

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électronique
Spécialité Machines Electriques

présenté par

YAHIAOUI Ayoub

&

DEGHRAR Mohamed

Amélioration et dimensionnement d'un réseau de terre pour la centrale électrique de Djelfa selon la norme IEEE 80-2000

Proposé par : Mr. BELAZZOUG Messaoud & Mr. DILMI Zohir

Année Universitaire 2017-2018

Dédicace

Je dédie ce modeste mémoire de fin d'étude à :

*Ma cher mère, Mon cher père Mes frères et Mes sœurs et toute
la famille, à mes grand père*

Mes collègues de la promotion

Tous mes amis

Tous ceux qui me sont chers



Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Mes frères et sœur qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Mes professeurs de l'USDB qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis

Mon professeur encadreur Mr Belazzoug Messaoud pour son aide et sa précieuse attention

Mes amis abdenmour salem , michentel meroua , raouf , amine , abdelilah amrou , malek

Mohamed deghrar

REMERCIEMENTS

La première des pages qui reste la dernière à écrire... et voilà enfin le moment d'achever ces cinq années passées à l'USDB. Au jour d'aujourd'hui, on se rappelle surtout des bons moments passés avec nos compagnons d'une certaine infortune. On sait que certains resterons des amis, même si nos choix de vie nous éloignent.

Nos remerciements tout d'abord à notre promoteur Monsieur Me BELAZZOUG pour son encadrement, son aide, et pour les discussions enrichissantes et instructives qui ont été très motivantes.

Nous tenons bien sûr à remercier Monsieur DILMI Zoheir d'avoir proposé ce sujet de mémoire, Nos souhaite lui témoigner nos profonde reconnaissance, toute nos gratitude et nos respect pour l'intérêt qu'il a porté à nos travail, et surtout à la confiance qu'il nous a accordée.

Nous remercions les membres du jury, qui nous ont fait l'honneur de participer à l'examen de ce travail.

Merci à toute personne qui nous a apporté son aide.

ملخص :

هذه الأطروحة مخصصة لدراسة و تحجيم الشبكة الأرضية لمحطة الجلفة الكهربائية وفقاً لمعيار IEEE 80-2000 باستخدام برنامج ETAP وبرنامج AUTOCAD. اعتبرنا عدة عوامل تأثير منها: عمق الدفن، عدد الدارات، الشكل الهندسي للهيكل وطبيعة الارض (متجانسة وغير متجانسة مكونة من طبقتين). يقوم البرنامج بتقييم ارتفاع كمون الارض، توتر اللمس توتر الخطوة، المقاومة الكهربائية الارضية .

كلمات المفاتيح : التأسيس، الشبكة الأرضية، ارتفاع كمون الأرض، توتر اللمس، توتر الخطوة ، المقاومة الكهربائية الارضية

Résumé :

Ce mémoire est consacré à l'étude et le dimensionnement d'un réseau de terre pour la centrale électrique de Djelfa selon la norme IEEE 80-2000 en utilisant les logiciels ETAP et AUTOCAD. Plusieurs paramètres d'influence ont été considérés à savoir, la longueur des piquets, la profondeur d'enfouissement, le nombre des mailles, la forme géométrique de ces grilles et la nature du sol (homogène et hétérogène à deux couches). A partir des résistivités du sol, ce code de calcul permet l'évaluation de l'élévation de potentiel de terre, la résistance du système et les tensions de contact et de pas.

Mots clés : mise à la terre, ETAP, grille, piquet, élévation de potentiel (GPR), tension de contact, tension de pas, résistance du système de terre.

Abstract :

This thesis is dedicated to the study and dimensioning of a ground network for the Djelfa power station according to the IEEE 80-2000 standard using ETAP and AUTOCAD software. Several parameters of influence were considered namely, the length of the stakes, the depth of burial, the number of meshes, the geometrical form of these grids and the nature of the ground (homogeneous and heterogeneous with two layers). From the ground resistivities, this calculation code allows evaluation of the earth potential rise, the resistance of the system and the contact and step voltages

Keywords: grounding, ETAP, gate, picket, potential rise (GPR), voltage of contact, step voltage, earth system resistance.

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 : Matériaux des systèmes de protection contre la foudre et conditions d'utilisation	13
Tableau 1.2 les résistivités des différents types de sol	19
Tableau 2.1 : Constantes de matériau	28
Tableau 2.2 : Valeurs typiques de D_f	31
Tableau 2.3 Les sections normalisées obtenues en fonction des I_{cc}	41
Tableau 2.4 : Analyse de la grille pour différents maillages	42
Tableau 2.5 : Influence de l'espacement entre conducteurs sur les paramètres principaux de simulation	43
Tableau 2.6 : Analyse de la grille pour différents nombres de piquets rajoutés	44
Tableau 2.7 indiquent que La profondeur doit être comprise entre 0,5 m et 2 m. Au-delà de cette dernière valeur la tension de contact augmente	45
Tableau 2.8 Influence de la forme des grilles de mêmes surface et longueur des conducteurs sur les résultats de simulation	46
Tableau 3.1 les valeurs de résistivité obtenues	51
Tableau 4.1 Module d'analyse pour le réseau de terre proposé par le constructeur	68
Tableau 4.2 Module d'analyse pour le réseau de terre amélioré	72
Tableau 4.3 module d'analyse pour le réseau de terre préliminaire	75
Tableau 4.4 module d'analyse pour le réseau de terre améliorée	79
Tableau 4.5 Le module d'analyse finale	81

Conclusion Générale

L'optimisation des architectures des réseaux de terre des ouvrages électriques restera toujours un sujet de recherche vaste et passionnant et on ne peut le cerner dans une seule étude.

Dans notre modeste mémoire, nous avons fait une étude de synthèse sur l'importance de système de mise à la terre :

- Le fonctionnement des dispositifs de protection différentiel (la protection des personnes).
- Ecoulement des courants de défaut, de foudre, les décharges électriques.
- Ecoulement des surtensions transitoires (parafoudres).
- Maintenir un potentiel de référence.

Cette étude nous a montré qu'un réseau de terre ne pourra être efficace dans son rôle que s'il réunit les conditions suivantes :

- La résistance de prise de terre est inférieure à un ohm.
- La tension de contact prévue est inférieure à la tension de contact tolérable.
- La tension de pas prévue est inférieure à la tension de pas tolérable.

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

- Méthodes analytique.
- Méthodes numérique.
- Logiciels (par exemple : E-TAP).

Dans notre cas, nous avons utilisé la méthode analytique décrite dans la norme IEEE 80-2000 en utilisant le logiciel E-TAP. Ce logiciel permet de calculer les différents paramètres électriques à savoir l'élévation de potentiel, les tensions maximales de contact et de pas permises, à partir de l'analyse du sol ainsi que la résistance de système de mise à la terre.

Conclusion Générale

Comme application, nous avons réalisé le dimensionnement du réseau de terre d'une centrale électrique DJELFA, et nous avons supposé que le sol est uniforme.

Plusieurs simulations ont été réalisées pour aboutir à la conception finale de réseau de terre de cette centrale, qui nous ont permis de conclure que :

- L'augmentation de nombre de mailles permet d'assurer l'équipotentialité du réseau de terre.
- Les piquets de terre sont une solution pratique pour diminuer l'élévation des potentiels dans le périmètre de la grille.
- Dans certains cas, la conception d'un réseau de terre efficace remplissant les critères suscités et économique ne peut être possible que si on ajoute une couche superficielle de résistivité élevée. Cette couche superficielle de résistivité élevée, permet d'augmenter les valeurs des tensions de pas et de contact maximale admissibles par le corps humain.

Nous ajoutons que le dimensionnement du réseau de terre de n'importe quel ouvrage ne se résume pas dans uniquement dans les paramètres électriques à prendre en compte (résistivité du sol, dimensions du terrains, l'intensité du courant de défaut, la durée du défaut, ...), mais il y a aussi l'aspect économique qui doit être pris sérieusement en compte (on réalise selon le budget dont on dispose). Donc le coût de réalisation sera également intégré au cours de l'étude pour comparer différentes solutions possibles.

A la fin, nous insistons sur une règle d'or : l'étude et la réalisation d'un réseau de terre peut contenir des erreurs, pour garantir une sécurité totale, des contrôles doivent être effectués lors de la mise en service et aussi durant l'exploitation des ouvrages à protéger.

Introduction générale

L'énergie électrique est un facteur primordial du développement. Les pays en 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.

Lors d'un défaut à la terre dans un poste ou sur une ligne de transport d'énergie, le courant de défaut cherche à s'écouler dans le sol à travers le système de mise à la terre, ce qui fait monter le potentiel local du sol par rapport à celui d'une terre lointaine. Les problèmes reliés à la conception de la mise à la terre retiennent l'attention des ingénieurs en électricité et les concepteurs des postes et des lignes de transport d'énergie en haute tension.

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

C'est pour ça La compagnie de l'Engineering de l'Electricité et du Gaz CEEG filiale du groupe SONALGAZ à interpellé une entreprise espagnole pour faire une étude du projet de centrale d'énergie de cycle combiné qui es installée à AIN OUSSERA, Wilaya de Djelfa, République Algérienne, sur un terrain propriété de la Société Algérienne de Production de l'Electricité, situé à environ 7 Km au Sud-Est de la ville avec une superficie totale du terrain pour l'implantation de la centrale est de 40 Ha.

Le réseau de terre proposé par le constructeur assure un bon niveau de sécurité pour la centrale, mais avec une couche superficielle de gravier, qui représentent des coûts supplémentaires pour le client financièrement et techniquement, ce problème a incité La compagnie CEEG à reconsidérer l'étude soumise, C'est pour ça nous avons refait l'étude et améliorer le réseau de terre sans utiliser la couche superficielle.

L'étude a été faite en se base sur la méthode analytique décrite dans la norme IEEE 80 2000 en utilisant le code de calcule ETAP.

Le premier chapitre regroupe les généralités sur la mise à la terre des installations électriques de haute tension, ainsi que les définitions relatives au système de mise à la terre, sa construction et son rôle. Nous citons par la suite, les méthodes les plus

Introduction générale

utilisées pour la mesure de la résistivité du sol et de la résistance de prise de terre. Afin d'analyser le sol, nous exposons quelques modèles du sol homogène et stratifié (horizontalement et verticalement). Le régime du neutre et des différents schémas de liaison à la terre y sont également présentés.

Nous présentons, dans le deuxième chapitre l'organigramme et les étapes à suivre pour la conception et l'amélioration d'un réseau de terre.

Dans le troisième chapitre, nous appliquerons les étapes mentionnées dans le chapitre précédent afin de calculer les différents facteurs liés au réseau de terre de la station de DJELFFA, à l'aide d'un fichier Excel

Le quatrième et dernier chapitre est consacré à la simulation des différents cas, on a commencé par le réseau de terre proposé par le constructeur avec et sans amélioration, et nous avons terminé par la proposition d'un deuxième dimensionnement qui assure le même niveau de sécurité.

Enfin nous allons terminer par une conclusion générale représentant une synthèse globale de notre travail.

