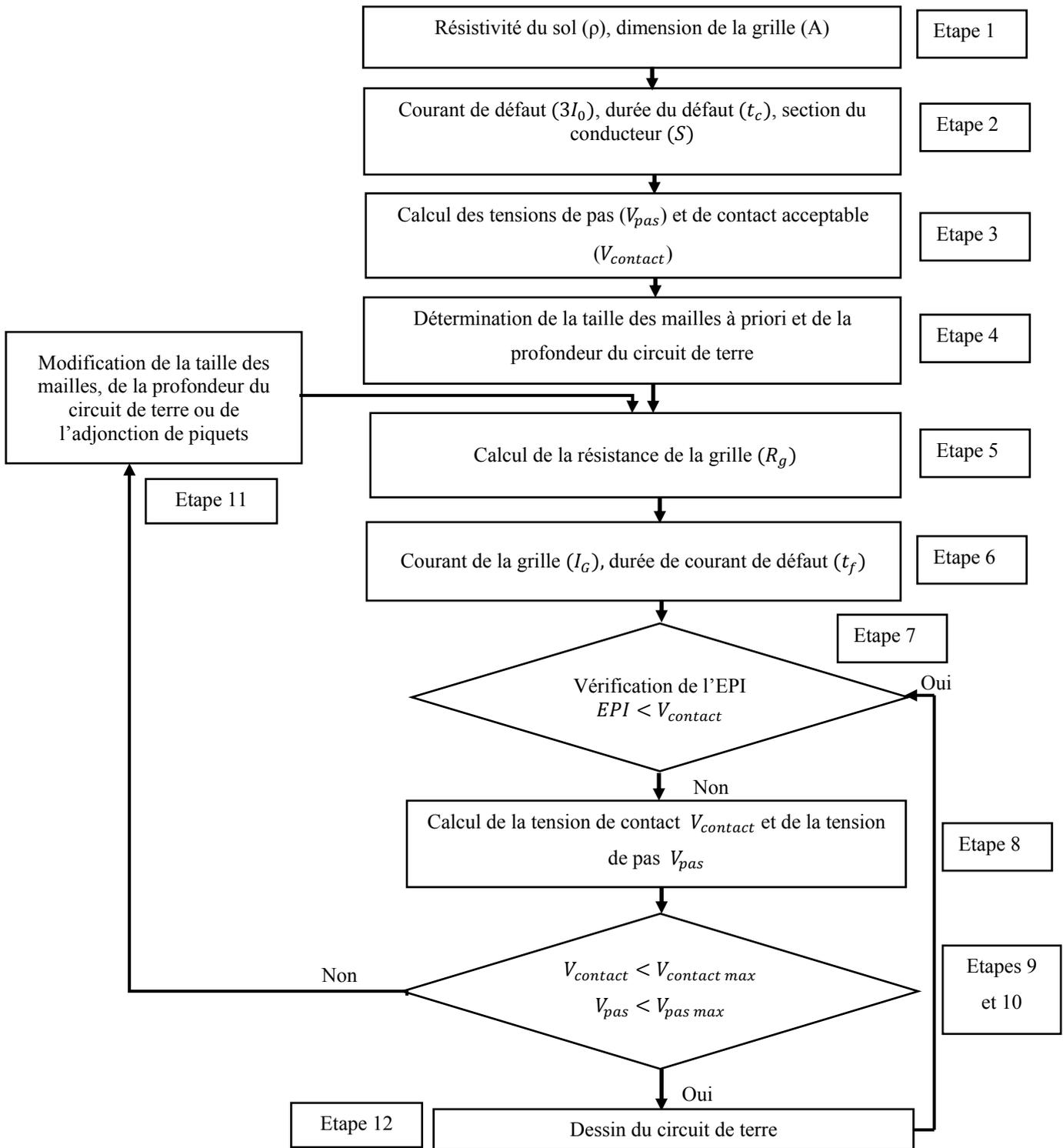


Figure III.1 : Organigramme de la conception d'un circuit de terre.

III.3.2.2 Configuration de base

Afin de comparer nos résultats concernant les tensions maximales (de contact et de pas autorisées), le EPI, 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 la configuration de base selon la norme susmentionnée. Il s'agit d'une grille carrée de 70 m x 70 m, contient 100 mailles et sans piquets de terre telle qu'illustrée sur la figure III.2 :

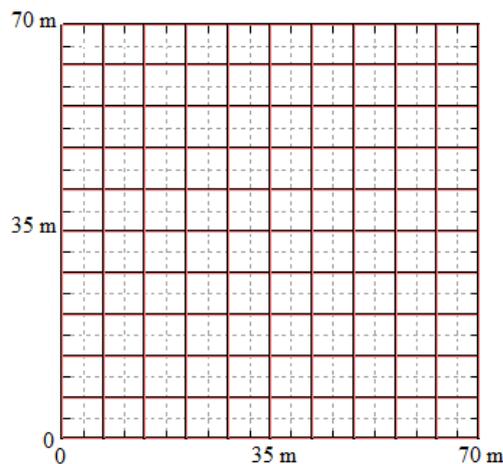


Figure III.2 : Grille carrée 70 m x 70 m sans piquets.

Les données de conception sont montrées dans le tableau III.2.

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	0,6
Matériau conducteur	Cuivre dur allié
Température ambiante	40 °C
Diamètre des conducteurs	0,01 m

Tableau III.2 : Données de conception de la grille carrée 70 m x 70 m sans piquets.

Les résultats obtenus utilisant les deux techniques sont données dans le tableau III.3 :

Référence	Tension maximale de contact autorisée (V)	Tension maximale de pas autorisée (V)	Facteur de réduction Cs	Résistance de la grille (Ω)	Élévation de potentiel (V)
CYMGRD	840,55	2696,10	0,742	2,64	5262,70
Guide IEEE 80-2000	838,20	2686,00	0,740	2,78	5304,24

Tableau III.3 : Comparaison des paramètres en utilisant CYMGRD et le Guide IEEE 80-2000.

III.3.2.3 Configuration améliorée

En suivant l'organigramme de la figure III.1, nous réalisons que l'étape 9 est non accomplie ($V_{\text{coin mailles}} = 1060 \text{ V} > V_{\text{contact}} = 838,2 \text{ V}$), la configuration de base (Figure III.2) est donc à améliorer. Nous procédons dans ce cas, à modifier la conception de la grille pour répondre aux exigences tolérables de la tension de contact. Souvent, il y a deux façons pour ce faire :

- a) Ramener le EPI à une valeur inférieure à la tension tolérable de contact ;
- b) Réduire le courant de défaut au sol.

Etant donné qu'il est généralement difficile de réduire le courant de défaut dans le sol, nous proposons à modifier les paramètres de la grille (espacement des conducteurs, longueur totale des conducteurs, profondeur d'enfouissement, ajout des piquets, ... etc.).

Nous avons jugé utile de rajouter 20 piquets placés autour du périmètre de la grille (Figure III.3) d'une manière alternée. Les nouvelles caractéristiques sont données dans le tableau (III.4). Nous obtenons ainsi :

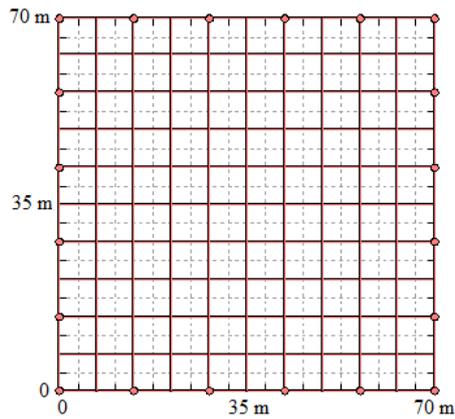


Figure III.3 : Grille carrée 70 m x 70 m avec 20 piquets.

Longueur des piquets	7,50 m
Diamètre des piquets	0,01 m
Profondeur d'enfouissement	0,5 m
Courant injecter au sol « I_G »	1908 A

Tableau III.4 : Données supplémentaires de conception de la grille carrée 70 m x 70 m avec 20 piquets.

Pour cette nouvelle configuration, nous avons calculé, pour la seconde fois, les différents paramètres à comparer. Les tensions maximales de pas et de contact autorisées ainsi que le facteur de réduction sont inchangés (constants), car ils ne dépendent pas du nombre de piquets rajoutés. Les autres paramètres (résistance de la grille et l'élévation de potentiel) sont présentés dans le tableau III.5.

Référence	Résistance de la grille (Ω)	Élévation de potentiel (V)
CYMGRD	2,5	4984,62
Guide IEEE80	2,75	5247

Tableau III.5 : Comparaison de la résistance de la grille et de l'élévation de potentiel en utilisant CYMGRD et le Guide IEEE 80-2000.

Afin de comparer la tension de contact obtenue dans les deux configurations de base et améliorée, nous illustrons à la figure III.4, le diagramme de contour de potentiel en 3D, qui représente la tension de contact de la grille (avec et sans piquets).

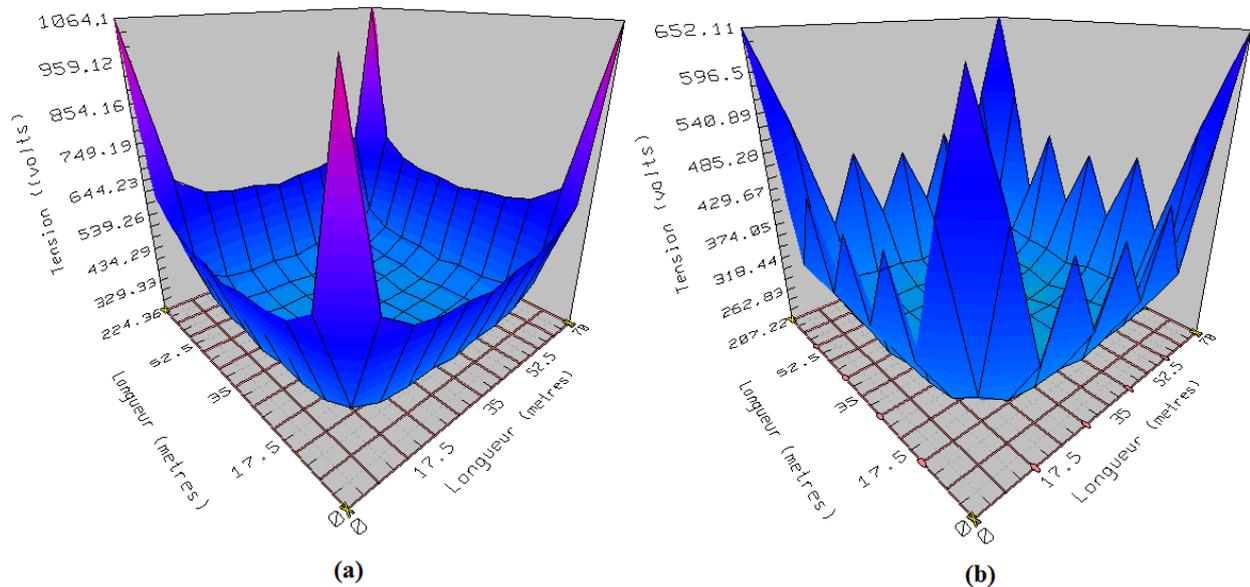


Figure III.4 : Diagramme de contour de potentiel en 3D :
 (a) Grille sans piquets, (b) Grille avec 20 piquets.

La figure III.4 (a) nous montre que la tension, dans les quatre coins de la grille, est supérieure à celle de contact tolérable ($V_{\text{contact max}} = 838,2 \text{ V}$). Chose qui nous mène à corriger ce dysfonctionnement, en rajoutant 20 piquets placés d'une manière alternée, autour du périmètre de la grille. Le rajout de ces derniers entraîne une diminution de la tension de contact aux coins jusqu'à 650 V, comme le montre la figure III.4 (b).

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 d'une part, nos résultats, concernant l'élévation du potentiel, la résistance de la terre et les tensions maximales de contact et de pas, à ceux trouvés en utilisant la norme IEEE 80-2000, et d'autre part, notre résistance de la terre à celles obtenues par les modèles conventionnels. Une très bonne concordance a été obtenue.

CHAPITRE IV

CARACTERISTIQUES DES GRILLES DE TERRE UTILISANT CYMGRD

IV.1. Introduction

Dans ce qui va suivre, nous allons présenter les résultats de simulation relatifs aux systèmes (grilles) de mise à la terre obtenus en utilisant CYMGRD. En se basant sur les mesures de la résistivité, ce code permet d'évaluer l'élévation du potentiel à la surface du sol et de repérer les zones à risque ou dangereuses à l'intérieur des aires d'intérêt.

IV.2. Étude d'une grille carrée

Nous étudions le cas d'une grille carrée avec et sans piquets. Les caractéristiques de cette grille, ainsi que les paramètres de simulation supposés pour notre étude (courant de défaut, durée de choc et poids de la victime) sont illustrés dans le tableau IV.1. La surface du poste doit être remblayée avec de la pierre cassée ayant une résistivité de 2500 Ωm et une épaisseur de 0,2 m. Nous introduisons, dans CYMGRD, les valeurs relatives à la résistivité apparente du sol, considérées par le guide IEEE 80-2000 et données dans le tableau IV.2. Notons que, la méthode de mesure de la résistivité de sol supportée par le logiciel CYMGRD est celle de Wenner. Par ailleurs, ce logiciel ne considère que le type de stratification horizontale du sol.

Grille de forme carrée	50 m x 50 m
Diamètre des conducteurs	19,1 mm
Longueur des piquets	10,9 m
Diamètre des piquets	12,7 mm
Profondeur d'enfouissement	0,5 m
Poids corporel	70 kg
Courant de défaut	1000 A
Durée du choc	0,5 s
Pas minimal	0,22 m

Tableau IV.1 : Paramètres de la grille et des piquets.

Distance entre électrodes (m)	6	9	15	21	27	33	40	46
ρ_a (Ωm)	247,57	202,12	144,05	120,28	110,68	106,41	104,34	103,16

Tableau IV.2 : Mesures de résistivités de sol.

Étant donné que ce logiciel n'utilise que les modèles de sol uniforme et à deux couches, nous avons estimé intéressant de présenter ces deux modèles pour le cas de la grille carrée sans piquets de la figure IV.1.

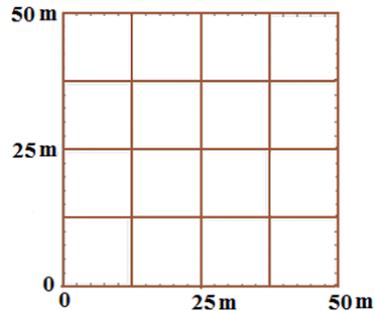


Figure IV.1 : Grille carrée (50 m x 50 m) de 16 mailles symétriques.

1^{er} cas : Sol uniforme

La résistivité d'un sol uniforme est calculée à partir de l'équation (II.11). Cette expression donne la résistivité apparente moyenne de ce modèle. Dans ce cas, nous obtenons $\rho_a = 142,32 \Omega\text{m}$.

2^{ème} cas : Sol à deux couches

Les deux résistivités ρ_1 et ρ_2 des couches supérieure et inférieure, sont déterminées à partir du graphe de la figure IV.2. Avec $\rho_1 \geq \rho_{a(\text{Max})}$ et $\rho_2 \leq \rho_{a(\text{min})}$ ($\rho_1 = 300 \Omega\text{m}$ et $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$). Il nous reste à déterminer l'épaisseur h de la couche supérieure, en utilisant le graphe, appelé graphe de Sunde employé par IEEE 80-2000 [IEEE, 2000], de la figure IV.3, avec :

ρ_1 : résistivité de la couche supérieure ;

ρ_2 : résistivité de la couche inférieure ;

ρ_a : résistivité apparente calculée par l'expression (II.12) ($\rho_a = 175,36 \Omega\text{m}$) ;

$\rho_{a(\text{Max})}$: résistivité apparente pour la distance entre électrodes la plus petite ($a_{\text{min}} = 6 \text{ m}$) ;

$\rho_{a(\text{min})}$: résistivité apparente pour la distance entre électrodes la plus grande ($a_{\text{max}} = 46 \text{ m}$) ;

a : distance entre électrodes de Winner ($a = 10,8 \text{ m}$) ;

h : épaisseur de la couche supérieure ($h = 6,75 \text{ m}$).

L'épaisseur calculée par CYMGRD est : $h = 6,11 \text{ m}$.

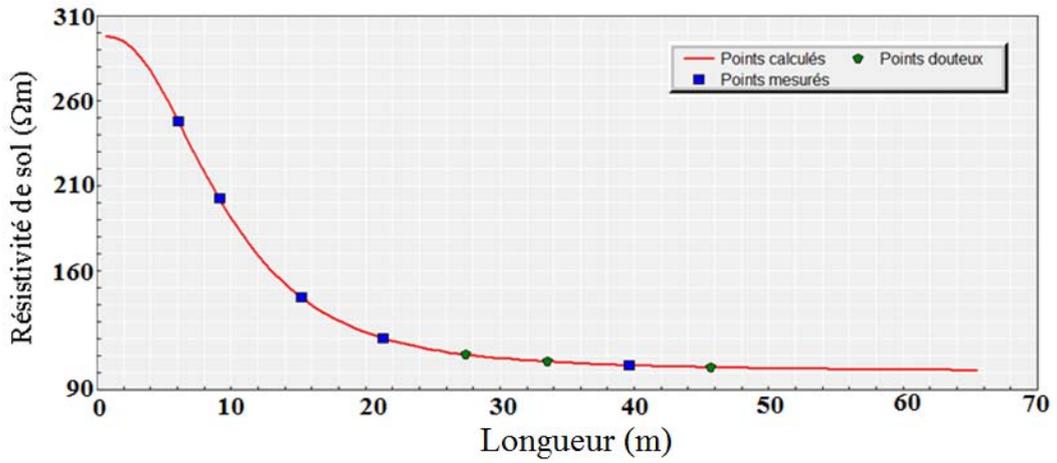


Figure IV.2 : Graphe de mesures de résistivités de sol (les ponts douteux sont donnés par CYMGRD).

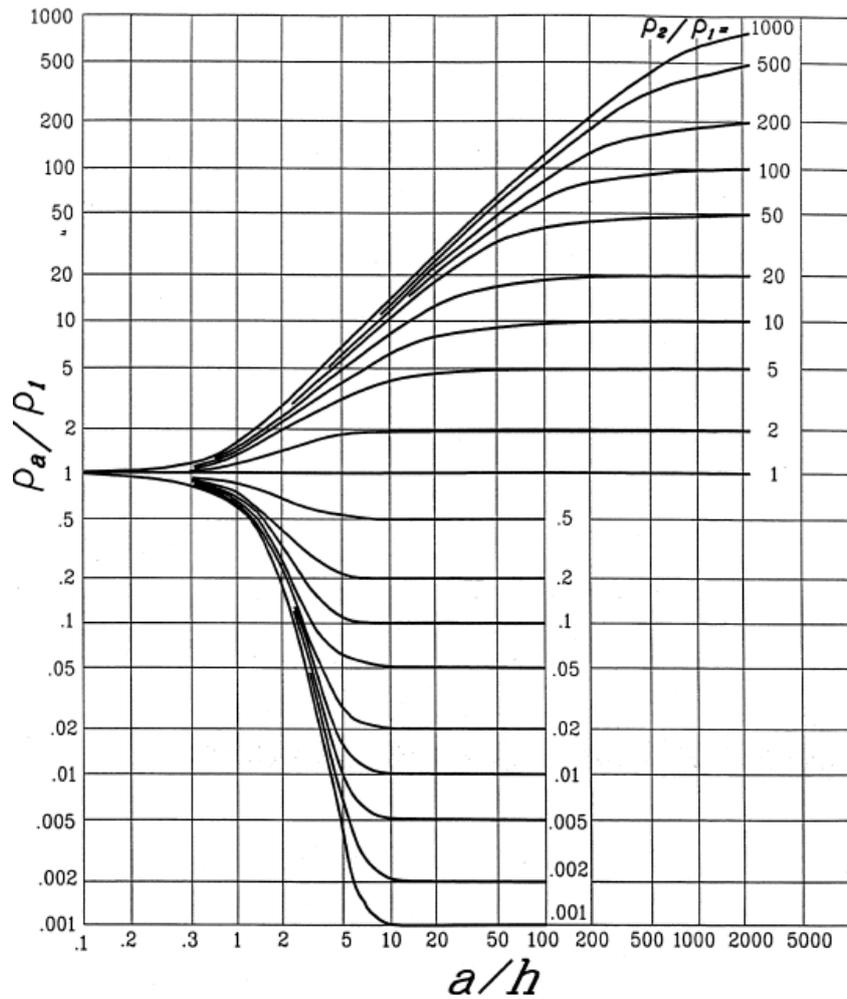


Figure IV.3 : Graphe de la méthode de Sunde.

Le tableau IV.3 correspond aux résultats de simulation obtenus pour les deux modèles de sol.

Modèle de sol	Uniforme	À deux couches
Facteur Cs de réduction	0,84	0,84
Tension de contact maximale permise (V)	919,93	919,96
Tension de pas maximale admissible (V)	3013,63	3013,76
Élévation du potentiel de terre (V)	1379,02	1688,07
Résistance de la grille (Ω)	1,41	1,75

Tableau IV.3 : Résultats de simulation obtenus pour les deux modèles de sol.

Ce tableau nous indique que le facteur de réduction et les tensions de contact et de pas maximales varient peu en fonction de la nature de sol (homogène et hétérogène). Cependant, la résistance de la grille et l'élévation de potentiel de terre changent d'un modèle à l'autre, car ces deux derniers dépendent de la résistivité apparente du sol.

Le potentiel de contact dans la grille, pour les deux cas de sol, est illustré sur la figure IV.4.

