

N° 125



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI)

Master Recherche en Génie Electrique

Rapport de stage

Thème :

**Etude comparative de plusieurs configurations de prise de terre
sur un sol multicouches**

Présenté par :

Jérémie ADJAGBE

Encadré par :

Dr Jacques AREDJODOUN

Sous la direction de :

**Dr SOSOU Vincent,
Maître de Conférences des Universités CAMES.**

**Laboratoire d'Electrotechnique De Télécommunication et
d'Informatique Appliquée (LETIA)**

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

- ma très chère maman pour ses conseils et ses encouragements ;
- ma chère femme ;
- mes enfants ;
- toute ma famille ;
- tous mes amis...
- toute ma promotion

REMERCIEMENTS

Notre profonde gratitude et nos plus grands remerciements vont en priorité à Dieu Tout Puissant sans qui ce travail n'aurait jamais abouti.

- ❖ Je tiens à remercier en tout premier lieu Pr. HOUNDEDAKO Vincent Directeur de ce mémoire et Dr Jacques AREDJODOUN qui m'ont proposé ce sujet et qui m'ont aidé par leurs idées et leurs conseils durant toutes les étapes de ce travail.
- ❖ J'exprime ma gratitude aux enseignants de l'école doctorale des Sciences de l'Ingénieur de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (ED-SDI/EPAC) qui m'ont aidé par leurs explications durant le cycle de ma formation. Je remercie également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

RESUME

La conception des prises et réseau de terre doit permettre, même dans les conditions les plus défavorables, d'assurer le maintien de la sécurité des personnes, la protection des installations de puissance et la protection des équipements sensibles. La mise à la terre dans les réseaux électriques paraît être relativement simple et cependant elle n'a cessé de présenter des difficultés. L'objectif de notre travail est de faire un choix convenable de la configuration de la prise de terre pour une protection optimale. Sa particularité dépend de ses dimensions géométriques. L'étude se focalise sur la détermination de la résistance de mise à la terre en tenant compte de la structure du sol et des caractéristiques du circuit de terre. Pour cela, on a procédé à l'étude comparative de plusieurs configurations de systèmes de mise à la terre afin de dégager leurs comportements selon que le sol soit homogène ou hétérogène. De ces études, quatre types de configurations de prise de terre ont été simulés et analysés. Les résultats obtenus permettent d'adopter des choix de configurations selon que la résistivité du sol augmente ou diminue en profondeur. Il ressort de notre travail que chaque configuration présente des avantages et aussi des inconvénients.

Mots clés : configurations ; prise de terre ; multicouches. Structure du sol, résistivité du sol, réseau de terre prise de terre

ABSTRACT

The design of the earthing system must allow, even in the most unfavourable conditions, to maintain the safety of people, the protection of power installations and the protection of sensitive equipment. Earthing in electrical networks seems to be relatively simple and yet it has always presented difficulties. The objective of our work is to make a suitable choice of the grounding configuration for optimal protection. Its particularity depends on its geometrical dimensions. The study focuses on the determination of the grounding resistance taking into account the structure of the soil and the characteristics of the grounding circuit. For this purpose, a comparative study of several configurations of grounding systems has been carried out in order to identify their behavior according to whether the soil is homogeneous or heterogeneous. From these studies, four types of grounding configurations were simulated and analyzed. The results obtained make it possible to choose configurations according to whether the resistivity of the soil increases or decreases with depth. It appears from our work that each configuration has advantages and also disadvantages.

Keywords: configurations; grounding; multi-layers. Soil structure, soil resistivity, grounding network.

NOMENCLATURE

Symboles	Grandeurs physiques	Unités
J	Densité du courant	$A.m^{-2}$
E	Champ électrique	V/m
u	Potentiel électrique	v
U_p	Tension de pas	v
U_r	Tension de touche	v
ρ	Résistivité du sol	$\Omega.m$
T	Température	$^{\circ}C$
R	Résistance de terre	Ω
I	Courant électrique	A
R	Rayon	m
L	Longueur de l'électrode	m
d	Diamètre de l'électrode	m
A	Distance entre les électrodes	m
σ	Conductivité électrique	S/m
μ	Perméabilité	H/m
ε	Permittivité	F/m
h	Hauteur de la couche du sol	m

Abréviation

MALT	Mise à la terre
EF	Élément finis

LISTE DES TABLEAUX

<u>Tableau 1</u> : Les sections normalisées obtenues en fonction des I_{cc}	25
<u>Tableau 2</u> : Résistivités moyennes des différents types de sol	28

LISTE DES FIGURES

<u>Figure 1</u> : Tension de pas.	10
<u>Figure 2</u> : Tension de pas en fonction de la distance	11
<u>Figure 3</u> : Tension de touchée.	12
<u>Figure 4</u> : Réseau du transport	15
<u>Figure 5</u> : Systèmes simples (a) et systèmes complexes de terre(b).	16
<u>Figure 6</u> : Méthode des trois points.....	17
<u>Figure 7</u> : Méthode de chute de potentiel.....	17
<u>Figure 8</u> : Zones d'influence	18
<u>Figure 9</u> : Méthode du 62 %	18
<u>Figure 10</u> : Méthode de chute de tension utilisant des sondes capacitives	19
<u>Figure 11</u> : Méthode de mesure sans électrodes auxiliaires.....	20
<u>Figure 12</u> : Variation de la résistance de terre en fonction de la longueur de l'électrode de terre.....	21
<u>Figure 13</u> : Résistance en fonction de la distance entre les électrodes cylindriques.	22
<u>Figure 14</u> : Caractéristique $R=f(n)$	23
<u>Figure 15</u> : Résistance en fonction du diamètre de l'électrode cylindrique verticale	24
<u>Figure 16</u> : Mesure de la résistivité à l'aplomb du point O	30
<u>Figure 17</u> : Principe de mesure de la résistivité apparente.....	30
<u>Figure 18</u> : Schéma de mesure de la méthode de quatre électrodes.....	32
<u>Figure 19</u> : Sol en deux couches de résistivités différentes.	32
<u>Figure 20</u> : Résistivité apparente d'un sol hétérogène à deux couches en fonction de la profondeur de la première couche : cas où $R_{o1} < R_{o2}$	33
<u>Figure 21</u> : Résistivité apparente d'un sol hétérogène à deux couches en fonction de la profondeur de la première couche : cas où $R_{o1} > R_{o2}$	34
<u>Figure 22</u> : Ajout d'une matière de faible résistivité autour de l'électrode	36
<u>Figure 23</u> : Caractéristiques $R=f(l)$ sans et avec la couche de bentonite.	37
<u>Figure 24</u> : Réseau de terre avec des fissures de faible résistivité.	39
<u>Figure 25</u> : Prise de terre avec trous profonds	39
<u>Figure 26</u> : Piquet de terre	42

<u>Figure 27</u> : Electrodes en ligne droite	43
<u>Figure 28</u> : Electrode sur les côtés d'un carré.....	44
<u>Figure 29</u> : Electrodes sur une circonférence.....	45
<u>Figure 30</u> : l'hémisphère.	46
<u>Figure 31</u> : Câble enterré horizontalement.....	46
<u>Figure 32</u> : Câbles enterrés horizontalement.....	47
<u>Figure 33</u> : Câbles enterrés horizontalement.....	48
<u>Figure 34</u> : Câbles enterrés horizontalement.....	48
<u>Figure 35</u> : Boucle enterrée.	48
<u>Figure 36</u> : Résistance de terre en fonction de la longueur de câble pour différente valeur de profondeur (sol homogène).....	50
<u>Figure 37</u> : Résistance R de terre en fonction du diamètre de la boucle pour différentes profondeurs (sol homogène)	51
<u>Figure 38</u> : Résistance R de terre en fonction de la longueur de piquet pour différents rayons (sol homogène).....	51
<u>Figure 39</u> : Résistance de terre cas des piquets en fonction du nombre pour de différentes longueurs de piquets (sol homogène)	52
<u>Figure 40</u> : Résistance de terre en fonction de la longueur des piquets pour de différents nombres de piquets (sol homogène)	52
<u>Figure 41</u> : Résistance de trois configurations de terre en fonction de la longueur des piquets ou de câble ou diamètre de la boucle (sol homogène)	53
<u>Figure 42</u> : Résistance de terre en fonction de la longueur de câble pour différente valeur de profondeur (sol hétérogène).....	54
<u>Figure 43</u> : Résistance de terre en fonction du diamètre de la boucle pour différentes profondeurs (sol hétérogène)	55
<u>Figure 44</u> : Résistance de terre en fonction de la longueur de piquet pour différents rayons (sol hétérogène).....	55
<u>Figure 45</u> : Résistance de terre en fonction du nombre de piquets pour de différentes longueurs de piquets (sol hétérogène).....	56
<u>Figure 46</u> : Résistance en fonction de la longueur de piquet pour de différents nombres de piquets (sol hétérogène).....	56
<u>Figure 47</u> : Résistance de trois configurations de terre en fonction de la longueur des piquets ou de câble ou diamètre de la boucle : cas $R_{o1} < R_{o2}$ (sol hétérogène).....	57
<u>Figure 48</u> : Résistance de trois configurations de terre en fonction de la longueur des piquets ou de câble ou diamètre de la boucle : cas $R_{o1} > R_{o2}$ (sol hétérogène).....	57

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME.....	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	vi
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTERATURE SUR LES SYSTEMES DE MISE A LA TERRE	3
Introduction.....	3
1.1. Etude bibliographique	3
1.2. Généralité sur les systèmes de mise à la terre.....	9
1.2.1. Définition d'un réseau de terre	9
1.2.2. Rôle d'une mise à la terre	9
1.2.3. Système de mise à la terre.....	13
1.2.4. Conception et réalisation des systèmes de mise à la terre	13
1.2.5. Différents types de prise de terre	15
1.3. Mesure de la résistance de système de mise à la terre	16
1.3.1. Méthode des trois points (triangle)	16
1.3.2. Méthode de chute de potentiel (Fall of potentiel).....	17
1.4. Amélioration de la résistance d'une mise à la terre	20
1.4.1. Augmentation de la longueur de l'électrode.....	20
1.4.2. Augmentation de la distance entre électrodes	21
1.4.3. Augmentation du nombre d'électrodes.....	22
1.4.4. Augmentation du diamètre de l'électrode.....	23
Conclusion.....	25
CHAPITRE 2 : ETUDE GEOLOGIQUE DU SOL	27

Introduction.....	27
2.1. Nature du sol	27
2.2. Résistivité du sol	27
2.3. Mesure des résistivités des sols.....	28
2.3.1. Sol en plusieurs couches de résistivités différentes.....	35
2.3.2. Traitement des sols pour réduire la résistivité	36
2.3.3. Ajout d'une matière de résistivité réduite entourant l'électrode	36
Conclusion.....	40
CHAPITRE 3 : OPTIMISATION DES CONFIGURATIONS DES RESEAUX DE MISE A LA TERRE	41
Introduction.....	41
3.1. Principe général de la méthode des éléments finis (EF).....	41
3.2 Différentes configurations.....	42
3. 3. Résistance de prise de terre dans un sol homogène.....	49
3.4. Résistance de prise de terre dans un sol hétérogène.....	54
3.5. Interprétation des résultats	58
Conclusion.....	59
CONCLUSION GÉNÉRALE	60
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	61
ANNEXES	65

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie électrique est un facteur primordial du développement. Les pays en voie de développement, ont encore à ce jour un déficit en taux d'électrification et, en plus, les réseaux électriques existants connaissent de nombreuses perturbations, dues notamment aux problèmes de mise à la terre.

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. Le rôle d'un réseau de terre d'une installation est de permettre l'écoulement à l'intérieur du sol de courant de toutes origines, qu'il s'agisse, par exemple de courants de choc dus à des coups de foudre ou bien de courants de défaut à 50hz [1]. La conception des prises et réseau de terre doit permettre, même dans ces conditions, d'assurer le maintien de la sécurité des personnes, la protection des installations de puissance, la protection des équipements sensibles, un potentiel de référence.

La mise à la terre dans les réseaux électriques paraît être relativement simple et cependant elle n'a cessé de présenter des difficultés [1].

Dans la pratique le sol est presque toujours non homogène et ces non-homogénéités peuvent prendre beaucoup de formes, là sont dans la plupart des cas plusieurs couches de sol, qui peuvent être : terre grasse, sables, gravier, argile ou mélange de ces derniers et roches. Pour cela la question qui pose est alors comment choisir la configuration de prise terre en tenant compte de la structure du sol pour obtenir une résistance de terre la plus basse que possible.

L'objectif principal de ce mémoire est le choix convenable du type de configuration de prise de terre sur un sol hétérogène pour une protection optimale. L'élaboration de cet objectif va nous conduire à passer par un premier chapitre de revue de littérature sur les systèmes de mise à la terre basée sur la recherche bibliographique intensive où on va présenter des travaux des autres chercheurs, ainsi qu'une analyse et une synthèse de ces travaux.

Dans le second chapitre, nous avons fait l'étude géologique du sol car certaines caractéristiques du sol sont déterminantes dans le choix de la configuration d'une prise de terre.

Le chapitre trois est consacré l'optimisation des configurations de prises de terre.

CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTERATURE SUR LES SYSTEMES DE MISE A LA TERRE

Introduction

Dans le présent chapitre, on va rappeler les notions de base indispensables à l'analyse des mises à la terre des installations électriques à fréquence industrielle, en mettant un accent particulier sur les propriétés des mises à la terre : la résistance de la terre et sa résistivité.

1.1. Etude bibliographique

La recherche bibliographique effectuée dans le cadre de ce mémoire montre plusieurs études qui se sont basées sur différents aspects qui jouent un rôle important dans la conception d'un bon système de mise à la terre.

ZOUHAIR BEN ZAIED [2] : dans son mémoire sur « **Analyse du comportement électrique d'une électrode de mise à la terre de forme géométrique complexe** » s'est focalisé sur la répartition du potentiel électrique ainsi que la détermination de la résistance de mise à la terre dans un sol avec différents paramètres (résistivités, nombre de couches...). Plusieurs configurations d'électrodes de système de mise à la terre ont été reproduites afin d'étudier leurs comportements dans un sol homogène et hétérogène. Le calcul analytique de la résistance de certaines configurations avec certains paramètres du sol a été fait grâce aux relations trouvées dans la littérature et ce qui a permis de valider le modèle utilisé par les simulations. Le calcul le plus complexe, qui s'explique par les paramètres du sol hétérogène et par la forme géométrique comme celle de l'électrode proposée, a été effectué par le traitement numérique basé sur la méthode des éléments finis vu qu'elle est bien adaptée pour résoudre ce type de problème. Cette approche a pour but de comparer l'électrode proposée à ceux de forme standard de manière à connaître laquelle qui dissipe mieux le courant de défaut dans le sol pour éviter les perturbations dans les réseaux de télécommunication et assurer la sécurité du matériel et les personnes

aux alentours. Son étude se limite donc sur le comportement des piquets de terre et ne fait pas une comparaison avec les autres configurations possibles.

M. ZIDANE ZINE ABIDDINE [3] : dans son mémoire « **modélisation et simulation des prises de terre dans les systèmes électrique** », a fait une synthèse des travaux sur les modélisations des différentes mises à la terre. Pour l'étude de la réponse transitoire de mise à la terre, il a utilisé la méthode électromagnétique du NEC-4 (Numerical Electrmagnetic Code) qui est basé sur la théorie antennes. Pour faciliter l'utilisation du ce dernier, une interface dans l'environnement MICROSOFT VISUAL STUDIO 2010 à été développée. L'utilisation du formalisme des antennes permet une modélisation plus rigoureuse avec prise en compte des interactions entre les différentes barres. Les résultats obtenus pour ces applications ont permis de bien montrer la difficulté du problème d'optimisation qui certainement doit intégrer un élément bien important qui est la statistique qui prend en compte d'autres paramètres du sol :

M. AREDJODOUN G. Jacques [4], « **Détermination de la résistivité apparente d'un sol hétérogène en vue du choix de la configuration d'une prise de terre de type piquet pour une protection optimale** » son travail porte sur l'étude d'une électrode de terre de type piquet dimensionné pour optimiser et protéger le système électrique de tout défaut de courant. Par exemple, les courants d'appel causés par la foudre ou courant de défaut 50 Hz. Son intérêt à déterminer la résistivité apparente des sols hétérogènes à sélectionner et configurer un système de mise à la terre jalonné pour une protection optimale. L'analyse des résultats de simulation à l'aide d'un logiciel Matlab, a permis de développer une méthode pour sélectionner une configuration optimale pour les systèmes de mise à la terre de type piquet.

Nzuru NSEKERE [5], dans son mémoire « **Contribution à l'analyse et à la réalisation des mises à la terre des installations électriques**

dans les régions tropicales » propose les Modèles le calcul par éléments finis en 2D et 3D axisymétriques pour évaluer la résistance de la terre à fréquence industrielle à certaines configurations d'électrodes. Ces modèles informatiques ont l'avantage d'être plus proche de la condition physique réelle. Ces résultats montrent que Les calculs axisymétriques sont beaucoup moins chers en termes de Temps et ressources de calcul car ils permettent aux grilles Beaucoup mieux. Il a également obtenu des chiffres fiables en mesurant Propriétés électriques des sols dans la région de Kinshasa République démocratique du Congo, des données très importantes conception mise à la terre.

Sossou HOUNDEDAKO [6], dans son travail sur le thème « **Identification de la résistivité du sol et de la résistance de prise de terre en milieu hétérogène par la méthode des éléments finis** » propose des modèles de calcul de la résistance de prise de terre et la résistivité du sol dans un modèle à multiple couches par la méthode des éléments finis à l'aide des logiciels FLUX2D dans le premier cas et FLUX3D dans le second afin de pouvoir identifier les paramètres de ce dernier. Par rapport à la résistance de prise de terre, il a déterminé des méthodes de calcul pour les modèles à une et deux couches et a procédé à leur validation par la loi de conservation de courant. Concernant la résistivité du sol, il a simulé la méthode de Wenner pour un modèle à une, deux et trois couches. De l'analyse des résultats obtenus, l'auteur constate que l'erreur est au maximum de 0,2% pour les prises de terre hémisphériques tandis que dans le cas des piquets, l'erreur varie de 4,3% à 6,2%. En ce qui concerne la simulation de la méthode de Wenner, il a abouti à des erreurs qui varient entre 0,48% et 1,96% pour un modèle à une couche et entre 0,69% et 2,56% pour un modèle à deux couches.

O. GOUDA, G. AMER, T. MEL-SAIED [7] : Dans cet article, « **Optimum design of grounding system in uniform and non-uniform soils Using ANN** » les auteurs se sont intéressés à l'évaluation des paramètres apparents du sol de modèle à deux couches et à la conception du

réseau de terre. Pour cela, ils décrivent une méthode artificielle de réseau neurologique (ANN) pour évaluer la résistivité apparente du sol de modèle à deux couches et la conception du réseau de terre. Les résultats obtenus sont très proches de ceux obtenus avec plusieurs méthodes analytiques conventionnelles. Cet outil a permis de déterminer les dimensions et la géométrie du réseau de terre afin d'obtenir une résistance satisfaisante du sol.

Lambert PIERRAT [8] : Dans l'article, « Maîtrise de la sécurité électrique dans les grandes installations : **Optimisation de la conception, du dimensionnement et N du coût des circuits de terre, communication France, 2009** » l'auteur s'est intéressé à la performance générale d'un circuit de terre qui selon lui, résulte d'un processus dans lequel interagissent différentes phases : conception, dimensionnement, optimisation technico-économique. A cet effet, il présente une approche méthodologique originale basée sur deux étapes analytiques successives permettant d'aboutir à une solution compatible avec la nature et la sévérité des contraintes imposées. La démarche est illustrée par l'étude d'une application concrète, relative à la sous-station électrique d'alimentation d'un grand complexe industriel. Cette démarche alternative consiste à utiliser une méthode de calcul analytique associée à une analyse plus approfondie des caractéristiques géologiques du sous-sol. Certes, Il perd un peu de précision sur le plan du dimensionnement électrique, mais ceci est largement compensé par une prise en compte plus réaliste de la résistivité, liée à la stratification du sous-sol.