Table des matières

Listes des acronymes et abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Résumé	
Introduction générale	1

Chapitre 1 : GENERALITES SUR LA MISE A LA TERRE

1.1 Introduction	3
1.2 La société CEEG	3
1.3 Description du projet	3
1.3.1 Emplacement du projet	4
1.4 La mise à la terre	4
1.5 La prise de terre	4
1.5.1 Prise de terre "profonde"	4
1.5.2 Prise de terre de "surface"	5
1.6 Le réseau de terre	5
1.7 Le rôle d'une mise à la terre	5
1.8 Effet du courant sur le corps humain	5
1.8.1 Interprétation de la courbe	6
1.9 Les surtensions dues à la foudre	7
1.9.2 Mode de protection	7
1.10 Élévation de potentiel de terre	7
1.11 Potentielle de référence	8
1.12 La Masse	8
1.13 Tension de pas	8
1.14 Tension de contact	8
1.14.1 Contact direct	9
1.14.2 Contact indirect	10
1.15 Les Éléments d'une mise à la terre	11
1.15.1 Les piquets de terre	11
1.15.2 le réseau de terre primaire	11
1.15.3 le réseau de terre secondaire	11
1.16 Défauts affectant le réseau de terre	12
1.17 Matériaux utilisées pour la construction des systèmes de mise à la terre	12
1.18 Les facteurs affectant la résistance de terre	14
1.19 Régime de neutre et schéma de liaison à la terre en basse tension	14
1.19.1 Régime TT	15
1.19.2 Neutre isolé IT	15
1.19.3 Mise au neutre TN	16

Table des matières

a. Schéma TN-C	16
b. Schéma TN-S	16
1.20 Régimes de neutre utilisés en haute tension.....	17
1.20 Régimes de neutre utilisés en haute tension.....	17
1.20.2 Mise à la terre directe	17
1.20.3 Mise à la terre par l'intermédiaire d'une résistance	18
1.20.4 Mise à la terre par l'intermédiaire d'une réactance	18
1.21 Résistance et résistivité du sol	18
1.22 Conduction du courant électrique dans le sol.....	19
1.23 Mesure de la résistivité du sol	20
1.23.1 Méthode de Wenner.....	20
1.23.2 Méthode de Schlumberger	22
1.23.3 Méthode à trois pôles	23
1.23.4 Sol en plusieurs couches de résistivités différentes	24
1.24 CONCLUSION	25

Chapitre 2 : Principe de conception d'un réseau de terre selon la norme IEEE 80-2000

2.1 Introduction	26
2.2 Les étapes de conception d'un réseau de terre selon la norme IEEE 80-2000.....	26
Etape 1 dimension de la grille et la résistivité du sol	26
Etape 2 courant de défaut, durée de défaut, et section de conducteur	26
Etape 3 : Les tensions tolérables de contact et de pas	28
Etape 4 : la taille des mailles et profondeur de la grille	29
Etape 5 Résistance à la terre	30
Etape 6 Le courant maximal de la grille I_G	30
Etape 7 L'élévation du potentiel	31
Etape 8 Les tensions de pas et de contacte	31
Etape 9 Comparaison de la tension admissible et de la tension obtenue	33
Etape 10 Comparaison de la tension admissible et de la tension obtenue	34
Etape 11 Optimisation du réseau	34
Etape 12 la conception finale	34
2.3 Amélioration de la conductivité d'une mise à la terre	36
2.3.1 Cas d'une électrode	36
a. Augmentation de la longueur de l'électrode	36
b. Augmentation de la distance entre électrodes	37
c. Augmentation du nombre d'électrodes	38
d. Augmentation du diamètre de l'électrode	39
2.3.2 Cas d'une grille	41

Table des matières

a. L'augmentation du nombre de mailles	41
b. l'espacement entre conducteurs	42
c. Influence du nombre de piquets	43
d. Influence de la profondeur d'enfouissement sur une grille carrée	44
e. Influence de la forme de la grille	45
f. Traitement des sols pour réduire la résistivité.....	47
g. Autre méthode	47
2.4 Conclusion	48

Chapitre 3 : Étude de cas

3.1 Introduction	49
3.2 DONNEES PRELIMINAIRES	49
3.2.1 Conditions de l'environnement	49
3.2.2 Système électrique	49
3.2.3 Modèle du sol	50
3.3 Les étapes de démontonnement de réseau de terre	52
Etape 1 : dimension de la grille et la résistivité du sol	52
Étape 2 : courant de défaut, durée de défaut, et section de conducteur	52
Etape 3 : Les tensions tolérables de contact et de pas	53
Etape 4 : la taille des mailles et profondeur de la grille	53
Étape 5: Résistance à la terre	55
Etape 6 : Le courant maximal de la grille I_G	56
Etape 7 : L'élévation du potentiel	56
Etape 8 : Les tensions de pas et de contacte	56
Etape 9 et10 : Comparaison de la tension admissible et de la tension obtenue	58
Etape 11 : Optimisation du réseau	59
Etape 12 : la conception finale	60
3.4 Conclusion	60

Chapitre 4 : Simulation

4.1 Introduction	61
4.2 Présentation AUTOCAD MEP	61
4.3 Présentation d'ETAP 12.6	61
4.4 Méthode des éléments finis	62
4.4.1 Description	62
4.4.2 Choix du maillage	62

Table des matières

4.4.3 Vecteurs de base	63
4.4.4 Formulation du système d'équations	63
4.5 analyse de réseau de terre proposé par le constructeur	64
4.5.1 le réseau de terre proposé par le constructeur	65
4.5.2 L'amélioration du réseau	70
4.6 Le nouveau dimensionnement	75
4.6.1 Premier dimensionnement	75
a. Analyse de la grille préliminaire	77
b. Répartition de tension de pas	78
c. Répartition de tension de contact	79
4.6.2 Deuxième dimensionnement	80
a. Répartition de tension de pas	82
b. Répartition de tension de contact	82
4.7 Comparaison entre les résultats	86
4.8 Conclusion	87
Conclusion générale	88
Bibliographie	

1.1 Introduction :

Toutes les installations électriques (sous-stations, pylônes, transformateurs et les installations électriques dans les bâtiments) ont besoin d'un circuit de protection (La Mise à la terre). La mise à la terre d'une installation électrique peut être réalisée de différentes manières, Dans le présent chapitre, on va rappeler les notions de base indispensables à l'analyse des mises à la terre en générale et le réseau de terre en particulier et les propriétés des sols la résistance et la résistivité.

1.2 La société CEEG :

La compagnie de l'Engineering de l'Electricité et du Gaz CEEG est une filiale du groupe SONALGAZ chargée de la maîtrise d'œuvre (études, conduit, contrôle des travaux, réception et mis en service) des projets de réalisation d'infrastructure énergétiques.

La société assure les prestations de conception du projet, l'élaboration de documents techniques, l'aide au choix des entreprises, le suivi et la coordination des travaux de réalisation et l'assistance à la réception des ouvrages.

1.3 Description du projet :

Une centrale de génération électrique de cycle combiné, qui comprend deux bâtiments de génération électrique, chacun de configuration 2 par 1, constitué d'une tranche de production avec : deux (2) turbines à gaz en connexion à des chaudières de récupération et une (1) turbine à vapeur, leurs auxiliaires, et les systèmes habituels pour les deux bâtiments de génération d'énergie, avec une puissance de 2 par 631MW approximativement[1].

La centrale d'énergie de cycle combiné sera installée à AIN OUSSERA, Wilaya de Djelfa, République Algérienne, sur un terrain propriété de la Société Algérienne de Production de l'Electricité, situé à environ 7 Km au Sud-Est de la ville d'AIN OUSSERA. La superficie totale du terrain pour l'implantation de la centrale est de 40 Ha.

La centrale pourra fonctionner en combustible double, par gaz naturel ou par gasoil, comme combustible de secours [1].

1.3.1 Emplacement du projet :

Comme déjà indiqué, la centrale électrique de cycle combiné de DJELFA sera située à AIN OUSSERA, wilayat de DJELFA, République Algérienne.

Le terrain pour l'implantation de la centrale se situe approximativement à 730m au-dessus du niveau de la mer [1].

1.4 La mise à la terre :

La mise à la terre est l'ensemble des moyens mis en œuvre pour relier une partie métallique conductrice à la terre. 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 puissance, on emploie l'expression « prise de terre », en réservant le terme « réseau de terre » à l'installation importante telle que celles des postes électriques.

1.5 La prise de terre :

Une prise de terre est réalisée par l'enfouissement dans le plan vertical un corps conducteur enterré en contact directement avec la terre à une profondeur bien déterminé [2]

1.5.1 Prise de terre "profonde" :

Une prise de terre est dite "profonde" dès que la profondeur atteinte est supérieure à 3 mètres. En effet, cette prise de terre est réalisée par l'enfoncement dans le plan vertical de piquets auto-allongeables [2].

1.5.2 Prise de terre de "surface" :

Elle est également réalisée par l'enfouissement dans le plan horizontal de câble, de grilles, etc. suivant une forme géométrique adaptée. La profondeur d'enfouissement est de 0,80 à 1 m [2].

1.6 Le réseau de terre :

Un réseau de terre est constitué d'un ensemble de conducteurs enterrés en contact direct avec le sol et reliés électriquement entre eux suivant une forme géométrique adaptée à une profondeur bien déterminée

1.7 Le rôle d'une mise à la terre :

Le rôle d'une mise à la terre d'une installation électrique 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, d'assurer le maintien de :

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

1.8 Effet du courant sur le corps humain :

Lors du passage d'un courant de défaut à travers le corps humain, un danger d'électrocution peut se produire le graphe suivant représente les déférente zone des

effets physiologiques en fonction du temps de passages du courant électrique alternatif
50-60 Hz

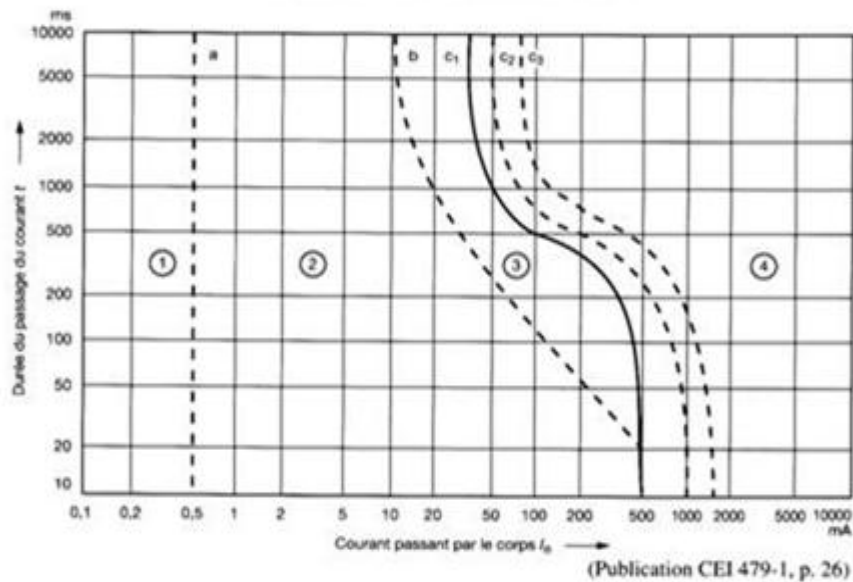


Figure 1.1 : effets physiologique en fonction de temps [2]

1.8.1 Interprétation de la courbe :

- Zone 1 : aucune réaction
- Zone 2 : aucun effet dangereux
- Zone 3 : effets non mortels, tels que contraction musculaire au-dessus des valeurs de « non lâcher », difficulté de respiration, des arrêts temporaires du cœur, ect
- Zone 4 : fibrillation ventriculaire probable, provoque l'arrêt de la respiration et brulure graves.

Au – delà de certaines valeurs de courant il existe des risques considérables qui peuvent être l'arrêt respiratoire, l'arrêt cardiaque, ect

La protection des êtres humains est assurée dans la mesure au les grandeurs du courant et/ou la tension appliquée restent en de – là de limites définies dans la littérature.

1.9 Les surtensions dues à la foudre :

1.9.1 Généralité sur la foudre :

Le mécanisme de la foudre se résume comme suit, la terre et l'électro-sphère, zone conductrice de l'atmosphère (épaisseur de l'ordre de 50 à 100 km), constituent un condensateur sphérique naturel qui se charge par ionisation d'où un champ électrique dirigé vers le sol de l'ordre de quelques centaines de volts/mètres. L'air étant faiblement conducteur, il existe donc un courant de conduction permanent associé, de l'ordre de 1500 A pour tout le globe terrestre.

L'équilibre électrique est assuré lors des décharges par pointes, par pluies et coups de foudre. La formation des nuages orageux, masses d'eau sous forme d'aérosols, s'accompagne de phénomènes électrostatiques de séparation de charges : les particules légères chargées positivement sont entraînées par les courants d'air ascendants, et les particules lourdes chargées négativement tombent sous l'action de leur poids. Il arrive également qu'à la base du nuage se trouvent des îlots de charges positives à l'endroit de pluies intenses. Globalement à l'échelle macroscopique, il y a création d'un dipôle. Lorsque le gradient limite de tenue au claquage est atteint, une décharge se produit au sein du nuage ou entre nuages ou entre nuage et sol. Dans ce dernier cas on parle de foudre.

1.9.2 Mode de protection :

La base de toute protection contre les surtensions est le réseau de terre équipotentiel, le réseau de terre idéal étant une surface très conductrice en tous points dont la tension serait nulle par rapport au sol lointain. Pour pouvoir protéger les équipements contre les surtensions dû à la foudre. Les parafoudres doivent être mis à la terre.