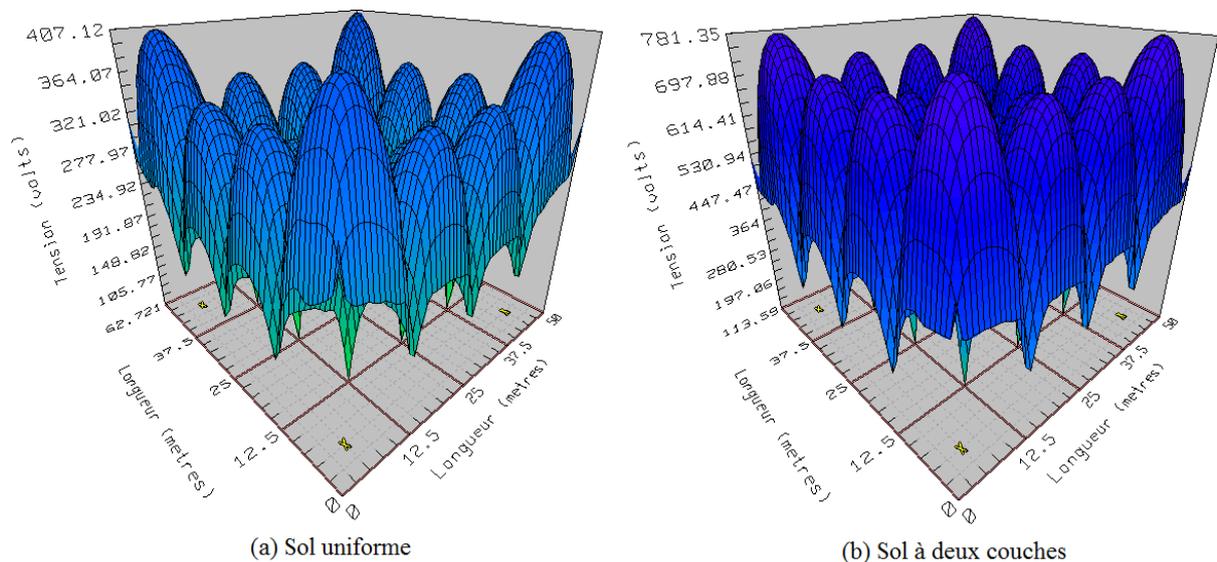


Figure IV.4 : Potentiel de contact dans la grille pour les deux modèles de sol en 3D.

Les variations de la résistivité du sol ont une influence considérable sur la performance de la plupart des systèmes de mise à la terre, affectant à la fois la valeur de la résistance du sol, l'élévation du potentiel de terre et les tensions de pas et de contact. La norme IEEE 80 2000 recommande le modèle de sol à deux couches dans les simulations des terres [IEEE, 2000]. C'est pour cette raison que nous allons poursuivre notre étude avec ce modèle.

IV.2.1. Influence des mailles sur une grille carrée sans piquets

IV.2.1.1. Influence du nombre de mailles

Nous considérons deux grilles similaires à celle présentée précédemment, la différence est dans le nombre de mailles. La première comporte 4 mailles et la seconde 16 mailles.

Dans le tableau IV.4, nous présentons, pour les deux configurations, l'élévation de potentiel de terre, la résistance de grille et les tensions de pas et de contact maximales.

Nombre de maille de la grille	4 mailles	16 mailles
Élévation du potentiel de terre (V)	2062,19	1688,07
Résistance de grille (Ω)	2,17	1,75
Tension de contact maximale permis (V)	919,96	919,96
Tension de pas maximale admissible (V)	3013,76	3013,76
Tension de pas maximale (V)	92,96	71,28
Tension de contact maximale (V)	1321,56	782,95

Tableau IV.4 : Analyse de la grille pour différents maillages.

Ce tableau nous montre que l'augmentation du nombre de mailles, engendre une baisse de tous les paramètres de simulation. Cependant, les tensions de contact et de pas maximales admissibles restent invariables, car elles sont indépendantes de la nature du sol (homogène et hétérogène).

Nous observons aussi que la tension de contact maximale de la grille à 4 mailles, est supérieure à celle permise ($1321,56 \text{ V} > 919,96 \text{ V}$). Contrairement à celle obtenue pour 16

mailles, où cette tension (782,95 V) est inférieure à 919,96 V. Ce qui nous a permis de dire que la grille à 16 mailles est beaucoup plus fiable que celle à 4 mailles.

Nous présentons, maintenant, sur la figure IV.5, le potentiel de contact obtenu le long de la diagonale principale de la grille (du coin inférieur gauche vers le coin supérieur droit) pour différents maillages.

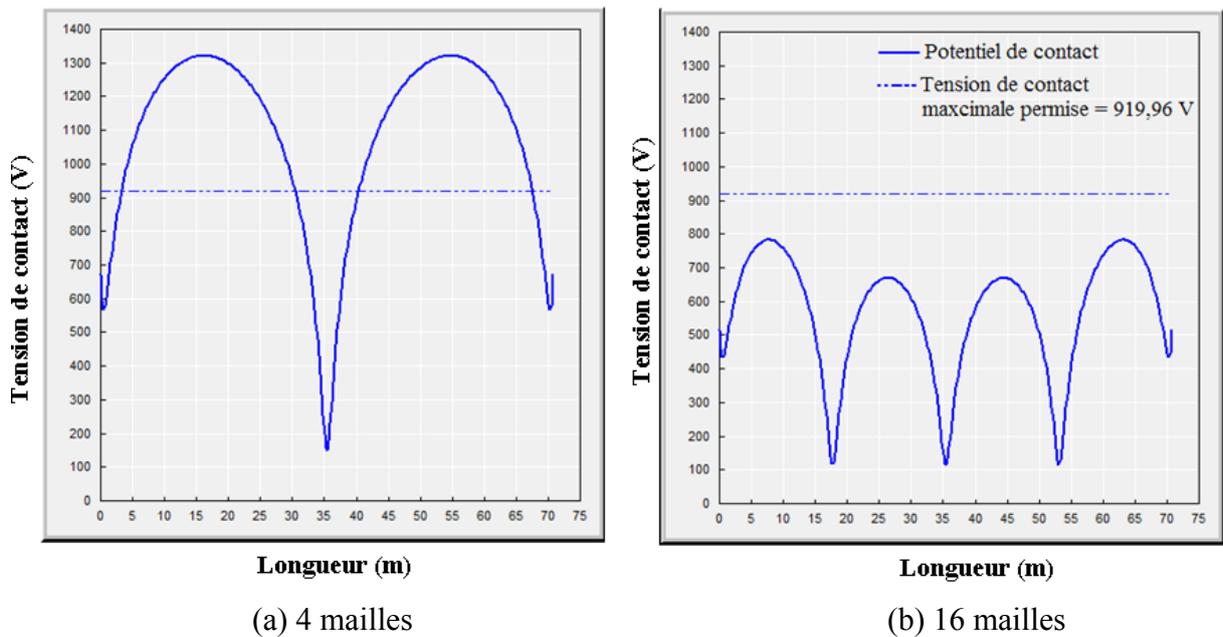


Figure IV.5 : Potentiel de contact obtenu le long de la diagonale principale de la grille.

Les deux diagrammes présentent des allures de paraboles qui correspondent aux nombres de mailles traversées par la diagonale principale. Les valeurs maximales de la tension de contact sont obtenues dans les mailles des coins de la grille. La tension de contact, dans la configuration à 4 mailles, dépasse la valeur maximale permise, ce cas nous expose à un risque d'électrocution. Ce risque a été éliminé dans la configuration à 16 mailles, étant donné que la tension de contact obtenue est inférieure à 919,96 V.

Des diagrammes de contour du potentiel ont été générés pour toutes les grilles. Ils sont montrés en 3D sur la figure IV.6.

Les seuils considérés pour les potentiels de contact sont 33,33 %, 66,66 %, 100 % et de 133,33 % de la tension maximale autorisée de contact. Toute valeur dépassant les tensions maximales permise de contact est affichée en rouge pour indiquer les aires dangereuses.

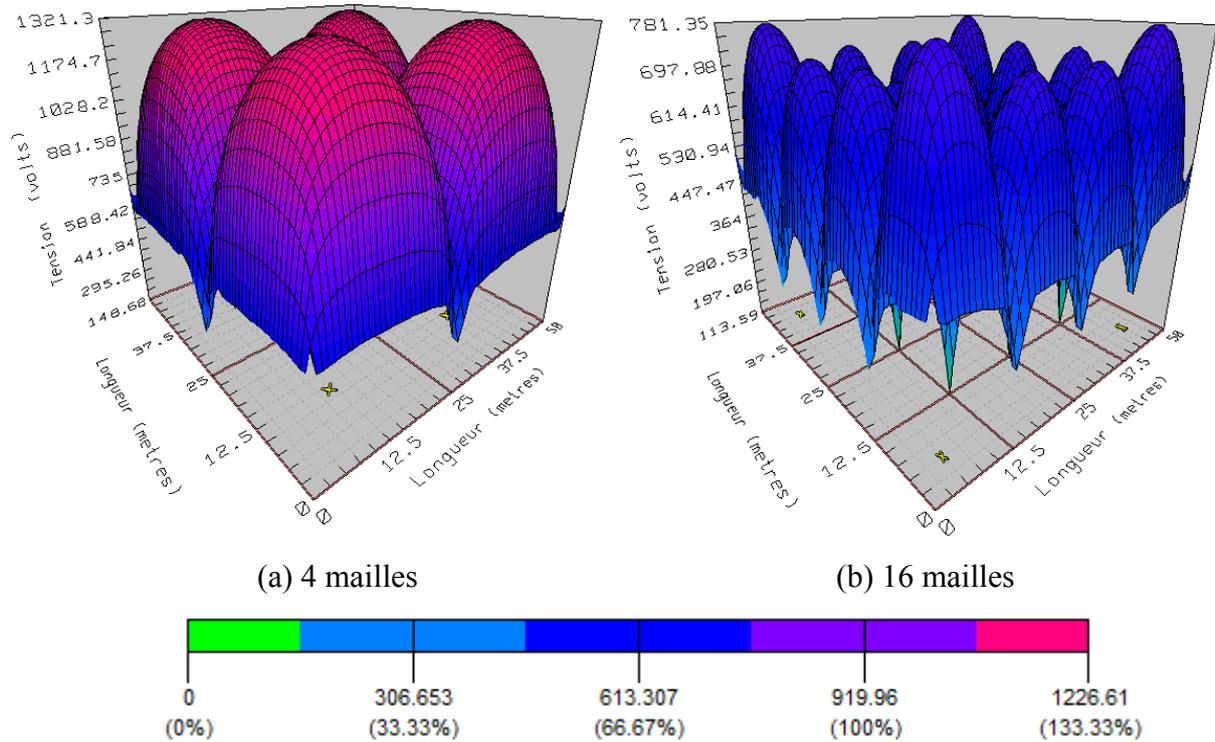


Figure IV.6 : Diagrammes de contour du potentiel de contact en 3D.

Les résultats montrent qu'il n'y a rien d'inquiétant pour la configuration (b), puisque toutes les valeurs calculées se situent bien en dessous de leurs valeurs maximales correspondantes. Cependant, sur la configuration (a), nous remarquons clairement que les valeurs hors-limites de potentiel de contact sont affichées dans les zones des centres des mailles de la grille, ce qui nous indique l'existence d'un risque d'être exposé à un choc pour cette configuration.

Pour la même grille sans piquets, nous examinons l'influence du nombre des mailles, pour un courant de défaut égale à 2 kA, sur l'élévation de potentiel (EPI), la résistance de la grille (R_g) et les tensions maximales de pas et de contact (V_{Pas} et $V_{Contact}$). Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau IV.5.

Nombre de mailles	Elévation de potentiel (V)	Résistance de la grille (Ω)	Tension maximale de pas (V)	Tension maximale de contact (V)
12	3489,04	1,81	149,13	1713,26
16	3376,13	1,75	142,56	1565,92
25	3199,40	1,65	132,11	1312,81
49	2996,33	1,54	119,76	1013,49
81	2929,89	1,51	116,48	909,18
144	2783,78	1,43	108,67	779,18
225	2724,12	1,39	106,81	747,90
361	2675,71	1,37	106,37	721,93
529	2651,42	1,36	107,33	706,42
576	2638,47	1,35	107,89	695,91
1156	2598,07	1,33	113,28	661,62
1521	2585,64	1,32	116,43	647,92
2025	2574,66	1,31	120,25	634,68

Tableau IV.5 : Influence du nombre de mailles sur l'élévation de potentiel, la résistance de la grille et les tensions maximales de pas et de contact.

Nous avons tracé les différentes caractéristiques (Figures IV.7 à IV.10) donnant la variation de l'élévation du potentiel de terre, de la résistance de la grille et des tensions maximales de pas et de contact en fonction du nombre de mailles.

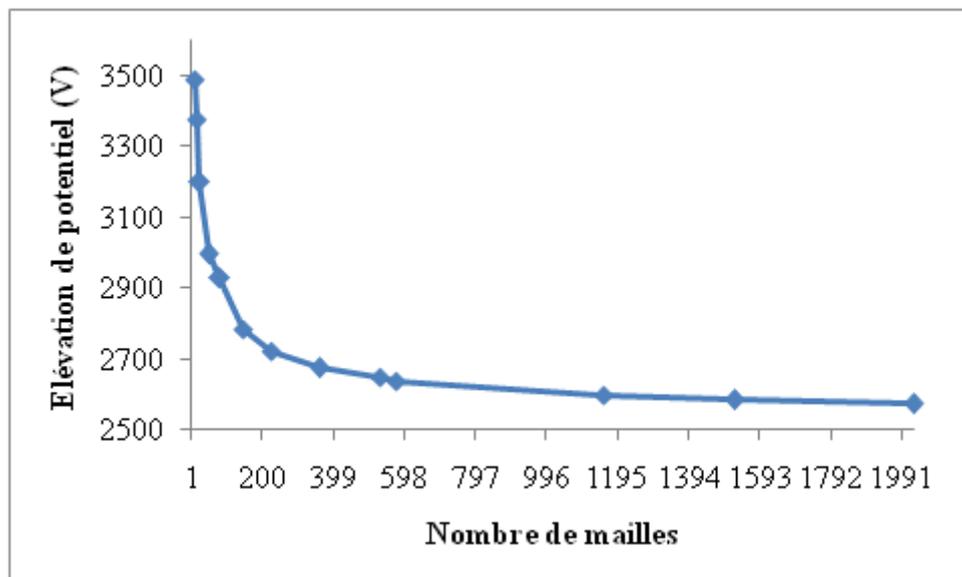


Figure IV.7 : Elévation de potentiel en fonction du nombre des mailles.

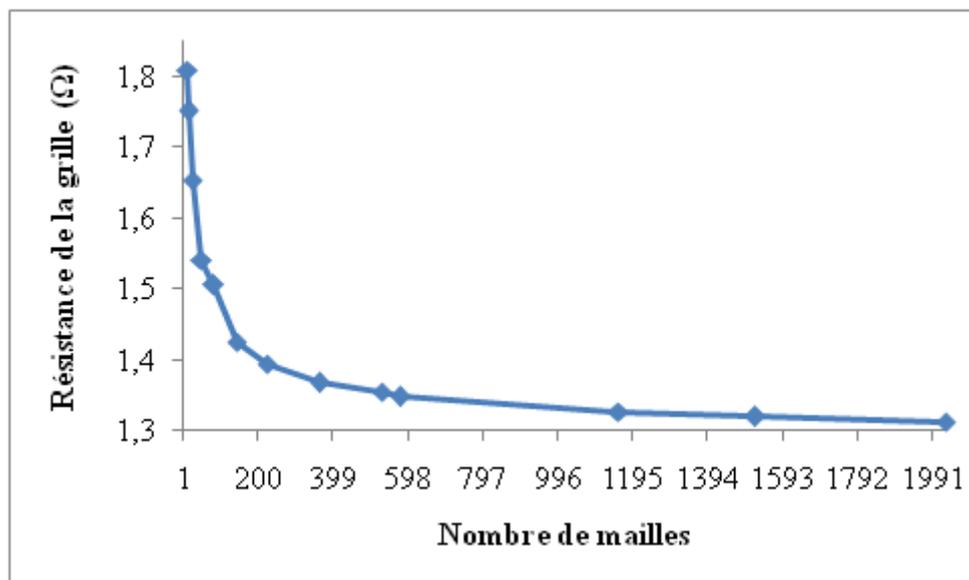


Figure IV.8 : Variation de la résistance de la grille en fonction du nombre de mailles.

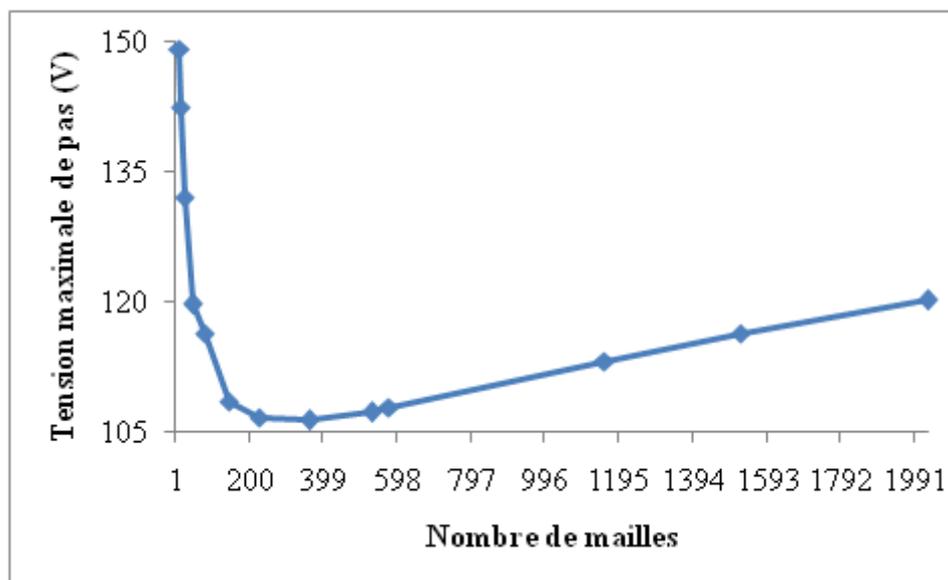


Figure IV.9 : Variation de la tension maximale de pas en fonction du nombre de mailles

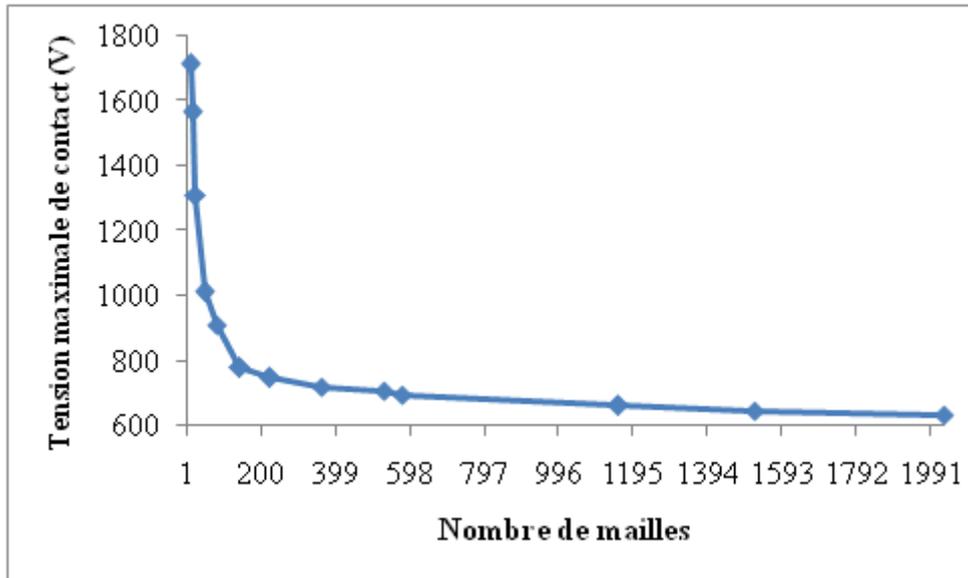
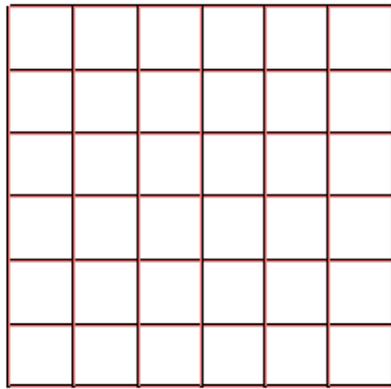


Figure IV.10 : Variation de la tension maximale de contact en fonction du nombre de mailles.

D'après le tableau IV.5 et les figures IV.7 à IV.10, nous pouvons conclure que l'augmentation du nombre de mailles entraîne une rapide diminution de la résistance, l'élévation du potentiel de terre, ainsi que les tensions de contact et de pas. Jusqu'à un nombre proche de 200 mailles, cette diminution tend vers une valeur constante pour la résistance, l'élévation de potentiel et la tension maximale de contact. Cependant, la tension de pas augmente à partir de ce nombre de mailles.

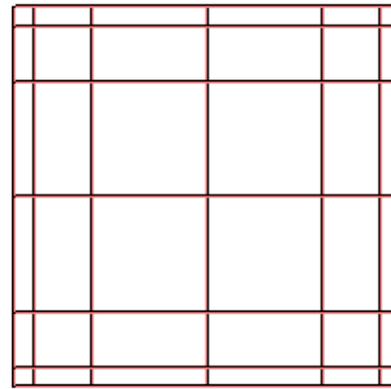
IV.2.1.2. Influence de l'espacement entre conducteurs

Dans cette partie, nous considérons deux formes de maillages distincts de la grille carrée : symétrique pour la première configuration, et asymétrique pour la deuxième (Figure IV.11). Les résultats de simulation, pour les deux cas, sont donnés dans le tableau IV.6, et illustrés sur les figures IV.12 et IV.13.



(a)

Mailles symétriques



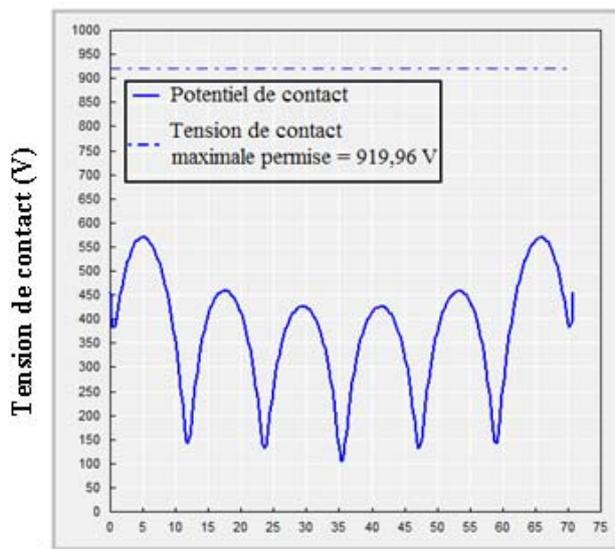
(b)

Mailles asymétriques

Figure IV.11 : Configurations des grilles (50 m x 50 m) avec différents espacements entre conducteurs.