A. PUTTARACH, N. CHAKPITAK, T. KASIRAWAT, and C. PONGSRIWAT [9], Dans la communication sur « **Substation grounding grid analysis with the variation of soil layer depth method. Faculty of Engineering, Chiang Mai University** » les auteurs présentent l'analyse d'une prise de terre en grille avec la variation de la profondeur de la grille. Cette analyse porte sur un cas pratique du sous- station de 22 kilovolts dont la grille est fabriquée à base du cuivre. Le résultat obtenu à partir d'un logiciel de

CDEGS a prouvé que la résistivité du sol à la sous-station est celle du modèle de sol à deux couches. Il montre aussi que la combinaison des piquets de terre à la grille lorsque la résistivité de la première couche est supérieure à celle de la couche inférieure, réduit considérablement l'élévation de potentiel au sol (GPR).

J.A. GÜEMES, F. RODRIGUEZ, J.M. RUIZ, F.E. HERMANDO [10] : « Determination of the ground resistance and distribution of potentials in grounding grids using FEM. University of the Basque Country; Plaza de la Casilla n°3,48012 Bilbao (Spain) », les auteurs ont utilisé la méthode des éléments finis à la résolution des modèles en 3D pour calculer la résistance du sol. Les résultats obtenus sont suffisamment meilleurs par rapport à ceux obtenus expérimentalement ou calculés par d'autres méthodes. La méthode est principalement indiquée pour le calcul de la résistance d'une prise de terre en grille asymétrique dans un sol stratifié à plusieurs couches ou non. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne prend en compte ni la géométrie de la grille, ni la configuration du sol.

L'effet d'un sol hétérogène composé de deux couches sur la résistance du système MALT a été considéré, où des expressions ont été produites, de la conception de MALT dans des sols dont le rapport de résistivité varie entre 1 à 100 [12]. Une méthode générale a été développée pour déterminer les propriétés électriques d'un système complexe de MALT dans un sol à deux couches. Cette méthode propose une simple approximation d'une formule qui sert à calculer la résistance de MALT [13]. Un sol à plusieurs couches a été considéré pour effectuer une analyse paramétrique sur le comportement des systèmes MALT où plusieurs cas illustrant des situations pratiques comme un sol totalement ou partiellement gelé [14]. Un modèle théorique a été présenté pour analyser les systèmes de mise à la terre qui se trouvent dans le voisinage ou à l'intérieur d'un sol hémisphérique et hétérogène. Les résultats numériques

obtenus montrent l'influence de la forme et de l'hétérogénéité du sol sur le comportement des systèmes de MALT [15].

D'autres paramètres à tenir compte lors d'une conception de système MALT sont la géométrie des électrodes où plusieurs relations ont été développées pour calculer la résistance pour chaque type d'électrode dans un sol homogène et hétérogène.

Parmi ces relations, pour un sol homogène, on trouve celle de Tagg qui permet de calculer la résistance d'une électrode hémisphérique [16] et de plusieurs tiges cylindriques verticales [17]. Pour les systèmes composés d'électrodes horizontales (grille) et verticales, le chercheur S.J. Schwarz a développé des formules pour le calcul de la résistance de l'ensemble de ces électrodes [8].

Pour un sol à deux couches, Tagg [17] a développé deux relations pour le calcul de la résistance dont la première considère que la tige est dans la couche supérieure du sol et la deuxième lorsque la tige est pénétrée dans les deux couches.

Dans certains cas, pour évaluer les performances d'un système MALT, on est confronté à des configurations d'électrodes ou structure du sol complexe qui rendent les calculs plus difficiles à réaliser. La méthode numérique est la solution à ce problème, car elle est bénéfique en termes de temps et de ressources et permet de se rapprocher le plus de la réalité physique. Pour ce faire, les simulations numériques se basent sur plusieurs méthodes de calculs comme la méthode des éléments finis.

Une méthode a été décrite pour le traitement des quantités globales, dans le cadre de la méthode des éléments finis, où elle a été appliquée à l'électrostatique, à la magnétostatique et à la magnétodynamique pour définir naturellement les charges électriques, les potentiels flottants, les flux magnétiques, les forces magnétomotrices, les courants et les tensions. La méthode des éléments finis.

1.2. Généralité sur les systèmes de mise à la terre

1.2.1. Définition d'un réseau de terre

La mise à la terre, parfois simplement appelée « la terre », est l'ensemble des moyens mis en œuvre pour relier une partie métallique conductrice à la terre. La mise à la terre est un élément important d'un réseau électrique, que ce soit en haute ou basse tension. Elle est caractérisée par sa résistance ou son impédance, elle doit être capable d'assurer l'écoulement du courant de défaut ou de courant de foudre, sans se détruire par échauffement. Pour ces raisons, les mises à la terre ont pour but d'éliminer des potentiels anormaux sur les masses.

Pour une installation ou une structure de faible étendue, on emploie l'expression « prise de terre », en réservant le terme « réseau de terre » à l'installation importante telle que celles des postes.

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, 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.

1.2.2. Rôle d'une mise à la terre

Le rôle d'une mise à la terre d'une installation électrique [1] est de permettre l'écoulement rapide à l'intérieur du sol de courants de défaut de toutes origines.

Lors de l'écoulement de tels courants par une prise ou un réseau de terre, des différences de potentiel peuvent apparaître entre certains points ou entre deux masses métalliques, par exemple entre la prise de terre et le sol qui l'entoure, ou entre deux points de sol. Les schémas de liaison à la terre seront

abordés sous l'aspect de leurs relations avec les réseaux de terre. La conception des prises et des réseaux de terre doit permettre, même dans ces conditions [1], d'assurer le maintien de :

- La sécurité des personnes et des animaux,
- La protection des installations de puissance,
- La protection des équipements sensibles,
- Le maintien d'un potentiel de référence.

1.2.2.1. Sécurité des personnes et des animaux

Lors de l'écoulement dans le sol de courant élevé, la sécurité doit être assurée à l'intérieur de l'installation électrique et ses abords immédiats par une limitation de la tension de pas et de la tension de touchée à des valeurs non dangereuses pour l'homme ou les animaux. Cette limitation est obtenue grâce à la connaissance et au contrôle de la répartition idéale dont on doit chercher à se rapprocher, est l'équipotentialité de l'ensemble des prises de terre.

➤ Tension de pas

Comme représenté dans la figure 1 suivante, la tension de pas est la différence de potentiels 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 [3] :

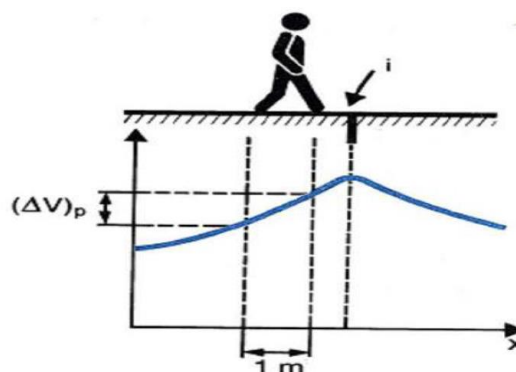


Figure 1 : Tension de pas.

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

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 :

$$U_p = \frac{\rho I}{2\pi d} \frac{\rho}{(d+\rho)} \quad (1.1)$$

Dans ce cas, pour un courant de foudre de valeur de crête $I = 50$ kA par exemple, la tension de pas à une distance de 30 m du lieu d'impact est de [3] :

$U_p = 855,67$ V pour $\rho = 100 \Omega \cdot m$ (Sétif par exemple) et

$U_p = 25,67$ kV pour $\rho = 3000 \Omega \cdot m$ (région tropicale par exemple).

La courbe de la figure 2 [4] donne la tension de pas en fonction de la distance pour une résistivité typique de $100 \Omega \cdot m$ à l'impact de courant $I = 50$ kA.

Cette courbe qualifie bien la diminution de la tension de pas avec l'éloignement du point d'écoulement du courant à la terre. Dans ce cas, la tension de pas qui valait 398 kV à 1 m du point d'impact, tombe à 856 V à une distance de 30 m et à 312 V à 50 m.

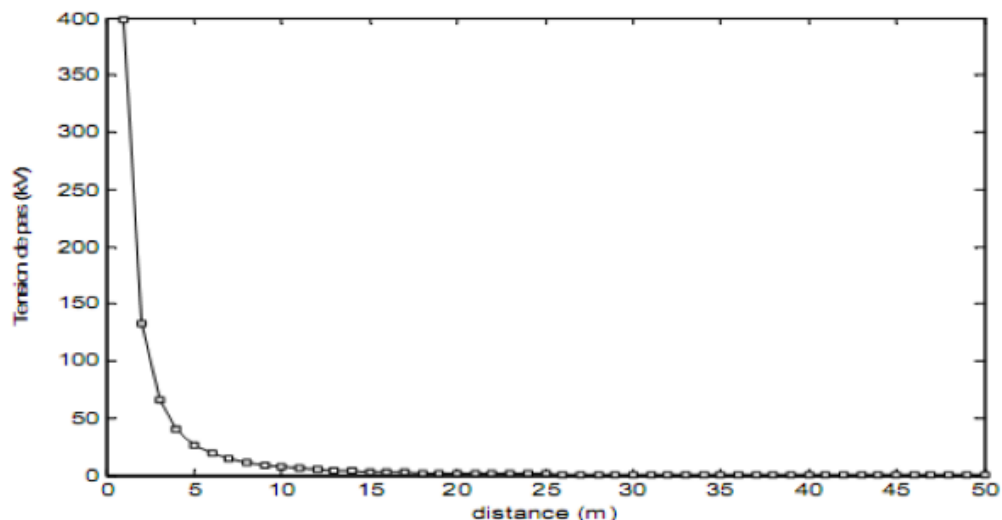


Figure 2 : Tension de pas en fonction de la distance

Cette tension cessera d'être dangereuse pour un être humain à 126 m du point d'impact. Tandis que pour une résistivité de $3000 \Omega.m$, cette distance sera de 690 m, dans un sol sec.

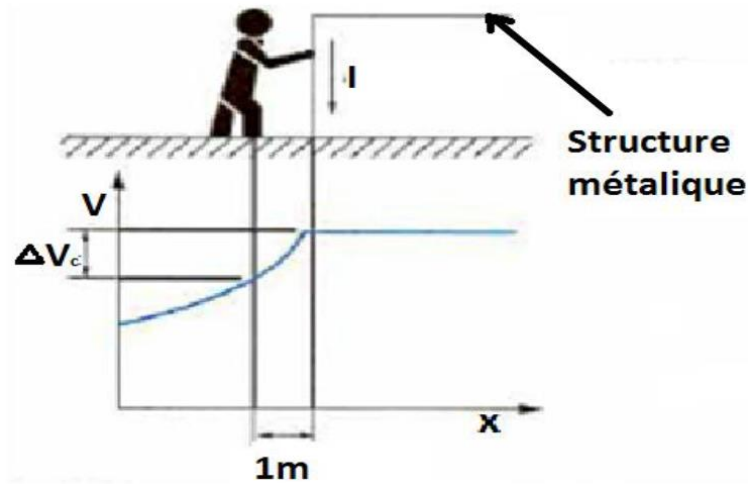


Figure 3 : Tension de touchée.

1.2.2.2. Protection des installations de puissance

Le réseau de terre des installations électriques, la prise de terre des supports de lignes, limitent les effets des surtensions provoquées par :

- ✓ Les défauts à 50 Hz,
- ✓ Les manœuvres d'appareillages dans les postes,
- ✓ Les surtensions d'origine atmosphérique.

Cette limitation est d'autant plus efficace que ces prises de terre facilitent l'écoulement du courant dans le sol, c'est-à-dire qu'ils présentent une impédance de terre faible, aussi bien pour les phénomènes lents (défauts à 50 Hz) que pour les phénomènes rapides tels que ceux engendrés par la foudre et par les manœuvres des disjoncteurs.

1.2.2.3. Protection des équipements sensibles

Dans les postes, à proximité des installations de puissance, on trouve des équipements fonctionnant à des niveaux de tension beaucoup plus faibles, équipements électroniques ou électromécaniques. Ces équipements sont

également exposés aux effets liés par couplage galvanique, inductif, capacitif ou plus généralement, électromagnétique.

1.2.2.4. Maintien d'un potentiel de référence

Les différents équipements placés dans une même installation doivent, lorsqu'ils sont reliés électriquement, rester fixes à un potentiel identique même pendant la durée des perturbations mentionnées plus haut.

1.2.3. Système de mise à la terre

Un système de mise à la terre est défini comme 'une connexion conductrice intentionnelle ou non intentionnelle entre un circuit électrique ou un équipement doté d'une terre et un corps conducteur servant de terre'. Il constitue en outre un moyen de déviation efficace des courants de défaut, des coups de foudre, des décharges électriques, des perturbations électromagnétiques et des interférences hautes fréquences. Cette protection a pour objectif d'assurer à l'utilisateur une mise à la terre garantissant toute sécurité à l'intérieur de l'installation.

1.2.4. Conception et réalisation des systèmes de mise à la terre

Les dispositions constructives des systèmes de mise à la terre doivent être appropriées à l'environnement de l'ouvrage et ceci pour garantir la sécurité des personnes et des biens et limiter le nombre de défauts dus aux amorçages en retour pour le cas d'un poste. Les systèmes de mise à la terre peuvent être assurés soit par la nature même des matériaux constituant la fondation (par exemple : pieu battu lisse), [2] soit par des aménagements appropriés (boucle de terre, piquet de terre...). Une liaison équipotentielle doit être réalisée entre la mise à la terre, les pieux et la virole ou l'armature métallique noyée dans le béton armé.

Plus généralement, et quelle que soit la configuration de la fondation d'un système de mise à la terre, il est nécessaire d'interconnecter tous les

éléments métalliques enterrés. D'autre part, les prises de terre doivent être dimensionnées, vis-à-vis de l'échauffement, de manière à éviter la diminution de leur résistance mécanique et la détérioration des matériaux environnants. La taille du conducteur doit être déterminée à partir des valeurs de courants de défaut de la ligne en tenant compte de la structure du réseau à long terme. Les électrodes, étant en contact direct avec le sol, celles-ci doivent être constituées de matériaux capables de supporter la corrosion (attaque chimique ou biologique, oxydation, électrolyse, ...) et les contraintes mécaniques. Ainsi, pour des sols à teneur élevée en chlorure, il y aura lieu d'utiliser des conducteurs en acier inoxydable spéciaux adaptés aux caractéristiques du sol.

1.2.4.1. Critères et contrainte à respecter

La conception des installations d'un système de mise à la terre doit répondre à des exigences :

- résister aux contraintes mécaniques et à la corrosion,
- supporter, d'un point de vue thermique, le courant de défaut le plus élevé calculé,
- limiter les perturbations apportées aux installations électriques,
- assurer la sécurité des personnes vis-à-vis des tensions apparaissant sur
- l'installation de mise à la terre lors du défaut à la terre,
- assurer la fiabilité de la ligne vis-à-vis de la foudre.

Les paramètres à prendre en compte au départ pour le dimensionnement des installations des systèmes de mise à la terre sont :

- ✓ les caractéristiques du sol,
- ✓ la valeur du courant de défaut,
- ✓ la durée du défaut,
- ✓ la distance vis-à-vis des ouvrages tiers ou des personnes.

Le facteur coût de réalisation sera également intégré au cours de l'étude pour comparer différentes solutions possibles.

1.2.4.2. Configurations

La configuration d'un système de mise à la terre dépend de la nature de la structure connectée et de l'environnement. Un système de mise à la terre peut être composé d'un ou plusieurs sous-systèmes qui ne sont pas nécessairement connectés directement mais sont mutuellement influencés par couplage électromagnétique. On représente ainsi en figure 4, le cas d'un réseau de transport. Chaque système de mise à la terre est relié en un ou plusieurs points de connexion au réseau électrique [11].

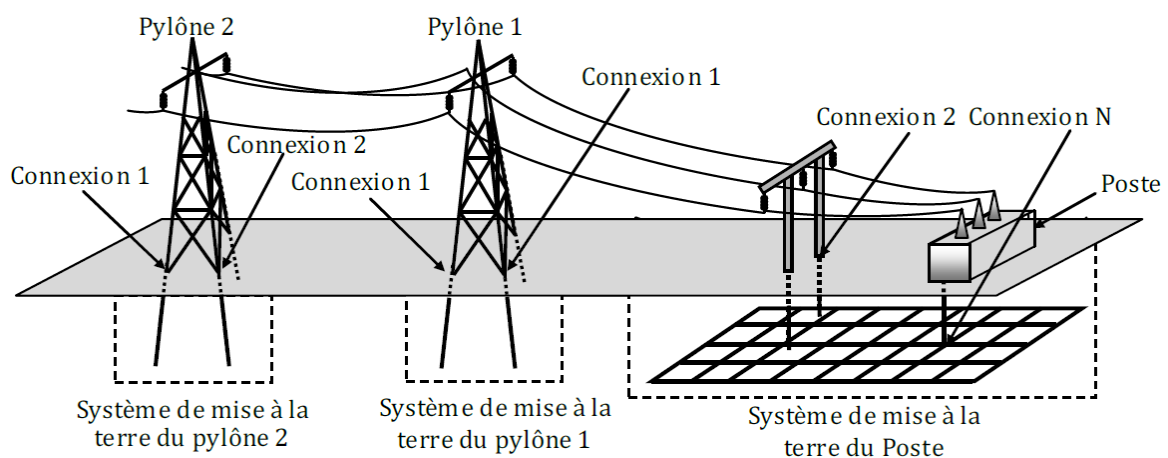


Figure 4 : Réseau du transport

1.2.5. Différents types de prise de terre

Il y'a deux types de systèmes de prise de terre les systèmes simples et les systèmes complexes [15].

✓ Systèmes simples

Ils sont constitués, comme montré sur la figure 5.a de piquets ou tubes métalliques verticaux, rubans ou câbles enfoncés dans le sol à une profondeur supérieure à 1m, et couramment de 3 à 30 m ou plus. Les terres individuelles représentent le type de mise à la terre le plus utilisé.

✓ Systèmes complexes

Ils se composent de prises de terre multiples reliées entre elles, de systèmes maillés ou de réseau de grilles placé horizontalement à faible profondeur, comme le montre dans la figure 5.b.

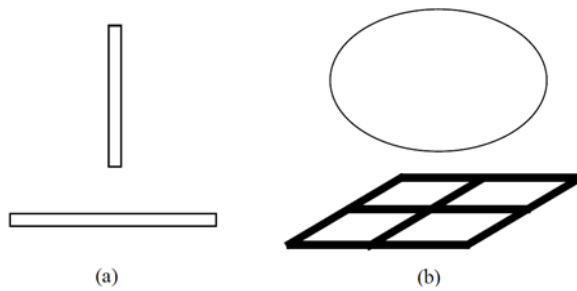


Figure 5 : Systèmes simples (a) et systèmes complexes de terre(b).

1.3. Mesure de la résistance de système de mise à la terre

Le problème de la détermination de la résistance d'un réseau de terre est extrêmement complexe. A part les méthodes de calculs analytiques et numériques (voir l'annexe 1), il est nécessaire dans la pratique d'utiliser des électrodes auxiliaires d'une part pour injecter du courant dans la prise de terre étudiée et d'autre part pour mesurer l'élévation de potentiel de cette dernière. Parmi ces méthodes on peut citer :

- Méthode des trois points (triangle) ;
- Méthode de chute de potentiel (Fall of potential)

1.3.1. Méthode des trois points (triangle)

On utilise deux électrodes auxiliaires E1 et E2 associées à l'électrode de mesure E [8]. On injecte du courant électrique I entre les électrodes E et E2 et on mesure la différence de potentiel entre E et E1 (figure 6). Les mesures se font plusieurs fois, en écartant les électrodes jusqu'à ce que les valeurs des résistances mesurées soient constantes. C'est une méthode peu recommandée à cause de son manque de précision. Elle nécessite, par ailleurs, la déconnection de la barrette de terre avant la mesure.