1.10 Élévation de potentiel de terre :

Une élévation de potentiel de terre (EPT) se produit quand un courant électrique de forte intensité s'écoule à la terre. Le potentiel électrique est plus élevé au point où le courant pénètre dans le sol, et diminue avec l'éloignement de ce point. [3]

1.11 Potentielle de référence :

La tension de masse de différents équipements placés dans la même installation, lorsqu'ils sont connectés électriquement, doit rester fixée à un potentiel identique même pendant les perturbations.

Dans les réseaux à neutre relié directement à la terre, le réseau de terre des installations contribue à fixer le potentiel des phases saines pendant un défaut, mais les courants de défaut peuvent alors atteindre des valeurs importantes (KA). Ces qui montent l'importance de la résistance de terre et de la qualité de l'équipotentialité des réseaux de terre.

1.12 La Masse :

C'est la partie conductrice d'un matériel électrique, qui n'est pas normalement sous tension, mais qui peut le devenir en cas de défaut d'isolement des parties actives de ce matériel [4]

1.13 Tension de pas :

Comme représenté dans la figure 1.2 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]

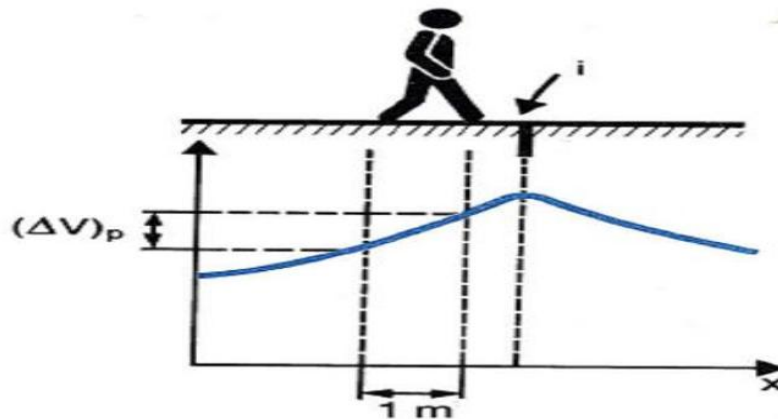


Figure 1.2 Tension de pas

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

A une distance d de l'impact d'un courant de défaut au sol, en considérant un sol homogène de résistivité ρ et une répartition purement résistive de potentiel.

1.14 Tension de contact :

C'est la différence de potentiel à laquelle est soumis l'homme quand il touche un objet porté à un potentiel non nul (tension entre pied et main) [4].

On distingue deux sortes de contacts : le contact direct et le contact indirect [5]

1.14.1 Contact direct :

C'est le contact d'une personne avec une partie active d'un matériel sous tension. Le contact peut avoir lieu avec une phase ou avec le neutre (Figure 1.3)

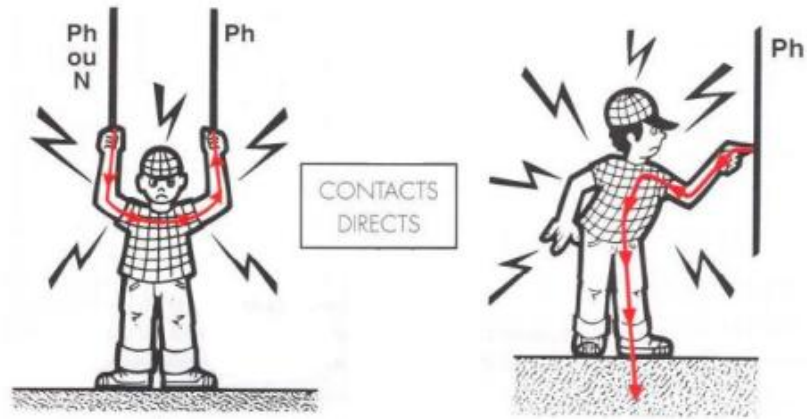


Figure 1.3 contact direct

1.14.2 Contact indirect :

La tension de contact (figure 1.4) est la différence de potentiels entre une structure métallique mise à la terre et un point situé à la surface du sol, à une distance égale à 1 m

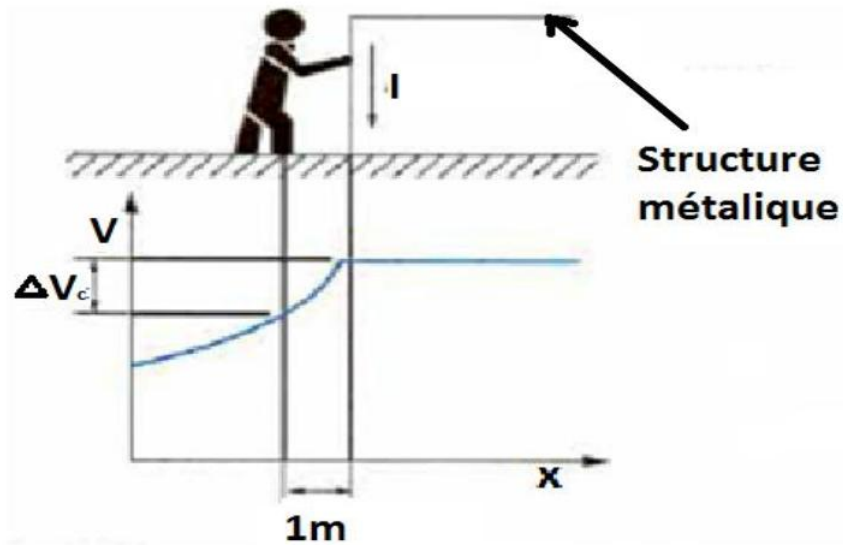


Figure 1.4 contact indirect

1.15 Les Éléments d'une mise à la terre :

Une mise à la terre est habituellement composée d'une ou de plusieurs électrodes verticales (piquets) ou horizontales (grilles). La forme de la prise de terre est normalement commandée par l'emplacement physique des appareils et des structures métalliques à mettre à la terre. Par exemple, la mise à la terre d'un poste de transformation ou de distribution est généralement constitué d'un réseau maillé de conducteurs enfouis dans le sol et formant le treillis du poste.

1.15.1 Les piquets de terre :

Les piquets de terre sont de longues baguettes ou tubes métalliques placés verticalement dans le sol, afin de traverser les couches profondes de celui-ci. [5]

1.15.2 le réseau de terre primaire :

Les grilles sont des électrodes maillées. Elles sont principalement utilisées pour des prises de terre dans le cas de surfaces au sol importantes, comme par exemple, les stations électriques. Les grilles de ce type d'électrode sont généralement préfabriquées et correspondent aux dimensions de l'installation. Elles assurent ainsi une distribution favorable et approximativement uniforme du gradient de potentiel surfacique. Elles peuvent être utilisées avantageusement dans les terrains difficiles. [5]

1.15.3 le réseau de terre secondaire :

Des conducteurs de taille déférente sont utilisés pour relier l'installation à la grille de mise à la terre. Tout matériaux conducteur au-dessus du sol qui pourrait éventuellement être excité comme des structure métalliques, des châssis de machines, des réservoirs, des pièces métalliques qui pourraient avoir un potentiel différent des autres et tous les autres équipements qui pourraient être la source d'un courant de défaut devraient être liés par la grille de mise à la terre

1.16 Défauts affectant le réseau de terre :

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

Les courants de foudre ont un grand effet sur le réseau de terre. En effet, un courant de foudre important peut avoir des conséquences thermiques destructives sur la structure de mise à la terre (décomposition, fusion, carbonisation) [4].

La protection des électrodes de terre contre la corrosion est assurée par une couche de zinc recouvrant l'électrode fabriquée en cuivre ou en acier. L'aluminium n'est pas utilisé dans la fabrication d'électrodes à cause de l'oxydation de sa surface, ce qui détériore sa conductivité [7].

Il faut placer les prises de terre dans une zone où la température est constante. La présence d'eau et de sels dans les sols ayant une impédance très faible, est souvent à l'origine d'une importante corrosion au niveau des prises de terre et de leurs bornes. Dans ce cas, il faut faire une vérification pour l'installation de mise à la terre au moins une fois par an [7].

1.17 Matériaux utilisées pour la construction des systèmes de mise à la terre :

Le tableau 1.1 illustre les matériaux des systèmes de protection contre la foudre et conditions d'utilisation. D'autres produits sont disponibles sur le marché pour ce faire. Dans tous les cas, il faut éviter toute solution tendant à réduire les performances de la mise à la terre avec le temps. C'est souvent le cas en pratique, les produits à base de sel permettent d'obtenir des faibles résistivités des sols mais perdent leurs caractéristiques dans le temps [9].

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

Tableau 1.1 : Matériaux des systèmes de protection contre la foudre et conditions d'utilisation

1.18 Les facteurs affectant la résistance de terre :

Tout d'abord, le code NEC (1987, 250-83-3) requiert une longueur de prise de terre minimum de 2,5 mètres (8,0 pieds) en contact avec le sol. Toutefois, quatre variables affectent la résistance d'un réseau de terre :

1. Longueur/profondeur de la prise de terre
2. Diamètre de la prise de terre
3. Nombre de prises de terre
4. Conception du réseau de terre

1.19 Régime de neutre et schéma de liaison à la terre en basse tension :

Le régime de neutre symbolise la situation d'une installation électrique par rapport au potentiel de la terre. Du fait que cette situation ne concerne que le neutre Le schéma de liaison à la terre représente tout simplement la manière dont les neutres du transformateur d'alimentation et des masses des récepteurs sont (ou pas) reliés à la terre ou au neutre du réseau d'alimentation.

❖ Les trois régimes de neutre

La norme NF C 15.100 définit trois régimes de neutre qui sont caractérisés par deux lettres :

1^{ère} Lettre : Situation de l'alimentation par rapport à la terre.

T: liaison d'un point avec la terre

I : isolation de toutes les parties actives par rapport à la terre ou liaison d'un point avec la terre à travers une impédance

2^{em} Lettre : Situation des masses de l'installation par rapport à la terre

T : masses reliées directement à la terre

N : masses reliées au neutre de l'installation, lui-même relié à la terre.

1.19.1 Régime TT :

Le neutre et les masses de l'installation sont directement reliés à la terre.

Cette solution est celle employée par l'E.D.F pour les réseaux de distribution basse tension. Aussitôt qu'un défaut d'isolement survient, il doit y avoir coupure : C'est la coupure au premier défaut

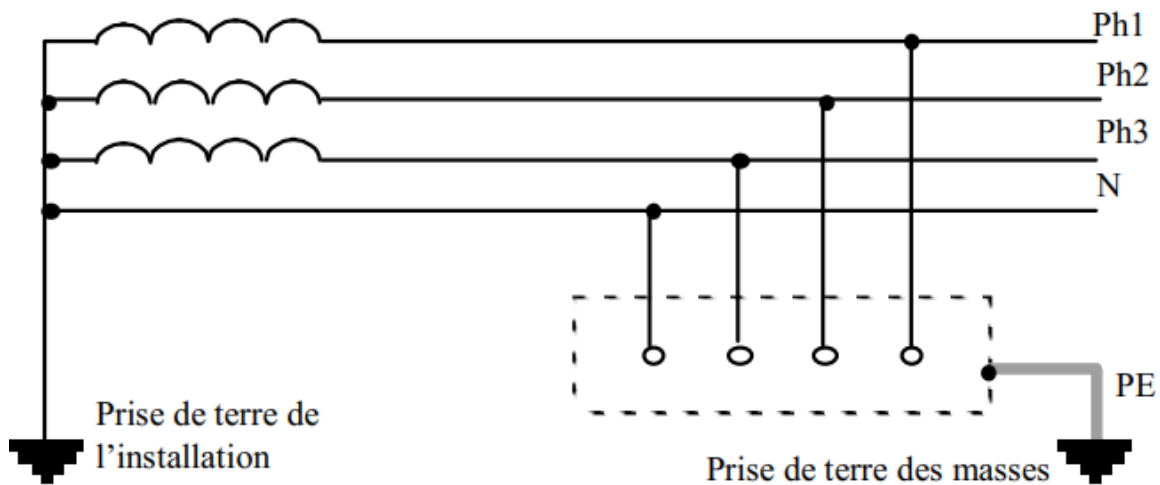


Figure 1.5 régime TT

1.19.2 Neutre isolé IT :

Le neutre est isolé ou relié à la terre par une assez forte impédance (1500 à 2000 Ω).