Formes des mailles	Symétrique	Asymétrique
Evaluation de potentiel (V)	1540,87	1631,26
Résistance de la grille (Ω)	1,59	1,69
Tension maximale de pas (V)	62,49	72,04
Tension maximale de contact (V)	569,57	750,77

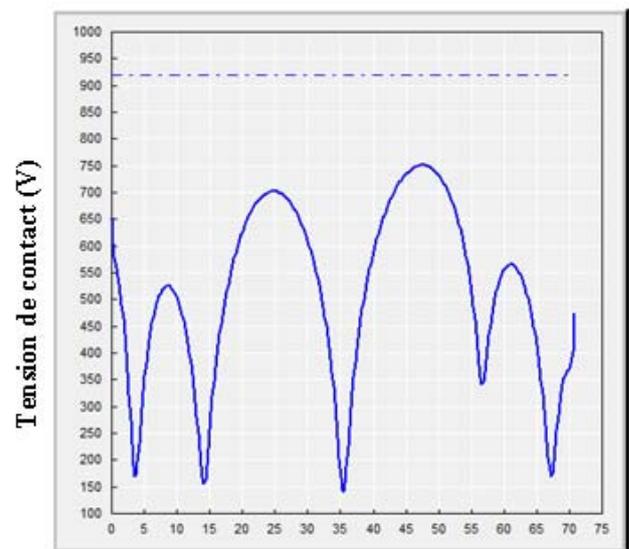
Tableau IV.6 : Influence de l'espacement entre conducteurs sur les paramètres principaux de simulation.



Longueur (m)

(a)

Mailles symétriques



Longueur (m)

(b)

Mailles asymétriques

Figure IV.12 : Potentiel de contact obtenu le long de la diagonale principale des grilles.

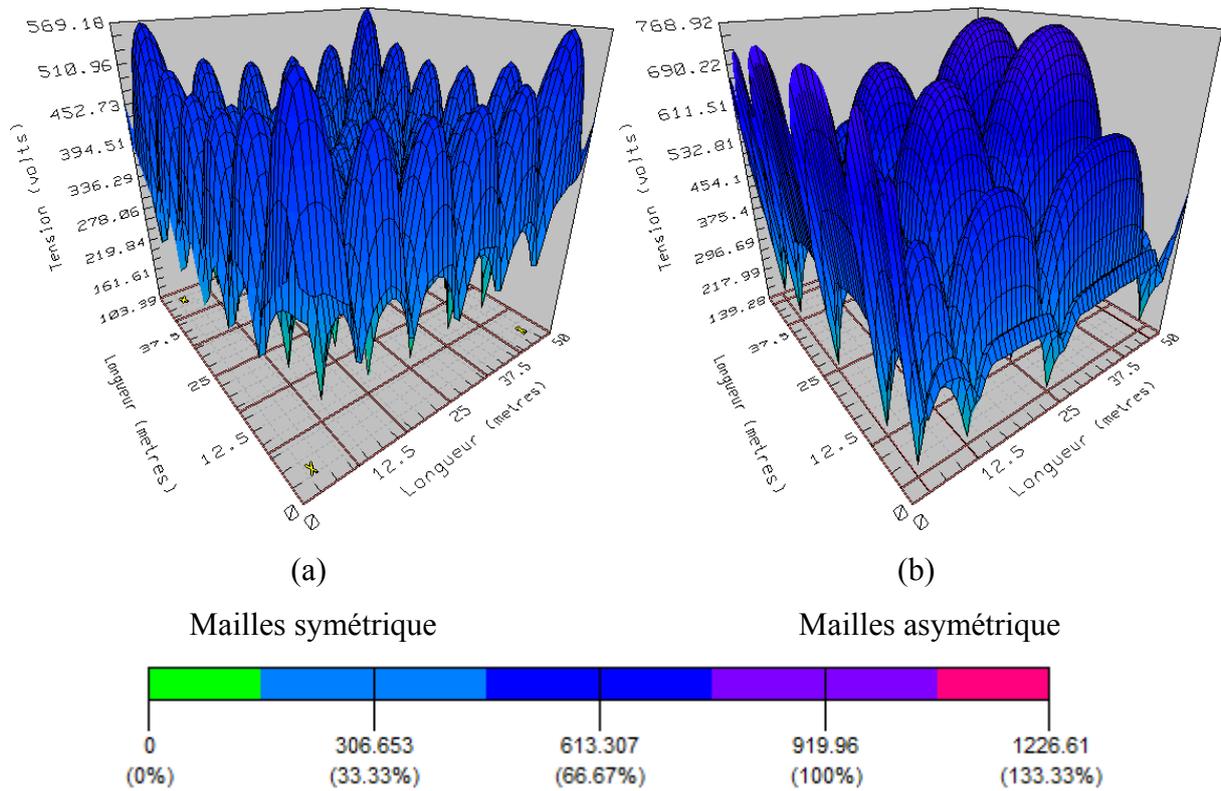


Figure IV.13 : Diagrammes de contour du potentiel de contact en 3D.

Nous avons abouti à des résultats de simulation qui nous indiquent que :

- la forme symétrique est meilleure que celle asymétrique ;
- les tensions de pas et de contact sont plus faible dans les mailles de petite surface ;
- la forme rectangulaire des mailles réduit les tensions de pas et de contact.

IV.2.2. Influence des piquets cas d'une grille carrée

IV.2.2.1. Influence du nombre de piquets

Dans ces configurations, nous rajoutons des piquets à la grille carrée de 16 mailles présentée auparavant. Ces piquets (10,9 m de longueur et 12,7 mm de diamètre) sont perpendiculaires aux conducteurs de la grille. Plusieurs configurations ont été considérées : grille sans piquets, grilles avec 5, 9 et 25 piquets (Figure IV.14). La profondeur (0,5 m) du piquet peut être décrite comme étant la distance entre la surface du sol et la pointe des piquets.

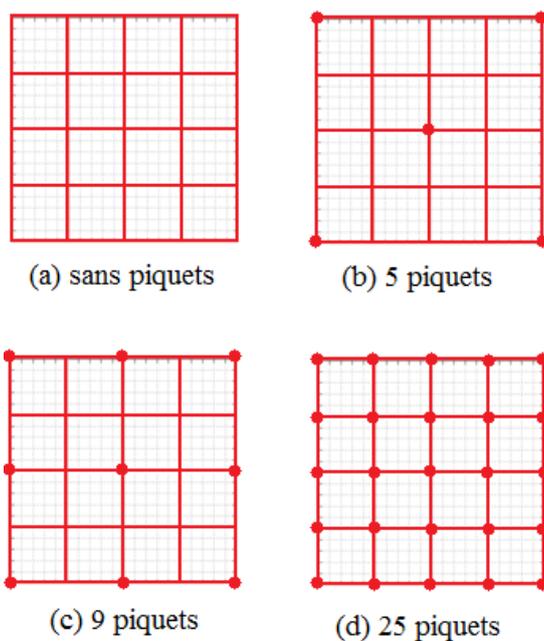


Figure IV.14 : Configurations des grilles.

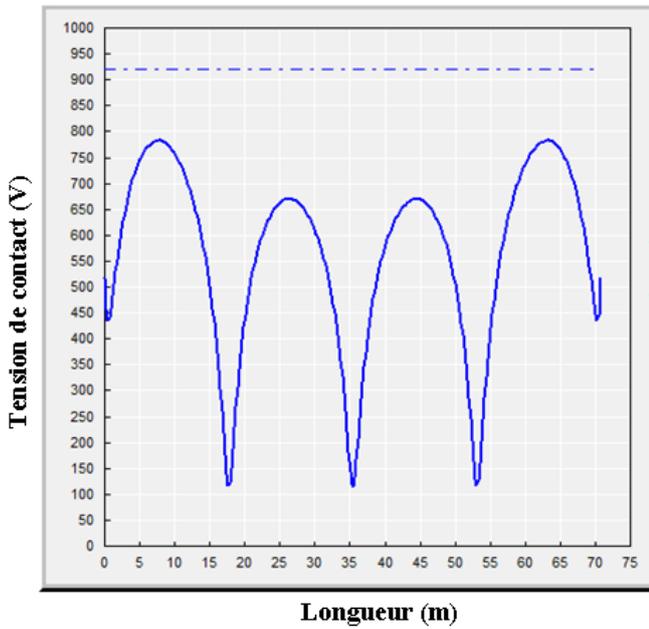
Après l'analyse de la grille, nous obtenons les résultats présentés dans le tableau IV.7.

Nombre de piquets	0	5	9	25
Elévation du potentiel de terre (V)	1688,07	1412,73	1287,08	1045,98
Résistance de la grille (Ω)	1,75	1,45	1,31	1,06
Tension de pas maximale (V)	71,28	37,33	32,63	23,13
Tension de contact maximale (V)	782,95	578,71	497,33	313,65

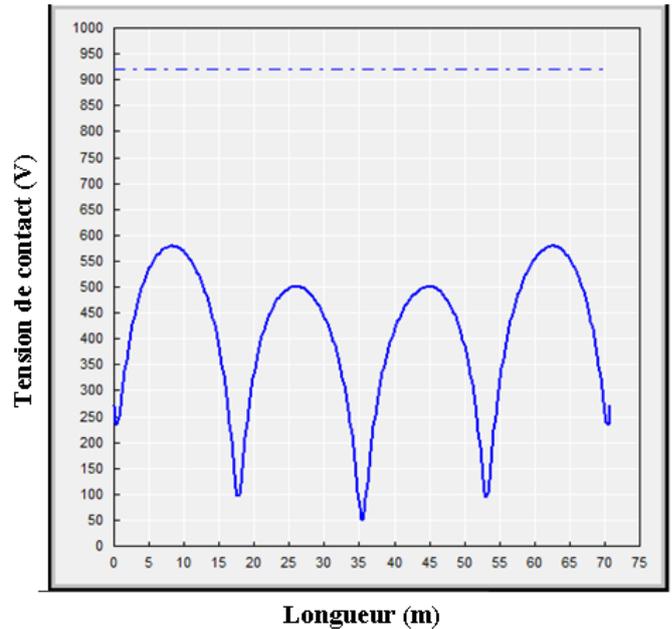
Tableau IV.7 : Analyse de la grille pour différents nombres de piquets rajoutés.

Le rajout des piquets à une grille engendre une diminution sur tous les principaux paramètres simulés, au fur à mesure que le nombre de piquets augmente.

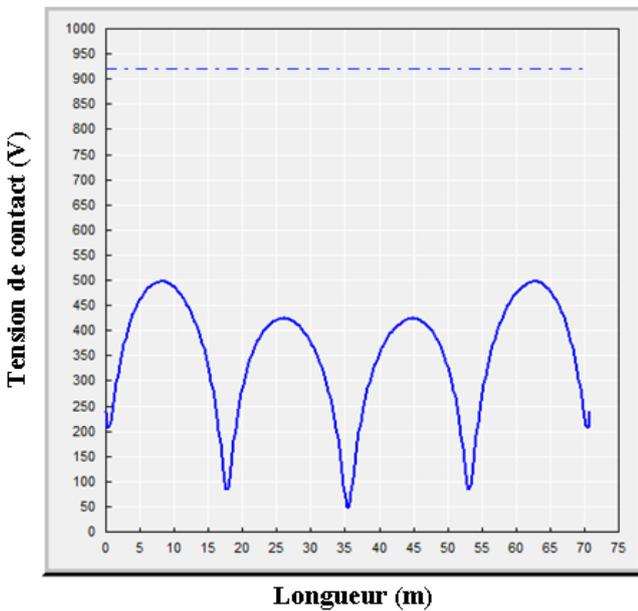
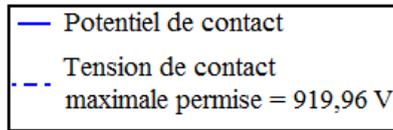
Afin d'évaluer les aires dangereuses, les diagrammes du profil de potentiel de contact partant de la diagonale principale de la grille (du coin inférieur gauche vers le coin supérieur droit) (Figure IV.15), et les diagrammes de contour du potentiel de contact en 3D (Figure IV.16), ont été déterminés, pour différents nombres de piquets rajoutés.



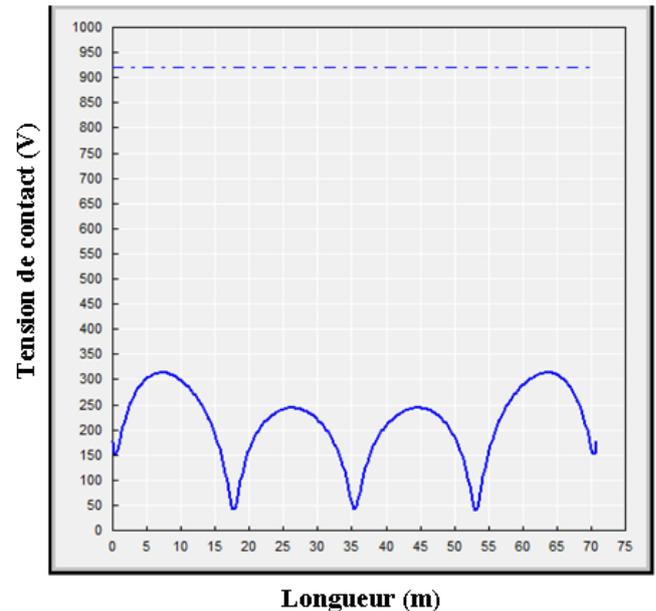
(a) sans piquets



(b) 5 piquets



(c) 9 piquets



(d) 25 piquets

Figure IV.15 : Potentiel de contact obtenu le long de la diagonale principale de la grille.

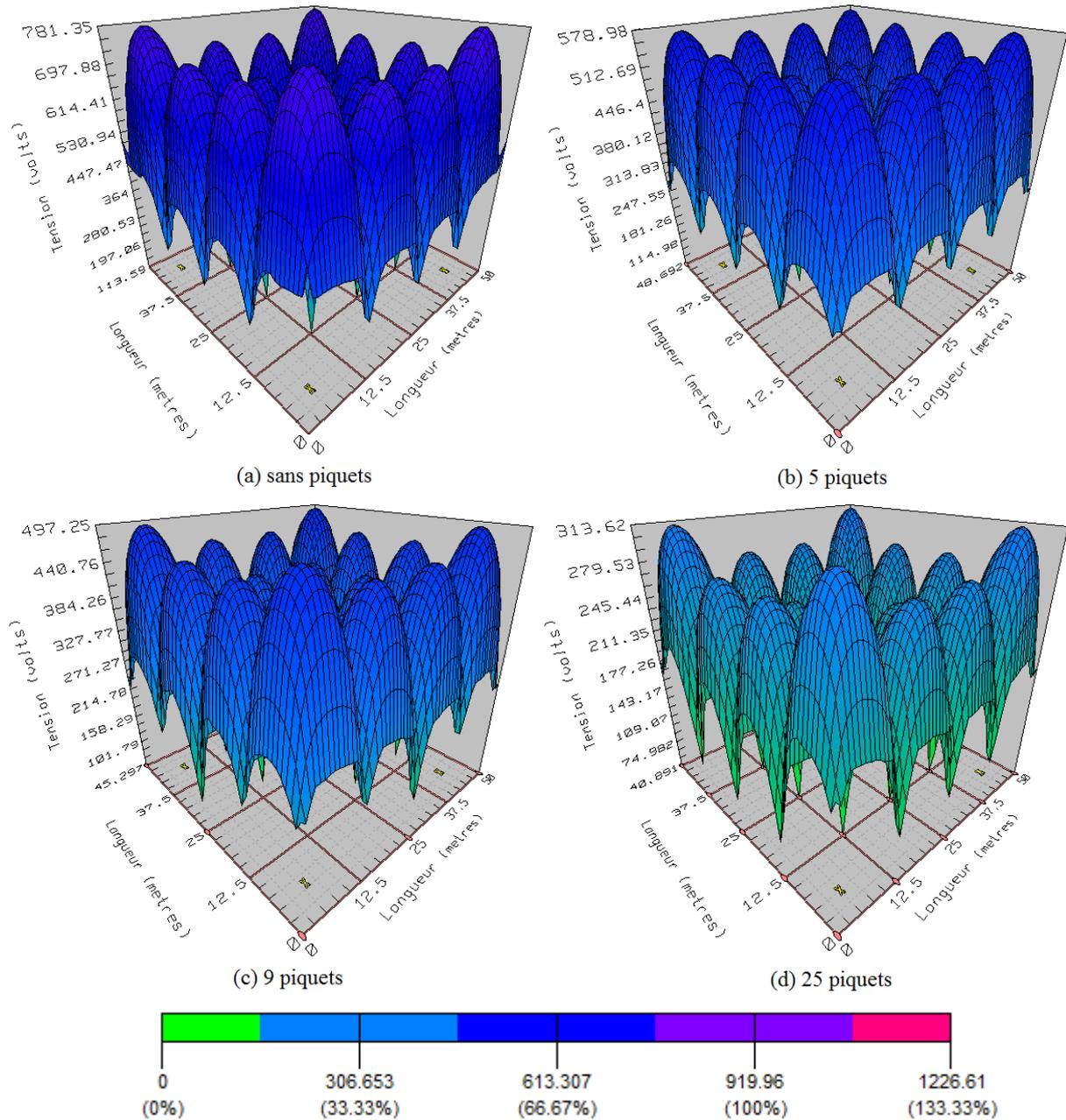


Figure IV.16 : Diagrammes de contour du potentiel de contact en 3D.

Le fait de rajouter plus de piquets à notre grille carrée, les résultats de simulation ont été améliorés (Figures IV.15 et IV.16).

IV.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 allons effectuer une simulation pour différentes longueurs des piquets, dans le cas d'une grille carrée de 225 mailles ayant 36 piquets (Figure IV.17).

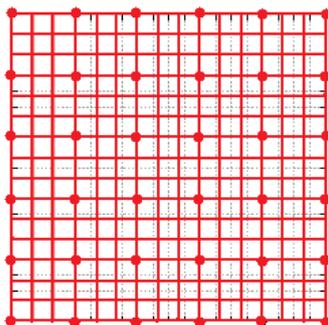


Figure IV.17 : Grille carrée (50 m x 50 m) de 225 mailles avec 36 piquets.

Le tableau IV.8 et les figures IV.18 à IV.21 présentent les variations de l'élévation de potentiel, la résistance de la grille et les tensions de pas et de contact maximales de la grille en fonction de la longueur des piquets.

Longueur des piquets (m)	Elévation du potentiel de terre (V)	Résistance de la grille (Ω)	Tension de pas maximale (V)	Tension de contact maximale (V)
1	1355,68	1,39	44,34	315,79
2	1343,62	1,37	41,35	290,75
3	1327,68	1,36	38,97	274,17
4	1308,21	1,34	36,79	262,36
5	1285,21	1,31	34,68	253,91
6	1216,68	1,24	31,25	232,57
7	1131,91	1,15	27,71	205,73
8	1067,82	1,08	24,98	185,50
9	1015,68	1,03	22,77	169,36
10	971,879	0,98	20,95	156,15

Tableau IV.8 : Analyse de la grille pour différentes longueurs de piquets.

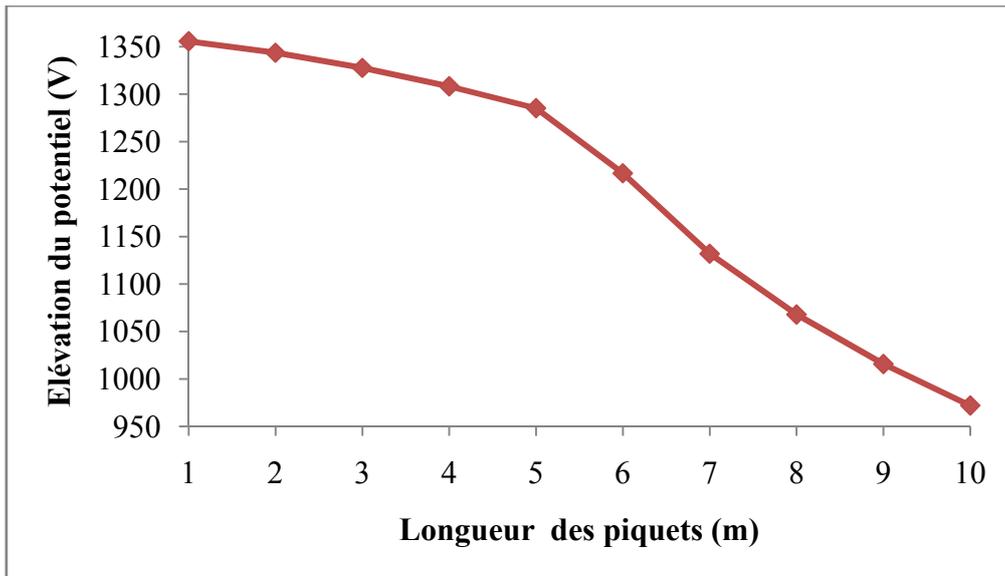


Figure IV.18 : Elévation de potentiel en fonction de la longueur des piquets.

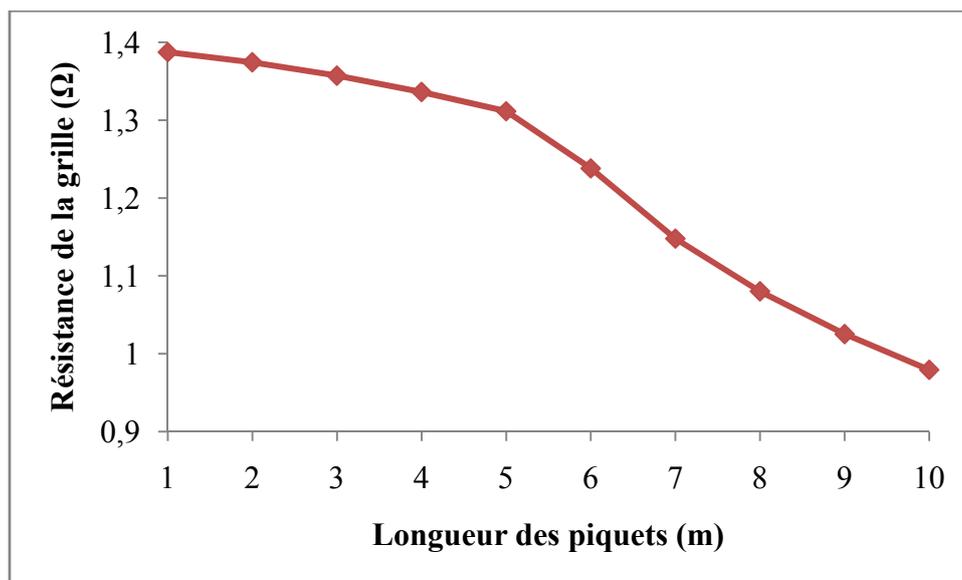


Figure IV.19 : Variation de la résistance de la grille en fonction de la longueur des piquets.