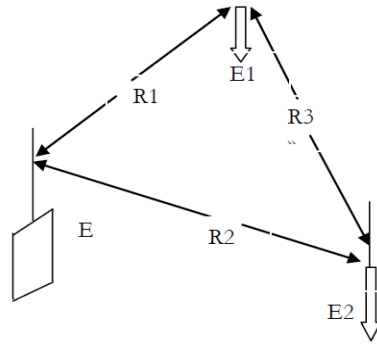


Figure 6 : Méthode des trois points.

1.3.2. Méthode de chute de potentiel (Fall of potential)

C'est la méthode appliquée presque pour tous les types de réseau de terre [19.21], elle nécessite l'emploi de deux électrodes auxiliaires pour permettre l'injection de courant et la référence de potentiel 0V [22].

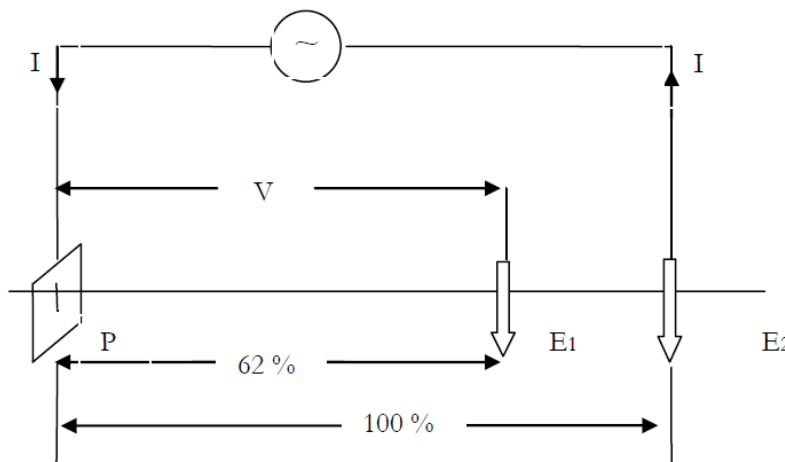


Figure 7 : Méthode de chute de potentiel.

La position des deux électrodes auxiliaires, par rapport à la prise de terre à mesurer $E(X)$, est déterminante. Pour effectuer une bonne mesure, il faut que la « prise auxiliaire » de référence de potentiel (E_1) ne soit pas plantée dans les zones d'influences des terres E et H (figure 8), zones d'influence créées par la circulation du courant. Des statistiques de terrain ont montré que la méthode idéale pour garantir la plus grande précision de mesure consiste à placer le piquet E_1 à 62 % de E sur la droite EE_2 [16] comme le mentionne la figure 7.

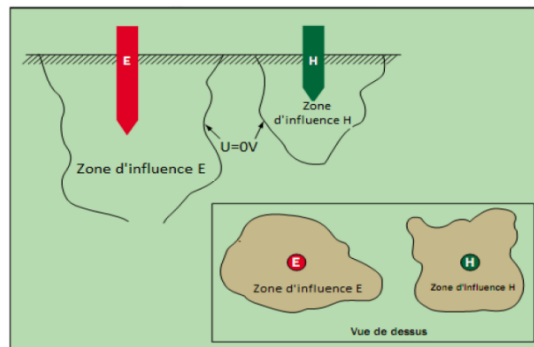


Figure 8 : Zones d'influence

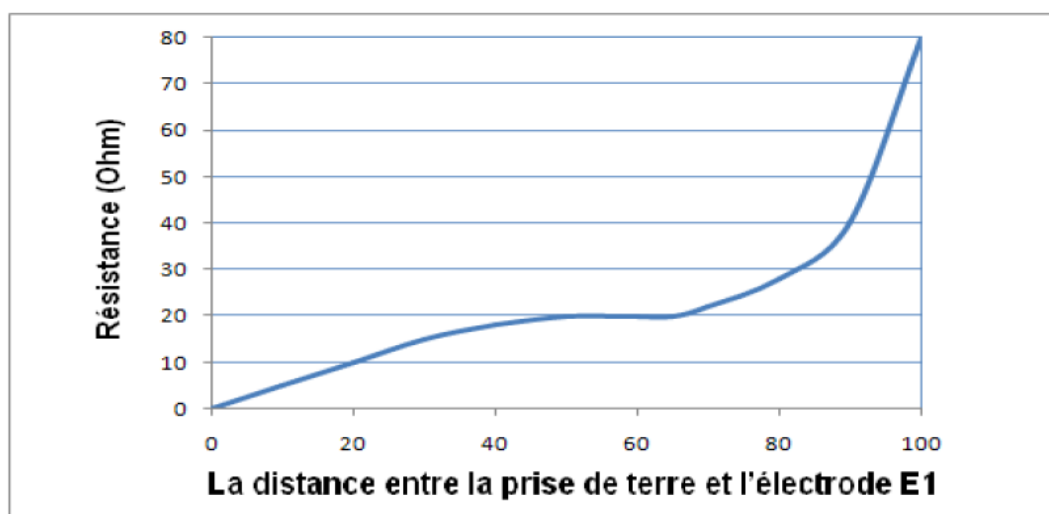


Figure 9 : Méthode du 62 %

Il convient ensuite de s'assurer que la mesure varie peu en déplaçant le piquet E_1 à $\pm 10\%$ de part et d'autre de sa position initiale et ceci toujours sur la droite EE_2 . Si la mesure varie, cela signifie que (E_1) se trouve dans une zone d'influence : Il faut donc augmenter les distances et recommencer les mesures. Cette méthode nécessite également, la déconnection de la barrette de terre avant la mesure. C. Korasli propose une nouvelle méthode très pratique pour mesurer la résistance de la mise à la terre en utilisant des sondes capacitives au lieu des électrodes dans les districts urbanisés où il est difficile d'appliquer les électrodes comme l'indique la figure 10 [23],[24]. Il a été démontré que les

sondes capacitives peuvent être utilisées avec succès à la place des sondes à tige dans les champs ayant une structure du sol dur et l'espace limité.

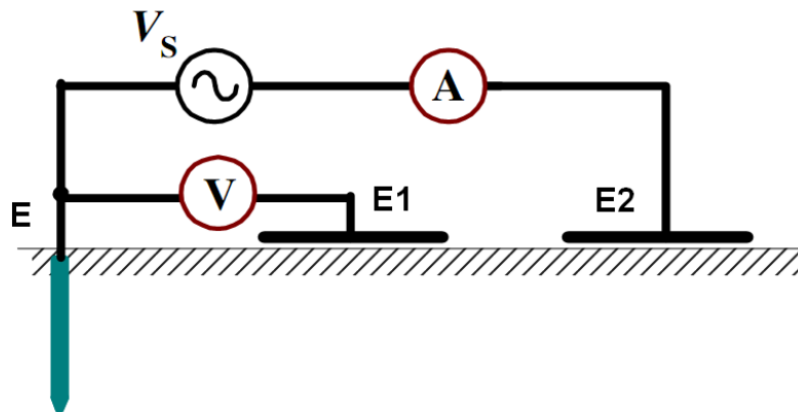


Figure 10 : Méthode de chute de tension utilisant des sondes capacitives

Kazuo Murakawa et Hiroshi Yamane proposent une autre méthode de mesure sans l'utilisation des électrodes auxiliaires lorsque la surface du sol est couverte par des chaussées ou des pierres (difficulté de l'utilisation d'électrodes auxiliaires) comme il est montré sur la figure 11 [25]. Un fil conducteur est relié à la prise de terre à l'essai, et le fil de retour est raccordé uniquement à un générateur de signal V_s , a est le diamètre des fils et h est le diamètre du l'isolant. $(\epsilon_1 \mu_1 \sigma_1)$, et $(\epsilon_2 \mu_1 \sigma_2)$ sont la permittivité, la perméabilité et la conductivité des fils et de la terre respectivement.

L'impédance interne de fil $z(\omega)$ est :

$$z(\omega) = R_g + Z_o \frac{1+r_R \exp(-2\gamma_1 L_2)}{1-r_R \exp(-2\gamma_1 L_2)} \quad (2.12)$$

Sachant que

$$Z_o = 60 \log \frac{2h}{a} \text{ et } \gamma_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1}$$

R_g est la résistance de prise de terre, r_R est le coefficient de réflexion du fil de retour, γ_1 est la longueur d'onde du fil de retour, L_1 et L_2 sont les longueurs des fils, on peut trouver R_g en changeant la fréquence de générateur V_S jusqu'à la valeur minimum de $Z(\omega)$.

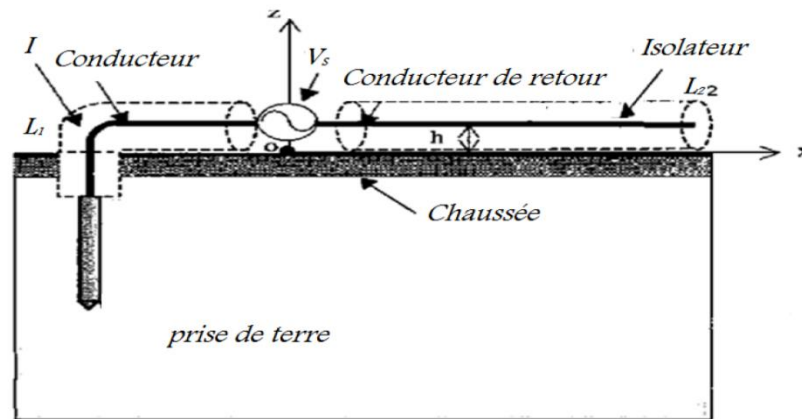


Figure 11 : Méthode de mesure sans électrodes auxiliaires.

1.4. Amélioration de la résistance d'une mise à la terre

En régions de forte résistivité des sols, les configurations habituelles de mise à la terre ne permettent pas d'obtenir des résistances et des impédances relativement faibles [16], selon les normes. Il faut alors trouver des moyens efficaces pour réduire ces résistances (impédances). De nombreuses solutions existent mais il nous faudra choisir celles qui minimisent le coût des installations, tout en respectant les normes. Dans les paragraphes qui suivent, nous allons énumérer ces différents moyens et évaluer l'impact de l'amélioration des résistances des mises à la terre qu'ils permettent.

1.4.1. Augmentation de la longueur de l'électrode

La figure 12 montre les valeurs des résistances pour différentes valeurs de la longueur de l'électrode cylindrique de rayon 0,0125 m, pour un sol homogène de résistivité 100 Ωm (La relation (1.1)) [26]. Cette figure montre que l'augmentation de la longueur de l'électrode réduit la résistance. Il est noté que cette affirmation n'existe que rarement en pratique, les mesures sont donc nécessaires. En plus, l'augmentation de la longueur induit l'augmentation de l'inductance du piquet, donc de son impédance, ce qui est mauvais pour les

courants en hautes fréquences. La longueur effective d'une électrode de terre est sa longueur pour laquelle le coefficient impulsionnel est égal à 1.

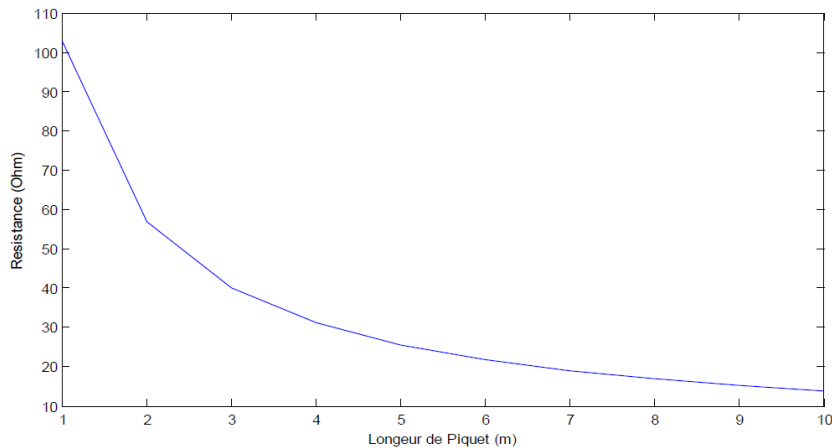


Figure 12 : Variation de la résistance de terre en fonction de la longueur de l'électrode de terre

Le coefficient impulsionnel est le rapport entre l'impédance impulsionnelle et la résistance en basse fréquence. Gupta et Thapar ont donné la relation analytique suivante pour calculer la longueur effective [27].

$$I_{eq} = 1.4\sqrt{\rho\tau_1} \quad (2.13)$$

Où ρ est la résistivité du sol et τ_1 le temps de monté de l'onde de courant de foudre en μs .

1.4.2. Augmentation de la distance entre électrodes

La figure 13 montre la résistance de plusieurs configurations possibles des prises de terre de rayon $r = 0,0125$ m, et longueur $l = 2$ m, en fonction de la distance entre elles, pour un sol homogène de résistivité $\rho = 100 \Omega m$ [15].

L'espace entre deux conducteurs D est donné par [11] :

$$D = \frac{2.L_x.L_y}{L-L_x-L_y} \quad (2.14)$$

L_x : longueur du poste

L_y : longueur du poste

L : Longueur totale du réseau maillé

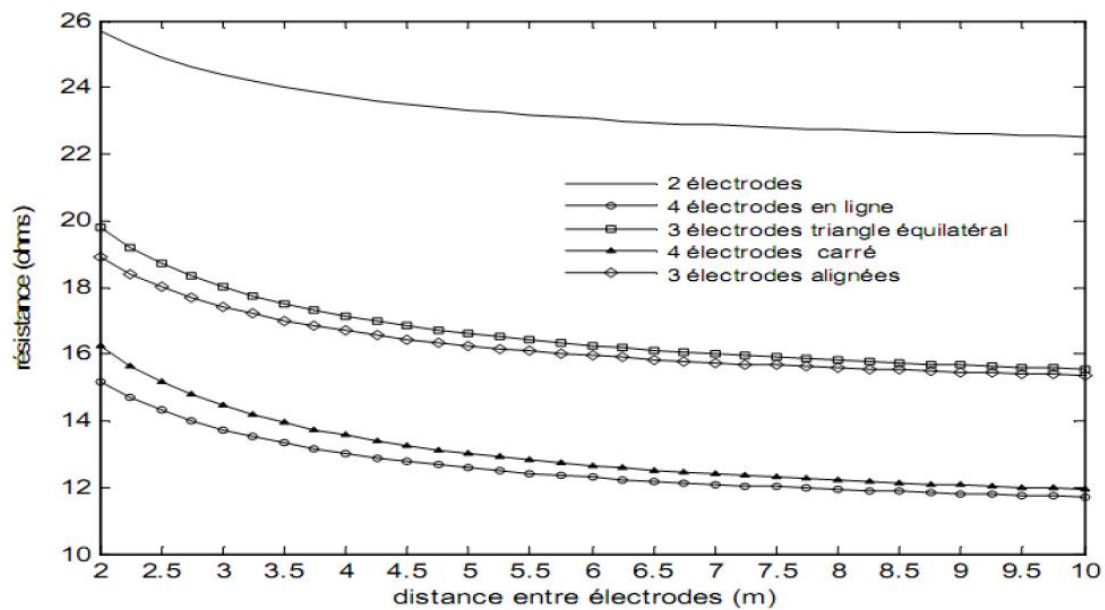


Figure 13 : Résistance en fonction de la distance entre les électrodes cylindriques.

Nous remarquons bien que pour des distances entre électrodes juste supérieures à la longueur de celle-ci, la réduction de la résistance des piquets est assez sensible et diminue avec l'augmentation de la distance (par exemple, pour 3 électrodes au sommet d'un triangle équilatéral, la résistance subit une diminution de 13 % quand la distance passe de 2 m à 3 m, alors que quand elle passe de 2 m à 10 m, la réduction n'est que de 21 %). Ceci montre une fois de plus que pour des raisons de coût et d'espace, il y a une limite quant à la distance entre les électrodes. La littérature renseigne que la distance de 6 m entre les électrodes est économiquement une limite du coût de la mise à la terre [28]

1.4.3. Augmentation du nombre d'électrodes

On peut réduire la résistance d'une mise à la terre en augmentant le nombre d'électrodes. La littérature indique que l'augmentation du nombre d'électrodes diminue la résistance mais pas d'un facteur inverse [28]. La figure 14 montre la résistance d'une mise à la terre en fonction du nombre d'électrodes cylindriques [15] pour une configuration en ligne droite et pour une distance

entre électrodes égale au double de la longueur des électrodes, soit $l = 2$ m, $d = 4$ m, $r = 0.0125$ met $\rho = 100 \Omega.m$

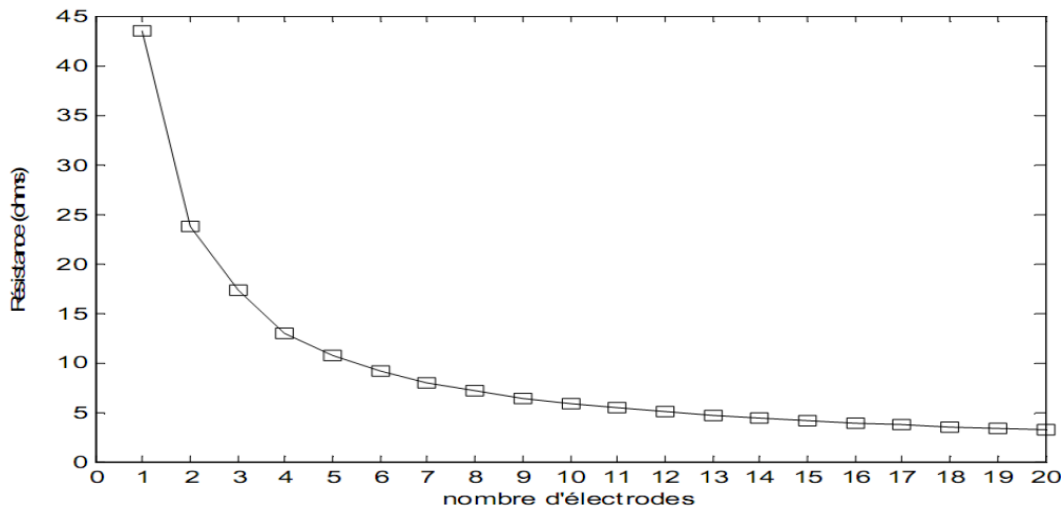


Figure 14 : Caractéristique $R=f(n)$

Cette figure montre bien l'impact de l'augmentation du nombre d'électrodes. Par exemple en passant d'une à 20 électrodes, la résistance est divisée par 10, comme souligné précédemment. La meilleure réduction de la résistance a lieu quand on passe d'une à deux électrodes. Au fur et à mesure que l'on augmente le nombre d'électrodes, la réduction de la résistance devient plus faible. Ce moyen est le plus utilisé pour obtenir une résistance de mise à la terre réduite. Il demande, néanmoins, de l'espace et augmente le coût de la mise à la terre.