Le premier défaut ne présente pas de danger. Le courant phase masse est très faible et aucune tension dangereuse n'est à craindre. Mais il doit être signalé et recherché pour être éliminé. La coupure est obligatoire au deuxième défaut.

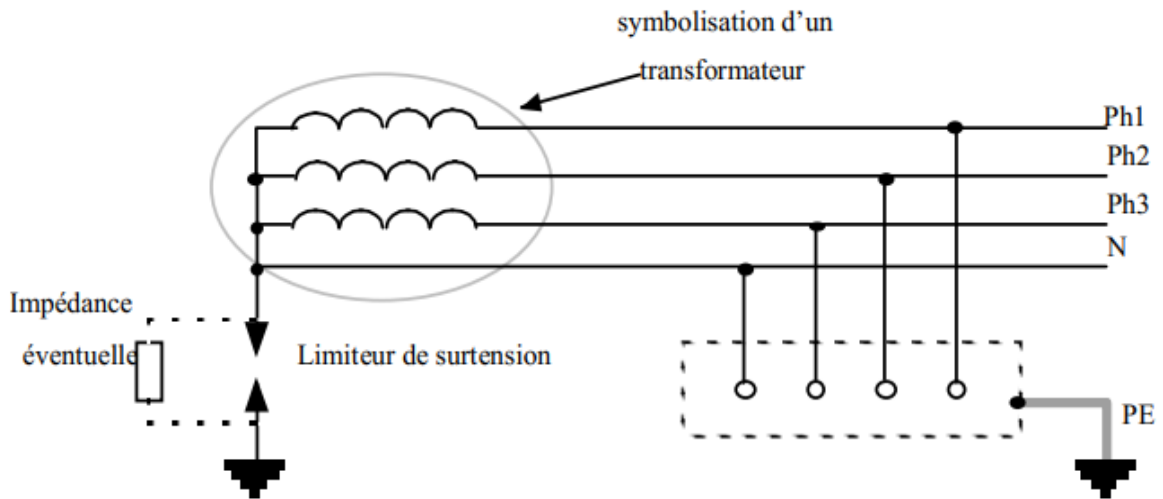


Figure 1.6 régime IT

1.19.3 Mise au neutre TN :

a. Schéma TN-C :

Le neutre et le conducteur de protection sont CONFONDUS. Ce type de schéma est interdit pour des sections de conducteurs inférieurs à 10 mm². En aval du schéma TN-S, on utilise l'appareillage tripolaire.

b. Schéma TN-S :

Le neutre et le conducteur de protection sont SEPARÉS. Il faut utiliser des appareils tripolaires plus le neutre.

Dans les deux cas, la protection doit être assurée par coupure au premier défaut.

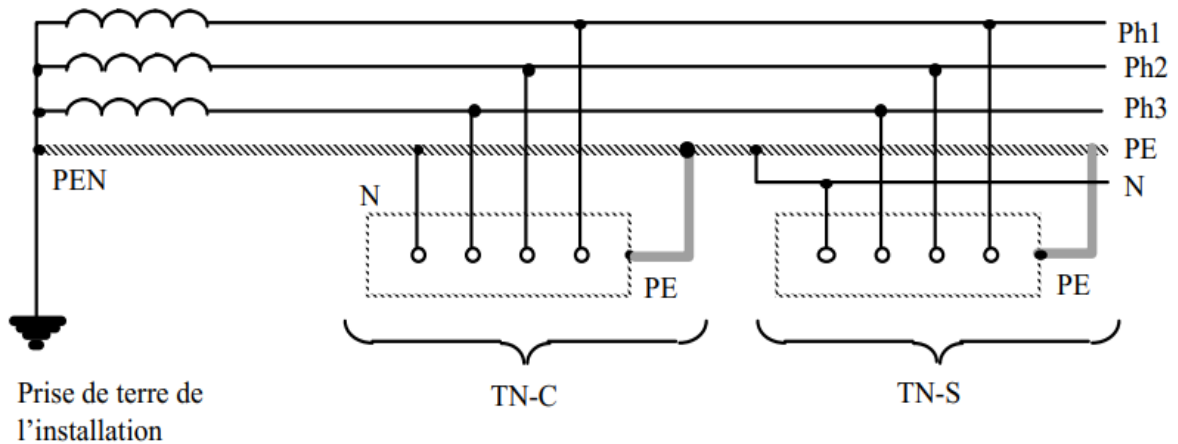


Figure 1.7 régime TN

1.20 Régimes de neutre utilisés en haute tension :

1.20.1 Mise à la terre par neutre isolé :

Il n'existe aucune liaison électrique intentionnelle entre le point neutre et la terre, à l'exception des appareils de mesure ou de protection. C'est une solution souvent utilisée pour les réseaux industriels (15 kV) nécessitant la continuité de service [10].

1.20.2 Mise à la terre directe :

Ce type de mise à la terre limite au mieux les surtensions, et la sélectivité des protections ne présente pas de difficultés. Par contre, en cas de défaut à la terre, le courant n'est pas limité, les dégâts et les perturbations sont maximales et le danger pour le personnel est important pendant la durée du défaut.[10]

Cette solution n'est pas utilisée pour la distribution en haute tension. Elle peut être utilisée quand la puissance de court-circuit de la source est faible.

1.20.3 Mise à la terre par l'intermédiaire d'une résistance :

Cette solution doit être appliquée lorsque le neutre MT du transformateur d'alimentation est accessible et lorsque son impédance propre est insuffisante pour limiter convenablement les courants de défaut, ce qui est le cas le plus courant [10]

1.20.4 Mise à la terre par l'intermédiaire d'une réactance :

- Réactance accordée (bobine de Petersen)

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

- Réactance de limitation

Cette solution peut provoquer des surtensions sévères. Elle n'est applicable que si l'impédance de limitation a une valeur faible [10].

1.21 Résistance et résistivité du sol :

La résistivité du sol est la résistance spécifique du sol, elle dépend de plusieurs facteurs qui influencent la formation d'électrolytes. Les facteurs principaux sont :

- Le type du sol
- La dimension des grains
- La porosité (pourcentage de volume des vides dans le sol)
- Le pourcentage d'eau contenu dans le sol
- Le pourcentage de sels solubles
- Le pourcentage d'acides et de bases
- La température

Le tableau I.2 donne une indication sur les résistivités des différents types de sol

Nature du sol	Résistivité en Ωm
Terrains marécageux	De quelques unités à 30
Humus	10 à 20
Tourbe humide	5 à 10
Sol pierreux nu	1500 à 3000
Calcaires compacts	1000 à 5000
Calcaires fissurés	500 à 1000

Tableau 1.2 les résistivités des différents types de sol

La résistivité du sol est une quantité variable et la seule manière de la connaître avec précision est de la mesurer

1.22 Conduction du courant électrique dans le sol :

Le courant de conduction dans le sol est un déplacement des charges électriques sous l'effet d'un champ électrique appliqué, ce mécanisme dépend de la structure physique et chimique du globe terrestre. [7]

Sous l'action d'un courant électrique, tout corps qui à l'état soluble peut se dissocier en anions et cations est appelé électrolyte. La présence d'eau dans un milieu est une condition essentielle à la conduction électrolytique. La combinaison des sels, des acides et des bases avec l'eau comme par exemple dans les océans et dans les couches de sol humide forment des solutions conductrices. On distingue deux types de conduction dans le sol :

a) La conduction électrolytique. Sous l'effet du champ électrique et du courant. Les électrolytes sont soumis à l'électrolyse, autrement dit, ils sont décomposés en anions et cations. Les charges négatives sont appelées anions ou ions négatifs. Ils se dirigent vers l'anode et les charges positives sont appelées cations ou ions positifs. Ils se

dirigent vers la cathode. Les ions qui atteignent les électrodes se départissent de leur charge, ils se déposent sur ces électrodes ou réagissent chimiquement avec elle. Le déplacement des ions engendre le passage du courant électrique, leur vitesse de déplacement est proportionnelle à l'intensité du champ électrique. Le nombre des particules dissociées ou le nombre des ions varie avec la température, par exemple pour une augmentation de 1° C. le nombre d'ions libérés augmente et la résistivité de l'électrolyte diminue d'environ 2%. Ainsi, le courant électrique augmente avec l'augmentation du champ électrique ou de la température. [7]

b) La conduction électronique. Elle est assurée par la présence des électrons libres qui sont caractérisés par une grande mobilité et se trouvent sur l'orbite externe de l'atome. Ce type de conduction est rencontré dans les milieux du globe où il y a une concentration des minerais et dépend de l'intensité du champ électrique. En général, les électrons libres sont rares dans les couches extérieures du globe mais quand même une faible conduction est toujours possible à cause de la grande superficie du milieu.[7]

Un autre phénomène qui mérite quelques explications est la décharge électrique. Lorsque l'intensité du champ électrique atteint une valeur critique de 1 à 3 kV/cm. il peut y avoir une formation de décharges électriques dans la partie gazeuse du sol sous forme d'étincelles ou d'arcs électriques selon l'intensité du champ. [7]

1.23 Mesure de la résistivité du sol :

1.23.1 Méthode de Wenner :

Le principe de mesure consiste à utiliser quatre électrodes qui sont disposées en ligne sur le sol, équidistantes d'une longueur a (Figure 1.8). Entre les deux électrodes extrêmes E et H, on injecte un courant de mesure I grâce à un générateur ; E et H s'appellent électrodes de courant. Entre les deux électrodes centrales S et ES, on mesure le potentiel

ΔV grâce à un voltmètre ; S et ES s'appellent électrodes de potentiel. Le terme V/I est la résistance R qui est mesurée avec un telluromètre à quatre bornes [6].

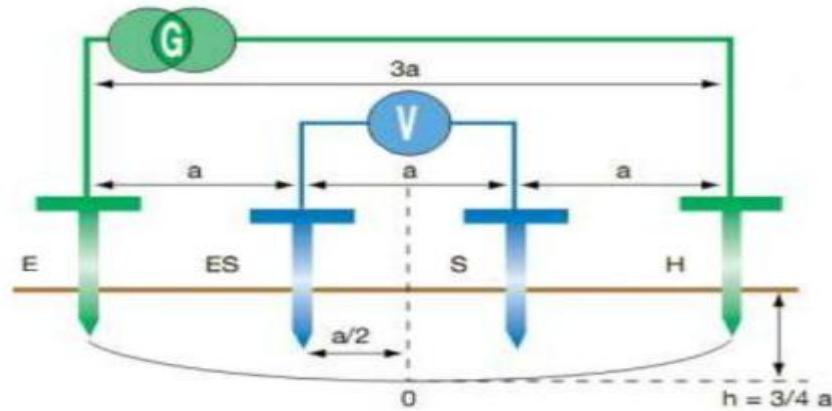


Figure 1.8 Méthode de Wenner

La valeur de la résistance R lue sur l'ohmmètre permet de calculer la résistivité (ρ) au point situé sous le point O , à une profondeur de, par l'expression simplifiée suivante obtenue dans le cas d'un sol homogène :

$$\rho = 2\pi a R \quad (1.1)$$

Avec :

ρ : Résistivité apparente en $\Omega.m$

a : la distance entre les électrodes en m

R : valeur (en Ω) de la résistance lue sur telluromètre

Pour déterminer exactement la performance de mise à la terre d'une station, il est nécessaire d'effectuer des mesures de résistivité le long d'une traversée (de préférence deux traversées orthogonales entre elles). La plus grande distance entre les deux sondes adjacentes dans la configuration de Wenner, devrait être idéalement au moins 3 fois (ou plus) la longueur maximale de la grille au sol. Cela établit une structure de sol avec un degré de confiance raisonnable pour l'analyse par ordinateur [13].

Si, les lignes électriques activées ou les équipements associés sont proches de

l'emplacement de mesure, un bruit électrique dû aux courants de charge sera induit dans les fils potentiels des circuits de mesure de résistivité. L'importance du bruit induit augmente avec l'espacement inter-électrodes, alors que la tension mesurée est décroissante. On peut éliminer ce problème en injectant des courants aux fréquences différentes de celle de la ligne électrique (par exemple 128 Hz), d'où la discrimination entre le courant injecté et le bruit électrique [13].