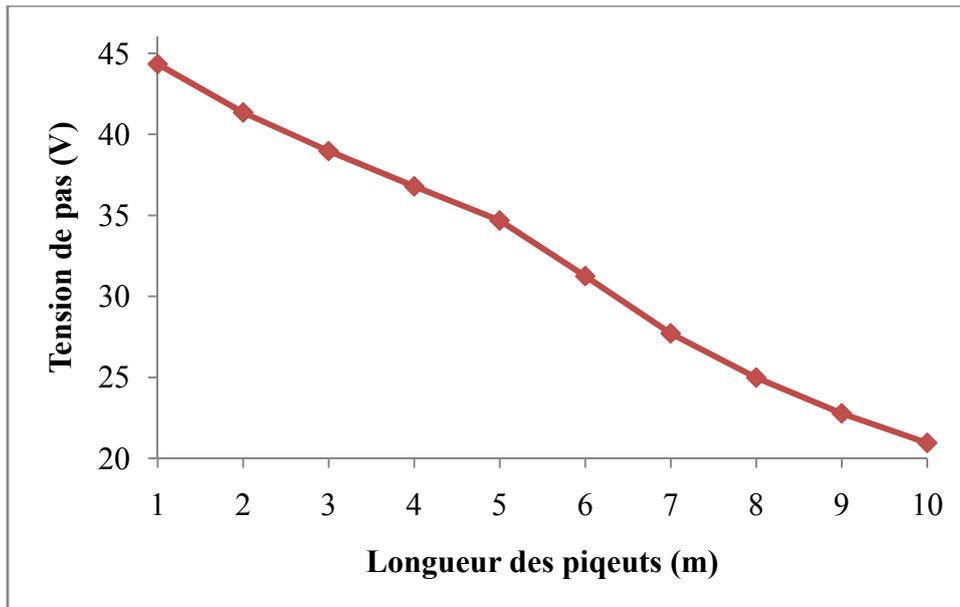


Figure IV.20 : Variation de la tension de pas maximale en fonction de la longueur des piquets.

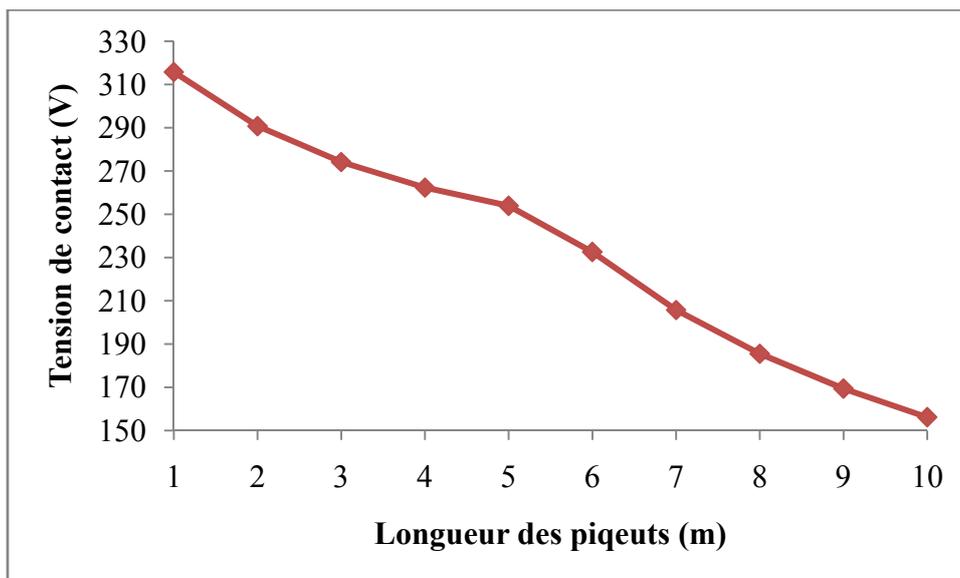


Figure IV.21 : Variation de la tension de contact maximale en fonction de la longueur des piquets.

L'augmentation de la longueur des piquets provoque une diminution de l'élévation du potentiel de terre, les tensions de contact et de pas ainsi que la résistance du système de mise à la terre. Nous remarquons aussi, que cette augmentions de 1 m à 10 m a fait chuter les tensions de pas et de contact maximales ainsi que la résistance de la grille de moitié, et l'élévation de potentiel d'un tiers.

Chapitre IV : Caractéristiques des grilles de terre utilisant CYMGRD

Le potentiel de contact obtenu le long de la diagonale principale de la grille et les diagrammes de contour du potentiel de contact en 3D, sont illustrés sur les figures IV.22 et IV.23 :

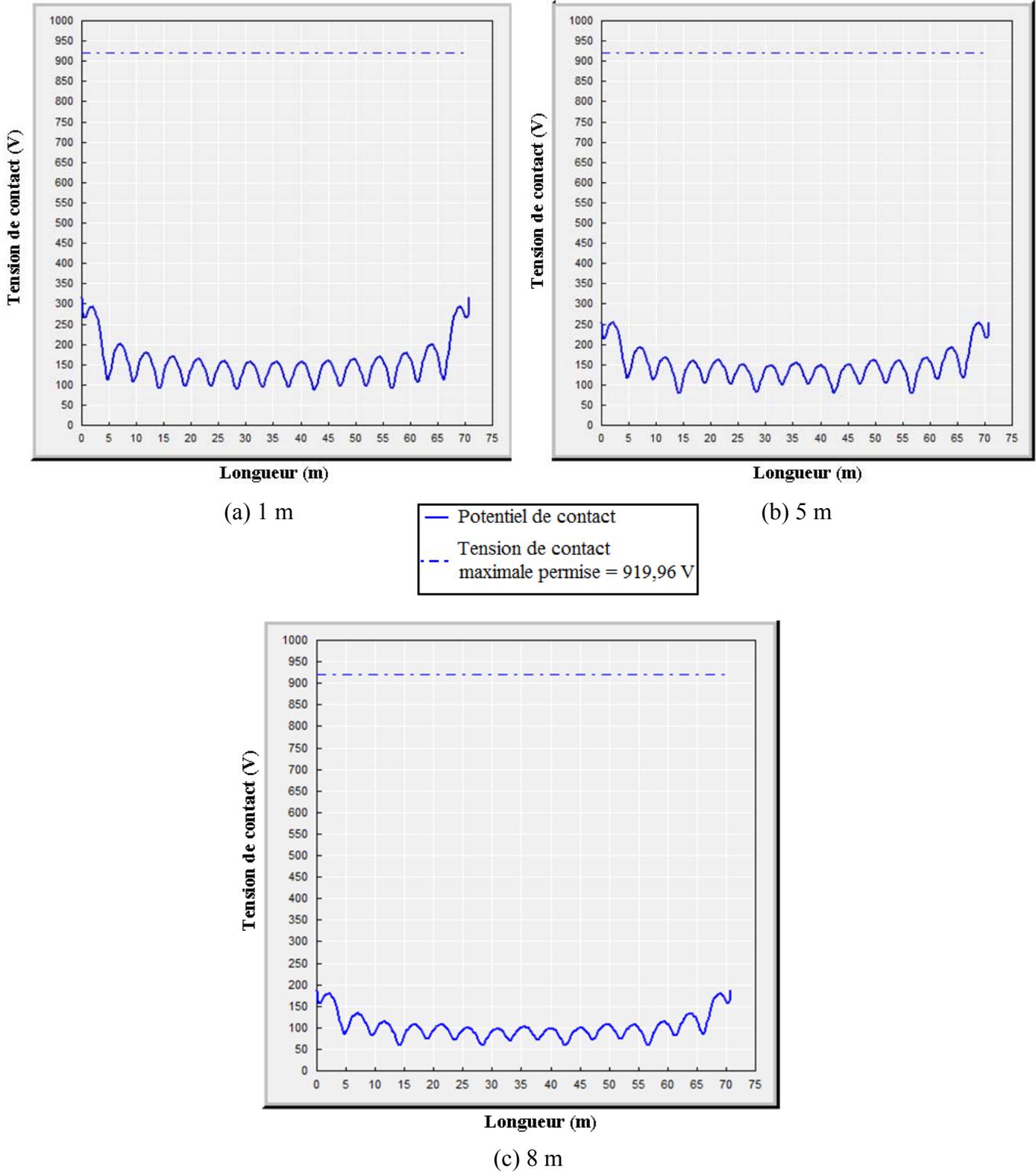


Figure IV.22 : Potentiel de contact obtenu le long de la diagonale principale de la grille.

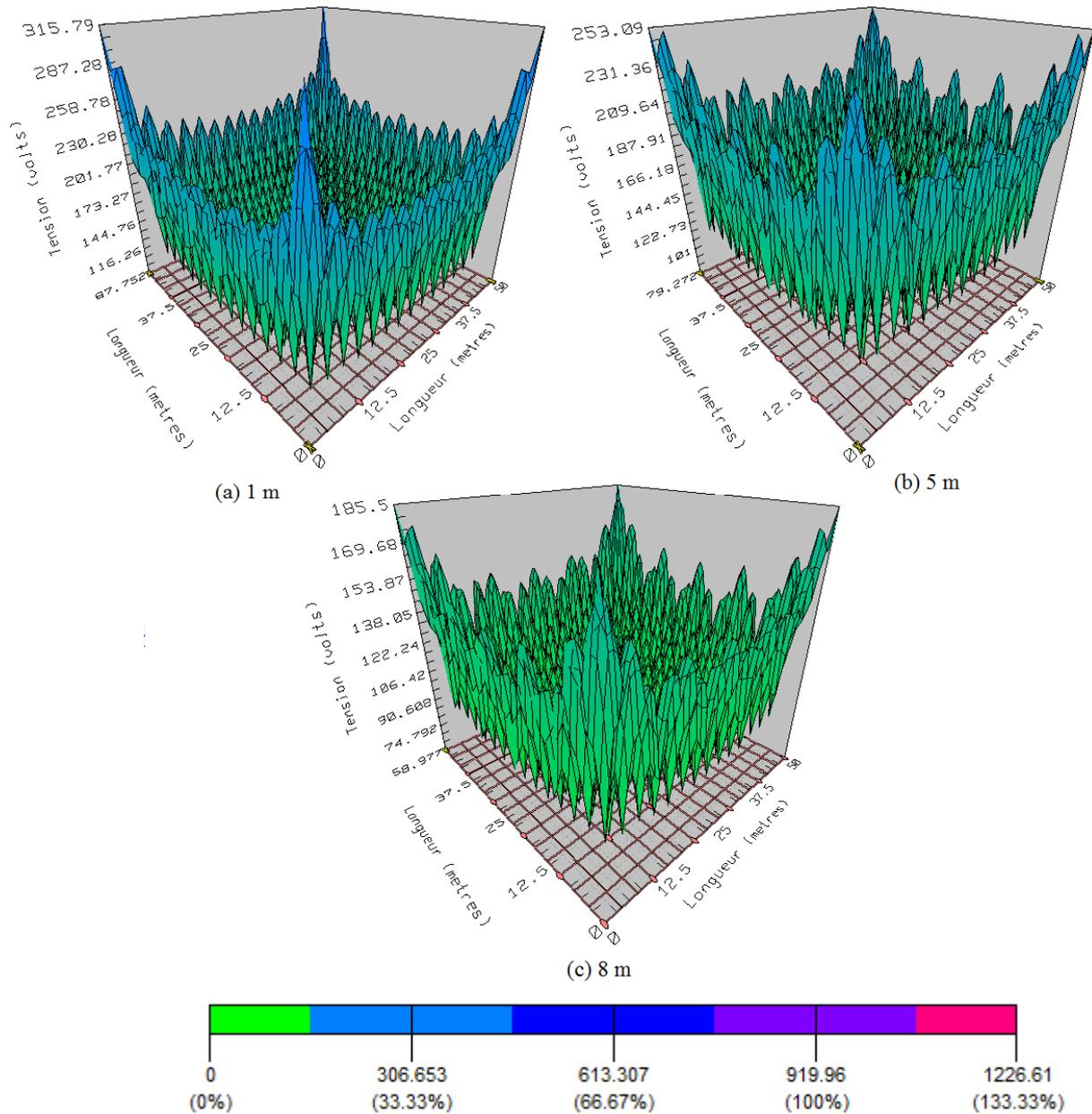


Figure IV.23 : Diagrammes de contour du potentiel de contact en 3D.

Ces deux figures (IV.23 et IV.23) nous montrent que l'augmentation de la longueur nous éloigne du risque de choc électrique.

IV.2.2.3. Influence de l'emplacement des piquets

Nous traitons le cas d'une grille carrée à 4 mailles (Figure IV.24), avec un seul piquet rajouté à des endroits différents de la grille.

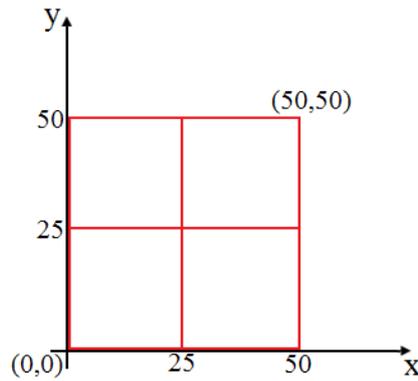


Figure IV.24 : Endroits du piquet, selon x et y, dans une configuration d'une grille carrée à 4 mailles.

Le tableau IV.9 illustre les résultats des principaux paramètres de simulation trouvés pour différents endroits du piquet rajouté à la grille carrée à 4 mailles.

(x,y)	(0,0)	(50,0)	(0,50)	(50,50)	(25,50)	(25,0)	(0,25)	(50,25)	(25,25)
EPI (V)	1940,49	1940,49	1940,49	1940,49	1958,43	1958,43	1958,60	1958,60	1975,42
Rg (Ω)	2,035	2,035	2,035	2,035	2,055	2,055	2,055	2,055	2,074
V _{pas} (V)	86,88	86,55	86,56	70,85	86,56	87,62	87,63	86,52	88,10
V _{contact} (V)	1231,89	1226,35	1226,34	1231,85	1240,66	1240,67	1240,79	1240,78	1233,3

Tableau IV.9 : Résultats d'analyse pour différents emplacements du piquet.

D'après ce tableau, l'emplacement des piquets, sur les extrémités, rajoutés à la grille carrée à 4 mailles, améliore légèrement les résultats de simulation.

Au vu de cette légère amélioration, nous avons jugé inutile de présenter le diagramme et le potentiel de contact.

IV.2.3. Influence de la profondeur d'enfouissement sur une grille carrée

Dans cette partie, nous proposons d'étudier une grille carrée de 16 mailles sans piquets, présenté au paragraphe § IV.2, enterrée à différentes profondeurs dans le sol, comprises entre 0,5 et 3 m. Nous avons obtenu dans ces conditions, les résultats présentés dans le tableau IV.10 et sur les figures IV.25 à IV.28.

Profondeur (m)	EPI (V)	Rg (Ω)	Vpas (V)	Vcontact (V)
0,5	1688,07	1,75144	177,08	782,955
0,7	1652,8	1,71235	136,42	751,225
0,8	1638,13	1,69611	121,07	738,808
1	1612,46	1,66777	97,62	718,645
1,3	1579,95	1,63194	77,79	696,078
1,4	1570,18	1,6212	78,82	690,104
1,6	1551,81	1,60101	80,82	679,738
1,8	1534,64	1,58218	81,33	671,863
1,9	1526,42	1,57316	80,71	677,995
2	1518,39	1,56437	79,01	683,658
2,3	1495,29	1,53911	75,29	698,578
2,5	1480,53	1,52299	72,3	706,998
2,6	1473,3	1,5151	70,71	711,166
2,8	1459,19	1,49972	67,52	718,197
3	1445,22	1,48452	64,32	724,243

Tableau IV.10 : Analyse de la grille pour différentes profondeurs d'enfouissement.

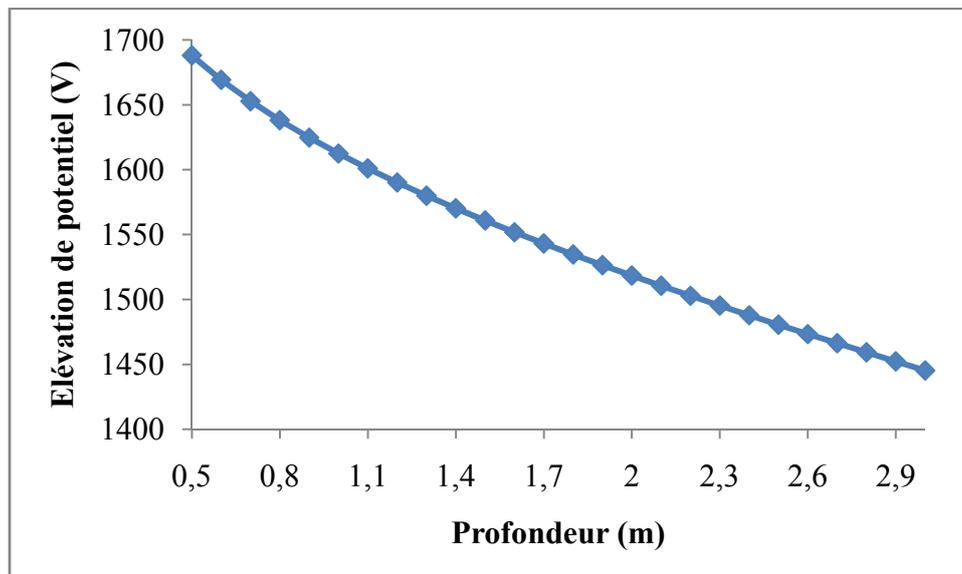


Figure IV.25 : Elévation de potentiel en fonction de la profondeur d'enfouissement.

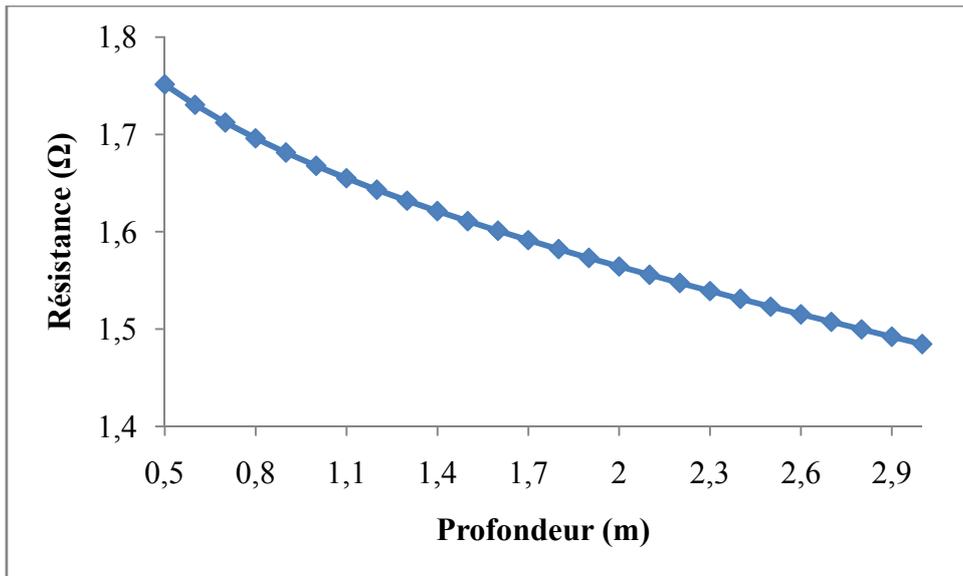


Figure IV.26 : Variation de la résistance de la grille en fonction de la profondeur d'enfouissement.

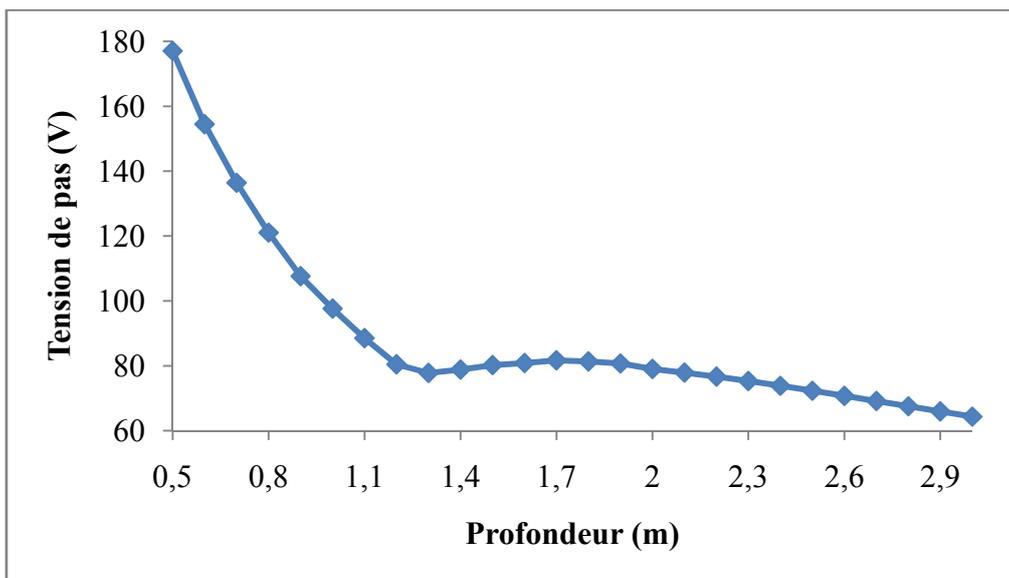


Figure IV.27 : Variation de la tension de pas maximale en fonction de la profondeur d'enfouissement.

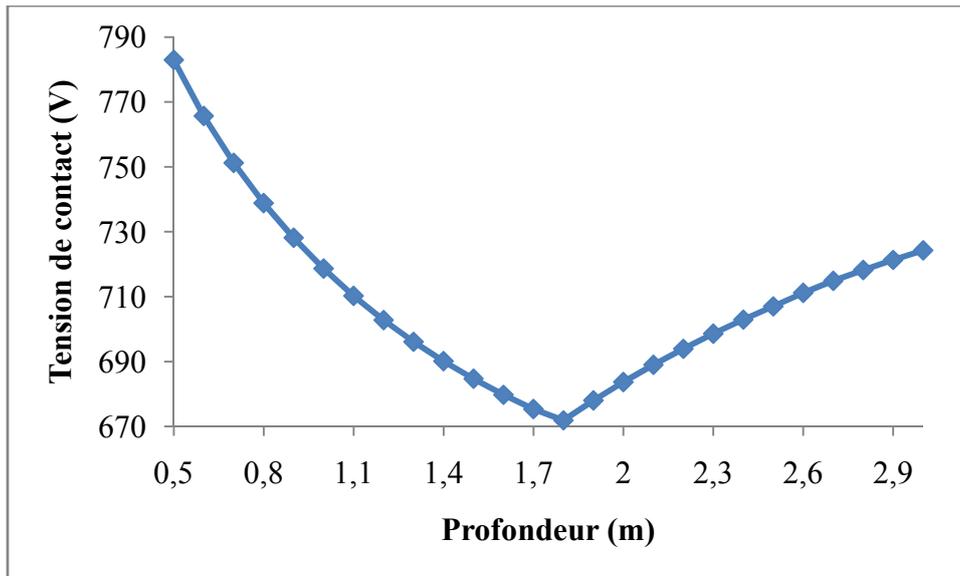


Figure IV.28 : Variation de la tension de contact maximale en fonction de la profondeur d'enfouissement.