Nombre de conducteur en parallèle [15]:

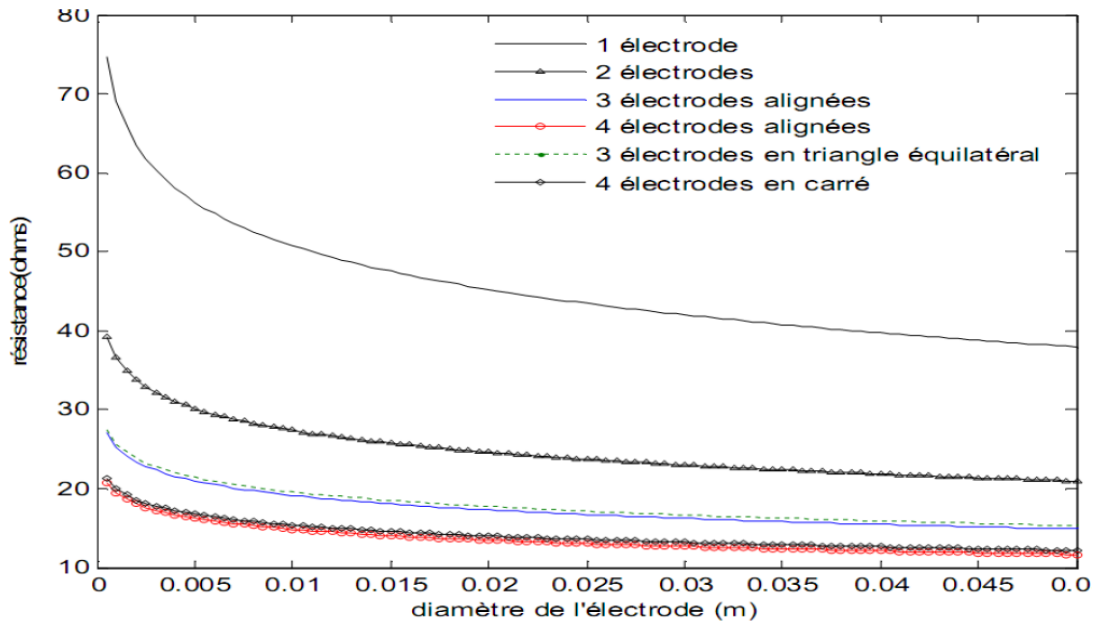
$$n = \frac{L_x}{D} + 1 \quad (2.15)$$

D = diamètre de l'électrode

l_x = longueur de l'électrode

1.4.4. Augmentation du diamètre de l'électrode

Soit une électrode verticale en cuivre de 2 m de longueur, dans un sol de $100 \Omega.m$. La résistance de la mise à la terre en fonction du diamètre de



l'électrode pour plusieurs configurations en appliquant la relation de Dwight Sunde (l'équation (A2.2)) est donnée à la figure suivante [15] :

Figure 15 : Résistance en fonction du diamètre de l'électrode cylindrique verticale

Cette figure montre que pour une électrode cylindrique, en multipliant le diamètre par 10, la résistance est réduite de 43 % pour une électrode, de 30 % pour deux électrodes, 29 % pour trois, 28 % pour 4 électrodes en ligne et 27 % pour 4 électrodes aux sommets d'un carré). Ceci montre qu'il n'y a pas beaucoup d'intérêt à augmenter dans des larges proportions le diamètre de l'électrode à cause des problèmes de coût. Nous rappelons ici que pour une électrode cylindrique pleine, multiplier le diamètre par 10 revient à multiplier le volume (le prix également) par 100, pour la même longueur, alors que la résistance, quant à elle, n'est réduite que de 30 % en moyenne. Le calcul de section des conducteurs est fait selon la norme ANSI :

$$s = 0.7 \cdot I_{cc} \cdot \sqrt{\frac{\frac{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r \cdot 10^4}{T_{cap}}}{\ln\left[1 + \frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a}\right]}} \quad (2.16)$$

S : Section du conducteur en (mm^2).

I_{cc} : Courant de court-circuit maximal en (kA).

t_c : Durée maximale de défaut (1s).

α_r : Coefficient thermique de la résistivité à la température de référence.

ρ_r : Résistivité du conducteur de terre à la température de référence.

T_{cap} : Capacité thermique.

T_m : Température maximale admissible typique pour les connections serties.
(300°C)

T_a : Température ambiante dans le sol. (30°C)

K₀ : Coefficient = $[1/\alpha_r] - Tr.$ ($K_0 = 234$)

Tr : Température de référence. (20 °C)

Le tableau ci-dessous montre quelques sections des conducteurs pour différents courant de court-circuit.

Tableau 1 : Les sections normalisées obtenues en fonction des courant I_{cc}

Sections (mm^2)	Courants de court circuit (kA)
75,5	< 20
93,3	$20 < I_{cc} \leq 24$
116,2	$24 < I_{cc} \leq 31,5$
147,1	$31,5 < I_{cc} \leq 40$
181,6	$40 < I_{cc} \leq 63$

Conclusion

Dans ce chapitre, une introduction sur les systèmes de mises à la terre a été présentée basée sur une étude bibliographique. L'importance et le rôle de ce système a été expliqué et les paramètres qui jouent un rôle très important dans sa conception. On parle des caractéristiques électriques du sol comme la résistivité et les facteurs qui influencent sur elle ainsi que la résistance d'une

prise de terre. Quelques formules simples de calcul de leur résistance ont été présentées dans un sol homogène. Nature du sol est un élément important dans la configuration de prise de terre, elle est considérée dans le prochain chapitre.

CHAPITRE 2 : ETUDE GEOLOGIQUE DU SOL

Introduction

Le comportement d'un système de mise à la terre dépend beaucoup des caractéristiques électriques de son environnement immédiat, c'est-à-dire du sol et des fondations. La connaissance de la résistivité réelle aux diverses profondeurs est l'une des bases nécessaires pour déterminer la configuration d'un réseau de terre. [1]

2.1. Nature du sol

La nature des sols du territoire béninois est très variée. Elle dépend de la position géographique. Il existe de nombreux types de sol et les caractéristiques électriques correspondantes ne sont pas évidentes à déterminer. Néanmoins, avec les abaques qui existent aujourd'hui dans les documents scientifiques nous pouvons déterminer une approximation de ces caractéristiques lorsqu'on connaît le type du sol.

Le comportement électrique du sol est caractérisé par les trois grandeurs suivantes :

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

La permittivité et la perméabilité interviennent également dans la détermination de la résistivité du sol.

2.2. Résistivité du sol

Le sol 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 [17] :

- la nature des sols,
- composition chimique des sels,
- concentration des sels dissous dans l'eau contenue,
- le taux d'humidité, la température.

Le tableau ci-dessous donne une indication sur les résistivités des différents types de sol [18]

Tableau 2 : Résistivités moyennes des différents types de sol

Nature du terrain	Résistivité ($\Omega.m$)	Nature du terrain	Résistivité ($\Omega.m$)
Terrain marécageux	De quelques unités à 30	Calcaires fissurés	500 à 1000
Limon	20 à 100	Schistes	50 à 300
Humus	100 à 150	Calcaire tendre	100 à 500
Tourbe humide	5 à 100	Calcaires compacts	1000 à 5000
Argile plastique	50	Sol pierreux nu	1500 à 3000
Marnes et argiles compactes	100 à 200	Sol pierreux recouvert de gazon	300 à 500
Sable argileux	50 à 500	Micaschistes	800
Sable siliceux	200 à 3000	Granits et Grès	100 à 10000

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

2.3. Mesure des résistivités des sols

Il a été précisé dans le chapitre I que la conception d'un réseau de terre doit débuter par une étude de la résistivité du sol dans lequel il sera réalisé. Pour un réseau de terre, il est nécessaire de connaître le profil de la résistivité du sol suivant la profondeur, de manière à choisir la disposition des conducteurs de terre et à prévoir les caractéristiques électriques du réseau de terre.

Diverses méthodes sont utilisées pour déterminer la résistivité d'un terrain. Mentionnons rapidement le prélèvement d'échantillons et la méthode des <deux électrodes > qui ne fournissent que des indications très locales, et par conséquent insuffisante, voir trompeuse, pour la conception des prises de terre. On utilise parfois la mesure de la résistance de terre d'une électrode de forme connue (piquet, par exemple) pour déterminer la résistivité du terrain qui l'entoure. Cette méthode a l'avantage de fournir une mesure globale, mais elle ne s'applique bien que si la prise de terre à implanter est de dimensions comparables à celles de l'électrode utilisée comme référence.

La méthode la plus utilisée pour déterminer la résistivité du sol est celle des « quatre électrodes » qui possède deux variantes, la méthode de « WENNER » et celle de « SCHLUMBERGER », qui se distinguent par la disposition des piquets de mesure.

2.3.1. Méthode des quatre électrodes

Pour connaître au juste d'un point O la résistivité du sol en fonction de la profondeur, on fait circuler à l'aide d'un générateur G un courant I entre deux prises de terre ponctuelles de très petites dimensions A et B (figure 16). En sol homogène de résistivité, la valeur du champ électrique E au point O qui est du à la présence des charges électriques de signes contraires venant de A et de B, a pour valeur. [9]

$$E = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{I}{AO^2} + \frac{I}{OB^2} \right) \quad (2.1)$$

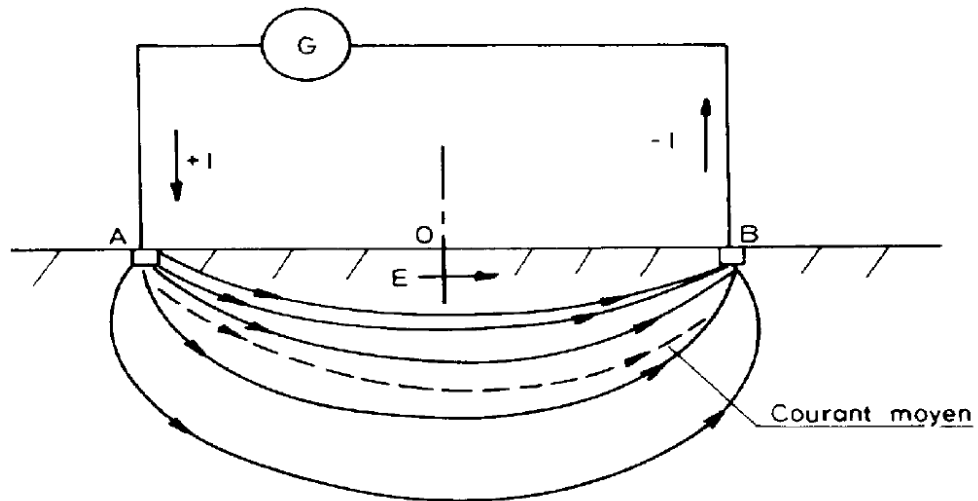


Figure 16 : Mesure de la résistivité à l’aplomb du point O

Si le point O est situé au milieu de AB, tel que $AO=OB=X$, on en déduit la formule suivante de la résistivité du sol sous le point O :

$$\rho = \pi x^2 \frac{E}{I} \quad (2.2)$$

Le sol étant rarement homogène, la formule exprime la résistivité apparente des couches cumulées du sol sous le point O jusqu’à la profondeur atteinte par le filet de courant moyen circulant entre les électrodes A et B.

En pratique, on détermine le champ électrique en faisant le rapport entre la différence de potentiel ΔV , qui existe entre deux sondes de terre C et D disposées symétriquement par rapport à O, et leur écartement ΔL . [9]

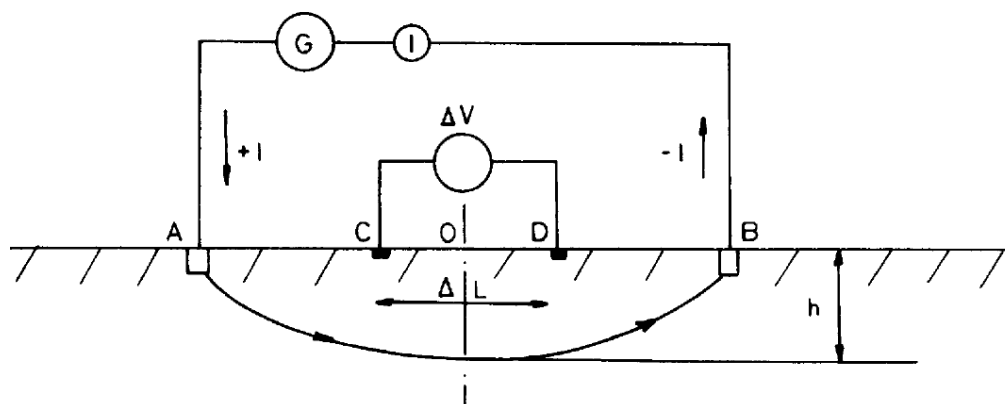


Figure 17 : Principe de mesure de la résistivité apparente

Le champ électrique s’écrit comme suit :

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta L} \quad (2.3)$$

La différence de potentiel ΔV peut être exprimée en fonction de la distance respective des point C et D par rapport aux courant $+I$ et $-I$. On obtient la relation suivante :

$$\Delta V = V_C - V_D = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AC} - \frac{1}{CB} \right) - \left(\frac{1}{AD} - \frac{1}{DB} \right) \right] \quad (2.4)$$

On en déduit la valeur de la résistivité apparente ρ des couches cumulées du sol sous le point O :

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{AC} - \frac{1}{CB} - \frac{1}{AD} + \frac{1}{DB}} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (2.5)$$

C'est la formule générale pour la mesure de la résistivité apparente des sols, quelle que soit la longueur des segments en négligeant l'enfoncement des piquets dans le sol. Le terme V/I est la résistance R qui est mesurée avec telluromètre à quatre bornes dont le circuit volumétrique est relié aux prises C et D et le circuit ampère métrique aux prises A et B. [1]

Dans le cas où le sol est homogène, la résistivité apparente est identique à la résistivité réelle.

2.3.2. Méthode de WENNER

La méthode de mesure de la résistivité apparente des sols la plus utilisée est celle de WENNER dans laquelle les quatre électrodes sont disposées en ligne équidistantes. L'appareil de mesure est un telluromètre classique. Les deux électrodes extrêmes sont celle d'injection du courant de mesure ; les deux centrales sont les électrodes de mesure du potentiel ΔV .

Le point O de mesure de la résistivité se trouve au milieu d'un système, entre les électrodes de potentiel. La distance «a» entre deux électrodes adjacentes est appelée «base de mesure», la distance entre les électrodes extrêmes est la «ligne d'émission», (elle est égale à «3a» avec la méthode de WENNER).

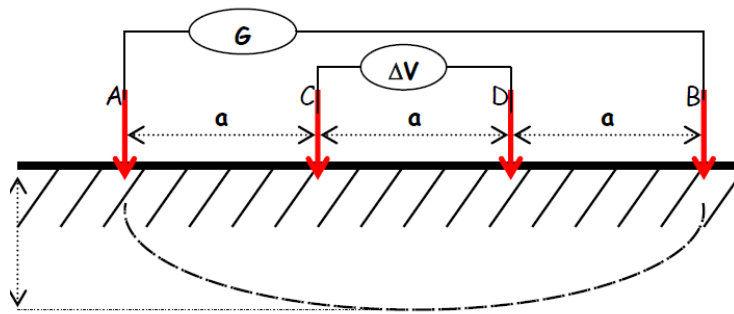


Figure 18 : Schéma de mesure de la méthode de quatre électrodes.

La formule générale pour la mesure de la résistivité apparente des sols à partir de la méthode de WENNER pour un sol homogène :

$$\rho = 2\pi aR \quad (2.6)$$

ρ : Résistivité en ($\Omega.m$)

a : Distance entre électrodes en (m)

R : Valeur lue sur le telluromètre (Ω)

La résistance R qui est mesurée avec un telluromètre à quatre bornes dont le circuit voltmétrique est relié aux prises C et D et le circuit ampèremétrique aux prises A et B.

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.7)$$

Depuis plusieurs dizaines d'années, les formules simples ont été développées pour calculer la résistance d'une mise à la terre en modélisant le sol en deux couches. La résistivité apparente du sol est alors donnée par la relation suivante,

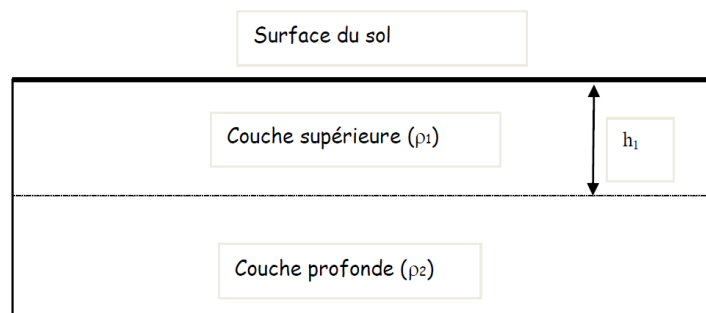


Figure 19 : Sol en deux couches de résistivités différentes.

Depuis plusieurs dizaines d'années, des formules simples ont été développées pour calculer la résistivité d'une mise à la terre en modélisant le sol en deux couches. Tagg [Tagg G.F, Earth Resistances, George Newness LTD, London, 1964.] établira une relation de la résistivité apparente du sol, donnée par la relation suivante :

$$\rho(a) = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1+(2n\frac{h}{a})^n}} - \frac{K^n}{\sqrt{4+(2n\frac{h}{a})^n}} \right] \quad (2.8)$$

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (2.9)$$

avec :

a : la distance entre les électrodes de terre lors de la mesure, ρ_1

h : la profondeur de la couche supérieure de résistivité,

k : coefficient de réflexion, donné par la relation suivante,

ρ_1 : la résistivité de la couche supérieure du sol.

ρ_2 : la résistivité de la couche profonde du sol.

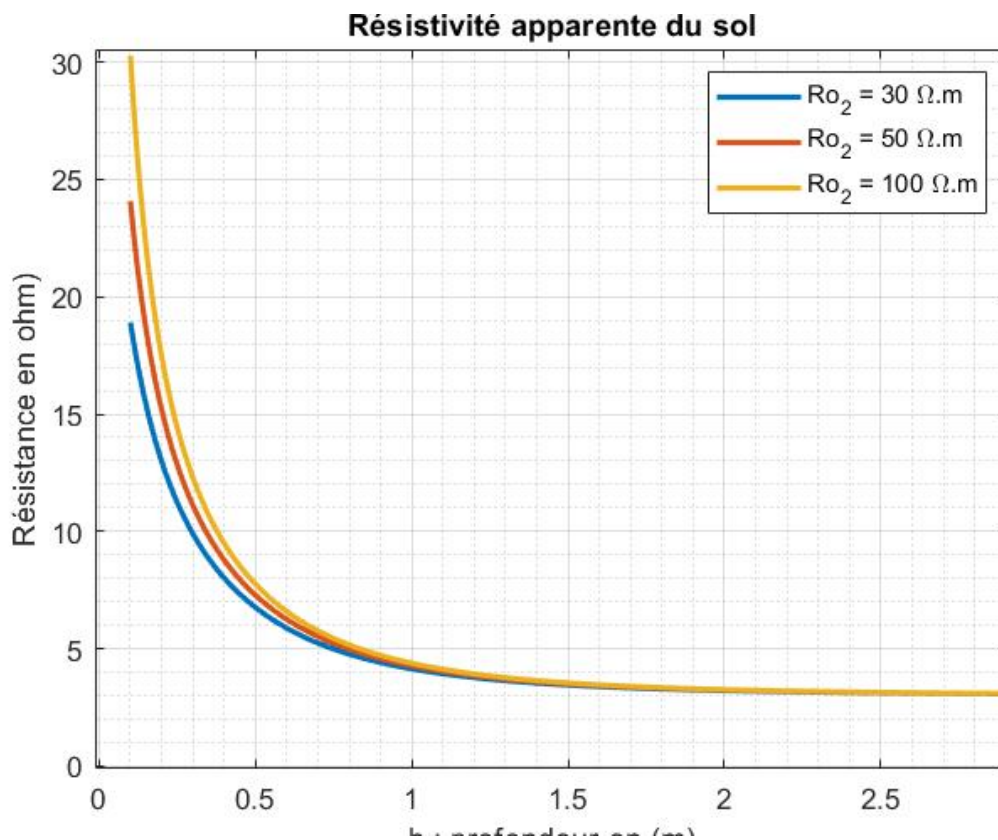


Figure 20 : Résistivité apparente d'un sol hétérogène à deux couches en fonction de la profondeur de la première couche : cas où $\rho_1 < \rho_2$