1.23.2 Méthode de Schlumberger :

La méthode de Schlumberger est basée sur le même principe de mesure de Wenner. La seule différence se situe au niveau du positionnement des électrodes (Figure 1.9):

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

La valeur de résistance R lue sur l'ohmmètre permet de calculer la résistivité par la formule [11].

$$\rho = \left[\pi \left(d^2 - \frac{a^2}{4} \right) R \right] / 4 \quad (1.2)$$

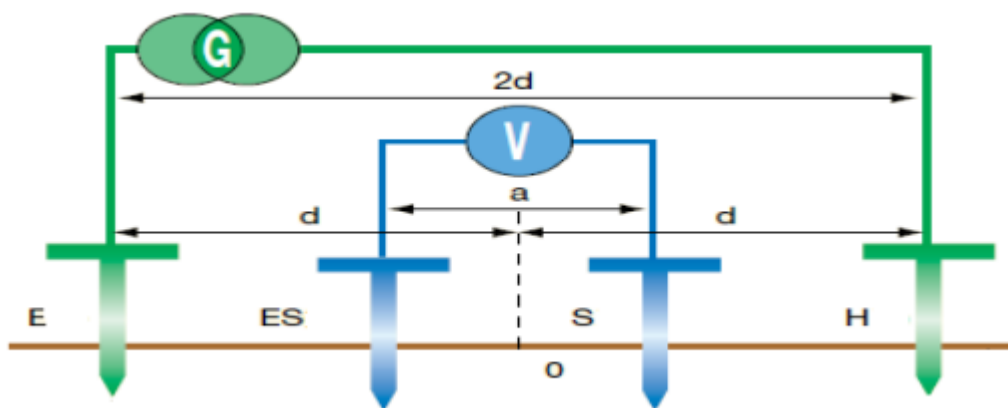


Figure 1.9 Schéma de mesure de la méthode de Schlumberger

La méthode de Schlumberger permet un gain de temps considérable sur le terrain notamment si l'on désire réaliser plusieurs mesures de résistivité. En effet, seules les 2 électrodes extérieures doivent être déplacées contrairement à la méthode de Wenner nécessitant de déplacer les 4 électrodes en même temps[12].

Bien que la méthode de Schlumberger permette de gagner du temps, c'est la méthode de Wenner qui est la plus connue et la plus utilisée. Sa formule mathématique est plus simple

1.23.3 Méthode à trois pôles :

Cette méthode nécessite l'emploi de deux électrodes (ou piquets) auxiliaires pour permettre l'injection de courant et la référence de potentiel. La position des deux électrodes auxiliaires, par rapport à la prise de terre à mesurer E, est déterminante. Pour effectuer une bonne mesure, il faut que la « prise auxiliaire » de référence de potentiel S ne soit pas plantée dans les zones d'influence des terres E et H 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 S à 62 % de E sur la droite EH (Figure 1.10)

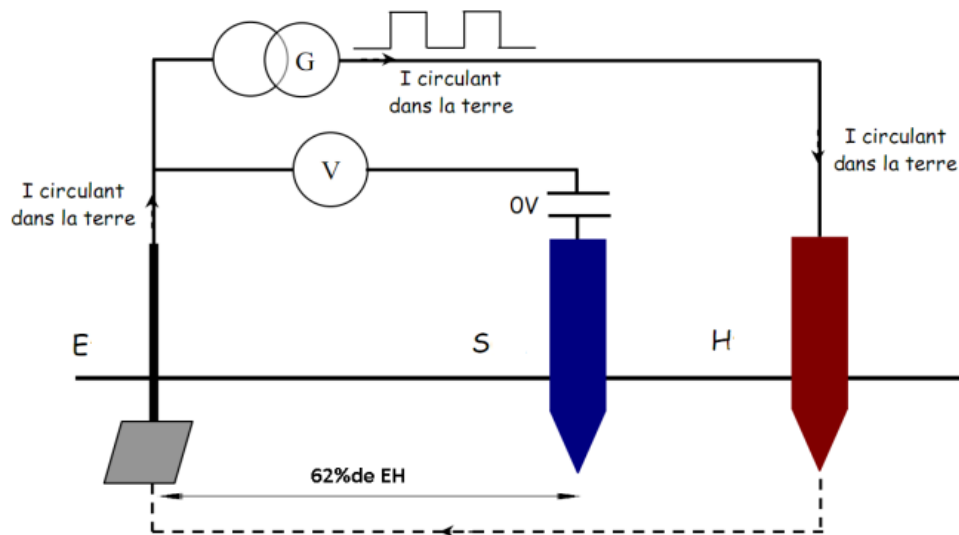


Figure 1.10 Schéma de mesure de la méthode de 62%

La méthode des trois piquets est utilisée pour la vérification des prises de terre existantes.

Cependant, les méthodes de Wenner et de Schlumberger sont utilisées pour les prises de terre à installer. En effet, les mesures de résistivité par les deux méthodes de Wenner et de Schlumberger ne peuvent s'appliquer que dans le cas de construction d'une nouvelle prise de terre elles permettent de prévoir, par avance, la valeur de résistance de terre et d'ajuster la construction selon la valeur de terre souhaitée [14]

1.23.4 Sol en plusieurs couches de résistivités différentes :

Pour le cas de sol en plusieurs couches de résistivités différentes, on peut aussi considérer le sol comme uniforme. Dans ce cas, La résistivité apparente ρ_a du sol supposée homogène peut être trouvée par les deux relations suivante. [14]

$$\rho_a = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} \quad (1.3)$$

$\rho_a(1) \rho_a(2) \rho_a(n)$ sont les résistivités de n différentes couches du sol mesurées avec la méthode de 4 électrodes. [3]

$$\rho_a = \frac{\rho_{a(\max)} + \rho_{a(\min)}}{2} \quad (1.4)$$

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

1.24 CONCLUSION :

On conclut que le réseau de terre est très important pour la protection des employé et les équipements, et on conclut aussi qu'il y-a plusieurs types de conducteurs, chaqu'un est utilisé pour un besoins précis, et l'importance de la résistance de sol ainsi que les méthodes de son calcul.

Figure 1.1 : effets physiologique en fonction de temps	6
Figure 1.2 : Tension de pas	9
Figure 1.3 : contact direct	10
Figure 1.4 : contact indirect	10
Figure 1.5 : régime TT	15
Figure 1.6 : régime IT	16
Figure 1.7 : régime TN	17
Figure 1.8 : Méthode de Wenner	21
Figure 1.9 : Schéma de mesure de la méthode de Schlumberger	22
Figure 1.10 : Schéma de mesure de la méthode de 62%	24
Figure 2.1 : Organigramme de la conception d'un circuit de terre	35
Figure 2.2 Variation de la résistance de terre en fonction de la longueur de l'électrode de terre	37
Figure 2.3 Résistance en fonction de la distance entre les électrodes cylindriques	38
Figure 2.4 Caractéristique $R=f(n)$	39
Figure 2.5 Résistance en fonction du diamètre de l'électrode cylindrique	40
Figure 2.6 : Configurations des grilles avec différents espacements entre conducteurs	42
Figure 2.7 : Configurations des grilles	44
Figure 2.8 : Configurations des grilles de mêmes surface (3600 m ²) et longueur des conducteurs (840 m)	46
Figure 2.9 : Configurations des grilles de mêmes surface (10000 m ²) et longueur des conducteurs (2200 m)	46
Figure 2.10 Réseau de terre avec des fissures de faible résistivité	48
Figure 3.1 : les coordonnées des sites d'échantillonnage dans la zone de la Centrale	50
Figure 3.2 : le réseau de terre proposée	55
Figure 4.1 : Maillage triangulaire (gauche) et un élément fini triangulaire (droite)	63
Figure 4.2 le réseau de terre proposé par le constructeur	65
Figure 4.3 l'interface principale du programme ETAP 12.6	66
Figure 4.4 L'éditeur de cas d'étude	67
Figure 4.5 L'éditeur du sol	68
Figure 4.6 Diagramme de distribution de tension de pas	69
Figure 4.7 Diagramme de distribution de tension de contact	69
Figure 4.8 Diagramme de repartition de tension de contacte sans couche superficiel	71
Figure 4.9 Diagramme de repartition de tension de pas sans couche superficiel	71

Figure 4.10 le réseau de terre amélioré	72
Figure 4.11 Diagramme de distribution de tansion de contact	73
Figure 4.12 Plan général de la station	74
Figure 4.13 Maillage préliminaire	75
Figure 4.14 Diagramme de distribution de tansion de pas	76
Figure 4.15 Diagramme de distribution de tansion de contact	77
Figure 4.16 Maillage améliorée	78
Figure 4.17 Diagramme de Répartition de tension de pas	79
Figure 4.18 Diagramme de Répartition de tension de pas	80
Figure 4.19 Diagramme de répartition de tension de pas finale	81
Figure 4.20 Diagramme de répartition de tension de contact finale	82

2.1 introduction :

Le réseau de terre doit vérifier deux principes fondamentaux :

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

Dans ce chapitre en vas parler sur les étapes de conception de réseau de terre selon la norme IEEE80-2000.

2.2 les étapes de conception d'un réseau de terre selon la norme IEEE 80-2000 :

La démarche à suivre peut se faire selon les étapes suivantes :

➤ Etape 1 :

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

Les méthodes de mesure de la résistance du sol et les types de sols sont mentionnées dans le premier chapitre 1.

➤ Etape 2 :

La section de conducteur (S) est déterminée par l'équation (II.1), Le courant de défaut donné par l'équation (II.2), devrait être le courant maximum de défaut prévu, qui sera conduit par n'importe quel conducteur dans le système de mise à la terre. Pour estimer la taille de conducteur de terre, le temps devrait refléter le temps maximum d'élimination du défaut.

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

$$3I_0 = \frac{V}{3R_f + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (II.2)$$

$$I_g = S_f * I_G \quad (II.3)$$

Avec :

t_c : Durée d'élimination de défaut (S)

S_f : facteur de division du courant de défaut

I_g : courant maximum de la grille (kA)

I_0 : composante homopolaire du courant de défaut (A)

T_m : température maximale admissible par le conducteur en °C

α_r : coefficient thermique de résistivité

TCAP: facteur de chaleur spécifique (J/cm³/°C)

T_a : température ambiante en °C

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

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

R_f : est la résistance estimée du défaut dans Ω (normalement on suppose $R_f = 0$)

Les différentes

Les différents coefficients sont exprimés dans le tableau II.1.

Description	Matériel conductivité (%)	α_r à 20°C (1/°C)	K_0 à 0°C (°C)	T_m (°C)	ρ_r à 20°C ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	TCAP (J/($\text{cm}^3\cdot^\circ\text{C}$))
Cuivre, recuit	100,0	0,00393	234	1083	01,72	3,42
Cuivre, commercial	97,00	0,00381	242	1084	01,78	3,42
Gaine de cuivre fil d'acier	40,00	0,00378	245	1084	04,40	3,85
Gaine de cuivre fil d'acier	30,00	0,00378	245	1084	05,86	3,85
Gaine de cuivre tige en acier	20,00	0,00378	245	1084	08,62	3,85
Aluminium, Qualité CE	61,00	0,00403	228	0657	02,86	2,56
Aluminium, Alliage 5005	53,50	0,00353	263	0652	03,22	2,60
Aluminium, 6201 alliage	52,50	0,00347	268	0654	03,28	2,60
aluminium fil d'acier	20,30	0,00360	258	0657	08,48	3,58
acier inoxydable tige en acier	09,80	0,00160	605	1400	17,50	4,44
Zingué tige en acier	08,60	0,00320	293	0419	20,10	3,93

Tableau 2.1 : Constantes de matériau

➤ **Etape 3 :**

Les tensions tolérables de contact et de pas sont déterminées à partir des équations suivantes.