Le tableau IV.10 ainsi que les caractéristiques représentées sur les figures IV.25 à IV.28 indiquent que l'augmentation de la profondeur de la grille provoque une diminution de l'élévation du potentiel de terre et de la résistance de la grille. En ce qui concerne la tension de pas maximale, elle diminue jusqu'à une valeur minimale pour une profondeur de 1,3 m, en suite, elle enregistre une faible augmentation, puis elle diminue à partir de la profondeur de 1,7 m (Figure IV.27). La tension de contact maximale présente une allure différente à celles des autres paramètres cités précédemment. Elle atteint un minimum à une profondeur de 1,8 m, ensuite elle augmente. La figure IV.28 illustre bien cette variation.

IV.2.4. Influence de la forme de la grille

L'influence de la forme géométrique de la grille a été examinée. Pour cela, deux formes (carrée et rectangulaire), de même surface et de même longueur des conducteurs, ont été considérées (Figures IV.29 et IV.30). Les résultats de simulation sont donnés dans le tableau IV.11. Les caractéristiques de potentiel de contact obtenu le long de la diagonale principale des grilles et les diagrammes de contour de potentiel de contact en 3D, sont illustrés sur les figures IV.31 à IV.34.

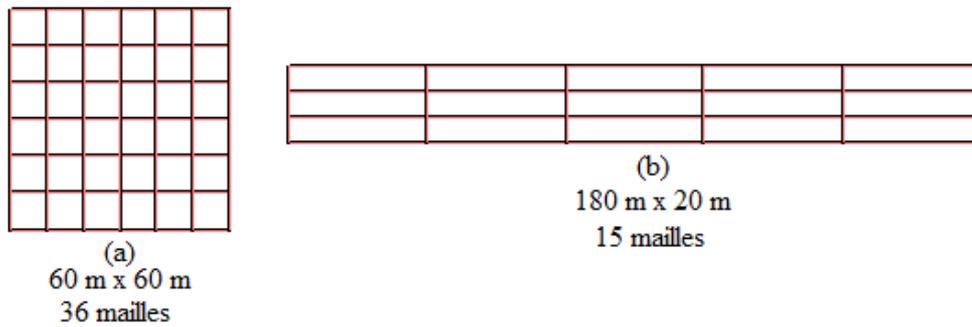


Figure IV.29 : Configurations des grilles de mêmes surface (3600 m^2) et longueur des conducteurs (840 m).

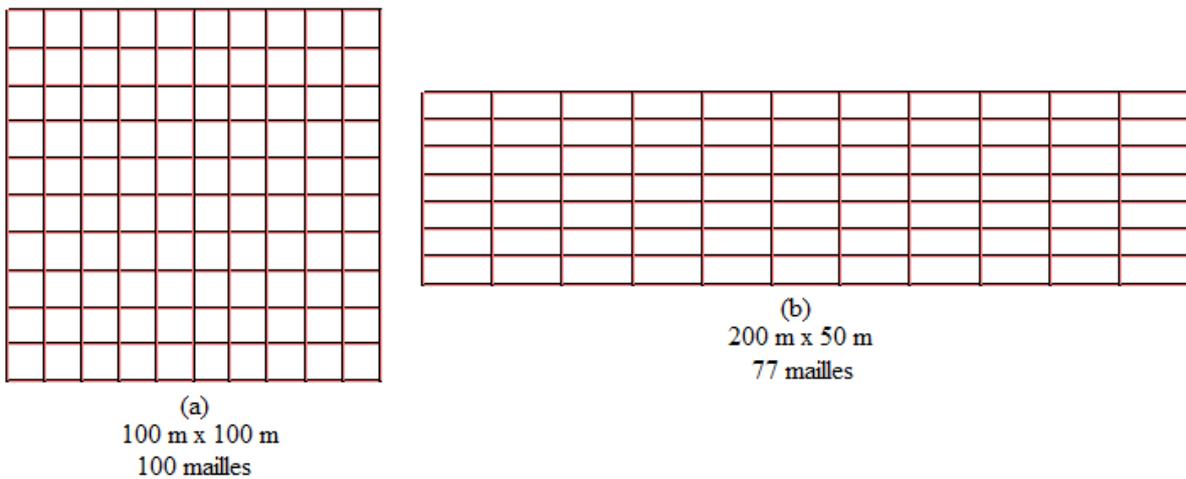


Figure IV.30 : Configurations des grilles de mêmes surface (10000 m^2) et longueur des conducteurs (2200 m).

Surface (m^2)	Longueur totale des conducteurs (m)	Forme (m x m)	EPI (V)	Rg (Ω)	V _{pas} (V)	V _{contact} (V)
3600	840	60 x 60	1275,64	1,30	55,88	500,88
		180 x 20	1066,27	1,08	36,64	387,48
10000	2200	100 x 100	676,09	0,67	25,89	236,92
		200 x 50	623,85	0,62	21,93	201,70

Tableau IV.11 : Influence de la forme des grilles de mêmes surface et longueur des conducteurs sur les résultats de simulation.

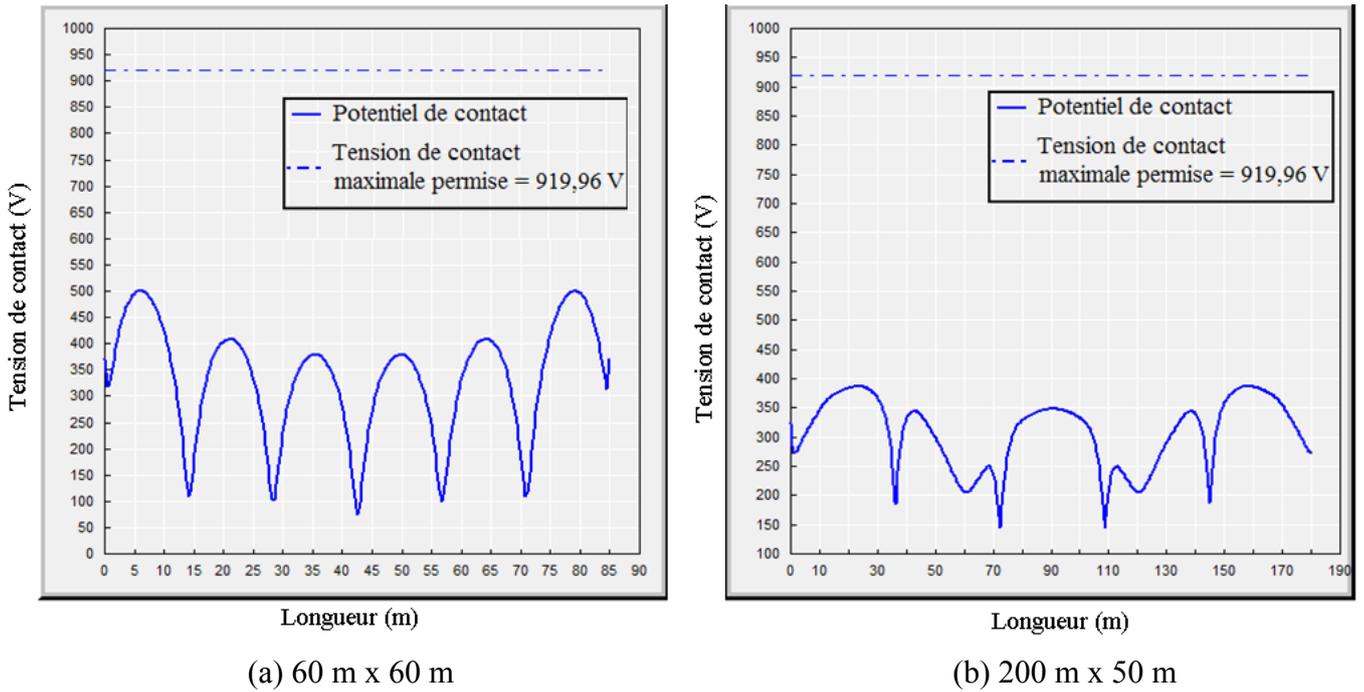


Figure IV.31 : Potentiel de contact obtenu le long de la diagonale principale des grilles de mêmes surface (3600 m^2) et longueur des conducteurs (840 m).

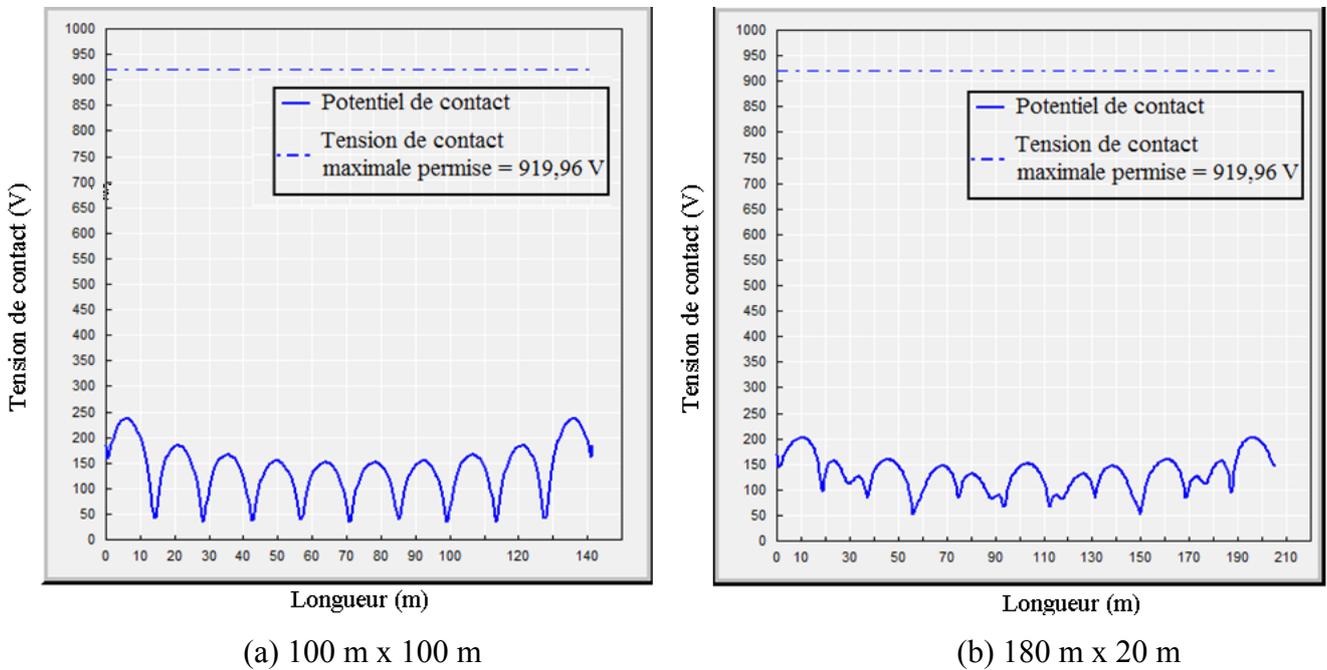


Figure IV.32 : Potentiel de contact obtenu le long de la diagonale principale des grilles de mêmes surface (10000 m^2) et longueur des conducteurs (2200 m).

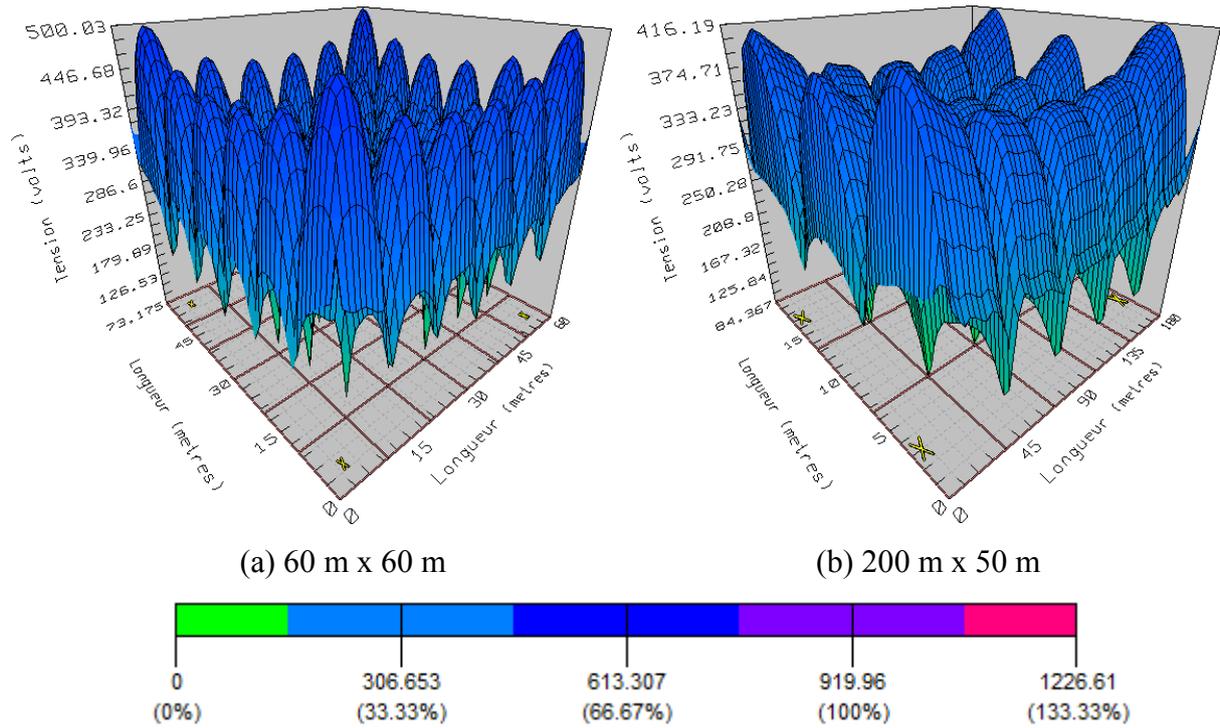


Figure IV.33 : Diagramme de contour de potentiel de contact en 3D des grilles de mêmes surface (3600 m²) et longueur des conducteurs (840 m).

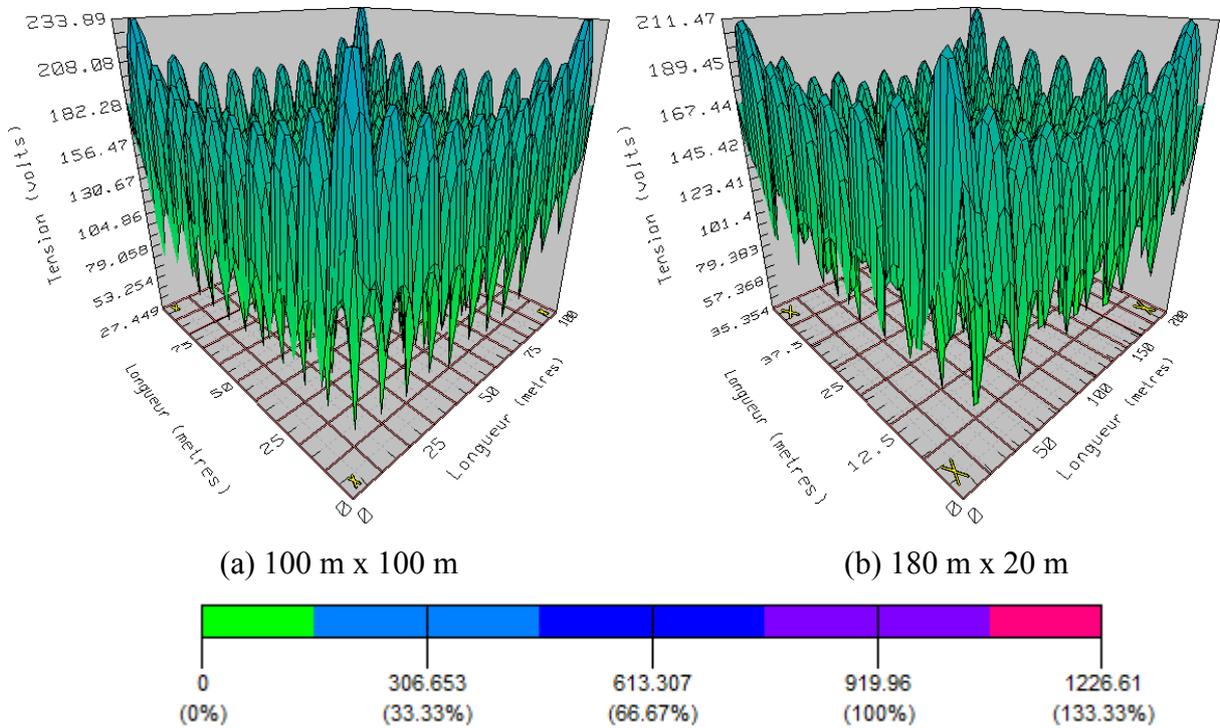


Figure IV.34 : Diagramme de contour de potentiel de contact en 3D des grilles de mêmes surface (10000 m²) et longueur des conducteurs (2200 m).

L'influence de la forme de la grille, joue un rôle très important lors de la conception des systèmes de mise à la terre. Les résultats obtenus nous indiquent que la forme rectangulaire est plus recommandée que celle carrée de mêmes surface et longueur des conducteurs.

IV.3. Conclusion

Il ressort de cette étude les principales conclusions suivantes :

- L'augmentation du nombre de mailles (à condition que ce nombre soit inférieur à une limite estimée dans notre étude à 200 mailles) entraîne une diminution de l'élévation de potentiel, de la résistance de la grille et des tensions maximales de contact et de pas.
- Le rajout des piquets engendre une décroissance des caractéristiques électriques susmentionnées de la grille.
- La profondeur doit être comprise entre 0,5 m et 2 m. Au-delà de cette dernière valeur, la tension de contact augmente.
- La forme rectangulaire pour des systèmes de mise à la terre est recommandée que celle carrée de mêmes superficie et longueur des conducteurs.

CHAPITRE V

MODELISATION D'UNE ELECTRODE
HEMISPHERIQUE BASEE SUR FEMM ET PSPICE

V.1. Introduction

Le régime transitoire de foudre nécessite une évaluation des composants des systèmes électriques. Néanmoins, un compromis entre la simplicité et la précision est généralement accepté dans certaines applications, la résistance est un modèle qu'est souvent utilisé, bien que [Visacro et De Conti, 2007] :

- le comportement de la résistance du système de mise à la terre devient de plus en plus non approprié à des fréquences élevées ;
- les paramètres du sol (ρ et ϵ) sont liés à la fréquence ;
- l'ionisation au sol se manifeste à des courants élevés.

Dans ce chapitre, nous proposons un circuit RC équivalent, pour représenter la configuration de mise à la terre de forme hémisphérique (Figure II.1 du chapitre II). Ce modèle proposé est destiné à être facile à mettre en œuvre que les modèles de terre rigoureux disponibles dans la littérature, mais suffisamment précis pour fournir des résultats raisonnables dans certaines limites. Il est également destiné à être une meilleure alternative pour l'étude des surtensions de foudre que le modèle d'une résistance simple.

V.2. Simulation par la méthode des éléments finis dans le domaine fréquentiel

V.2.1. Méthodes des éléments finis

La méthode des éléments finis, outil numérique très puissant, est très utilisée dans la résolution des problèmes à domaine spatial fini. Le principe de cette méthode consiste à diviser le domaine d'étude en plusieurs éléments finis. C'est une étape très importante puisque le choix de la forme d'élément de maillage est primordial dans la précision des résultats obtenus [Teguar et M'hamdi, 2010].

Il existe un grand nombre de formes géométriques pour les éléments de maillage tels que :

- des triangles, des rectangles, des quadrilatéraux arbitraires pour les problèmes à deux dimensions ;
- des tétraèdres, hexaèdres et des prismes pour des problèmes à trois dimensions [Teguar et M'hamdi, 2010].

C'est une méthode flexible, car elle s'adapte facilement aux différentes géométries et tient compte aussi des propriétés inhomogènes et non linéaires des matériaux.

Dans le calcul du champ électrique présentant un domaine spatial infini, l'établissement de la frontière artificielle peut causer certaines difficultés dans la réalisation d'un programme simple. D'une part, celle-ci doit être beaucoup plus vaste que le domaine d'étude, ce qui engendre un temps de calcul (en ce qui concerne le maillage) beaucoup plus important que pour des domaines finis. D'autre part, le choix de cette frontière a une grande importance dans la précision des calculs, et son influence sur celle-ci doit être prise en compte dans tout programme de ce type [Tounsi et Chikh, 2008].

Dans le calcul de la capacité d'un système, Andersen [Tounsi et Chikh, 2008] utilise une méthode hybride utilisant à la fois les éléments finis et les réseaux de capacités et de résistances. Cet auteur part des deux constatations suivantes :

- la minimisation de l'énergie électrostatique conduit à une relation linéaire entre la valeur du potentiel V_0 d'un nœud donné et celles des autres nœuds qui l'entourent :

$$V_0 = \sum_{i=1}^n V_i \quad (\text{V.1})$$

Si, on remplace l'élément de maillage triangulaire (Figure V.1.a) par un réseau de capacités (Figure V.1.b) et si, on utilise la loi de Kirchhoff (la somme algébrique des intensités des courants qui passent par un nœud est nulle), on obtient une autre relation linéaire liant la valeur du potentiel au nœud O et celles de ces voisins immédiats

$$j\omega \sum_{n=1}^6 (V_n - V_0) C_n = 0 \quad (\text{V.2})$$

où C_n , est la capacité qui lie le nœud O au nœud n. Ce qui donne par identification :

$$C_n = k_n \sum_{n=1}^6 C_i \quad (\text{V.3})$$

Pour trouver la somme des capacités, on met un potentiel fictif de 1 V au nœud O et 0 V aux nœuds voisins. En calculant l'énergie emmagasinée dans les six triangles (d'épaisseur unité pour les géométries planes et sur un angle de 1 radian pour les géométries axisymétriques) et en l'égalisant avec la somme d'énergie emmagasinée dans les six capacités, on obtient la somme des six capacités. L'utilisation de l'équation (V.3) donne la valeur de chaque capacité [Tounsi et Chikh, 2008].

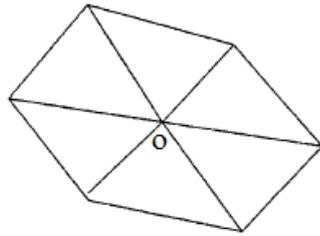


Figure V.1.a : Maillage utilisé.

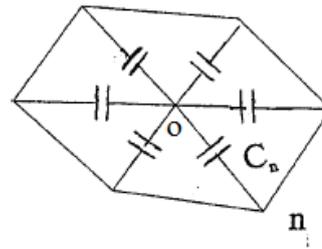


Figure V.1.b : Réseau de capacités.

Dans notre étude, nous utilisons le logiciel FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics), pour calculer l'impédance de l'électrode hémisphérique et montrer son comportement dans les hautes fréquences.