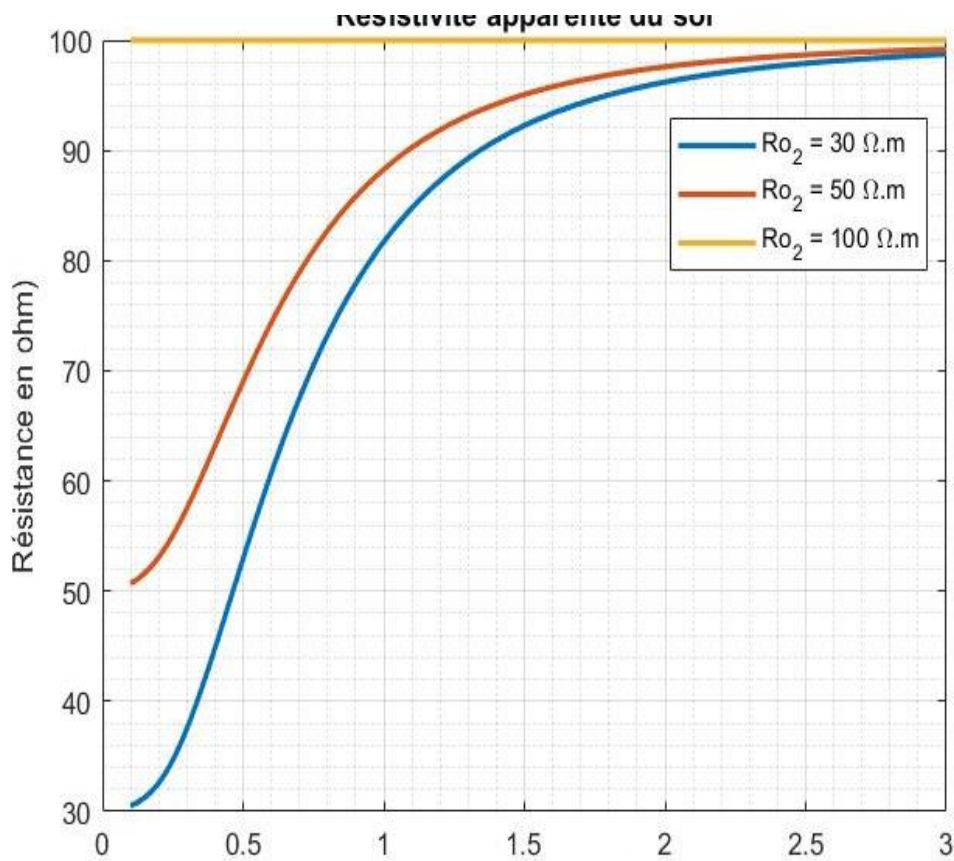


Figure 21 : Résistivité apparente d'un sol hétérogène à deux couches en fonction de la profondeur de la première couche : cas où $\rho_{o1} > \rho_{o2}$

Une autre méthode est proposée par Rajab I [Rajab Ibsaim Amer Ali Ammar Performance Assessment And Modeling Of Grounding Grid Case Study of Alkhom 400kV Substation Department of Electrical & Electronics Faculty of Engineering Zawia University University Bulletin – ISSUE, N°. 16, Vol.1, February - 2014]. Cette méthode basée sur la méthode des expressions finis de résistivité de Wenner. L'expression de série infinie de résistivité apparente est donnée par l'équation suivante :

$$\rho(a) = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1+(2n\frac{h_1}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4+(2n\frac{h_1}{a})^2}} \right] \quad (2.10)$$

L'expression finis pour une résistivité ρ_a lorsque $\rho_2 < \rho_1$,

$$\rho_a = \rho_2 + (\rho_1 - \rho_2) [2e^{-b(a)a} - e^{-b(2a)a}] \quad (2.11)$$

Où

$$b = \frac{1}{h} \left[b_m - (b_m - x_1) e^{-\frac{x_2 a}{h}} \right] \quad (2.12)$$

$$b_m = x_3 - x_4 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{x_5} \quad (2.13)$$

Les valeurs de x_1 , x_2 , x_3 , x_4 et x_5 et sont respectives 0.673191, 0.479513, 1.33335, 0.882645 et 0.697106.

Avec h_1 , la profondeur de la couche supérieure de résistivité ρ_1 .

K, coefficient de réflexion, donné par la relation

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (2.14)$$

ρ_2 , la résistivité de la couche profonde du sol.

ρ_1 , la résistivité de la couche supérieure du sol.

Une autre méthode est proposée par Rajab I [39, 40]. Cette méthode basée sur la méthode des expressions finis de résistivité de Wenner. L'expression de série infinie de résistivité apparente est donnée par l'équation suivante :

2.3.1. Sol en plusieurs couches de résistivités différentes

Cette modélisation de sol en différentes couches qui peuvent être verticales ou horizontales requiert des méthodes numériques ou graphiques car les méthodes analytiques sont limitées. On peut aussi considérer le sol comme uniforme en lieu et place du sol en plusieurs couches de résistivités différentes. La résistivité apparente ρ_a du sol supposé homogène peut, dans ce cas, être trouvée par les deux relations suivantes [Standard 80-2000 : IEEE guide for safety in AC substation grounding, 2000].

$$\rho_a = \frac{\rho_a(1) + \rho_a(2) + \dots + \rho_a(n)}{n} \quad (2.15)$$

Où $\rho_a(1)$, $\rho_a(2)$, $\rho_a(3)$, ..., $\rho_a(n)$, sont les résistivités de n différentes couches du sol mesurées avec la méthode de quatre électrodes

$$\rho_a = \frac{\rho_a(\max) + \rho_a(\min)}{2} \quad (2.16)$$

Où $\rho_a(\max)$ et $\rho_a(\min)$ sont les valeurs respectivement maximale et minimale de la résistivité des différentes couches du sol.

2.3.2. Traitement des sols pour réduire la résistivité

Comme évoqué précédemment, la résistivité du sol dépend de plusieurs facteurs : la nature des sols, la profondeur des courants dans le sol, le taux d'impuretés, la salinité, le taux d'humidité, la température, Il y a moyen de réduire la résistivité en traitant le sol avec des produits tels que le charbon de bois, la bentonite et le sel. La norme CEI 62305-3 recommande les matériaux à utiliser comme électrode de mise à la terre et les risques de corrosion en présence d'autres matériaux dans le sol, pour les mises à la terre de protection contre la foudre d'autres produits sont disponibles sur le marché pour ce faire [16]. Dans tous les cas, il faut éviter une solution tendant à réduire les performances de la mise à la terre avec le temps. Dans la suite, nous allons évaluer l'influence d'une couche de matière de résistivité plus faible que la terre entourant les électrodes de terre dans les performances des mises à la terre. En plus, l'utilisation des produits chimiques est dans la plupart de cas proscrite à cause des risques de pollution des sols [2].

2.3.3. Ajout d'une matière de résistivité réduite entourant l'électrode

Cette technique permet d'entourer l'électrode de terre d'une couche de matière peu résistive [25], tel que présenté sur la figure 20 ci-dessous.

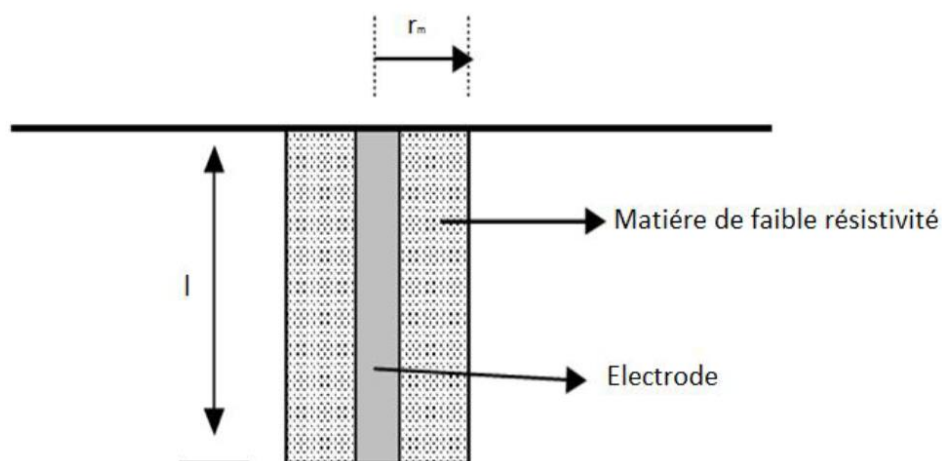


Figure 22 : Ajout d'une matière de faible résistivité autour de l'électrode

Cette matière ne devra pas causer une corrosion aux piquets. Plusieurs produits de faible résistivité sont utilisés (la bentonite par exemple), ou encore le charbon de bois dans les régions tropicales. La figure 21 représente la variation de la résistance de terre en fonction de la longueur de l'électrode de terre sans et avec la couche de bentonite [26], cette courbe est tracée pour une électrode verticale en cuivre de 2 -32 m de longueur et de rayon 4 mm, dans un sol de résistivité 1300 Ω .m. La résistivité de la matière entourant l'électrode étant de 10 Ω .m. La réduction de résistance justifie l'intérêt de bentonite. Une relation analytique ci-dessous, utilisée par Fagan et Lee a été donnée pour évaluer la résistance d'une telle électrode verticale [14]:

$$R_m = \frac{1}{2rl} \left\{ \rho_m \left[\ln \left(\frac{r_m}{r} \right) \right] + \rho \left[\ln \left(\frac{4l}{r_m} \right) - 1 \right] \right\} \quad (2.17)$$

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.

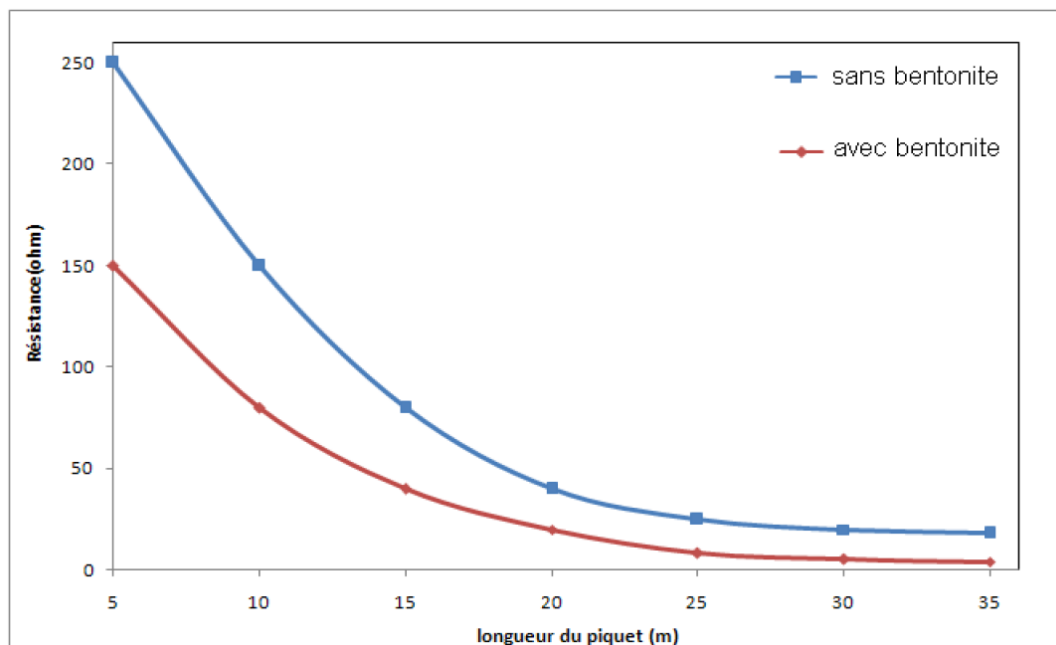


Figure 23 : Caractéristiques $R=f(l)$ sans et avec la couche de bentonite.

La résistivité électrique du charbon de bois a été évaluée et plusieurs références en donnent des résultats. Lev Weiner indique que les mesures effectuées sur un échantillon de la poudre de charbon de bois avaient donné une résistivité assez faible de quelques ohmmètres, dépendant de l'espèce du bois utilisée pour fabriquer le charbon de bois [15]. Il est donc intéressant de faire usage de la poudre de charbon de bois autour des piquets de terre car la résistivité diminue avec la diminution de la taille des grains. QingboMeng, Jinliang He et F. P. Dawalibi proposent une nouvelle technique pour réduire la résistance de sol [29]. Cette méthode nécessite trois étapes :

- faire des trous profonds dans le sol ;
- faire des fissures dans le sol à l'aide des explosifs dans les trous ;
- remplir les trous avec des matériaux de faible résistivité sous pression.

Un réseau complexe de fissures de faible résistivité en forme d'arbre lié à la grille est formé comme l'indique la figure 22. Jinliang He et GangYu proposent une autre technique permet l'utilisation des trous profonds dans le sol et de diminuer la résistance de mise à la terre [30]. La prise de terre est ainsi formée par un tube métallique avec des ouvertures latérales qui permettent la pénétration d'eau souterraine, qui a la capacité de recueillir l'eau et de mouiller l'environnement au tour de sol comme schématiser sur la figure 21. Cette nouvelle méthode a été appliquée dans les zones où la terre contient beaucoup d'eaux souterraines.

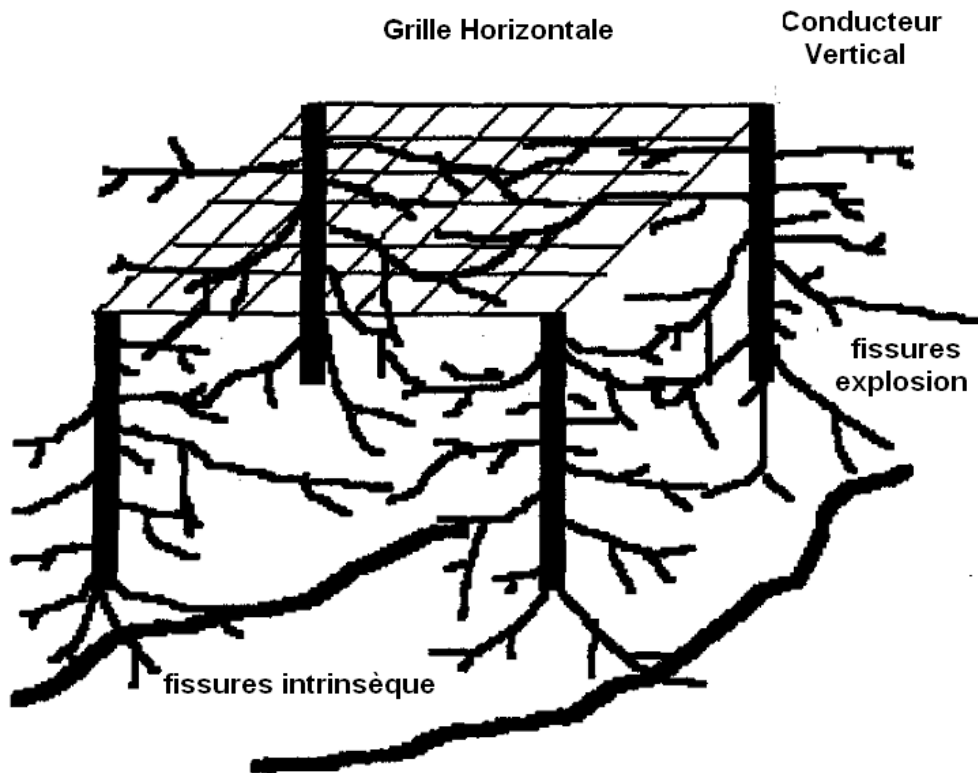


Figure 24 : Réseau de terre avec des fissures de faible résistivité.

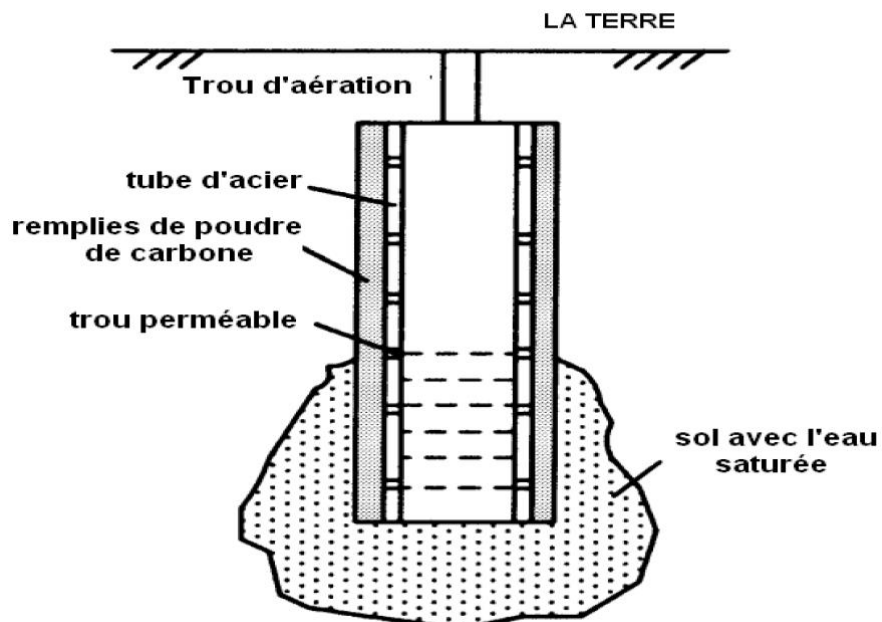


Figure 25 : Prise de terre avec trous profonds

Conclusion

Dans ce chapitre, une présentation de la généralité des systèmes de prises terre a été présentée. L'importance et le rôle de ce système a été expliqué et les paramètres qui jouent un rôle très important dans sa conception. Quelques formes simples d'électrodes et des méthodes d'amélioration de la résistance de terre ont été également présentées. Le prochain chapitre fera l'objet des différents calculs.

CHAPITRE 3 : OPTIMISATION DES CONFIGURATIONS DES RESEAUX DE MISE A LA TERRE

Introduction

Plusieurs méthodes permettent le calcul de la résistance de prise de terre, il s'agit de la méthode analytique et celle des éléments fins.

3.1. Principe général de la méthode des éléments finis (EF)

On considère le domaine délimité par la frontière γ . Le problème consiste à déterminer un champ $u(M,t)$ définie sur Ω , qui est une solution d'équations aux dérivées partielles et d'équations ordinaires en tout point M et à tout instant t en respectant les conditions aux limites sur γ . La variable t représente le temps et si elle est présente, on parle d'un problème d'évolution sinon le problème est dit stationnaire.

Pour résoudre ce problème par la méthode des EF, on procède par les étapes suivantes :

- choisir une formulation intégrale du système différentiel à résoudre et de ses conditions aux limites : Formulation faible,
- le maillage qui consiste à diviser le domaine Ω en n sous domaine Ω_i ,
- la discrétisation qui consiste à trouver des valeurs à attribuer aux entités géométriques pour décrire la solution approchée,
- la résolution,
- le post-traitement où la solution approchée va être construite à partir des valeurs trouvées aux nœuds et déduire d'autres grandeurs.

Tagg, Rudenberg, Dwight, Sunde et beaucoup d'autres auteurs [26] 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). 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.

3.2 Différentes configurations

Plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer les paramètres d'un réseau de terre. Nous allons présenter les modèles de calcul de la résistance de terre :

3.2.1 Piquet

Un piquet de terre vertical est représenté par la figure 24 suivante :

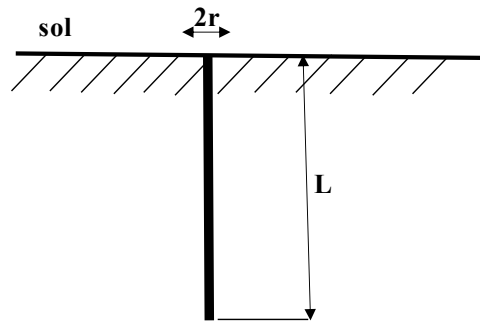


Figure 26 : Piquet de terre

Trois modèles ont été développés dans la littérature pour la détermination de la résistance d'un piquet de terre vertical, de forme cylindrique. [5]

3.2.1.1 Modèle de Rudenberg

Expression du calcul de la résistance de terre pour piquet de terre vertical d'après Rudenberg est donnée par :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{d} \right) \quad (3.1)$$

Avec :

ρ : la résistivité ;

l : la longueur du piquet ;

d : la distance entre piquets.

3.2.1.2 Modèle de Dwight-Sunde

Cette expression selon le modèle de Dwight-Sunde est donnée :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (3.2)$$

Avec :

- ρ : la résistivité ;
- l : la longueur du piquet ;
- d : la distance entre piquets.