Couche superficielle à résistivité élevée non considérée :

$$V_{\text{pas}} = (1000 + 6C_S\rho_S) \frac{0,116}{\sqrt{t_c}} \quad (\text{II.4})$$

$$V_{\text{cont}} = (1000 + 1,5C_S\rho_S) \frac{0,116}{\sqrt{t_c}} \quad (\text{II.5})$$

$$C_S = 1$$

Si aucune couche de surface protectrice n'est utilisée, alors $C_S = 1$

Couche superficielle à résistivité élevée considérée :

$$V_{\text{pas}} = (1000 + 6C_S\rho_S) \frac{0,116}{\sqrt{t_c}} \quad (\text{II.6})$$

$$V_{\text{cont}} = (1000 + 1,5C_S\rho_S) \frac{0,116}{\sqrt{t_c}} \quad (\text{II.7})$$

$$K = (\rho_S - \rho_{\text{sup}}) / (\rho_S + \rho_{\text{sup}}) \quad (\text{II.8})$$

$$C_S = \left(1 + K \left((1 - \rho_S) / \rho_{\text{sup}} \right) \right) / (2 * h_s + 0,09) \quad (\text{II.9})$$

ρ_S : la résistivité du matériau de surface en Ωm

ρ_{sup} : la *résistivité de la couche superficielle*

C_S : le facteur de réduction en la présence de matériau de haute résistivité à la surface, qui peut être calculé par

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

K : facteur de réflexion entre les différentes résistivités des matériaux

➤ **Etape 4 :**

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

➤ **Etape 5**

La résistance au sol d'une installation doit être très faible pour minimiser l'augmentation du potentiel de masse et augmenter la sécurité. La résistance au sol est généralement de 1Ω ou moins. Elle dépend principalement de la zone à occuper.

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

$$R_g = \rho_s \left[\frac{1}{L_c} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (\text{II.10})$$

ρ_s : résistivité de sol

L_c : longueur totale des conducteurs de la grille

h : profondeur d'enfouissement

A : surface de la grille.

➤ **Etape 6**

Le courant maximal de la grille I_G est déterminé selon l'équation (II.11). Seulement cette partie de tout le courant de défaut, $3I_0$ qui traverse la grille vers la terre éloignée, devrait être employée à la conception de la grille.

$$I_G = D_f S_f (3I_0) = D_f I_g \quad (\text{II.11})$$

D_f : facteur de décroissance pour la durée du défaut

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_c} \left(1 - e^{-\frac{2t_c}{T_a}} \right)} \quad (\text{II.12})$$

La durée de défaut, tf		Facteur de décroissance, D_f			
Seconds	Cycles at 60 Hz	$X/R = 10$	$X/R = 20$	$X/R = 30$	$X/R = 40$
0.008 33	0.5	1,576	1,648	1,675	1,688
0.05	3	1,232	1,378	1,462	1,515
0.10	6	1,125	1,232	1,316	1,378
0.20	12	1,064	1,125	1,181	1,232
0.30	18	1,043	1,085	1,125	1,163
0.40	24	1,033	1,064	1,095	1,125
0.50	30	1,026	1,052	1,077	1,101
0.75	45	1,018	1,035	1,052	1,068
1.00	60	1,013	1,026	1,039	1,052

Tableau 2.2 : Valeurs typiques de D_f

➤ **Etape 7**

Si, après la conception préliminaire, le EPI (Elévation de Potentiel à la surface du sol de l'Installation) est au-dessous de la tension de contact tolérable, aucune analyse approfondie n'est nécessaire. La conception préliminaire a besoin seulement des améliorations exigées permettant de relier les équipements au système de mise à la terre.

$$EPI = I_G R_g \quad (II.13)$$

➤ **Etape 8**

Les tensions de pas et de contact dépend de la taille et la forme de maille, pour que le système de mise à la terre soit sûr, les tensions de pas et de contact doit être inférieure a les tensions tolérables. Sinon, la conception de la grille nécessite une modification.

Les calculs de la tension de maille et celle de pas, relatives à la grille, peuvent être faits en utilisant les équations (II.14) et (II.15):

$$V_{\text{maille}} = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L_M} \quad (\text{II.14})$$

$$V_{\text{pas}} = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L_s} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

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

Ou

K_{ii} le facteur de correction relative aux effets des conducteurs situés sur le périmètre de la grille.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} \quad (\text{II.17})$$

Et K_h le facteur de correction relative à la profondeur de la grille.

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (\text{II.18})$$

K_i Le facteur de correction de la géométrie de la maille.

$$K_i = 0,644 + 0,148n \quad (\text{II.19})$$

K_s Le facteur de pas.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad (\text{II.20})$$

Le facteur géométrique n est composé de facteur $n_a n_b n_c n_d$

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \quad (\text{II.22})$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \sqrt{A}}} \quad (\text{II.23})$$

Pour une grille carrée : $n_b = 1$

$$n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{0,7 \cdot A} \quad (II.24)$$

Pour une grille carrée et rectangulaire : $n_c = 1$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (II.25)$$

Pour une grille carrée, rectangulaire et en forme L : $n_d = 1$

L_s : Longueur effective du conducteur

$$L_s = 0,75L_c + 0,85L_R \quad (II.26)$$

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

$$L_M = L_c + L_R \quad (II.27)$$

h : profondeur d'enfouissement

$h_o = 1$ m : profondeur de référence

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

D_m : Distance maximale entre deux points sur la grille

d : diamètre des conducteurs de la grille

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

L_p : Longueur périphérique de la grille

L_R : Longueur totale des piquets de terre

L_x : Longueur maximale du conducteur de la grille en x (m)

L_y : Longueur maximale du conducteur de la grille en y (m)

➤ **Etape 9**

Si, la tension calculée de maille est au-dessous de la tension tolérable de contact, la conception peut être complétée pour relier les équipements au système de mise à la

terre.

Sinon, la conception préliminaire devrait être modifiée (modification de la taille des mailles, de la profondeur du circuit ou de l'adjonction des piquets).

➤ **Etape 10**

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

➤ **Etape 11**

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

➤ **Etape 12**

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

Nous pouvons résumer ces étapes sous l'organigramme suivant :

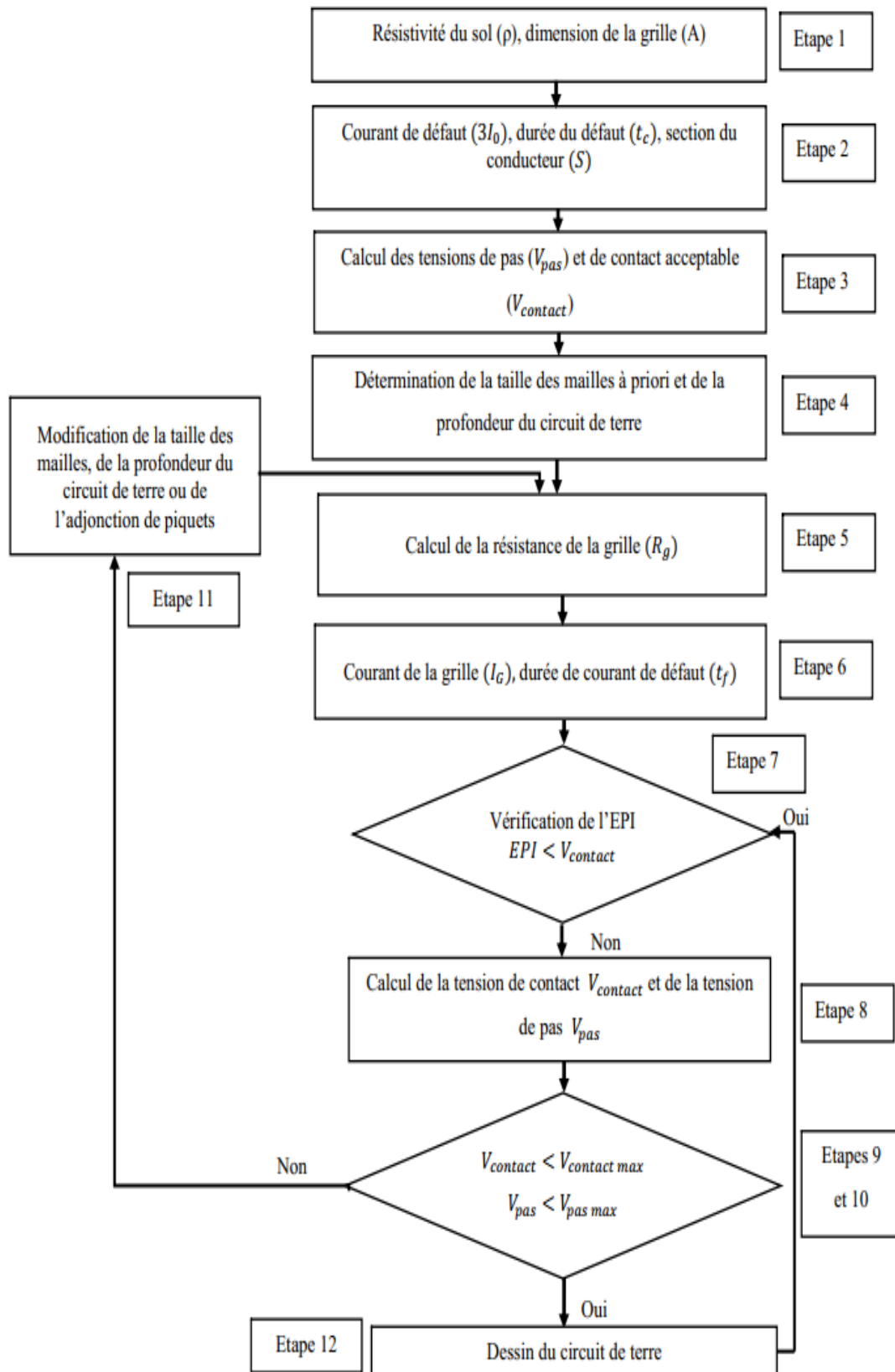


Figure 2.1 : Organigramme de la conception d'un circuit de terre

2.3 Amélioration de la conductivité 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, selon les normes. Il faut alors trouver des moyens efficaces pour réduire ces résistances. 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 [14].

2.3.1 Cas d'une électrode :

a. Augmentation de la longueur de l'électrode :

La figure 2.2 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 $\Omega.m$. 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 [14].

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 [14].

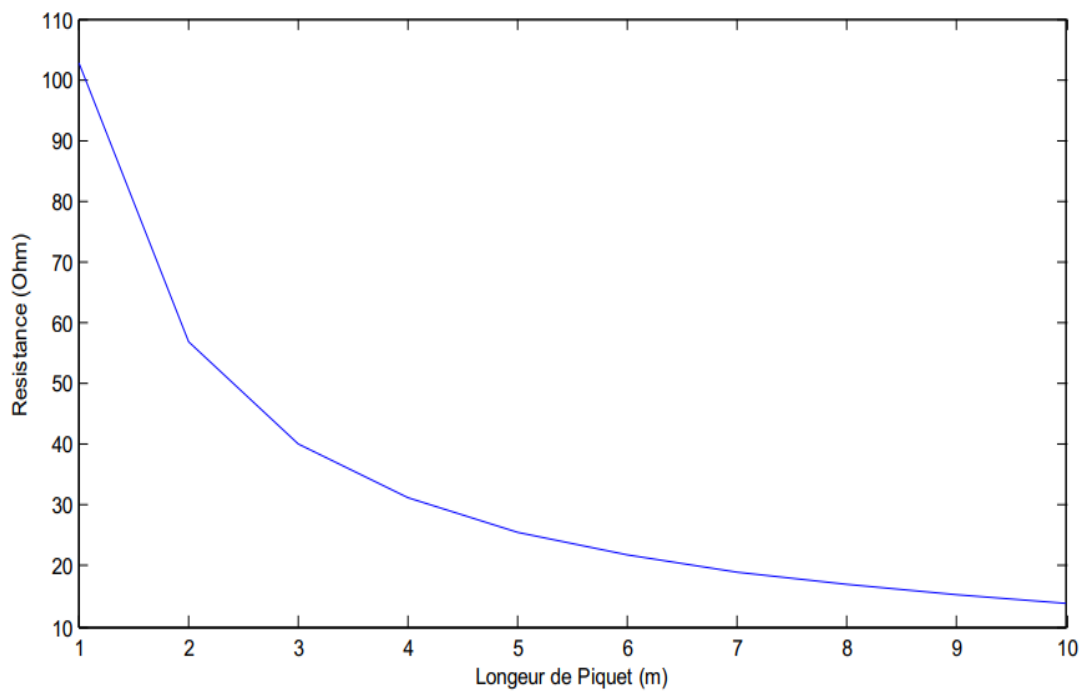


Figure 2.2 Variation de la résistance de terre en fonction de la longueur de l'électrode de terre

b. Augmentation de la distance entre électrodes :

La figure 2.3 montre la résistance de plusieurs configurations possibles des prise 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 $\rho = 100 \Omega\text{m}$ [14].