V.2.2. Fonctionnalités générales du FEMM (Finite Element Method Magnetics)

FEMM est un logiciel éléments finis 2D cartésien et 2D axisymétrique dédié à la résolution de problèmes électromagnétiques. Il est constitué de trois modules principaux [Meeker, 2009] :

- Un module "Pré-processeur et Post-processeur". Ce module permet, à travers d'une interface graphique, la saisie de la géométrie et la définition du problème en vue de sa résolution par la méthode des éléments finis. La saisie de la géométrie peut se faire avec la définition de points clefs que l'on relie pour former des régions ou par l'importation de structures AUTOCAD au format DXF. Ce module intègre également des outils de post-traitement : visualisation et différents calculs inhérents au problème (inductance, flux, pertes Joule, etc.)
- Un module de maillage (Logiciel Triangle) qui permet d'obtenir une triangulation de chaque région du domaine de calcul.
- Un module de résolution par éléments finis : ce solveur 2D cartésien et axisymétrique permet de résoudre des problèmes d'électrostatique linéaires, de magnétostatique linéaires et non linéaires, de magnétodynamique en régime harmonique linéaires et non linéaires, et de thermique en stationnaire.

Pour valider les résultats trouvés en utilisant FEMM 4.2, nous les comparons à ceux obtenus en utilisant l'expression (II.3). On considère une électrode hémisphérique en cuivre, de 0,5 m de diamètre. Le domaine choisi pour la simulation est illustré sur la figure V.2 :

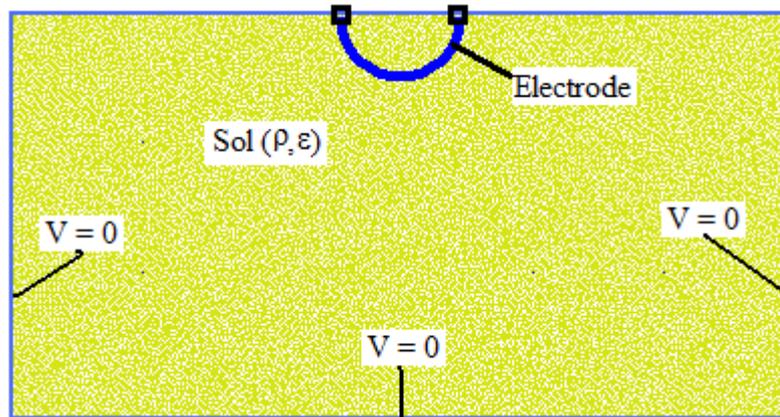


Figure V.2 : Domaine choisi pour la simulation des EF.

Dans notre calcul de la résistance par la méthode des éléments finis avec FEMM, on utilise la relation (II.10) obtenue au chapitre II, et on remplace ρ dans la relation (II.3) on obtient alors :

$$R_h = \left(\frac{E}{J}\right) / 2\pi r_h \quad (\text{V.4})$$

On a considéré le sol homogène alors $\frac{\vec{E}}{J} = \frac{E}{J}$.

E : champ électrique en (V/m) ;

J : densité du courant en (A/m^2) ;

r_h : rayon de l'hémisphère ;

R_h : résistance hémisphérique.

Dans le tableau V.1, nous présentons, pour des résistivités allant de 100 à 2000 Ωm , les résistances obtenues analytiquement par l'équation II.3 et numériquement en utilisant le FEMM 4.2.

ρ (Ωm)	100	200	350	1000	1500	2000
R_h (Ω) par la relation (II.3)	63,66	127,32	222,81	636,62	954,93	1273,24
R_h (Ω) par FEMM	63,7	127,32	222,82	636,62	954,93	1273,24

Tableau V.1 : Résistance analytique et numérique le FEMM.

Le tableau V.1 montre qu'on trouve les mêmes résultats pour les deux méthodes analytique et numérique. Cependant, la méthode analytique n'est valable que pour les basses fréquences, car au delà d'une certaine fréquence (Nommé fréquence de coupure qui dépend de ρ), la résistance de terre devient dépendante de la fréquence appliquée sur l'électrode.

Afin d'évaluer l'impédance $|Z|$ de mise à la terre de la configuration illustrée par la figure II.1 du chapitre II, des simulations avec FEMM, en fonction de la fréquence, ont été effectuées en considérant différentes valeurs de la résistivité du sol (ρ), et une permittivité relative du sol (ϵ_r) égale à 30. L'impédance de mise à la terre obtenue pour la configuration hémisphérique est présentée sur les figures V.3 et V.5.

Cette impédance (en module complexe) de mise à la terre, a été calculée en se basant sur les relations suivantes :

$$\underline{Z}_{EF} = \left(\frac{E}{J}\right) / 2\pi r_h \quad (\text{V.5})$$

où :

$$\underline{E} = \underline{E}_n + \underline{E}_t \quad (\text{V.6})$$

$$\underline{J} = \underline{J}_n + \underline{J}_t \quad (\text{V.7})$$

alors :

$$\underline{E} = [\text{Re}(E_n) + \text{Re}(E_t)] + j[\text{Im}(E_n) + \text{Im}(E_t)] \quad (\text{V.8})$$

$$\underline{J} = [\text{Re}(J_n) + \text{Re}(J_t)] + j[\text{Im}(J_n) + \text{Im}(J_t)] \quad (\text{V.9})$$

la forme trigonométrique des relations (V.10) et (V.11) est la suivante :

$$\underline{E} = |E|e^{\theta_E} \quad (\text{V.10})$$

$$\underline{J} = |J|e^{\theta J} \quad (V.11)$$

on obtient ainsi :

$$\underline{Z}_{EF} = |Z|e^{\theta z} \quad (V.12)$$

$$|Z_{EF}| = \left(\frac{|E|}{|J|}\right)/2\pi r_h \quad (V.13)$$

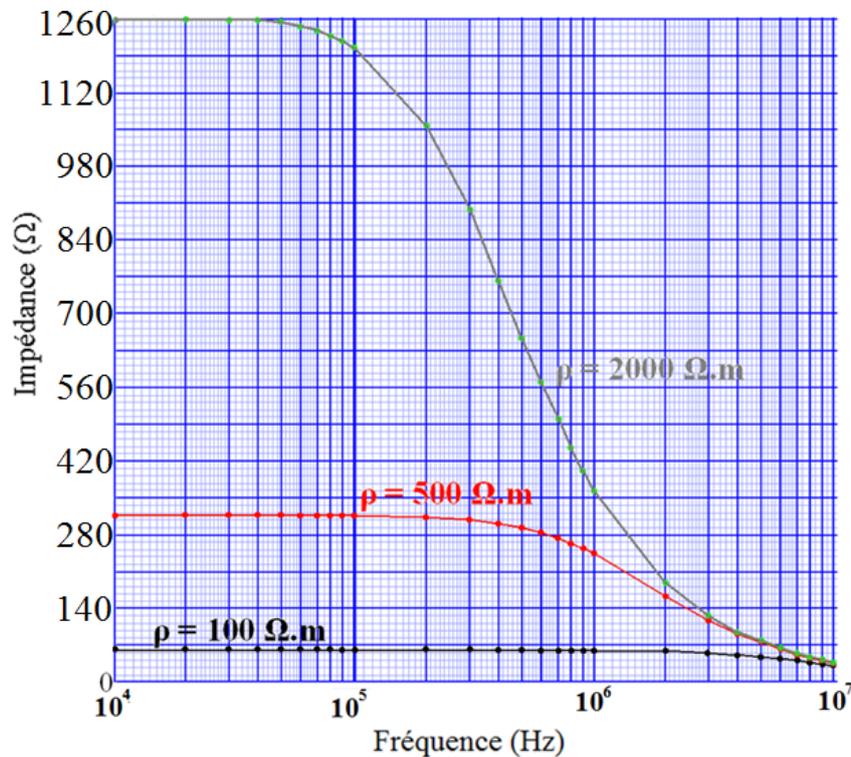
avec :

\underline{E}_n et \underline{E}_t : les composantes normale et tangentielle du champ électrique complexe \underline{E} ;

\underline{J}_n et \underline{J}_t : les composantes normale et tangentielle de la densité électrique complexe \underline{J} ;

\underline{Z}_{EF} : l'impédance complexe de la mise à la terre par la méthode des éléments finis ;

$|Z_{EF}|$: le module de l'impédance complexe de la mise à la terre.



Figures V.3 : Evolution de l'impédance de mise à la terre pour la configuration hémisphérique en fonction de la fréquence.

Pour $\rho = 500$ et $2000 \Omega.m$, l'impédance de mise à la terre est quasiment constante jusqu'à la fréquence de coupure (200 kHz pour $\rho = 500 \Omega.m$ et 50 kHz pour $\rho = 2000 \Omega.m$) qui dépend de la résistivité du sol. Au-delà de cette fréquence, les impédances diminuent considérablement. Pour des valeurs relativement basses de la résistivité du sol comme dans le

cas présenté sur la figures V.3, où $\rho = 100 \Omega\text{m}$, la fréquence de coupure est décalée vers la droite (1 MHz). Cette décroissance s'explique par le courant de déplacement dans le sol qui devient de plus en plus conducteur à des fréquences très élevées [Visacro et De Conti, 2007].

En magnétostatique, le théorème d'Ampère lie la circulation du champ magnétique sur un contour C fermé, et le courant I qui traverse toute surface S s'appuyant sur ce contour :

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \quad (\text{V.14})$$

Sous forme locale, il s'écrit en termes du vecteur densité de courant \vec{J} :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad (\text{V.15})$$

Maxwell a complété l'équation locale précédente de la façon suivante :

on introduit le courant de déplacement \vec{J}_d de Maxwell :

$$\vec{J}_d = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{V.16})$$

on a alors :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{B} = \mu_0 (\vec{J} + \vec{J}_d) \quad (\text{V.17})$$

on obtient finalement l'équation :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{V.18})$$

avec :

\vec{B} : vecteur champs d'induction ;

\vec{J} : vecteur densité de courant ;

\vec{E} : vecteur champ électrique,

μ_0 : perméabilité du vide ;

ε_0 : permittivité du vide.

Cela peut être consulté qualitativement en termes du rapport $\sigma/\omega\varepsilon$ (Figure V.4), où $\sigma = 1/\rho$, $\varepsilon = \varepsilon_r\varepsilon_0$ et $\omega = 2\pi f$. Pour les basses fréquences, $\sigma/\omega\varepsilon$ est élevé, l'effet du courant de déplacement dans le sol peut être négligé. En conséquence, le comportement de la mise à la terre est similaire à celle d'une simple résistance. Pour des faibles valeurs du rapport $\sigma/\omega\varepsilon$, le courant de déplacement de terre est aussi important que la conduction du courant de terre, dans ce cas le comportement est similaire à un circuit RC parallèle [Visacro et De Conti, 2007].

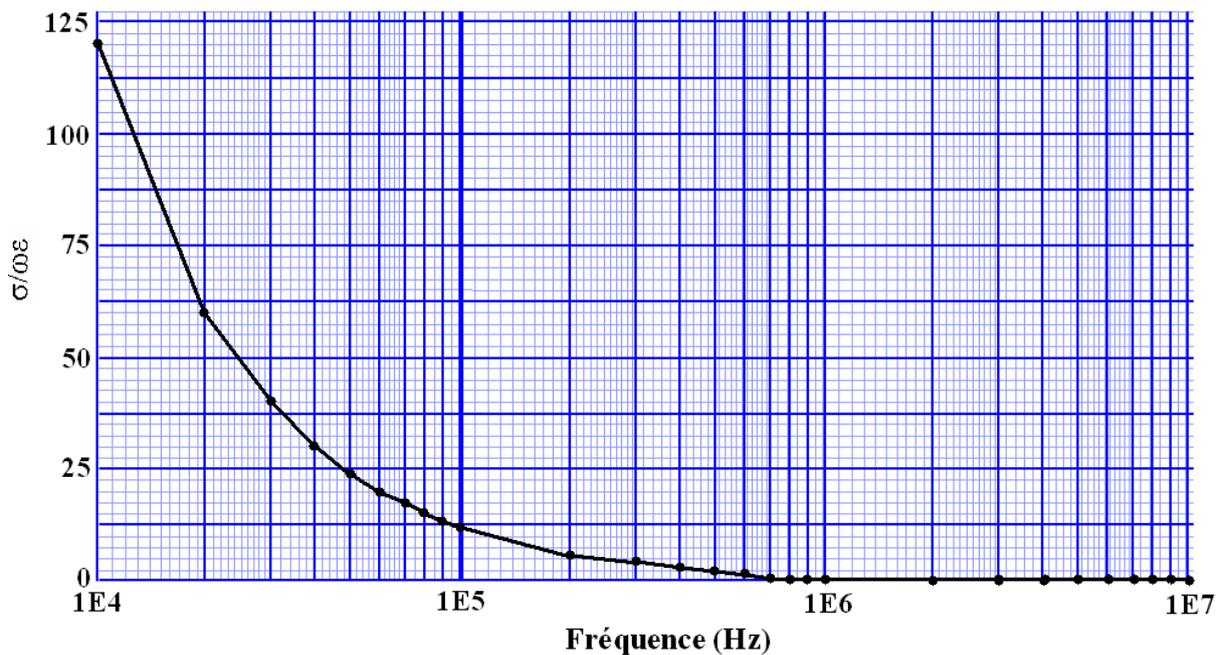


Figure V.4 : Variation du rapport $\sigma/\omega\varepsilon$ en fonction de la fréquence, pour $\rho = 500 \Omega\text{m}$ et $\varepsilon_r = 30$.

L'augmentation de la résistivité du sol ou de la permittivité relative du sol mène à une réduction de la fréquence de coupure au-delà de laquelle l'impédance du sol commence à décroître. C'est le même comportement observé sur la figure V.3, pour différentes valeurs de la résistivité du sol, et l'influence de la permittivité du sol est observée sur la figure V.5 pour une résistivité $\rho = 500 \Omega\text{m}$.

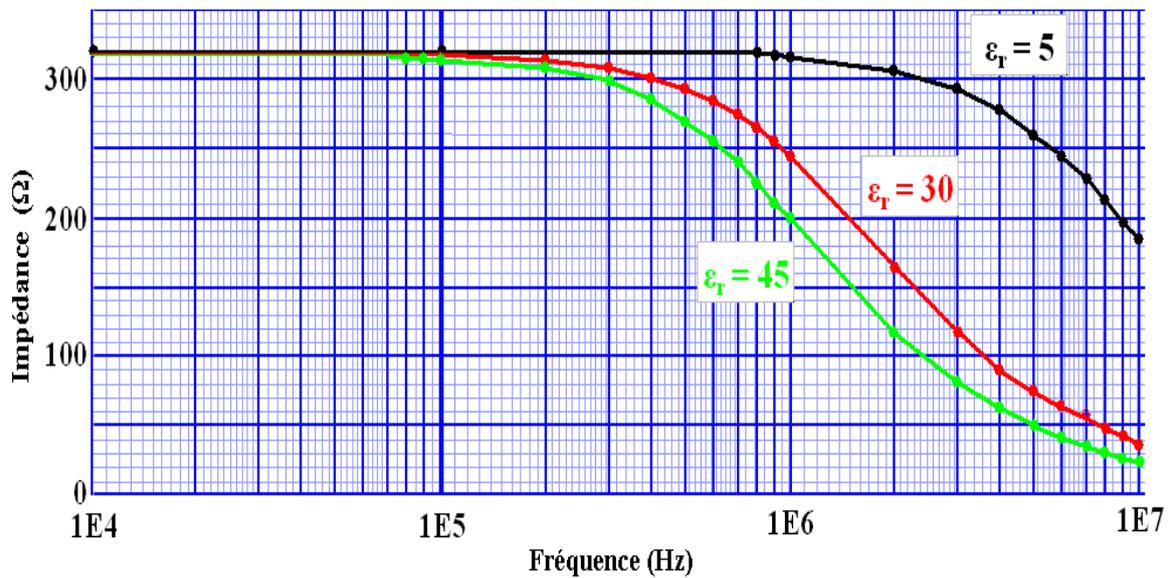


Figure V.5 : Variation de l'impédance de mise à la terre en fonction de la fréquence, pour $\rho = 500 \Omega\text{m}$ et différentes permittivités.

Tirée de la référence [Visacro et De Conti, 2007], la figure V.6 illustre l'impédance de la mise à la terre qui présente des pics de résonances pour les hautes fréquences du spectre ((a) un piquet de 2,4 m de longueur utilisé aux entrées de service des consommateurs de basse tension et (b) trois piquets parallèles de 2,4 m de longueurs séparés par un intervalle de 3 m. Ces trois piquets sont généralement utilisés dans les transformateurs et les pylônes de distribution de moyenne tension. On les trouve aussi, dans certains cas, à l'entrée de service des consommateurs de basse tension). Ces pics sont dus au comportement inductif du sol qui ne se manifeste pas pour les basses fréquences [Visacro et De Conti, 2007]. Cependant, ce phénomène n'apparaît pas dans notre simulation car le logiciel FEMM ne permet pas d'obtenir les pics de résonances ; c'est une des limitations de ce code.

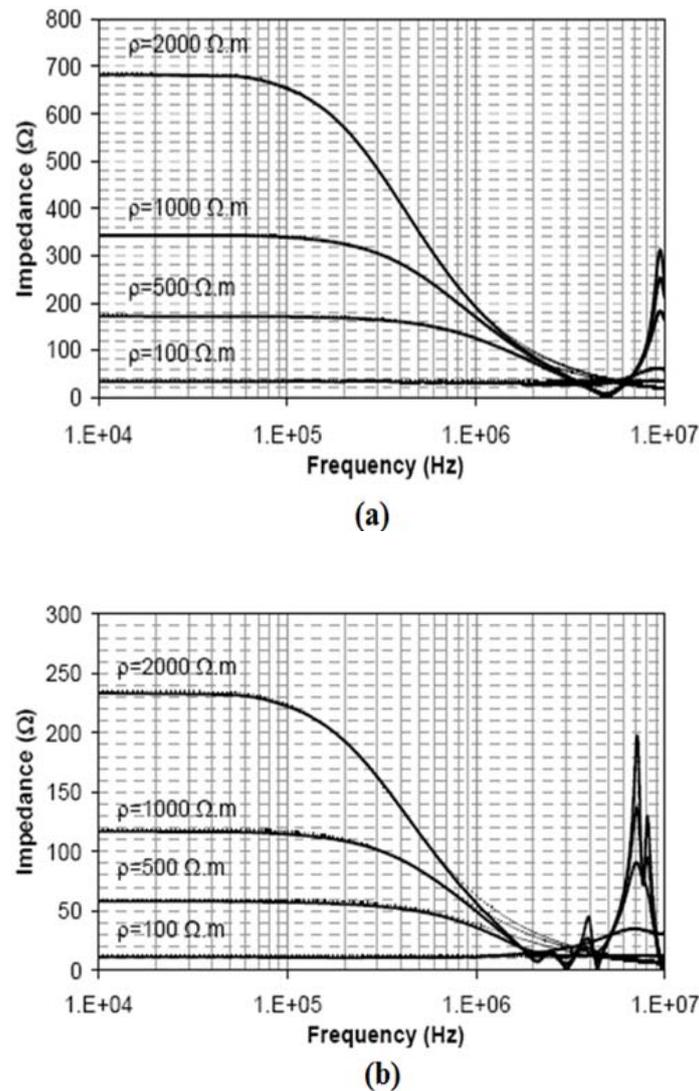


Figure V.6 : Impédances de mise à la terre obtenues par [Visacro et De Conti, 2007] pour deux montages : (a) un piquet de 2,4 m de longueur, (b) trois piquets parallèles de 2,4 m de longueurs séparés par un intervalle de 3 m.

V.3. Circuit équivalent RC

L'analyse présentée dans le paragraphe (§ V.2), recommande l'utilisation du circuit RC parallèle simple illustré sur la figure V.7, comme une approximation convenable de premier ordre pour représenter une mise à la terre, pour les conditions suivantes [Visacro et De Conti, 2007] :

- 1) la plus haute fréquence utilisée doit être inférieure à quelques MHz ;
- 2) la résistance de mise à la terre doit être suffisamment grande pour assurer que les effets inductifs sont négligeables dans la gamme de fréquence considérée.

La sélection des paramètres pour le circuit de la figure V.7 est simple et peut être réalisée en deux étapes comme suit :

- 1) R est défini comme la résistance de mise à la terre obtenue de la relation (II.3) ;
- 2) C est sélectionné dans l'expression :

$$C = \rho\varepsilon/R \quad (\text{V.19})$$

alors :

$$\underline{Z}_{RC} = \frac{R}{1 + (RC\omega)^2} - j \frac{R^2 C \omega}{1 + (RC\omega)^2} \quad (\text{V.20})$$

ou bien :

$$\underline{Z}_{RC} = \frac{R}{\sqrt{1 + (RC\omega)^2}} e^{-jRC\omega} \quad (\text{V.21})$$

avec :

$$|Z_{RC}| = \frac{R}{\sqrt{1 + (RC\omega)^2}} \quad (\text{V.22})$$

\underline{Z}_{RC} : l'impédance complexe du circuit RC ;

ω : l'impulsion propre du circuit ($\omega = 2\pi f$) ;

$|Z_{RC}|$: le module de l'impédance complexe du circuit RC.

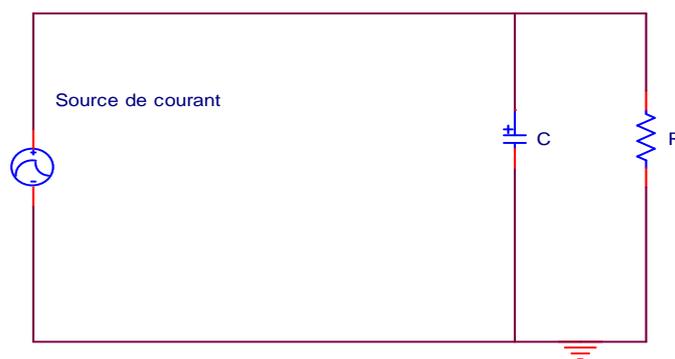
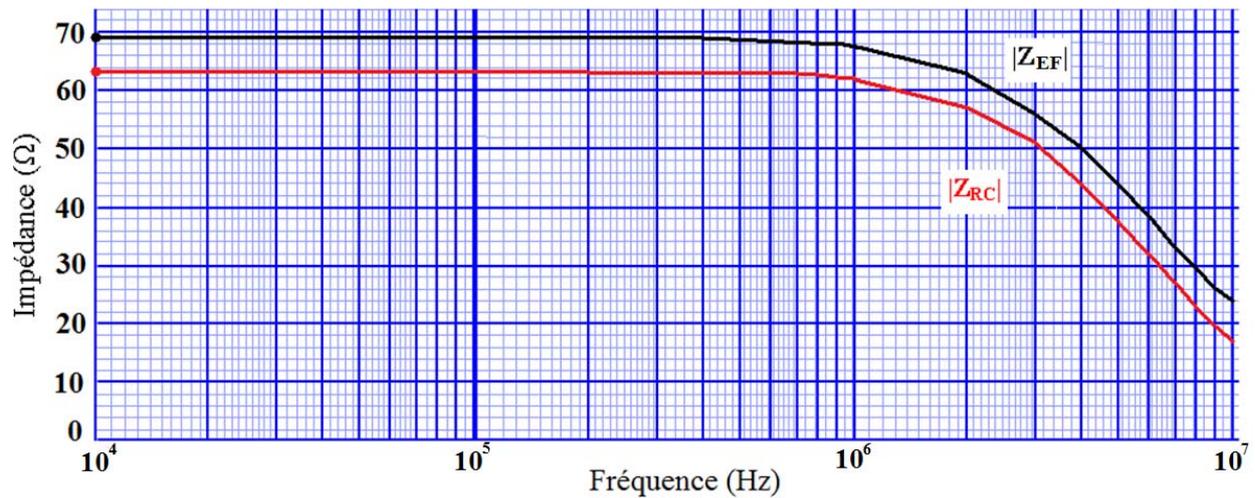


Figure V.7 : Circuit RC proposé pour le modèle de mise à la terre hémisphérique.