3.2.1.3 Modèle de LIEW-DARVENIZA

Expression de calcul de la résistance par le modèle de LIEW est donnée par :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{r+1}{R} \right) \quad (3.3)$$

Avec

- ρ : la résistivité ;
- l : la longueur du piquet ;
- r : le rayon du piquet ;

3.2.2 Electrodes en ligne droite

La figure 25 ci-dessous représente les électrodes en ligne droite

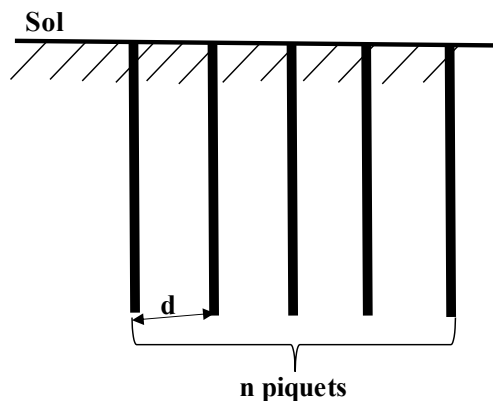


Figure 27 : Electrodes en ligne droite

La résistance équivalente de deux électrodes en ligne droite est donnée par la formule suivante : [5]

$$R_{eq} = R \left(\frac{1+\alpha}{2} \right) \quad (3.4)$$

Avec :

$$\alpha = \frac{r_{eq}}{d} \quad (3.5)$$

- d : la distance entre piquets.

La résistance équivalente de trois électrodes en ligne droite est donnée par la formule suivante :

$$R_{eq} = R \left(\frac{2+\alpha-4\alpha^2}{6-7\alpha} \right) \quad (3.6)$$

En général, pour N électrodes en ligne droite, pour $d > l$, la résistance équivalente est donnée par la relation approchée suivante :

$$R \approx \frac{1}{n} \left[\frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \frac{\rho}{\pi d} \left(\frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} \right) \right] \quad (3.7)$$

ρ : la résistivité ;

l : la longueur du piquet ;

r : le rayon du piquet ;

d : la distance entre piquets ;

n : le nombre de piquets

3.2.3 Electrodes aux sommets d'un triangle équilatéral

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

$$R_{eq} = R \left(\frac{1+2\alpha}{3} \right) \quad (3.8)$$

3.2.4 Electrodes sur les côtés d'un carré

La figure 26 représente les dispositions des électrodes.

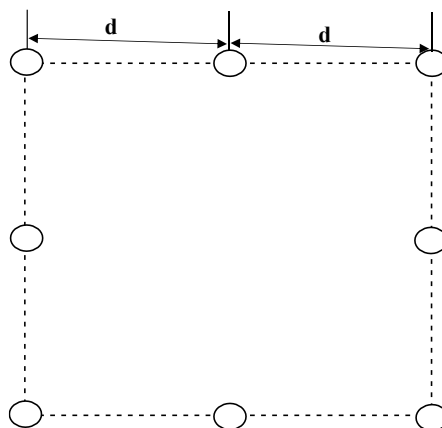


Figure 28 : Electrode sur les côtés d'un carré.

Soit N le nombre d'électrodes, la résistance équivalente est donnée par la relation suivante [41] :

$$R_N = R \left(\frac{1+K\alpha}{N} \right) \quad (3.9)$$

Les coefficients k sont donnés par le tableau ci-dessous :

Tableau 3 : Coefficients k pour des électrodes sur les côtés d'un carré [41]

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

3.2.5 Electrodes sur la circonférence d'un cercle

La disposition des électrodes se présente comme suit :

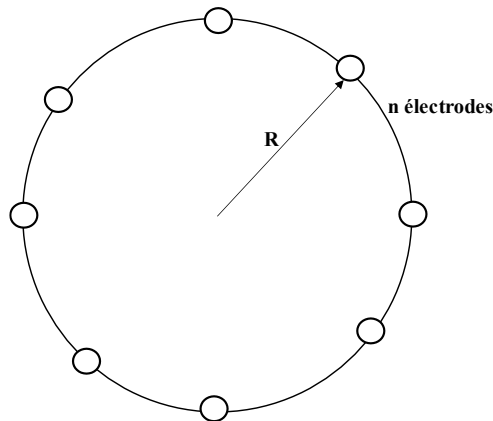


Figure 29 : Electrodes sur une circonférence.

La résistance équivalente est donnée par la relation suivante :

$$R_N = R \left[\frac{1+0,5\alpha + \alpha \sum_{S=1}^{S=(\frac{n}{2}-1)} \cos\left(\frac{S\pi}{n}\right)}{n} \right] \quad (3.10)$$

Avec $\alpha = \frac{r}{R}$

Dans ce cas, la distance entre deux électrodes est donnée par la relation suivante:

$$d = 2R \sin \frac{2\pi}{R} \quad (3.11)$$

3.2.6 Hémisphère

La figure 28 est celle de l'hémisphère

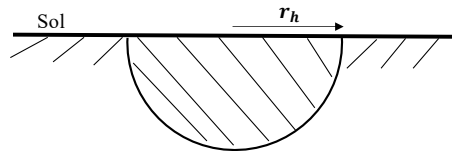


Figure 30 : l'hémisphère.

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

$$R = \frac{U}{I}, \text{ on aura donc :}$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_h} - \frac{1}{X} \right) \quad (3.12)$$

Si $X \rightarrow \infty$,

Cette relation est la plus simple expression qui représente la résistance d'une mise à la terre réalisée avec une électrode hémisphérique. L'hypothèse $x \rightarrow \infty$ donne un résultat autant précis que x est très grand [1]

$$R = \frac{\rho}{2\pi r_h} \quad (3.13)$$

r_h : le rayon de l'hémisphère

3.2.7 Câble enterré horizontalement

Le câble enterré sont représentés par la figure 29

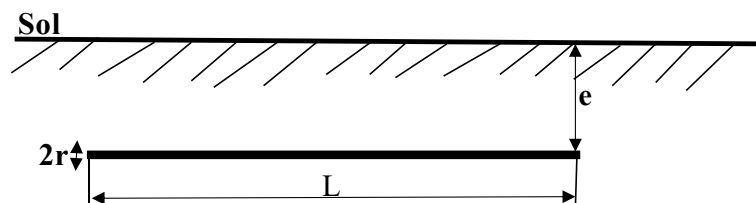


Figure 31 : Câble enterré horizontalement.

L'expression du calcul de la résistance :

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2re}} - 1 \right) \quad (3.14)$$

ρ : la résistivité ;

l : la longueur du câble ;

r : le rayon du piquet ;

e : la profondeur

2 câbles proches de longueur l , écartés de la distance d ($d \ll l$), enfouis à la même profondeur e

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2redd'}} - 1 \right) \quad (3.15)$$

$$\text{Avec } d' = \sqrt{d^2 + 4e^2}$$

Plusieurs câbles rayonnants de longueur l , enfouis de la profondeur e

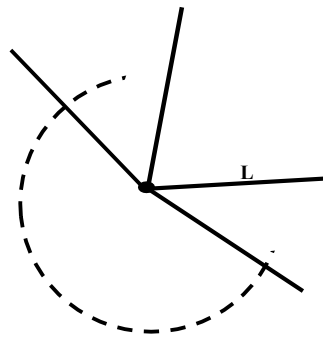


Figure 32 : Câbles enterrés horizontalement.

$$R = \frac{\rho}{n\pi l} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2re}} - 1 + N(n) \right) \quad (3.16)$$

n : nombre de « rayons » (supposés régulièrement disposés)

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

3.2.8 Disque

Le disque est représenté comme suit :

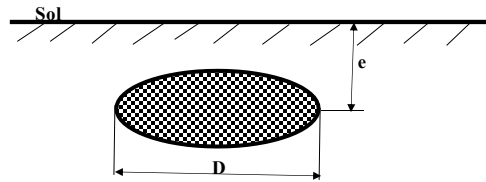


Figure 33 : Câbles enterrés horizontalement.

Avec e la profondeur et d le diamètre du disque, on a :

$$e \ll d$$

$$R = \frac{\rho}{4d} \left(1 - \frac{4e}{d}\right) \quad (3.17)$$

$$e \gg d$$

$$R = \frac{\rho}{8d} + \frac{\rho}{8\pi e} \quad (3.18)$$

ρ : la résistivité ;

d : le diamètre du disque ;

e : la profondeur

3.2.9 Réseau maillé superficiel

Le réseau maillé est représenté sur la figure ci-dessous :

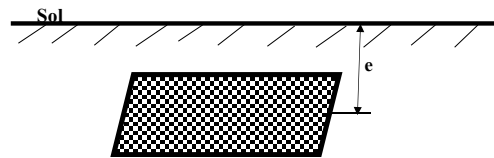


Figure 34 : Câbles enterrés horizontalement.

Avec e la profondeur et p petit devant les dimensions de la maille

P : le périmètre

L'expression de la résistance est donnée par [41]:

$$R = \frac{2\rho}{p} \quad (3.19)$$

3.2.10. Boucle enterrée

La figure 35 est celle de la boucle enterrée

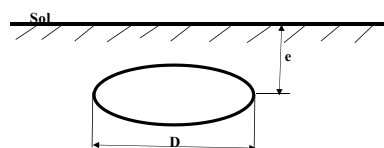


Figure 35: Boucle enterrée.

Avec e la profondeur, d le diamètre du disque et r le rayon l'expression de la résistance est :

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 d} \ln \frac{8d^2}{er} \quad (3.20)$$

ρ : la résistivité ;

d : le diamètre de la boucle enterrée ;

e : la profondeur

Nous avons plusieurs expressions qui permettent de calculer des résistances de prise de terre selon le type terre réalisé. Quatre type de configuration de terre ont été abordé dans le cadre de nos travaux :

- **Câble horizontal**
- **Boucle enterrée**
- **Un Pique**
- **n piquets**

3. 3. Résistance de prise de terre dans un sol homogène

Dans le cas d'un sol homogène, des considérations ont été faites pour nos différentes simulations sur Matlab. La résistivité est commune à toutes les configurations et vaut $\rho = 100\text{ohm.m}$. Pour les cas des câbles et boucle enterrés, nous avons varié la profondeur tout en traçant la résistance en fonction de la longueur pour le câble enterré et en fonction du diamètre pour la boucle. Pour les configurations à base des piquets de terre, la résistance est tracée en fonction de la longueur des piques.

❖ Câble enterré

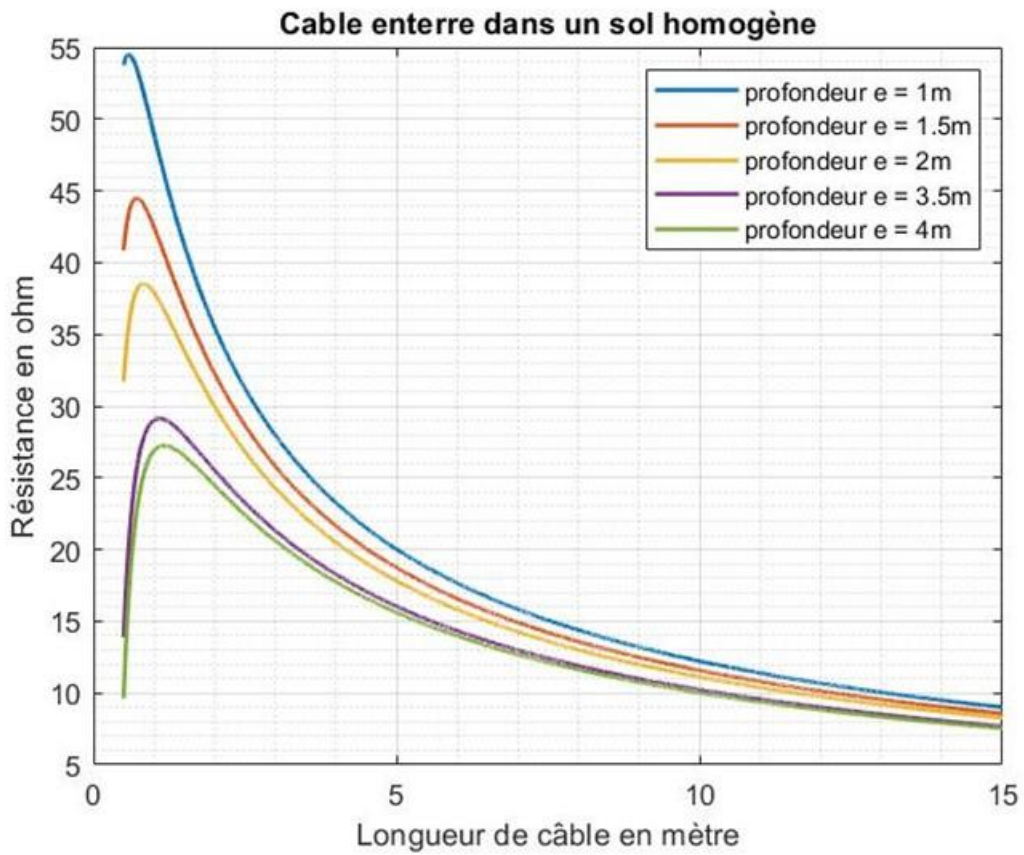


Figure 36 : Résistance de terre en fonction de la longueur de câble pour différente valeur de profondeur (sol homogène)

❖ Boucle enterrée

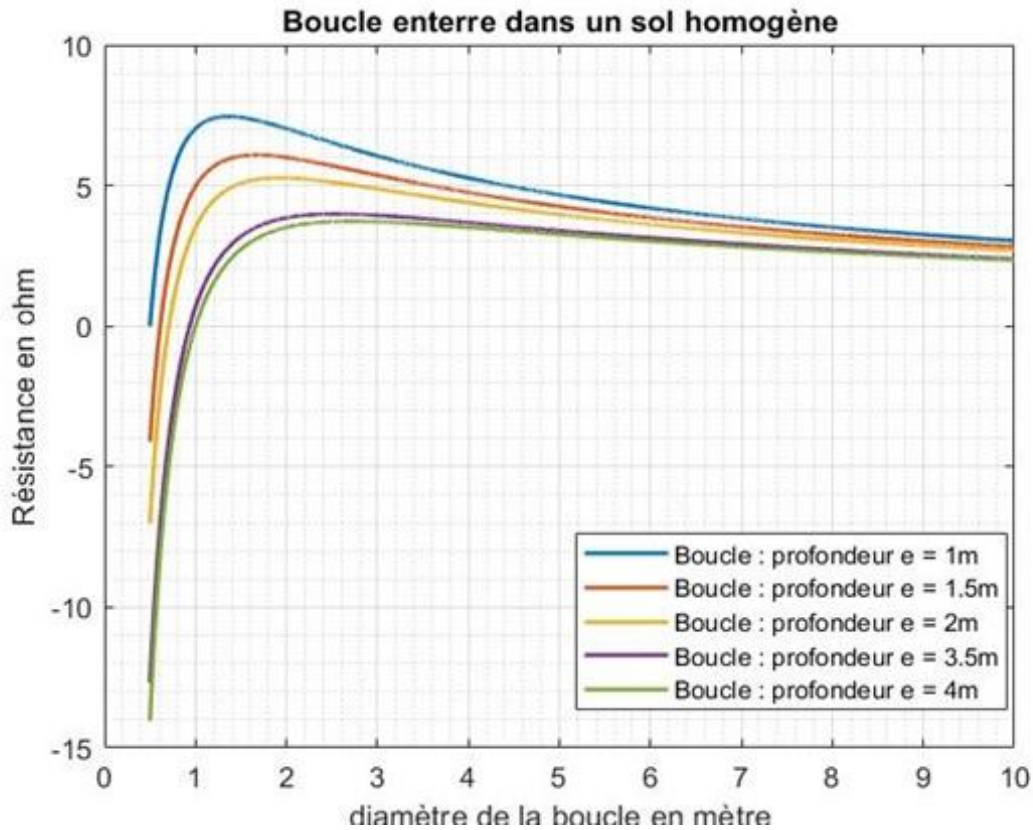


Figure 37 : Résistance R de terre en fonction du diamètre de la boucle pour différentes profondeurs (sol homogène)

❖ Piquet

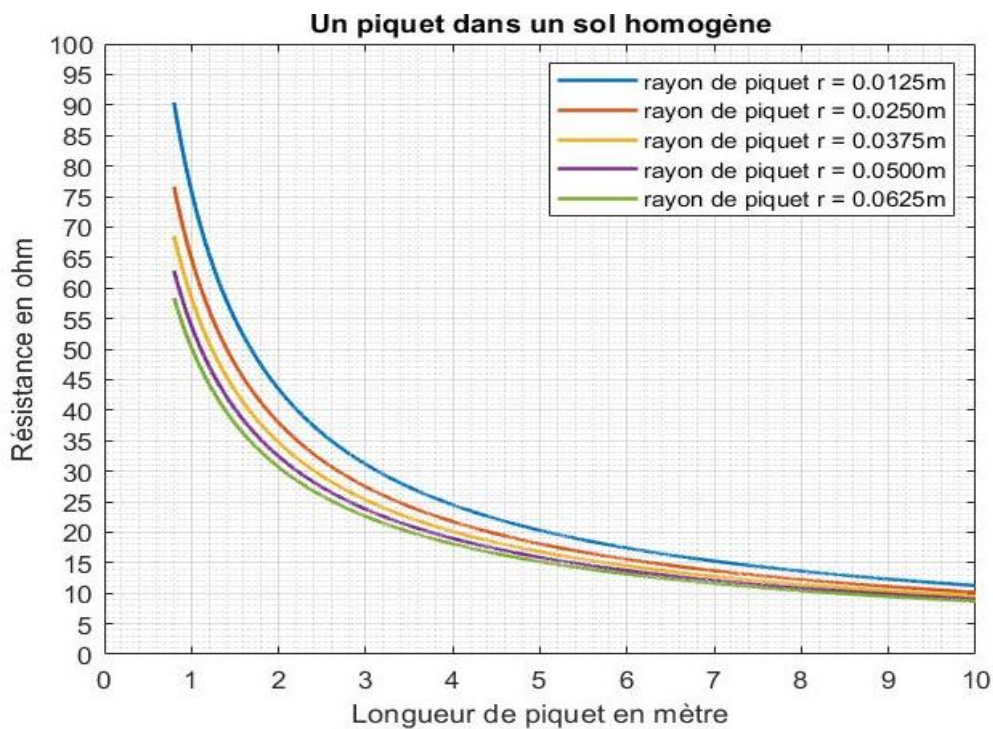


Figure 38 : Résistance R de terre en fonction de la longueur de piquet pour différents rayons (sol homogène)

❖ Plusieurs piquets (a)

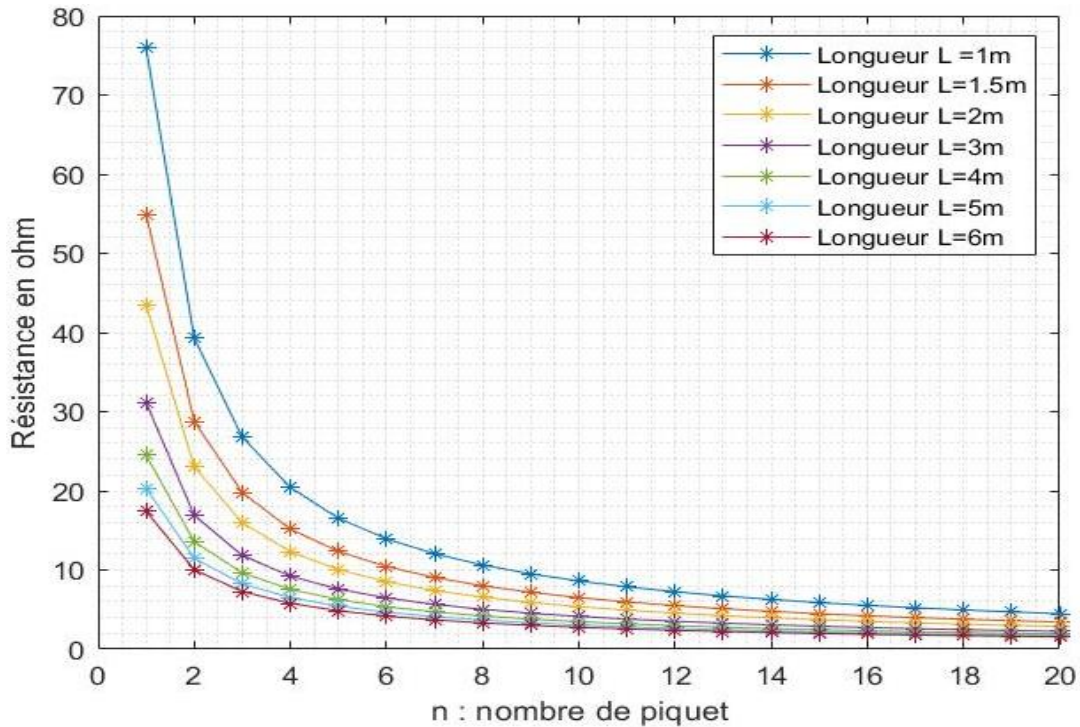


Figure 39 : Résistance de terre cas des piquets en fonction du nombre pour de différentes longueurs de piquets (sol homogène)