L'espacement entre deux conducteurs D est donné par :

$$D = \frac{2.L_x.L_y}{L - L_x - L_y} \quad (II.28)$$

L_x : Longueur du poste

L_y : Largeur du poste

L : Longueur totale du réseau maillé

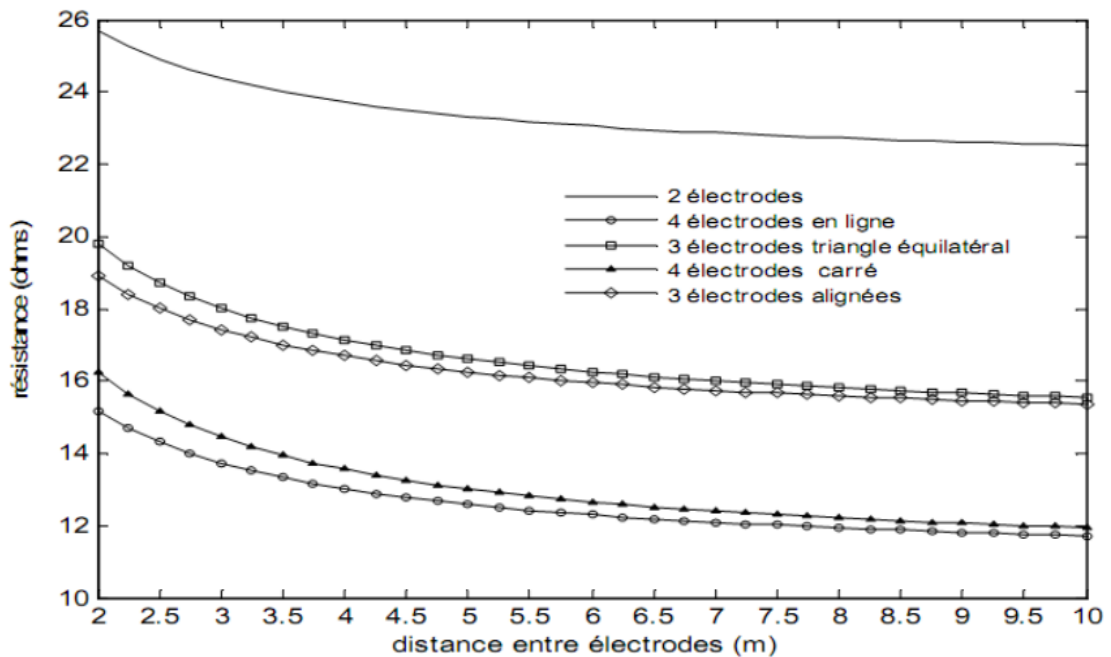


Figure 2.3 Résistance en fonction de la distance entre les électrodes cylindriques

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 [14].

La littérature renseigne que la distance de 6 m entre les électrodes est économiquement une limite du coût de la mise à la terre.

c. 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.

La figure 2.4 montre la résistance d'une mise à la terre en fonction du nombre d'électrodes cylindriques 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, $r = 0.0125$ et $\rho = 100 \Omega.m$

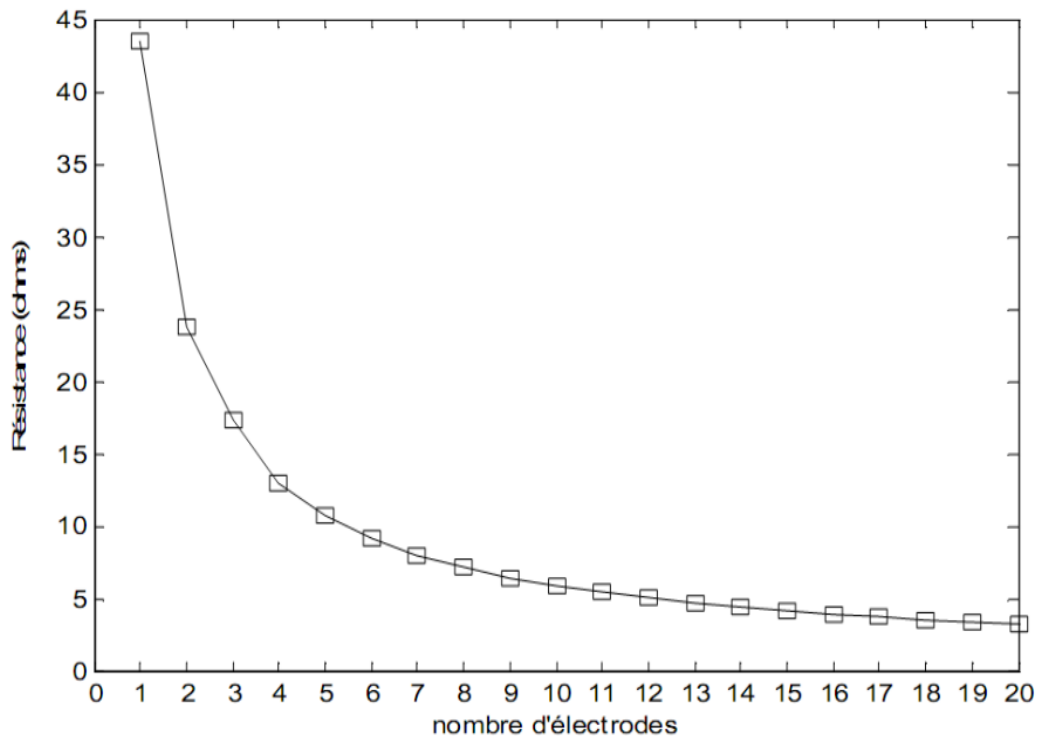


Figure 2.4 Caractéristique $R=f(n)$

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 [14].

d. 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, est donnée à la figure 2.5 suivante [14].

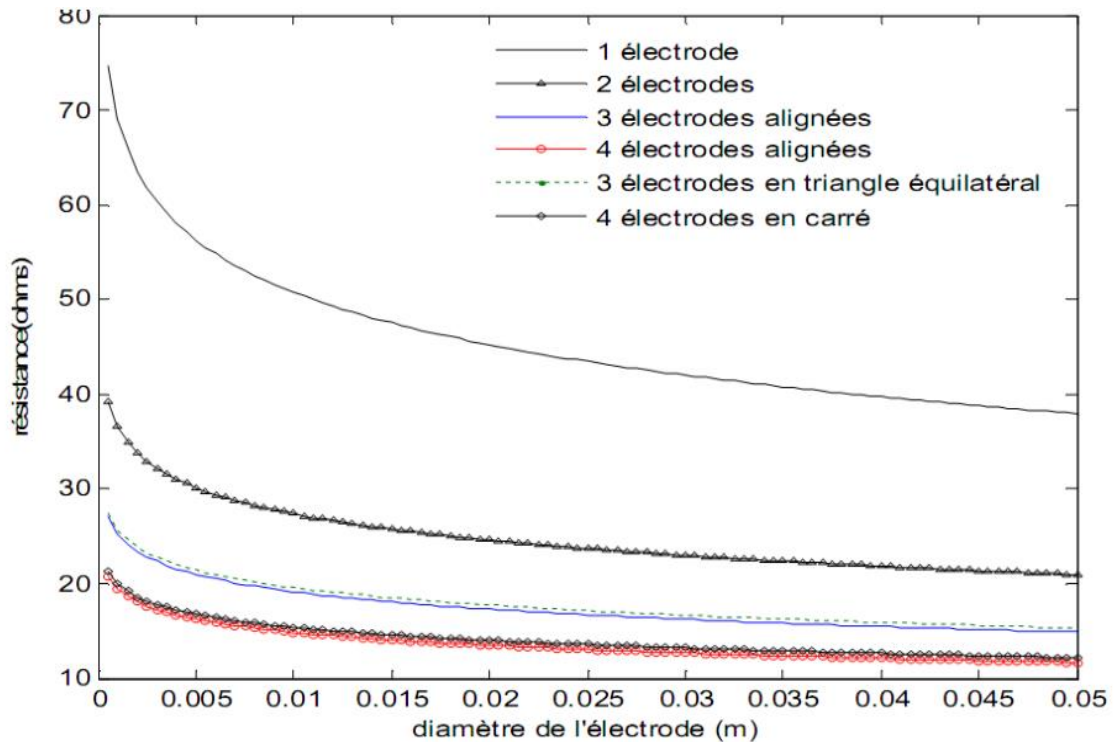


Figure 2.5 Résistance en fonction du diamètre de l'électrode cylindrique

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 [14].

$$S = I_g \cdot \sqrt{\frac{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r \cdot 10^4}{\text{TCAP} \cdot \ln\left[1 + \frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a}\right]}} \quad (\text{II.29})$$

S : Section du conducteur en (mm²).

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 connexions serties. (300°C)

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

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

T_r : Température de référence. (20 °C)

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

Section (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	$40 < I_{cc} \leq 63$

Tableau 2.3 Les sections normalisées obtenues en fonction des I_{cc}

II .3.2 Cas d'une grille :

Des recherches antérieures ont conclu que les facteurs les plus importants affectant la résistance sont :

a. L'augmentation du nombre de mailles :

Entraîne une diminution de l'élévation de potentiel, de la résistance de la grille et des tensions maximales de contact et de pas.

Dans le tableau 2.4 nous présentons les résultats d'une expérience sur deux grilles de 4 et 16 mailles l'élévation de potentiel de terre, la résistance de grille et les tensions de pas et de contact maximales.

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

Tableau 2.4 : Analyse de la grille pour différents maillages

b. l'espacement entre conducteurs :

Nous considérons deux formes de maillages distincts de la grille carrée : symétrique pour la première configuration, et asymétrique pour la deuxième. Les résultats de simulation, pour les deux cas, sont donnés dans le tableau 2.5.

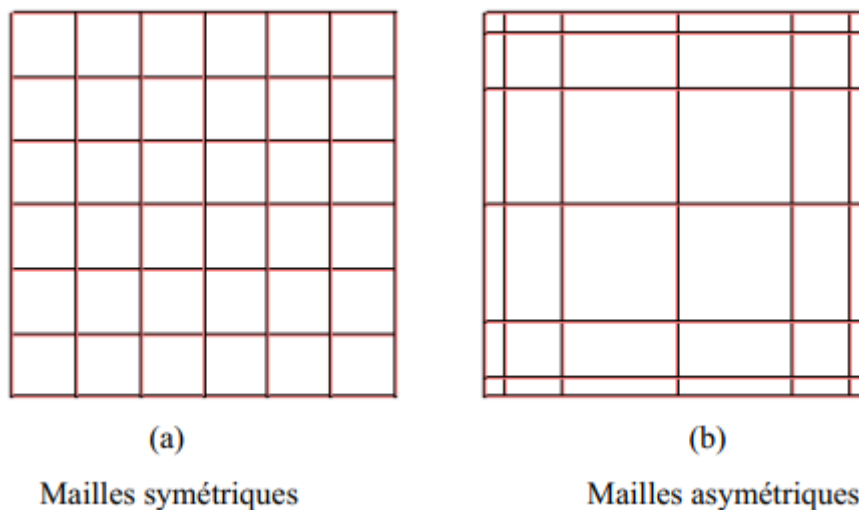


Figure 2.6 : Configurations des grilles avec différents espacements entre conducteurs.

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

Tableau 2.5 : Influence de l'espacement entre conducteurs sur les paramètres principaux de simulation

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

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

c. Influence du nombre de piquets :

Nous rajoutons des piquets à la grille carrée de 16 mailles présentée auparavant. Ces piquets sont perpendiculaires aux conducteurs de la grille. Plusieurs configurations ont été considérées, grille sans piquets, grilles avec 5, 9 et 25 piquets (Figure 2.7). La profondeur (0,5 m) du piquet peut être décrite comme étant la distance entre la surface du sol et la pointe des piquets [14] :

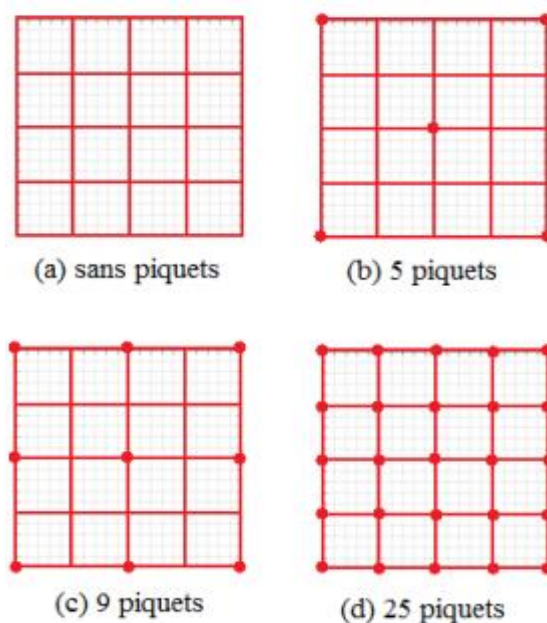


Figure 2.7 : Configurations des grilles

Après l'analyse de la grille, nous obtenons les résultats présentés dans le tableau 2.6.