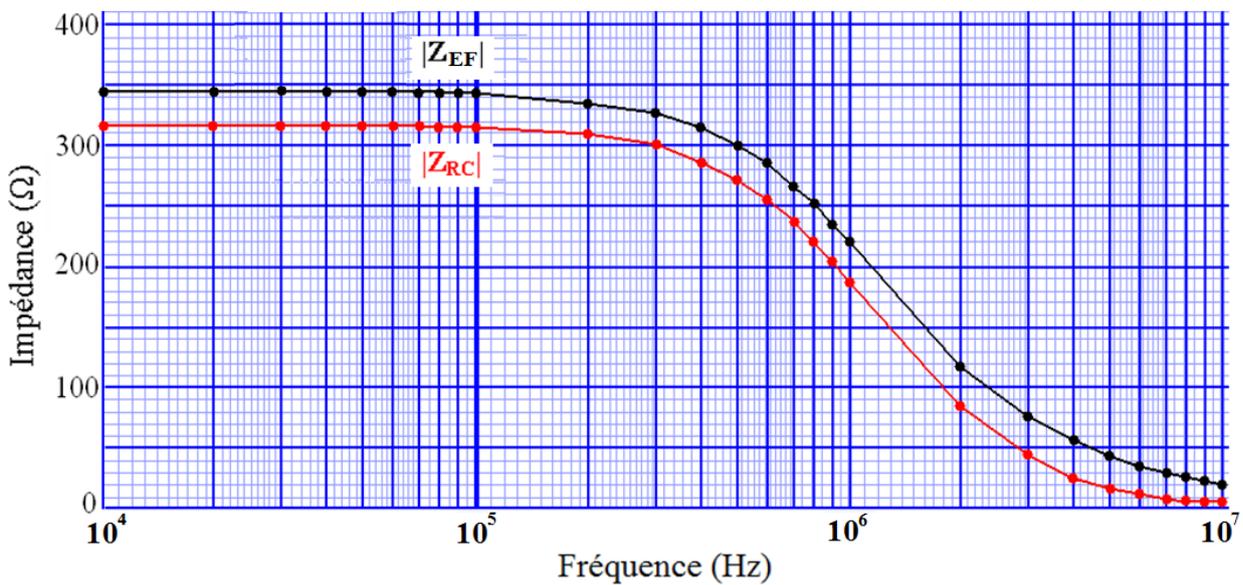
La figure V.8 nous montre la comparaison entre l'impédance obtenue par le calcul des éléments finis et celle trouvée en utilisant le modèle RC, pour trois cas de résistivités $\rho = 100$,

500 et 2000 Ωm . L'erreur de calcul entre $|Z_{EF}|$ et $|Z_{RC}|$ pour les basses fréquences est de 7,7%.

Lorsque la fréquence est égale à la fréquence de coupure ($f = 1$ MHz pour $\rho = 100$ Ωm , $f = 200$ kHz pour $\rho = 500$ Ωm et $f = 50$ kHz pour $\rho = 2000$ Ωm) l'erreur est de 8,01%. Au delà de cette fréquence, l'erreur devient de plus en plus importante, ce qui nous mène à dire que dans notre cas, ce modèle n'est valable que pour une gamme de fréquences donnée.



(a) $\rho = 100$ Ωm .



(b) $\rho = 500$ Ωm .

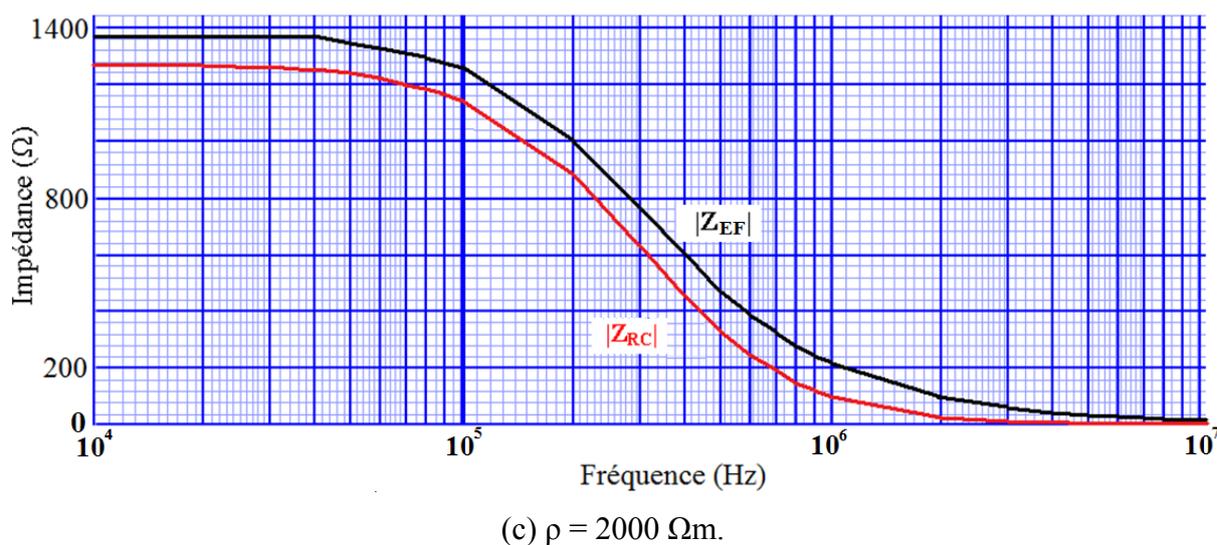


Figure V.8 : Comparaison entre l'impédance calculée par éléments finis et celle obtenue en utilisant le modèle RC.

En suivant la procédure décrite ci-dessus, R et C ont été estimés pour différentes résistivités ($\rho = 100 \Omega\text{m}$, $\rho = 500 \Omega\text{m}$ et $\rho = 2000 \Omega\text{m}$) (Figure V.8). Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau V.2. Nous constatons une augmentation linéaire de R avec la résistivité du sol. Par ailleurs, la capacité C reste constante quelle que soit la valeur de ρ .

Paramètre	$\rho = 100 \Omega\text{m}$	$\rho = 500 \Omega\text{m}$	$\rho = 2000 \Omega\text{m}$
R (Ω)	63,66	318,30	1272,53
C (nF)	0,42	0,42	0,42

Tableau V.2 : Paramètres RC pour les faibles fréquences.

V.3.1. Sélection des paramètres R et C pour différentes valeurs de permittivité relative du sol

Les paramètres RC figurant dans le tableau V.2, se réfèrent à une seule valeur de la permittivité relative du sol ($\epsilon_r = 30$). Pour obtenir des valeurs de capacité en fonction de la permittivité relative du sol, l'expression $C = \rho\epsilon / R$ a été appliquée pour ϵ_r allant de 5 à 80. La courbe obtenue pour la mise à la terre hémisphérique est indiquée sur la figure V.9. Les valeurs de capacitance varient de 0,07 à 1,11 nF et $C \text{ (nF)} = 0,014 \epsilon_r$ (variation linéaire).

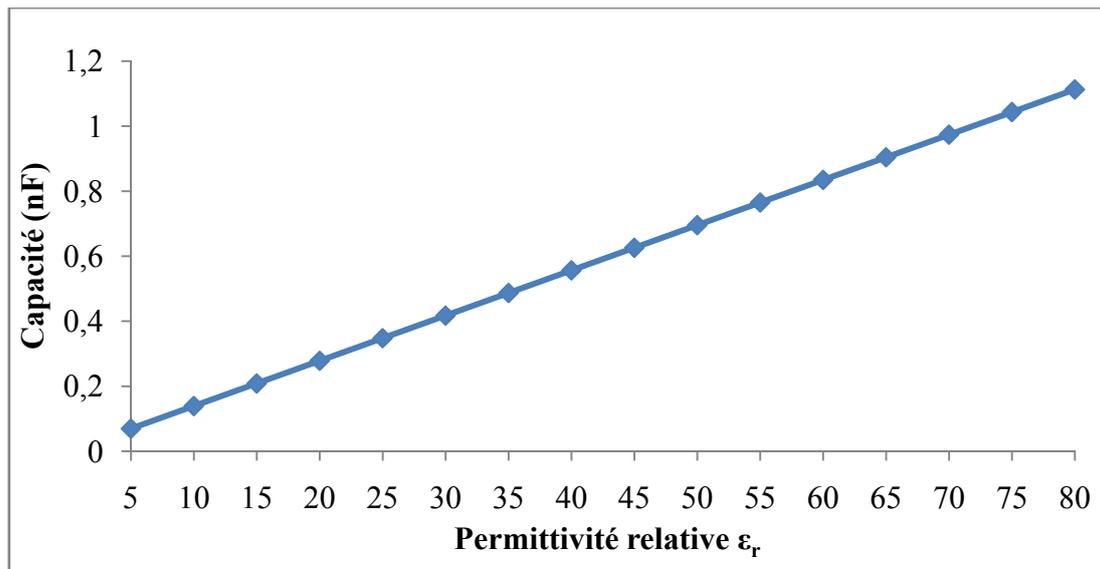


Figure V.9 : Variation de la capacité du sol en fonction de la permittivité relative.

V.3.2. Simulations dans le domaine temporel

Pour étudier le comportement de la précision du modèle proposé dans le domaine temporel, on injecte dans le circuit équivalent de la figure V.7, une onde de courant de 100 kA (0.5/20 μ s) représenté sur la figure V.12. Pour l'analyse du circuit RC, la résistance R et la capacité C ont été calculées pour une résistivité du sol $\rho = 100, 500$ et $2000 \Omega\text{m}$, et une permittivité relative $\epsilon_r = 5, 15, 30$ et 45 , et simulées avec le logiciel PSpice que nous le présenterons dans le paragraphe § V.3.5.

La foudre se comporte comme un générateur de courant. Ce courant est principalement composé d'impulsions successives, représentées sous la forme suivante :

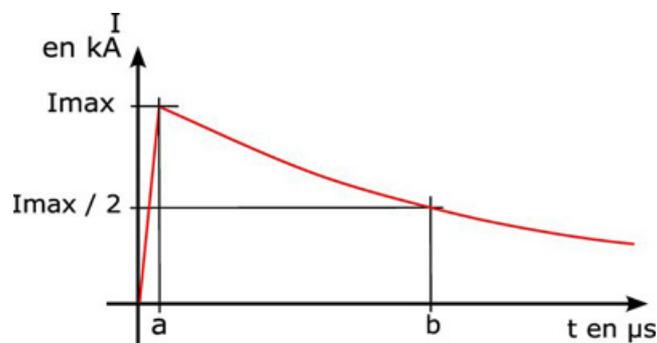


Figure V.10 : Onde de courant.

La courbe se compose d'une montée linéaire de 0 à I_{\max} (valeur crête du courant) de durée a , suivie d'une exponentielle décroissante que l'on caractérise par la durée b de passage à la mi-amplitude $I_{\max}/2$ (Figure V.10).

La donnée de I_{\max} et des deux durées a et b définissent complètement cette onde. La forme d'onde est notée " $a/b \mu s$ ".

La montée linéaire est appelée "front" de l'onde. La raideur de ce front est caractérisée par la pente I_{\max}/a exprimée en $kA/\mu s$.

La forme d'onde réelle n'est pas très éloignée de cette forme un peu simplifiée. La différence essentielle réside dans un sommet arrondi au lieu du point de rebroussement pas très physique que l'on voit ici. Mais l'expression mathématique habituellement retenue pour mieux coller à la réalité est de la forme dite bi-exponentielle qu'est significativement plus compliquée.

V.3.3. Calculs autour de l'onde de courant 0,5/20 μs de valeur crête 100 kA

On suppose

- une montée linéaire

$$I_{(0,a)} = I_{\max} t / a \quad (V.23)$$

- suivie d'une exponentielle décroissante que l'on peut écrire sous la forme

$$I_{(a,\infty)} = I_{\max} e^{-(t-a)/\tau} \quad (V.24)$$

$$I = I_{\max} / 2 \text{ pour } t = b$$

donc

$$1/2 = e^{-(b-a)/\tau}$$

$$(b-a)/\tau = \text{Log}(2)$$

$$\tau = (b-a) / \text{Log}(2) = (b-a) / 0,693$$

$$\tau = (b-a) / 0,693 \quad (V.25)$$

Cette dernière valeur permet de tracer la tangente au point $t = a$ qui passe par le point $(t = a + \tau, I = 0)$.

I : courant de la foudre (kA) ;

I_{\max} : valeur maximale du courant de la foudre (kA) ;

$I(0,a)$: courant de la foudre dans la montée linéaire (kA) ;

$I(a, \infty)$: courant de la foudre dans l'exponentielle décroissante (kA) ;

t : temps (μs) ;

a et b : constantes de la foudre (μs) ;

τ : constante de temps (μs).

V.3.3.1. Charge écoulee « Q »

La charge en milli-coulombs écoulee par ce courant, est donnée par l'intégration de $t=0$ à l'infini de $I(t)$ or :

Une primitive de $I / I_{\text{max}} = t / a$ est $F_1(t) = t^2 / (2a)$

Une primitive de $I / I_{\text{max}} = e^{[-(t-a)/\tau]}$ est $F_2(t) = -\tau e^{[-(t-a)/\tau]}$

donc la charge Q en coulombs est donnée par :

$1000 Q / I_{\text{max}} = F_1(a) - F_1(0) + \lim_{t \rightarrow \infty} [F_2(t)] - F_2(a) = F_1(a) - F_2(a)$ puisque les deux autres termes sont nuls.

$$1000 Q / I_{\text{max}} = a^2 / (2a) + \tau e^0 = a / 2 + \tau.$$

$$Q = (a/2 + \tau) I_{\text{max}} / 1000 \quad (\text{V.26})$$

V.3.3.2. Energie spécifique « Es »

L'énergie spécifique E_s en A^2s est donnée par l'intégration de $t = 0$ à l'infini de $I^2(t)$.

Une primitive de $(I / I_{\text{max}})^2 = t^2 / a^2$ est $G_1(t) = t^3 / (3 a^2)$

Une primitive de $(I / I_{\text{max}})^2 = e^{[-2(t-a)/\tau]}$ est $G_2(t) = (-\tau / 2) e^{[-2(t-a)/\tau]}$

Donc :

$E_s / I_{\text{max}}^2 = G_1(a) - G_1(0) + \lim_{t \rightarrow \infty} [G_2(t)] - G_2(a) = G_1(a) - G_2(a)$ puisque les deux autres termes sont nuls.

$$E_s / I_{\text{max}}^2 = a^3 / (3 a^2) + \tau / 2 e^0 = a/3 + \tau/2.$$

$$E_s = (a/3 + \tau/2) I_{\text{max}}^2. \quad (\text{V.27})$$

dans notre cas : $a = 0,5 \mu\text{s}$, $b = 20 \mu\text{s}$, $I_{\text{max}} = 100 \text{ kA}$, alors :

$$\tau = (20 - 0,5) / 0,693 \approx 28 \mu\text{s}$$

$$I_{(0,0,5)} = 200 t \quad (\text{V.28})$$

$$I_{(0,5,\infty)} = 100 e^{-(t-0,5)/28} \quad (\text{V.29})$$

Les expressions (V.28) et (V.29) représentent le courant de foudre générée par une source de courant de 100 kA ($0,5/20 \mu\text{s}$).

V.3.4. Choix du logiciel PSpice

Nous avons choisi PSpice, produit par Microsim, pour les raisons suivantes :

- PSpice est le logiciel de simulation le plus répandu dans l'industrie.
- Il est basé sur le standard industriel SPICE et donne donc accès aux bibliothèques de modèles développés par les fabricants.
- Il permet de mélanger, sans aucun problème, des composants numériques et analogiques.
- La prise en main du logiciel est simple.
- C'est un logiciel très complet puisqu'il permet de simuler tous les aspects des systèmes que l'on rencontre en électrotechnique : électronique de puissance, électronique de commande analogique et numérique, asservissements ... [Simulation PSpice].

V.3.5. Présentation du logiciel PSpice

PSpice est l'un des plus célèbres logiciels de simulation et d'analyse de circuits électroniques. Il permet de réaliser le schéma d'un montage quelconque, dont les composants sont décrits de manière à reproduire aussi fidèlement que possible des composants réels, puis de simuler le fonctionnement de ce montage pour l'analyser sous toutes les coutures, à l'aide d'outils aussi variés que sophistiqués.

Sa puissance et son extraordinaire richesse ont fait de PSpice une référence mondiale dans le domaine de la conception et de la simulation des circuits. Parmi ses caractéristiques les plus intéressantes, on peut mentionner la possibilité de créer des composants virtuels, à l'aide des datasheets des fabricants, ou de télécharger des bibliothèques de composants, fournies par les plus grands fabricants eux-mêmes.

OrCad PSpice est un logiciel de simulation mixte (analogique et/ou logique). La mise en œuvre (Figure V.11) d'une simulation repose principalement sur [Guide Pspice 9.1] :

- une description des composants et des liaisons figurant sur un schéma sous forme de fichier « Circuit » ;
- une description des signaux d'entrée appliqués sur le schéma sous forme de fichier « Stimulus » ;
- une description des modèles de simulation des composants sous forme de fichiers « Modèles ».

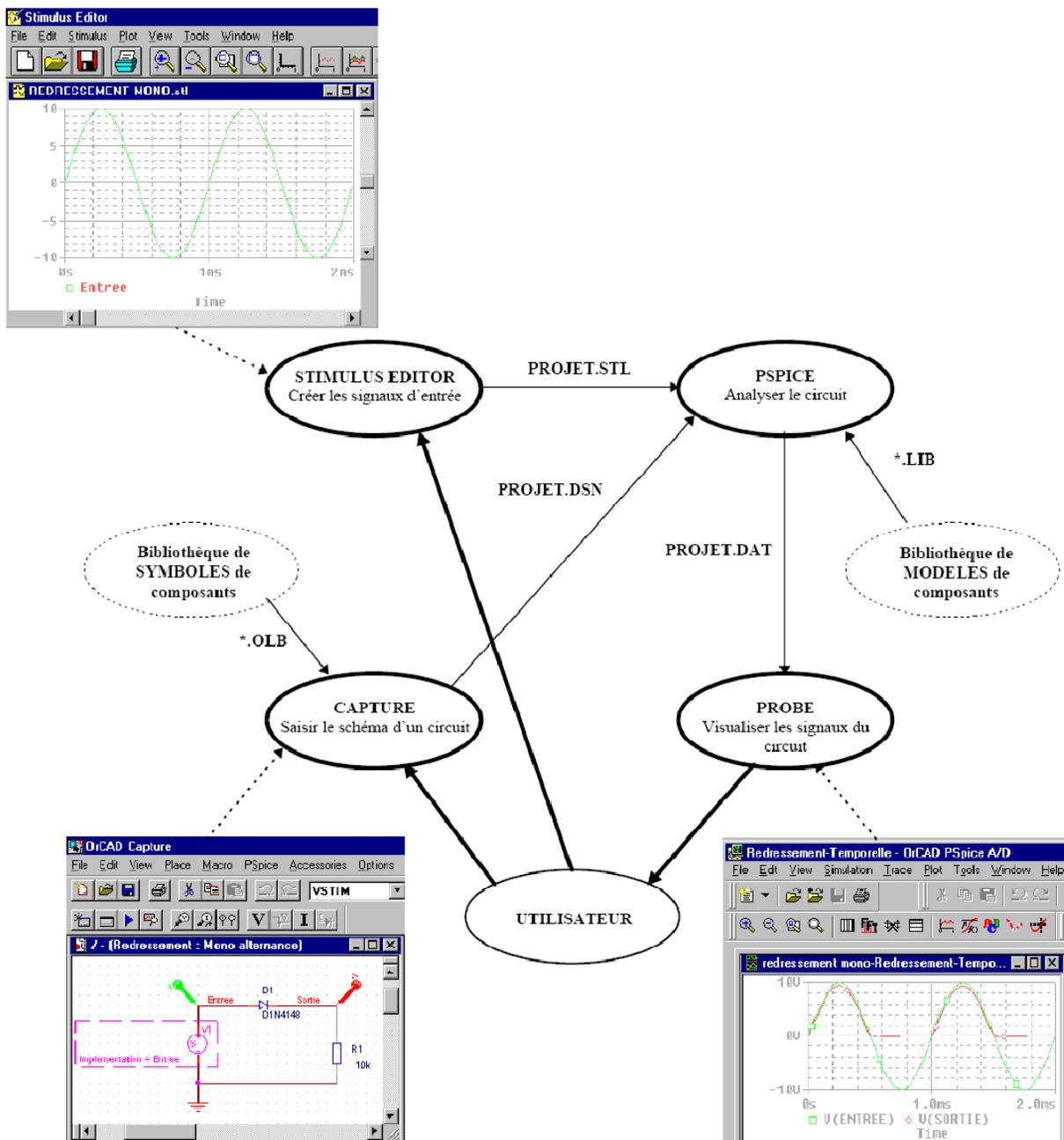


Figure V.11 : Mise en œuvre d'une simulation.

La visualisation des résultats de simulation s'effectue dans une partie du logiciel appelée « Probe ».

Pour mener à bien une simulation, certaines actions s'effectuent :

- sur le schéma, dans OrCad Capture ;
- dans l'éditeur de stimulus PSpice Stimulus Editor;
- dans le simulateur OrCad PSpice.