❖ Plusieurs piquets (b)

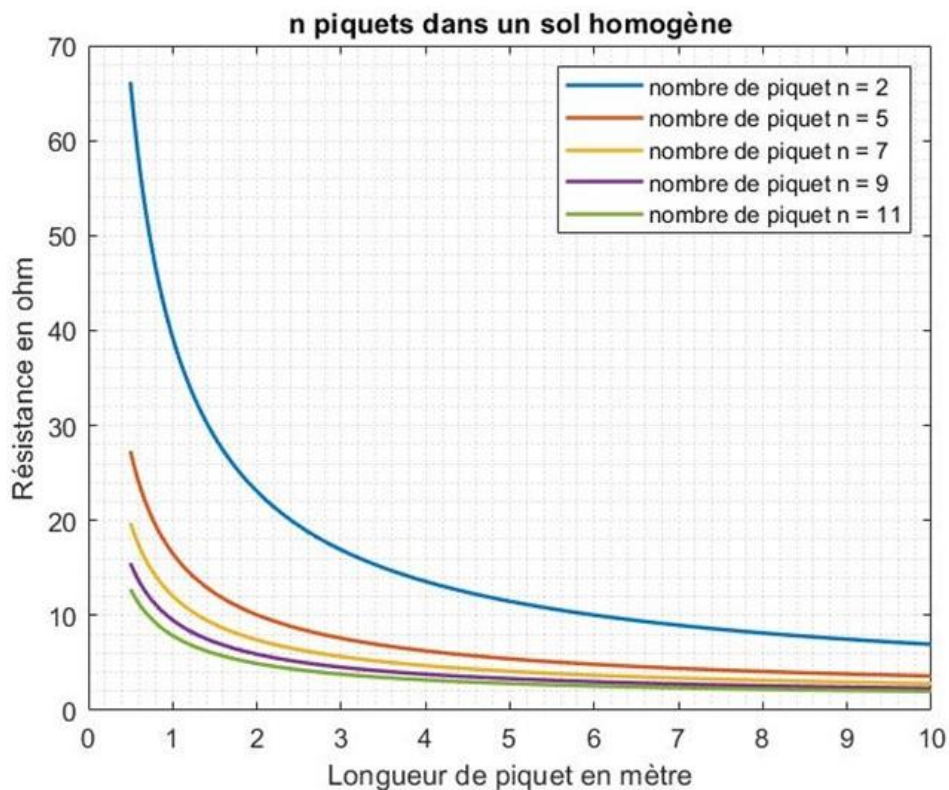


Figure 40 : Résistance de terre en fonction de la longueur des piquets pour de différents nombres de piquets (sol homogène)

❖ Comparaison des configurations

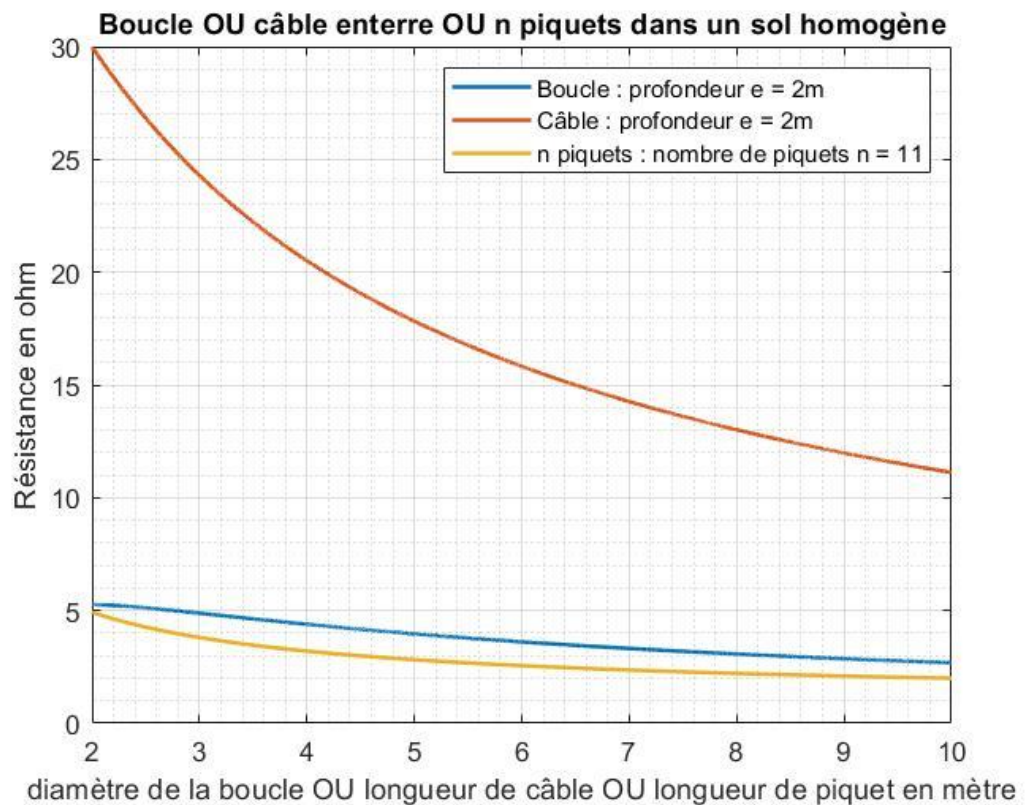


Figure 41 : Résistance de trois configurations de terre en fonction de la longueur des piquets ou de câble ou diamètre de la boucle (sol homogène)

Nous constatons que toutes nos différentes configurations ne peuvent pas permettre d'avoir la résistance de 5 ohms. Pour le câble enterré, dans notre plage de longueur, nous n'avons pas de valeur inférieure à 5 ohm alors que pour une boucle enterré. Les valeurs sont plus intéressantes à partir de la profondeur de 3,5m. la variation du diamètre d'un piquet ne nous permet pas de réaliser une terre de 5 ohm. Il faut dans l'ordre de 10 piquets de 6m pour commencer à avoir des valeurs de résistance de terre de 5ohm. Sachant des piquets trop longs sont à la bande des ondes électromagnétisme et peuvent engendrer d'autre perturbation. La combinaison des trois types de configuration (figure 29) nous permettre de dire que celle des 11 piquets de longueur 2m peut nous aider aussi à avoir une résistance de terre inférieure à 5ohm. Pour une réalisation optimum avec nos considérations, il faut une boucle enterrée à 2m de profondeur et de diamètre 3m ou 11 piquet de 2m.

3.4. Résistance de prise de terre dans un sol hétérogène

Le calcul de la résistance d'une prise de terre nécessite l'utilisation des modèles qui se rapproche le plus de la réalité physique. Pour la simulation sur Matlab, nous avons considéré pour toutes les configurations $\rho_1 = 100 \text{ ohm.m}$ et $\rho_2 = 150 \text{ ohm.m}$ Pour les cas des câbles et boucle enterrés, nous avons varié la profondeur tout en traçant la résistance en fonction de la longueur pour le câble enterré et en fonction du diamètre pour la boucle. Pour les configurations à base des piquets de terre, la résistance est tracée en fonction de la longueur des piquets.

❖ Câble enterré

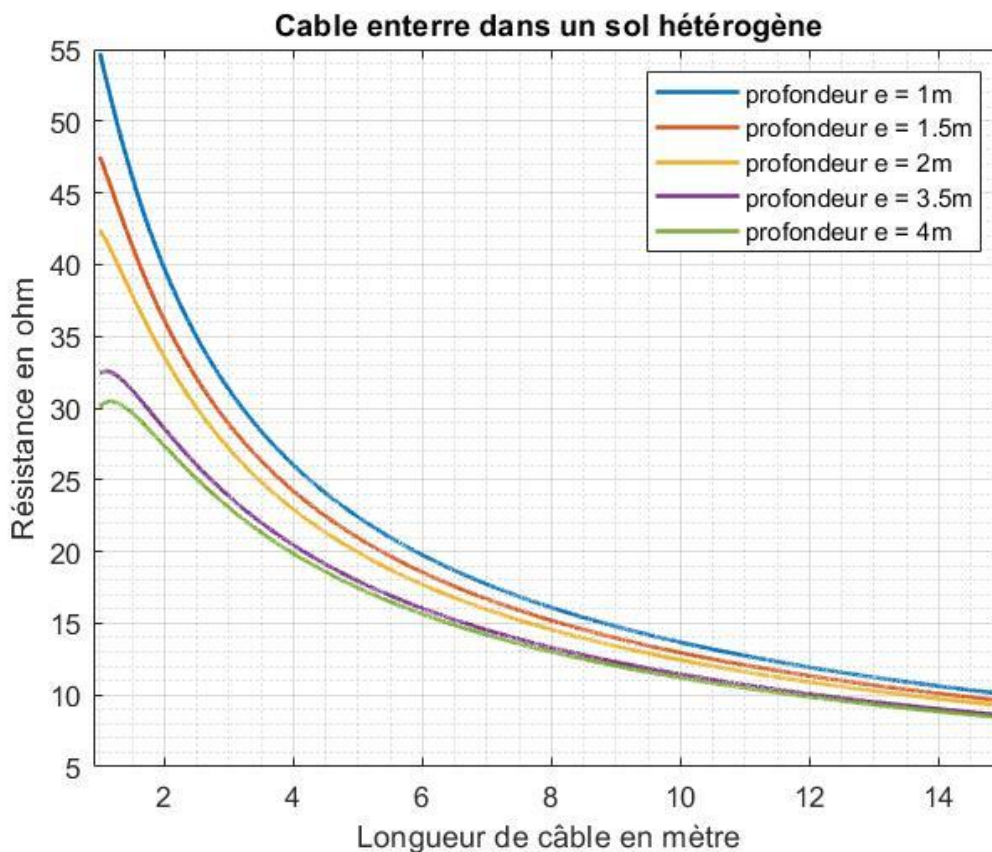


Figure 42 : Résistance de terre en fonction de la longueur de câble pour différentes valeurs de profondeur (sol hétérogène)

❖ **Boucle enterrée**

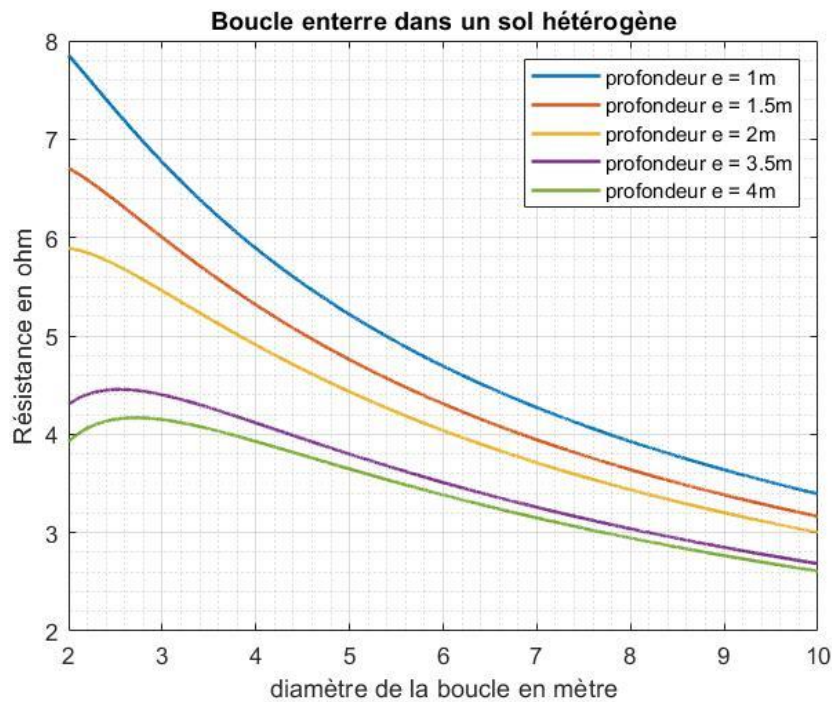


Figure 43 : Résistance de terre en fonction du diamètre de la boucle pour différentes profondeurs (sol hétérogène)

❖ **Piquet**

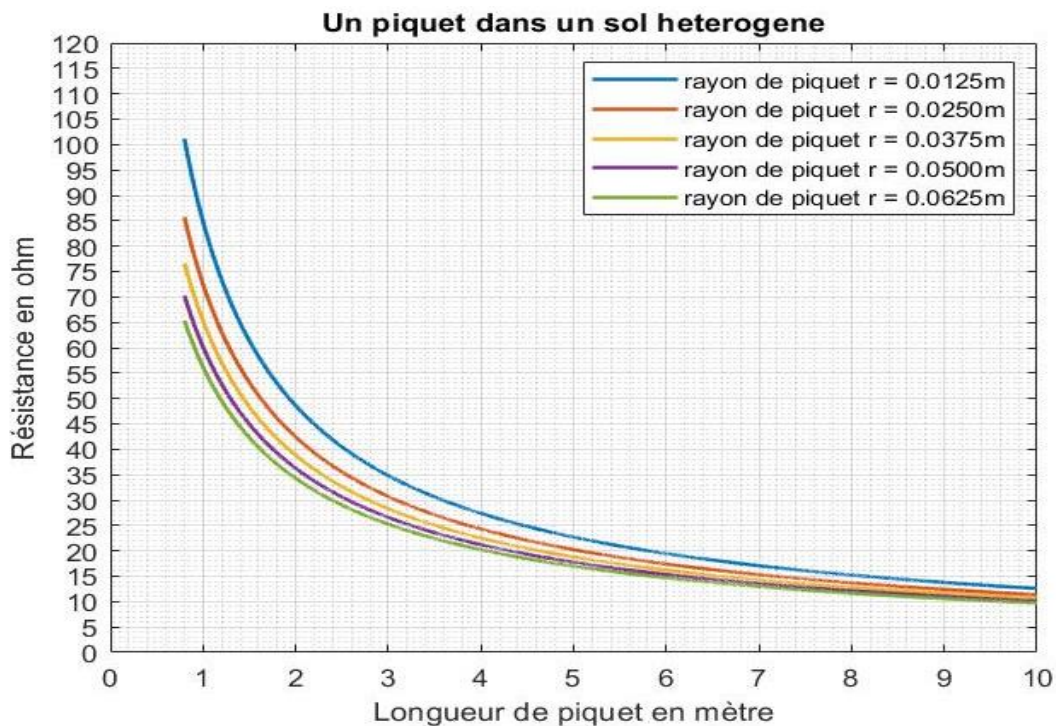


Figure 44 : Résistance de terre en fonction de la longueur de piquet pour différents rayons (sol hétérogène)

❖ **N piquets (a)**

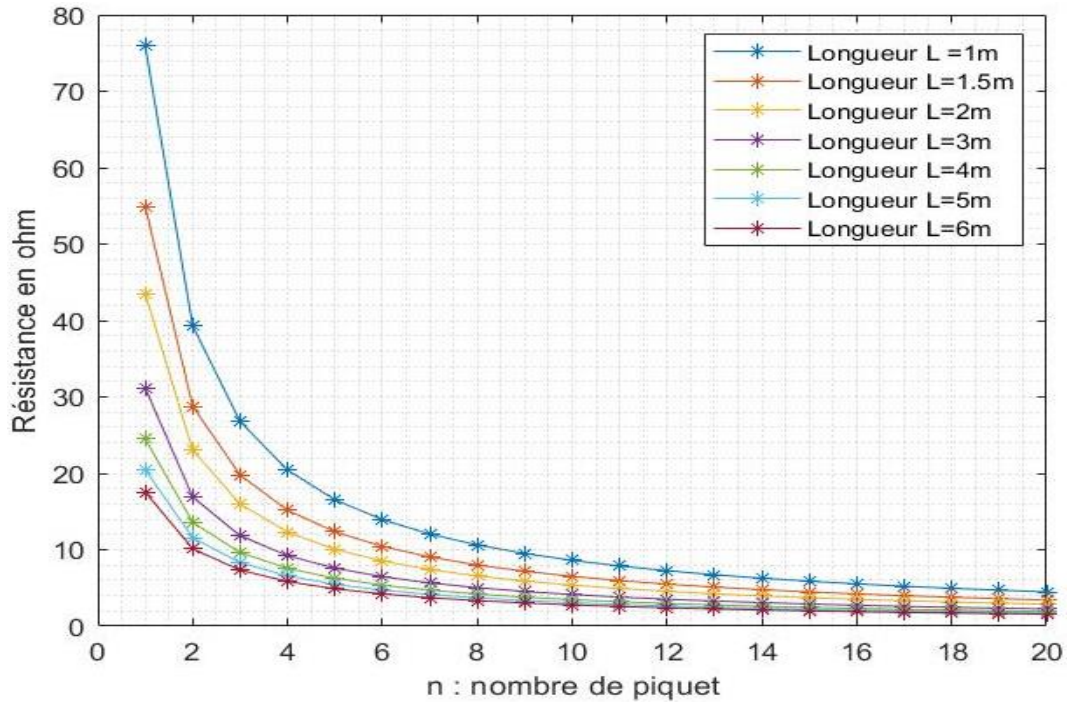


Figure 45 : Résistance de terre en fonction du nombre de piquets pour de différentes longueurs de piquets (sol hétérogène)

❖ **N Piquets (b)**

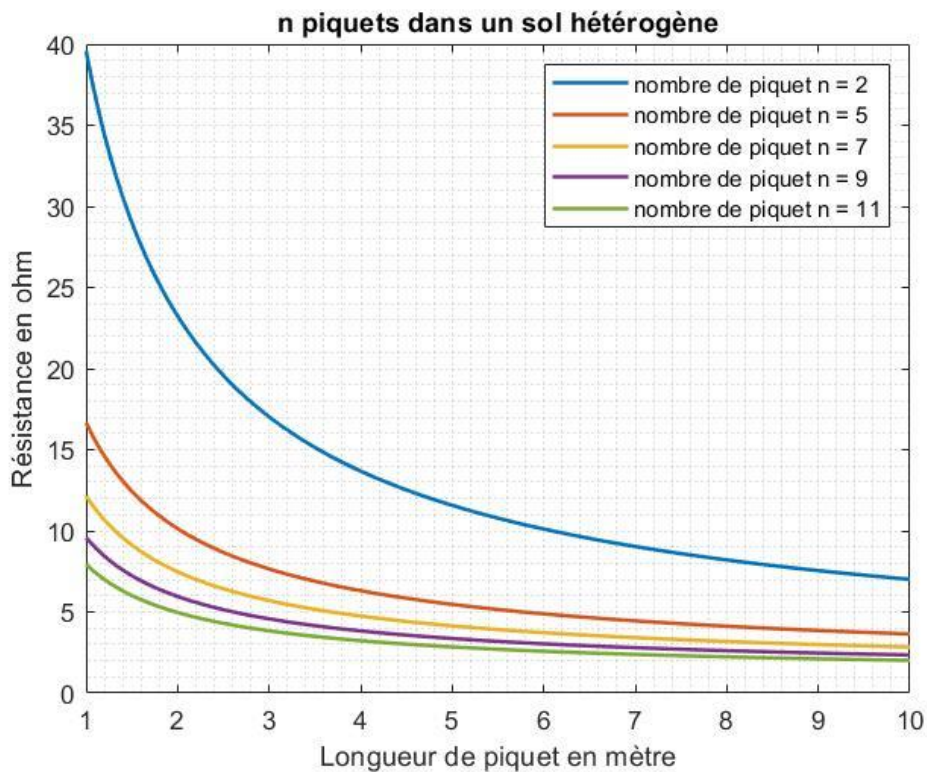


Figure 46 : Résistance en fonction de la longueur de piquet pour de différents nombres de piquets (sol hétérogène)