V.3.6. Résultats de simulation

La figure V.12 illustre l'onde de courant à franc très raide ($I_{\max} = 100 \text{ kA}$ et $(a/b \text{ } \mu\text{s}) = (0,5/20 \text{ } \mu\text{s})$) utilisée dans notre simulation avec le logiciel PSpice :

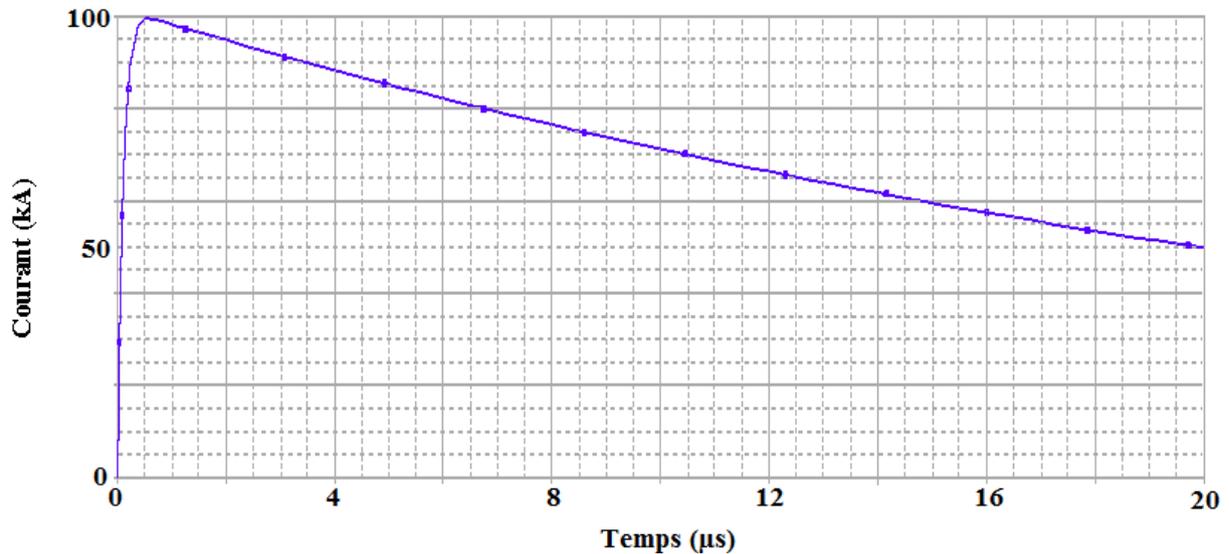
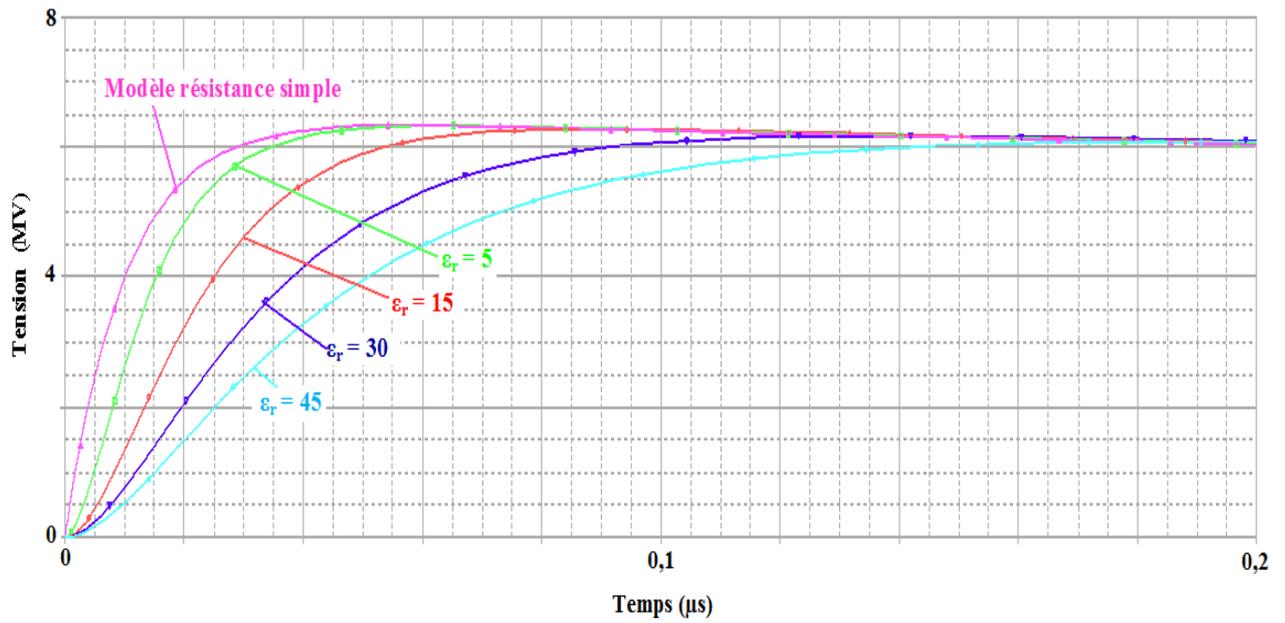


Figure V.12 : Onde de courant à franc très raide (0,5/20 µs), générée dans la simulation.

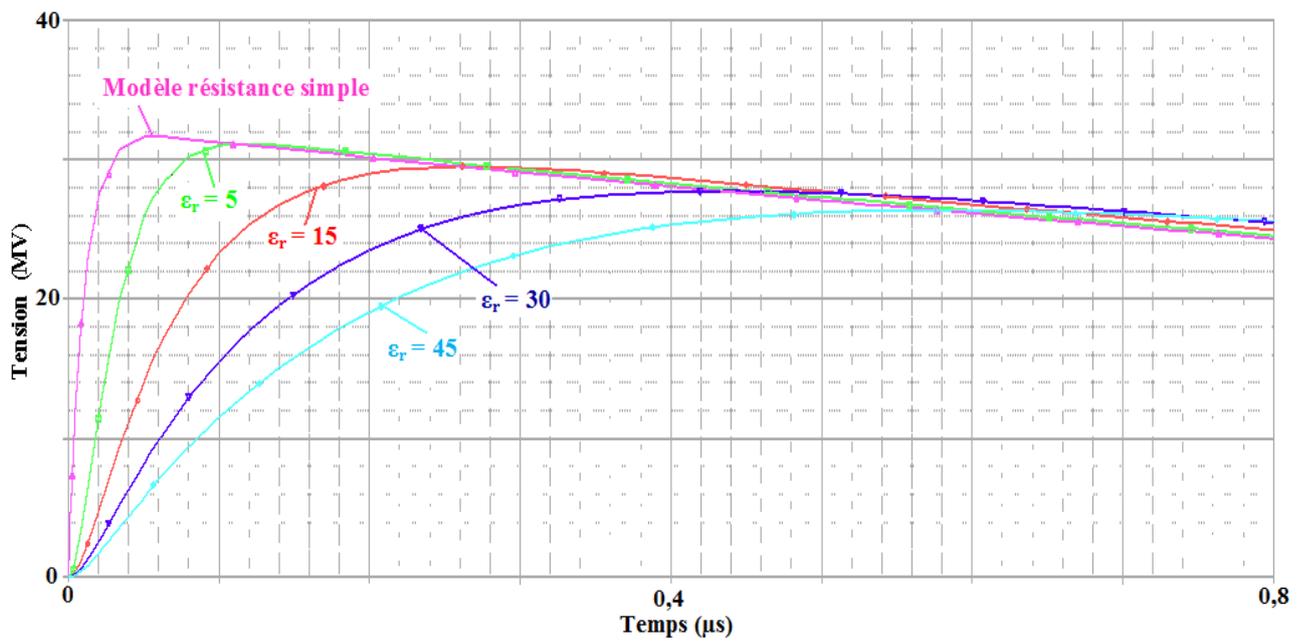
Les formes d'onde de tension de sortie du circuit RC proposé sont présentées sur la figure V.13. Les paramètres du circuit RC pour la simulation sont présentés dans le tableau V.3.

ρ (Ωm)	100				500				2000			
ϵ_r	5	15	30	45	5	15	30	45	5	15	30	45
R (Ω)	63.66	63.66	63.66	63.66	318.3	318.3	318.3	318.3	1273.2	1273.2	1273.2	1273.2
C (nF)	0,07	0.21	0.42	0,62	0,07	0.21	0.42	0,62	0,07	0.21	0.42	0,62

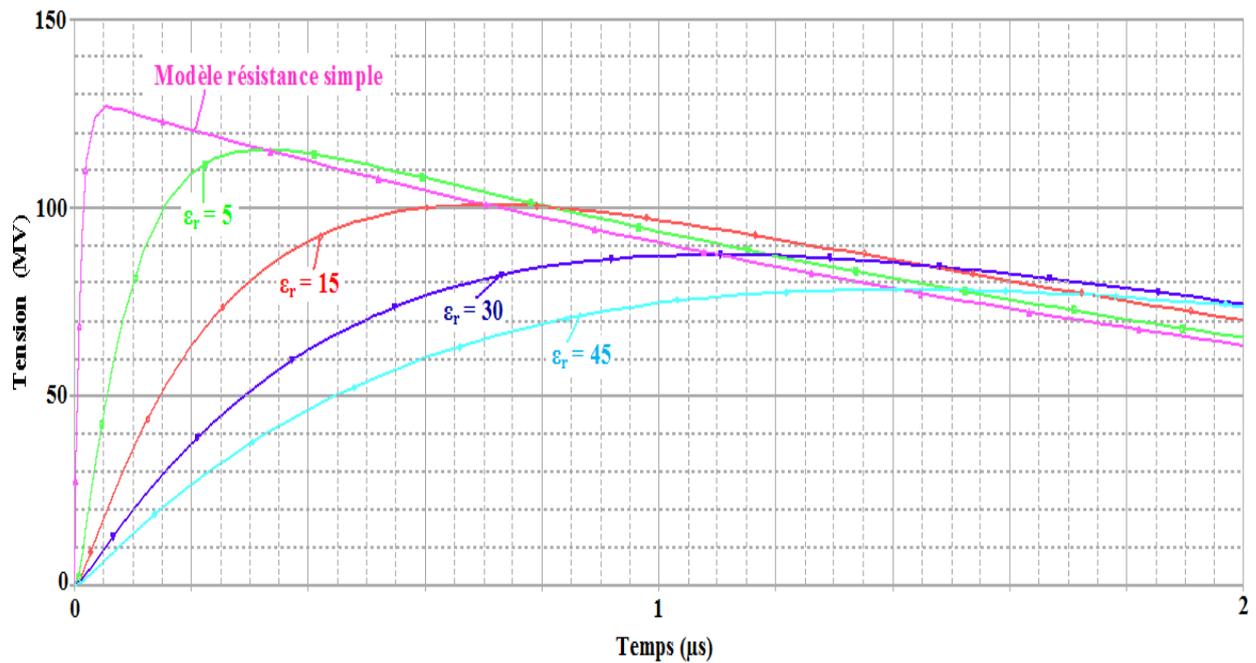
Tableau V.3 : Paramètres du circuit RC pour différentes résistivités.



(a) $\rho = 100 \Omega\text{m}$.



(b) $\rho = 500 \Omega\text{m}$



(c) $\rho = 2000 \Omega\text{m}$.

Figure V.13 : Résultats de simulation dans le domaine temporel de la tension entre borne du circuit RC, pour différentes résistivités.

L'augmentation des valeurs de ρ et ϵ_r conduit à une diminution de la pente des signaux de tension qui en résulte dans le modèle de résistance simple. En effet, comme le montrent les figures V.3 et V.5, la configuration étudiée (électrode hémisphérique) se comporte comme un filtre passe-bas pour les fréquences inférieures à quelques MHz. Ainsi, comme suggéré par la figure V.13, l'utilisation d'une résistance pour représenter la configuration de la figure II.1 devrait être limitée à des faibles valeurs de résistivité du sol $\rho < 250 \Omega\text{m}$ et de $\epsilon_r < 10$.

V.4. Conclusion

Un modèle RC simple a été proposé dans le but de représenter une configuration de mise à la terre hémisphérique. La détermination de R et C est simple en utilisant soit des expressions analytiques où les règles générales proposées. Il a été montré que le modèle proposé est valide pour des fréquences de quelques MHz, et son application a été illustrée pour l'injection d'un courant élevé sous forme d'onde.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Le concept de mise à la terre implique plusieurs champs de recherche. Le fonctionnement des installations électriques dépend étroitement de la manière dont certains dispositifs sont mis à la terre et des valeurs des paramètres des mises à la terre (résistance, inductance, capacité, ...). 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.

Ce travail porte sur l'étude du comportement des systèmes de mise à la terre. A fréquence industrielle, nous avons utilisé le code de calcul CYMGRD pour suivre, dans le cas de sols homogène et hétérogène à deux couches, les variations de l'élévation de potentiel, la résistance de terre et les tensions maximales de contact et de pas, en fonction de divers paramètres tels que la longueur de piquets, la forme de la grille, le nombre de mailles, la profondeur d'enfouissement, En se basant sur le code de calcul FEMM 4.2, nous avons examiné en outre, l'évolution de l'impédance d'une électrode hémisphérique lorsque la fréquence varie de 0 à 10 MHz. Ce comportement a été modélisé électriquement par une résistance en parallèle avec une capacité.

Le premier chapitre a été consacré à l'analyse des contraintes liées aux différents paramètres de l'installation (surtensions, réseaux, récepteurs) et à la présentation des régimes de neutres utilisés en basse et haute tensions. La connexion du neutre à la terre peut être réalisée directement, ou par l'intermédiaire d'une résistance ou d'une réactance. Dans le premier cas, on dit que l'on a un neutre direct à la terre et dans le second cas, que le neutre est impédant. Lorsqu'il n'existe aucune liaison intentionnelle entre le point neutre et la terre, on dit que le neutre est isolé. Lors d'un défaut d'isolement, ou de la mise accidentelle d'une phase à la terre, les valeurs prises par les courants de défaut, les tensions de contact et les surtensions sont étroitement liées au mode de raccordement du neutre à la terre. Un neutre direct à la terre contribue à limiter les surtensions ; par contre, il engendre des courants de défaut très importants. Au contraire, un neutre isolé limite les courants de défaut à des valeurs très faibles, mais favorise l'apparition de surtensions élevées. Le choix du régime du neutre, tant en basse tension qu'en haute tension, dépend à la fois de la nature de l'installation et de celle du réseau.

En raison de son importance dans l'étude des systèmes de mise à la terre, le calcul de la résistivité des sols et de la résistance des mises à la terre a fait l'objet d'un second chapitre.

Conclusion Générale

Afin d'être sûr qu'un système de mise à la terre est placé dans un bon endroit, il est nécessaire de maintenir une faible résistance de toutes les électrodes, 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 de l'électrode 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. 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. Il faut connaître la valeur de la résistance de mise à la terre pour calculer les dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels, par exemple). La mesure de la résistance des sols permet de choisir le meilleur emplacement pour les prises de terre. Il existe différentes méthodes pour mesurer la résistivité de terre. 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.

Il existe plusieurs méthodes de calcul pour la modélisation des systèmes de mise à la terre :

- Méthodes expérimentales, qui consistent à utiliser des équations obtenues expérimentalement pour différentes formes de mise à la terre ;
- Méthodes numériques (approche de ligne de transmission, approche de circuit électrique, approche de champ électromagnétique, approche hybride) qui sont indispensables pour résoudre les problèmes de la physique ;
- Codes de calculs pour l'analyse des systèmes de mise à la terre.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté brièvement le code de calcul « CYMGRD » utilisé dans notre étude. Pour la validation de ce code de calcul, nous avons comparé, dans les mêmes conditions, nos valeurs de la résistance obtenues par ce code à celles trouvées en utilisant la norme IEEE [IEEE, 2000] d'une part, et les différents modèles conventionnels rapportés dans la littérature d'autre part. Une très bonne concordance a été

Conclusion Générale

obtenue. Cependant, la distribution de la tension de contact, montre que la limite maximale permise de cette tension a été violée sur les coins de la grille. Nous avons donc jugé utile d'apporter des modifications à la conception actuelle. Cette violation au niveau des coins, a été, par conséquent, éliminée par l'insertion de 20 piquets, placés en alternance sur le périmètre.

Nous avons effectué une simulation sous environnement CYMGRD, réalisée dans le quatrième chapitre, pour examiner l'influence de quelques paramètres sur le comportement des grilles de mise à la terre, suite à un défaut. Les paramètres d'influences sont : la longueur et le nombre de piquets, le nombre et l'espacement des conducteurs des mailles et la profondeur d'enfouissement ainsi que la forme géométrique de la grille. Ce logiciel nous a permis de calculer les différents paramètres électriques à savoir, l'élévation de potentiel, les tensions maximales de contact et de pas permises, à partir de l'analyse du sol, ainsi que la résistance du système de mise à la terre. Le modèle de sol utilisé dans notre étude est celui à deux couches, recommandé par la norme IEEE 80 2000. Nous avons conclu que :

- L'augmentation du nombre de mailles engendre une diminution des paramètres électrique de la grille. Cependant, à une certaine limite (200 mailles, dans notre cas), la tension de pas augmente en fonction du nombre de maille. Pour avoir des bonnes conceptions des grilles, l'espacement doit être le plus possiblement symétrique ;
- Le rajout des piquets joue un rôle très important, car leur introduction diminue les caractéristiques électriques susmentionnées de la grille ;
- La profondeur doit être entre 0,5 m et 2 m. Au-delà de cette gamme, la tension de contact augmente, ainsi que le risque d'électrocution et de détérioration des installations électriques connectées au réseau ;
- La forme rectangulaire est plus adaptée à la conception des systèmes de mise à la terre que celle carrée de mêmes surface et longueur des conducteurs.

Le travail a été achevé par un cinquième chapitre dans lequel est présenté le comportement de la résistance de terre lors de l'écoulement des courants transitoires dans une prise de terre. Un certain nombre de phénomènes apparaissent :

- effet inductif : l'impédance de la prise de terre n'est plus exclusivement résistive comme elle l'était à fréquence industrielle ;

Conclusion Générale

- effet capacitif : la capacité de la prise de terre par rapport au sol peut, en très haute fréquence et dans les sols de résistivité élevée, réduire l'impédance apparente en shuntant la résistance de terre ;
- phénomène de claquage dans le sol : dans le cas d'impulsions de courant de grande amplitude, on peut observer une réduction de l'impédance apparente de la prise de terre grâce à des phénomènes disruptifs dans le sol.

Pour les fréquences de quelques Méga Hertz, une électrode de terre hémisphérique peut être représentée par un circuit électrique constitué d'une résistance et d'une capacité en parallèle.

Les prises de terre susceptibles d'écouler des chocs de foudre doivent donc être réalisées de telle sorte que leur comportement vis-à-vis des courants impulsionnels soit le meilleur possible (faciliter la dissémination de tels courants vers la terre).

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

AFNOR (Association Française de Normalisation), « Installations électriques à haute tension, règles, 3e partie : caractéristiques générales des installations », C 13-200, 4ème édition, 1987.

Bensoam M., « Qualité de la prise de terre et sécurité des personnes », Cours, Faculté des Sciences et Techniques de St Jérôme, octobre 2003.

CEI (Commission Electrotechnique Internationale), « Installations électriques des bâtiments, choix et mise en œuvre des matériels électriques – Mises à la terre, conducteurs de protection et d'équipotentialité », CEI 60364-5-54, 2ème édition 2002-06.

CEI (Commission Electrotechnique Internationale), « Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques – Partie 1: Aspects généraux », CEI 60479-1, 4ème édition 2005-07.

CEI (Commission Electrotechnique Internationale), « Protection Contre la Foudre-Partie 1: Principes Généraux », CEI 62305-01, Première édition 2006-01.

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

Chong Kiat Ng, « Simplified numerical based method for calculation of dc ground electrode resistance in multi-layered earth », Thesis of Master of Science, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Manitoba Winnipeg, Manitoba, Canada, June 2000.

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 », Copyright CYME International T&D Inc., October 2006.

Demuynck P., « Mesures électriques : Mesurer une résistance de terre », Lem France, leader mondial dans le développement et la production de capteurs de courants de très haute précision, Janvier 2002.

EDF (Electricité De France), « La mise à la terre du neutre des réseaux MT aériens et souterrains », Electricité de France, Centre de Normalisation, H 80, Avril 1959.

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.

Fagan E.J., Lee R.H., « The Use of Concrete-Enclosed Reinforcing Rods as Grounding Electrodes », IEEE Transactions on Industry and General Applications, Vol. N° 4, pp. G40-G51, 1970.

Georges S., « Evaluation de l'Effet de la Mer et du Contrepoids sur le Profil de la Tension d'un Système de Mise à la Terre d'une Ligne de Transport d'Energie à Haute Tension dans un Sol Résistif », Thèse de Doctorat, Département de Génie Electrique, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, Montréal, Septembre 2001.

Bibliographie

Guide Pspice 9.1, « OrCad PSpice 9.1 : Simulation analogique / logique », Lycée Julliot de la Morandière, Granville, France, 2000. Site Internet : www.google.fr

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

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

Kiessling F., Nefzger P., Nolasco J.F. & Kaintzyk U., « Overhead Power Lines : Planning, Design, Construction », Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2003.

Kimplaire D., Marique N. & Wandji O., « Analyse comparative des mises à la terre aux USA et dans divers pays d'Europe : influences sur les courants de contact », Note de cours, Université de Liege, Institut Montefiore, 2005

Laforest J., Comber M. & Zaffanella L., « Transmission Line Referenc Book », Catalogue de produits, Copyright, 2ème édition, 1989.

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

Meeker D., « FEMM (Finite Element Method Magnetics) Version 4.2 : User's Manual », Février 2009.

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

MG (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.

Prévé C., « Les Réseaux Electriques Industriels1 », Hermes Science, Lavoisier, ISBN 2-7462-1102-5, Paris, 2005.

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

Bibliographie

Schneider Electric Industries, Christophe P. & Robert J., « Guide de conception des réseaux électriques industriels : Les régimes de neutre », DAS Transport et Distribution, Activité Ensembles et Applications, 6 883 427/A, France, Février 1997. Site internet : www.schneider-electric.com

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

Missirliu P., « Simulation en électrotechnique avec PSpice », Lycée Newton-ENREA Clichy, France. Site Internet : www.google.fr

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

Teguar M. & M'hamdi B., « Distributions du potentiel et du champ électriques le long d'une chaîne d'isolateurs de ligne 33 kV », Ecole Nationale Polytechnique, Université Ziane Achour, Algérie, 2010.

Tounsi S. & Chikh F., « Influence du Sol sur le Comportement d'un Modèle d'Isolateur sous Tension Alternative 50 Hz », Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, Juin 2008.

Visacro S. & De Conti A., « A simplified model to represent typical grounding configurations applied in medium voltage and low voltage distribution lines », IX International Symposium on Lightning Protection, Federal University of Minas Gerais, Lightning Research Center, Brazil, November 2007.

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