❖ **Comparaison des configurations $R_{o1} < R_{o2}$**

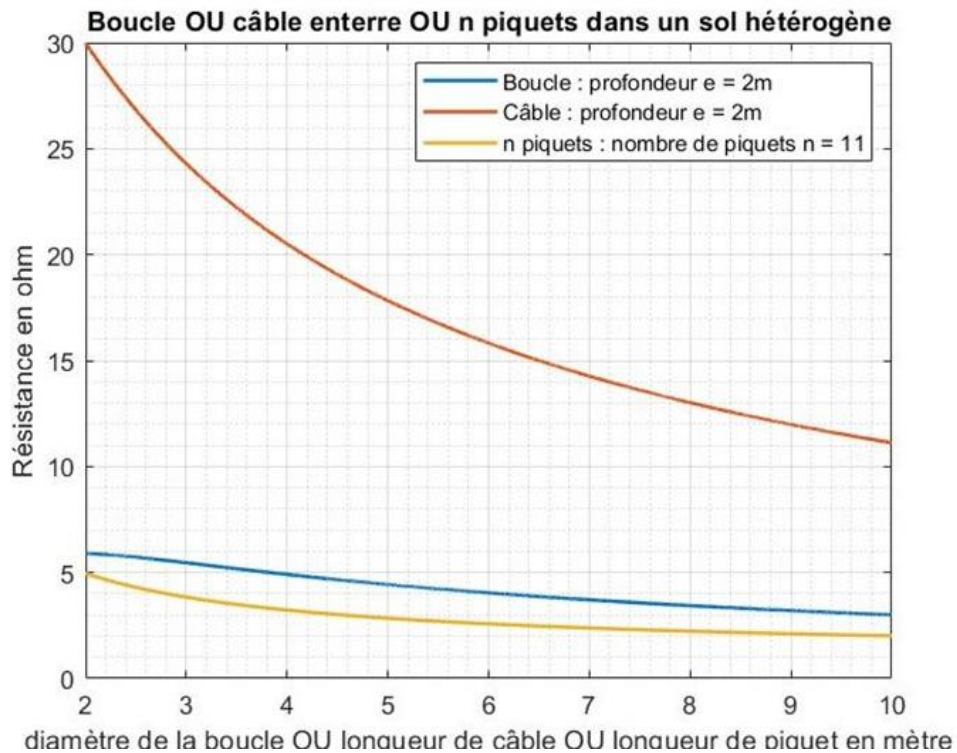


Figure 47 : Résistance de trois configurations de terre en fonction de la longueur des piquets ou de câble ou diamètre de la boucle : cas $R_{o1} < R_{o2}$ (sol hétérogène)

❖ **Comparaison des configurations $R_{o1} > R_{o2}$**

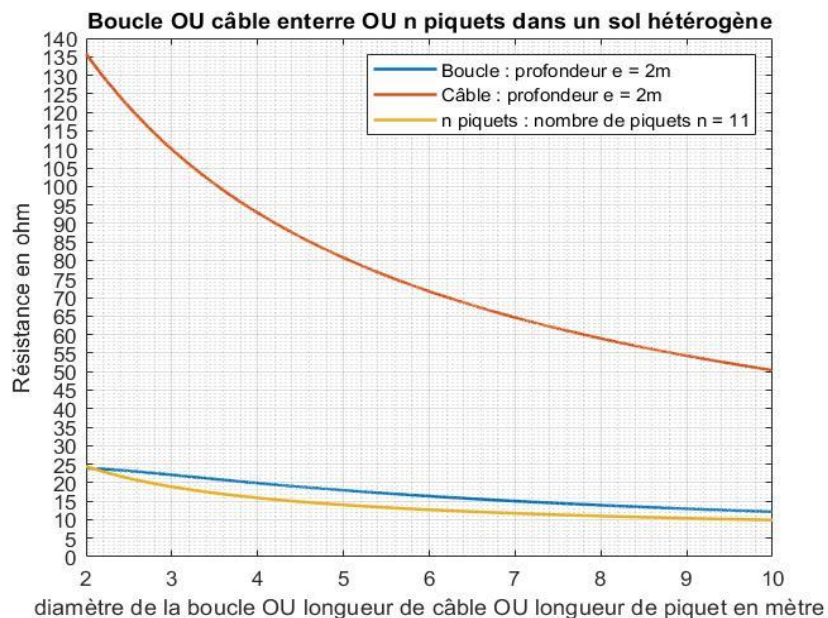


Figure 48 : Résistance de trois configurations de terre en fonction de la longueur des piquets ou de câble ou diamètre de la boucle : cas $R_{o1} > R_{o2}$ (sol hétérogène)

3.5. Interprétation des résultats

Le but d'une prise de terre étant la protection des personnes et des biens. Pour remplir cette fonction, il est recommandé que sa résistance soit inférieure à 5ohms. Pour un sol hétérogène, les résultats des simulations obtenues nous ont permis de constater l'influence des différentes résistivités des couches sur la résistance d'une prise de terre en faisant une comparaison dans un premier temps entre les mêmes configurations dans les différents types de sol et dans un second temps une comparaison de l'ensemble. En effet, pour un sol à deux couches, nous avons pu observer que le cas de câble enterré, lorsque la profondeur augmente, la résistance de la prise de terre diminue mais la plus faible valeur obtenue est supérieure à 5 ohms. Dans le cas de la « boucle enterré », nous avons obtenu des résultats satisfaisants à partir de la profondeur de 3,5m. Il faut un très grand diamètre de boucle de l'ordre de 4m pour obtenir les résistances de 5 ohms. Dans la réalité à partir d'un diamètre, les fouilles pourront être un obstacle pour la réalisation de la prise de terre. Pour plusieurs piquets, on constate qu'il faut non seulement des piquets de grande longueur à partir de 3m mais aussi un grand nombre à partir de 10 piquets pour avoir des prises de terre dont la valeur est inférieure à 5ohms. La combinaison des courbes de trois types de configuration : boucle, câble et piquets, nous a permis de comprendre que dans le cas où la résistivité augmente en profondeur, la configuration avec les 11 piquets de 2m est la meilleure. Une boucle enterrée à 2m profondeur permet d'avoir des résistances de terre inférieure à 5ohm dans le cas de $\rho_1 < \rho_2$. Dans le cas ou la résistivité diminue en profondeur $\rho_1 > \rho_2$ aucune des courbes dans notre plage de longueur ne permettent d'obtenir la résistance de 5 ohms.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de faire une étude comparative des différentes courbes d'abord pour le cas d'un sol homogène et ensuite pour les sols hétérogènes. Les courbes tracées avec le logiciel MATHLAB sur la base de certaines hypothèses des valeurs de résistivité proches de nos réalités ont permis de faire une interprétation de nos résultats. Il ressort que pour un sol hétérogène, une prise de terre en boucle enterrée permet d'avoir rapidement des valeurs souhaitées.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement de prise terre, dont la particularité est sa forme géométrique, dans plusieurs modèles de sol. L'analyse du comportement d'un système de mise à la terre composé d'une ou plusieurs configurations de terre a été réalisée pour différents type de sol. Les valeurs de la résistance des différentes configurations dans un sol homogène et hétérogène composé de deux couches ont été déterminées par des simulations et comparées avec celles trouvées analytiquement. Les différentes résistivités entre les couches du sol nous ont permis de voir leur impact sur la valeur de la résistance. Il ressort de notre analyse qu'il est préférable de faire des 'boucles enterré' sur les sols hétérogènes où les valeurs de la résistance de terre sont beaucoup plus faibles. Les résultats obtenus présentent des limitent car ceux-ci abordent seulement les sols à deux couches. Ces limites font appel aux perspectives suivantes :

- ✓ Etude du comportement de la prise de terre sur un sol hétérogène par la méthode des éléments finis ;
- ✓ Détermination de la résistivité apparente d'un sol hétérogène à plus de deux couches par la méthode des éléments finis.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] – BONNARD, CHAMPIOT, GERARD et autres, *Principe de conception et de réalisation des mises à la terre*, Electricité de France-direction des études recherches H115 janvier 1984.
- [2] – ZOUHAIR BEN ZAIED, <<*analyse du comportement électrique d'une électrode de mise à la terre de forme géométrique complexe**Principe de conception et de réalisation des mises à la terre*>>. Mémoire de maitre en ingénierie, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, juin 2019.
- [3] – ZIDANE ZINE ABIDDINE, <<*modélisation et simulation des prises de terre dans les systemes electriqu*>>. e. mémoire de magister en electrotechnique, universite ferhat abbas, mai 2012.
- [4]- AREDJODOUN G. Jacques: <<*Détermination de la résistivité apparente d'un sol hétérogène en vue du choix de la configuration d'une prise de terre de type piquet pour une protection optimale*>>. Mémoire de D.E.A, Université d'Abomey-calavi, 2012.
- [5]-Nzuru NSEKERE : *Contribution à l'analyse et à la réalisation des mises à la terre des installations électriques dans les régions tropicales*. Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique, Février 2009.
- [6]-Sossou HOUNDEDAKO : *Identification de la résistivité du sol et de la résistance de prise de terre en milieu hétérogène par la méthode des éléments finis*. Thèse de doctorat, Université Nationale du Bénin, décembre 2000.
- [7]-O. GOUDA, G. AMER and T. EL-SAIED : *Optimum design of grounding system in uniform and non-uniform soils Using ANN*. Faculty of Engineering, Cairo University, Egypt. IPEC, 2006.
- [8]-Lambert PIERRAT : *Maîtrise de la sécurité électrique dans les grandes installations : Optimisation de la conception, du dimensionnement et N du coût des circuits de terre*, communication France, 2009.
- [9] A. PUTTARACH, N. CHAKPITAK, T. KASIRAWAT, and C. PONGSRIWAT: *Substation grounding grid analysis with the variation of soil layer depth method*. Faculty of Engineering, Chiang Mai University.
- [10]-J.A. GÜEMES, F. RODRIGUEZ, J.M. RUIZ, F.E. HERMANDO: *Determination of the ground resistance and distribution of potentials in grounding grids using FEM*. University of the Basque Country; Plaza de la Casilla n°3,48012 Bilbao (Spain).
- [11] - J.A.Güemes, F.E.Hernando, *Method for Calculating the Ground Resistance of Grounding Grids Using FEM*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, No.2, pp 595-600, Avril 2004.

- [12] - Henryk Markiewicz , Dr Antoni Klajn, *Mise à La Terre – Bases de Calcul et De Conception* , Guide Power Quality Section 6: Cem et Mise à La Terre www.leonardo-energy.org/France, Edition Août 2007.
- [13] - Tony Mitton , Robin Watson, *Practical Testing of Grounding Systems by Current Injection* , Mitton Consulting Ltd Christchurch ,New Zealand, Mai 2005.
- [14] - J. Nzuru Nsekere, *Contribution à L'analyse et à La Réalisation des Mises à La Terre des Installations Electriques dans Les Régions Tropicales*, thèse de doctorat, Université de Liège Faculté des sciences appliquées, Février 2009.
- [15] - Yaqing Liu, *Transient Response of Grounding Systems Caused by Lightning: Modelling and Experiments*, thèse de doctorat , université de uppsala ,2004.
- [16] - Elvis R. Sverko, *Ground-Measuring Techniques: Electrode Resistance to Remote Earth & Soil Resistivity*, ERICO, Inc. Facility Electrical Protection, February 1999.
- [17] - Electricité de France, *Principes de conception et de réalisation des mises à la terre*, EDF NI 115, Direction des études et recherches, 1984.
- [18] - IEEE Standard 81.2-1991, *IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems*, IEEE Power Engineering Society, No.8, Decembre 1991.
- [19] - G.F.Tagg, B.Sc, Ph.D, M.I.E.F, F.Inst.P, *Earth Resistances*, Tower House,Southampton Street, London W.C.2 ,1964.
- [10] - Ahmed Mghairbi , *Caractrisation of Transmission Line Earthing System* , these de master ,Electrical and Electronic Division Universitie de Wales,2003.
- [21] - IEEE Standard, *IEEE Standard Test Code for Resistance Measurement*, IEEE Power Engineering Society, pp. 118-1978.1992.
- [22] - C. Korasli, *Ground Resistance Measurement with Alternative the Fall-of-Potential Method*, IEEE Power Engineering Society, pp. 1657-1661, 2005
- [23] -C. Korasli, *Ground Resistance Measurement Fall-of-Potential Method Using Capacitive Test Probes*, IEEE Power Engineering Society,2006.
- [24] -Kazuo Murakawa ,Hiroshi Yamane, *Earthing Resistance Measurement Technique without Using Auxiliary Electrodes*, IEEE Power Engineering Society, pp 213-216, 2003.
- [25] -B. Nekhoul, P. Labie, F. X. Zgainski and G. Meunier, *Calculating the Impedance of a Grounding System*, IEEE Power Engineering Society, Vol 32, No3,pp 1509-1512, Mai 1996.

- [26] -L.Grcev, *Impulse Efficiency of Ground Electrode*, IEEE Power Engineering Society, Vol.24, No.1, Janvier 2009.
- [27] G.Vijayaraghavan, Mark Brown, Malcolm Barnes, *Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection*, Elsevier, 2004.
- [28] QingboMeng, Jinliang He F. P. Dawalibi, *A New Method to Decrease Ground Resistances of Substation Grounding Systems in High Resistivity Regions*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, pp 911-916, , Juillet 1999.
- [29] Jinliang. He, Gang Yu, Jingping Yuan, *Decreasing Grounding Resistance of Substation by Deep-Ground-Well Method*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 20, No.2, pp 738-744, Avril 2005.
- [30] - Zaborszky, J., *Efficiency of Grounding Grids with Nonuniform Soil [includes discussion]*. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, 1955. 74(3): p. 1230-1233.
- [31] - Kostic, M. and G. Shirkoochi, *Numerical analysis of a class of foundation grounding systems surrounded by two-layer soil*. IEEE transactions on power delivery, 1993. 8(3): p. 1080-1087.
- [32] - Dawalibi, F., J. Ma, and R. Southey, *Behaviour of grounding systems in multi layer soils: a parametric analysis*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994. 9(1): p. 334-342.
- [33] - Ma, J., F. Dawalibi, and W. Dai, *Analysis of grounding systems in soils with hemispherical layering*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993. 8(4): p. 1773-1781.
- [34] - Tagg, G., *Earth Resistance*. Gorge Newnes Limited. 1964, London.
- [35] - Tagg, G. *Measurement of earth-electrode resistance with particular*
- [36] - Dwight, H., *Calculation of resistances to ground*. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1936. 55(12): p. 1319-1328.
- [37] - Vijayaraghavan, G., M. Brown, and M. Barnes, *Practical grounding, bonding, shielding and surge protection*. 2004: Elsevier

[38] A. F. Otero, J. L. del Alarno, *Frequency-Dependent Grounding System Calculation by Means of a Conventional Nodal Analysis Technique*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, Juillet 1999.

[39]- Basma Harrat, *Caractérisation et Optimisation Numérique d'Une Mise a La Terre*, thèse de doctorat, département de génie électrique Jijel, 1998.

[40] R.W.AdamsK, K.HazardE.K.Miller , *NEC Users Manual*, partI.1988.

[41]- CHRISTIAN PEUTO, ERIK FLICE et ALAIN KOHLER, *Guide de la mesure électrique (bâtiment et industrie*, DUNOD série EEA, paris 2007

ANNEXES

Les codes MATLAB

Résistance de terre en fonction de la longueur pour un électrode cylindrique verticale dans un sol homogène

```
%% Un Piquet de terre dans un sol homogène
%% Parametres
clear;
Ro=100; %Resistivite du sol
L = 0.8:0.001:10; %Longueur de piquet
r = 0.0125; %Rayon du piquet

%% Calculs
d = r*2;
R1 = (Ro./(2.*pi.*L)).*((log(8.*L./d))-1); % DwightSunde
R2 = (Ro./(2.*pi.*L)).*(log((r+1)./r)); % Liew-Darveniza
%% Graphique
figure('Name','Un piquet de terre')
plot(L,R1); hold on
plot(L,R2); hold off
grid minor ; grid;
legend('Dwight-Sunde','Liew-Darveniza');
title('Un piquet dans un sol homogène');
ylabel('R(L)') ; xlabel('L');
```

Résistance de terre en fonction de la résistivité du sol pour un électrode cylindrique verticale dans un sol homogène

```
%% Parametres
clear;
Ro=30:0.001:2000; %Résistivité variable du sol
L = 3; %longueur du piquet
r = 0.0125; %Rayon

%% Calcul
d = r*2; %Diamètre
R1 = (Ro./(2.*pi.*L)).*((log(8.*L./d))-1); % DwightSunde
R2 = (Ro./(2.*pi.*L)).*(log((r+1)./r)); % Liew-Darveniza
%% Graphique

figure('Name','Un piquet de terre')
plot(Ro,R1); hold on
plot(Ro,R2); hold off
grid minor ; grid;
```

```
legend('Dwight-Sunde', 'Liew-Darveniza');  
title('Un piquet dans un sol homogène')  
ylabel('R(\rho)') ; xlabel('\rho');
```

Résistance de terre en fonction de la longueur pour deux électrodes cylindriques verticales dans un sol homogène

```
%% Deux piquets cylindriques  
%% Parametres  
clear;clc;  
Ro=100;  
L = 0.8:0.001:10;  
r = 0.0125;  
a=2.*L; %Distance entre piquet  
%% Calcul  
d = r*2;  
R1 = (Ro./(2.*pi.*L)).*((log(8.*L./d))-1); % DwightSunde  
R2 = (Ro./(2.*pi.*L)).*(log((r+1)./r)); % Liew-Darveniza  
%% Dwight-Sunde  
alpha1 = (Ro./(2.*pi.*R1))./a;  
R1_1 = R1.*(1+alpha1)./2;  
%% Liew-Darveniza  
alpha2 = (Ro./(2.*pi.*R2))./a;  
R2_2 = R2.*(1+alpha2)./2;  
  
figure('Name','Un piquet de terre')  
plot(L,R1_1); hold on  
plot(L,R2_2); hold off  
grid minor ; grid;  
legend('Dwight-Sunde', 'Liew-Darveniza');  
title('Deux piquets dans un sol homogène')  
ylabel('R(L)') ; xlabel('L'); %axis([0.0 3.2 0 00])
```

Résistance de terre en fonction de la longueur pour trois électrodes cylindriques verticales dans un sol homogène

```
%% Trois Piquets  
%% Parametres  
clear;clc;  
Ro=100;  
L = 0.8:0.001:10;  
r = 0.0125;  
a=2.*L;  
%% Calcul
```

```
d = r*2;
R1 = (Ro./(2.*pi.*L)).*((log(8.*L./d))-1); % DwightSunde
R2 = (Ro./(2.*pi.*L)).*(log((r+1)./r)); % Liew-Darveniza
%% Dwight-Sunde
alpha1 = (Ro./(2.*pi.*R1))./a;
R1_ = R1.*(1+2.*alpha1)./3;
%% Liew-Darveniza
alpha2 = (Ro./(2.*pi.*R2))./a;
R2_ = R2.*(1+2.*alpha2)./3;

figure('Name','Un piquet de terre')
plot(L,R1_); hold on
plot(L,R2_); hold off
grid minor ; grid;
legend('Dwight-Sunde','Liew-Darveniza');
title('Trois piquets dans un sol homogène')
ylabel('R(L)') ; xlabel('L');
```