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

Tableau 2.6 : Analyse de la grille pour différents nombres de piquets rajoutés.

Le rajout des piquets engendre une décroissance des caractéristiques électriques susmentionnées de la grille.

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

Nous proposons d'étudier une grille carrée de 16 mailles sans piquets, enterrée à différentes profondeurs dans le sol, comprises entre 0,5 et 3 m. Nous avons obtenu dans ces conditions, les résultats présentés dans le tableau 2.7 [14].

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

Tableau 2.7 indiquent que La profondeur doit être comprise entre 0,5 m et 2 m. Au-delà de cette dernière valeur la tension de contact augmente

e. Influence de la forme de la grille :

L'influence de la forme géométrique de la grille a été examinée. Pour cela, deux formes (carrée et rectangulaire), de même surface et de même longueur des conducteurs, ont été considérées (Figures 2.8 et 2.9). Les résultats de simulation sont donnés dans le tableau 2.8

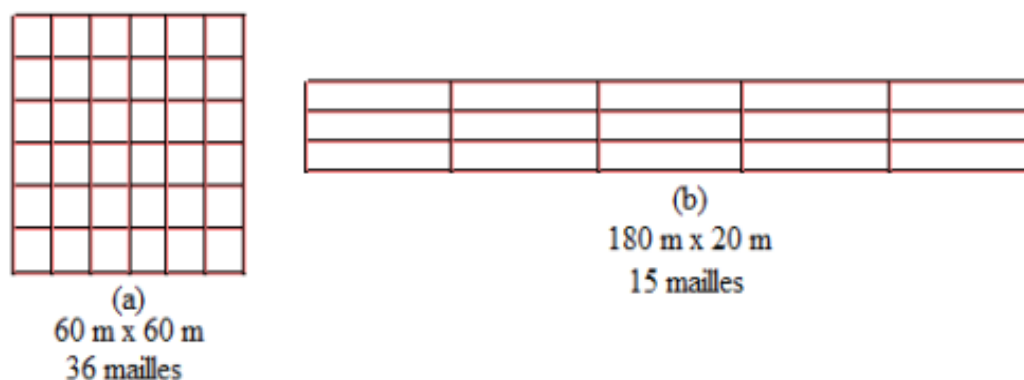


Figure 2.8 : Configurations des grilles de mêmes surface (3600 m²) et longueur des conducteurs (840 m)

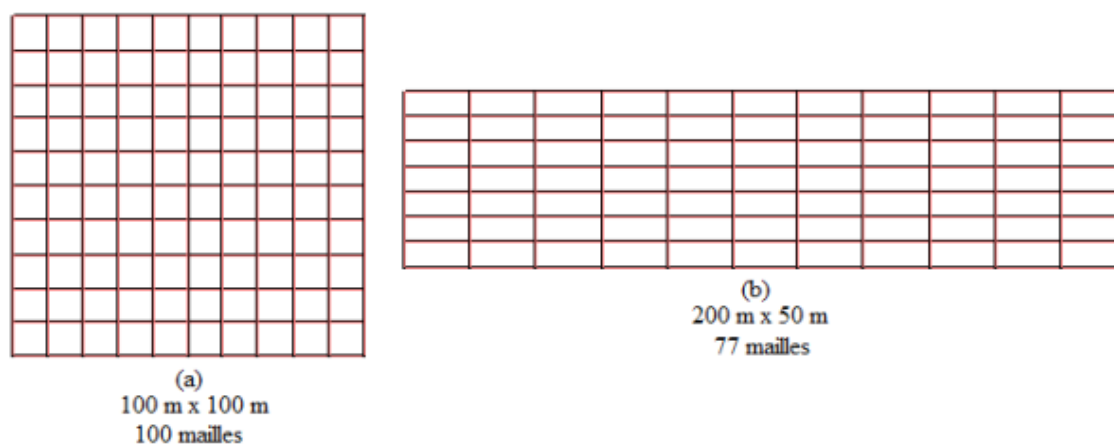


Figure 2.9 : Configurations des grilles de mêmes surface (10000 m²) et longueur des conducteurs (2200 m).

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

Tableau 2.8 Influence de la forme des grilles de mêmes surface et longueur des conducteurs sur les résultats de simulation

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

f. 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. 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 des cas proscrite à cause des risques de pollution des sols.

g. Autre méthode :

QingboMeng, Jinliang He et F. P. Dawalibi proposent Une nouvelle technique pour réduire la résistance de sol. 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.

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. 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. Cette nouvelle méthode a été appliquée dans les zones où la terre contient beaucoup d'eaux souterraines.

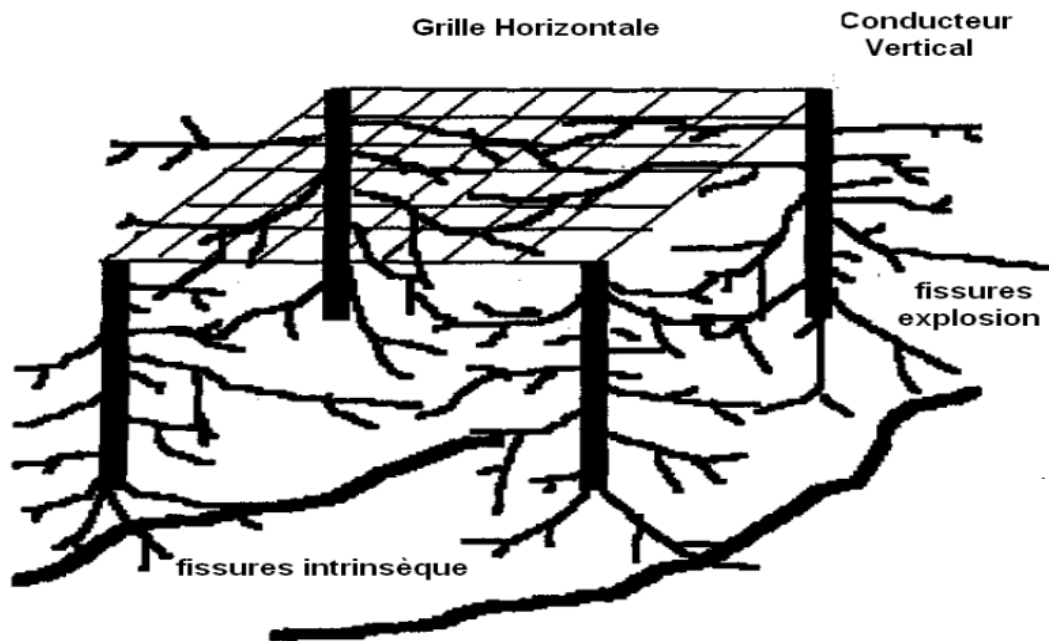


Figure 2.10 Réseau de terre avec des fissures de faible résistivité

2.4 Conclusion :

Afin de garantir la protection et respecter les exigences de la norme, des critères importants sont à respecter dont, limité les tensions maximales admissibles par le corps humain, car l'augmentation du potentiel peut être un danger pour le personnel et les équipements, les étapes ci-dessus doivent être suivies pour concevoir une meilleure conception d'un réseau de terre.

3.1 Introduction :

Dans le présent chapitre, on va exposer l'étude détaillée du réseau de terre de la centrale de Djelfa, Avec une application numérique sur le réseau proposé par le constructeur espagnol, selon la norme IEEE 80-2000, Nous utiliserons un fichier Excel Pour faciliter les calculs des différentes composantes du réseau.

3.2 DONNEES PRELIMINAIRES :

3.2.1 Conditions de l'environnement :

Environnement de la centrale : Zone industrielle

- Projection de la température mesurée à thermomètre sec (été): 45.0 °C
- Projection de la température mesurée à thermomètre sec (hiver) : 5.0 °C
- Température minimale mesurée à thermomètre sec: -8.0 °C
- Température maximale mesurée à thermomètre sec: 50.0 °C
- Température de fonctionnement: de -8.0°C à 50.0 °C
- Prévion humidité relative (été): 39.0%
- Prévion humidité relative (hiver): 77%
- Humidité atmosphérique relative min. coïncidente : 15%
- Humidité atmosphérique relative max. coïncidente : 99%
- Température maximale de période courte mesurée à thermomètre sec: 50°C
- Altitude du site: 730 m. au-dessus du niveau de la mer.
- Pression atmosphérique: 0.9401 bar

3.2.2 Système électrique :

Par rapport au calcul du réseau général de terre, il faut considérer les suivantes connexions neutres pour chaque niveau de tension :

- 400kV: La partie 400kV du transformateur principal est mise à la terre à travers un sectionneur.

A ce niveau il y a deux possibles connexions de mise à la terre : neutre directement à la terre et neutre isolée (à travers un sectionneur). Pour cette étude on a considéré le cas le plus défavorable. Alors, le niveau 400kV sera pris comme neutre isolée.

- 15kV: Mise à la terre à travers une résistance de mise à la terre de 7,5A (selon la documentation de GE).

- 6,6kV: Mise à la terre à travers une résistance de mise à la terre de 665A.

- 400V: Neutre isolé.

3.2.3 Modèle du sol :

Conformément à la section ci-dessus, un modèle du sol d'une valeur de résistivité de $133,9 \Omega\text{m}$ sera utilisé.

L'utilisation d'une couche superficielle d'un matériau à résistivité élevée de 10 ou 20cm d'épaisseur, est une pratique habituelle du fait de qu'il agit comme isolant en retardant l'évaporation de l'humidité du sol et en réduisant les courants en surface, Cela signifie des valeurs maximales admissibles de tension de pas et de contact plus élevées pour l'installation, comme indiqué aux équations de la norme IEEE 80.

L'image suivante montre les coordonnées des sites d'échantillonnage dans la zone de la Centrale

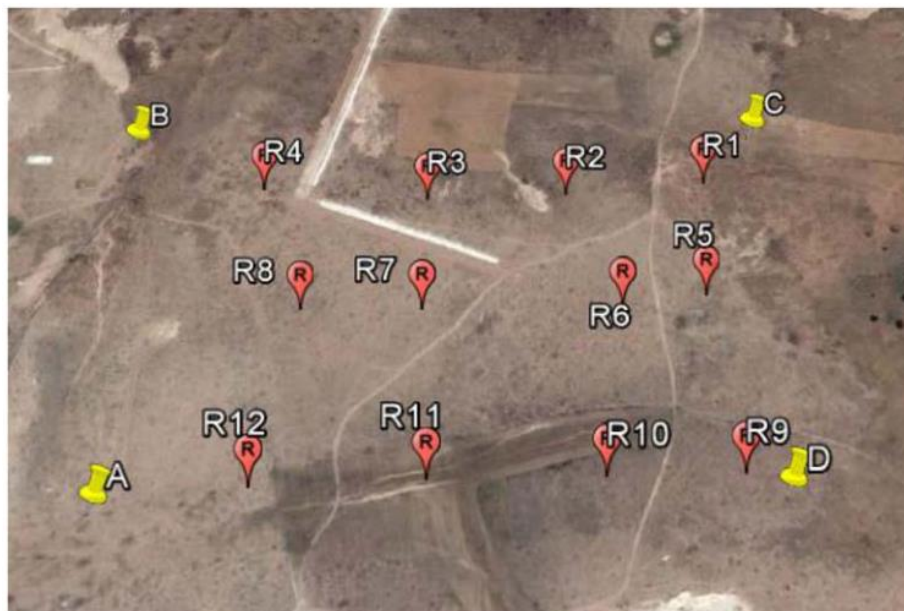


Figure 3.1: les coordonnées des sites d'échantillonnage dans la zone de la Centrale

Selon les résultats fournis par le Bureau des études les valeurs de résistivité obtenues au moyen de la Méthode de Wenner sont présentés dans le tableau suivant.

Echantillon	Profondeur(m)	Résistivité	Echantillon	Profondeur(m)	Résistivité
R1	1	135,09	R7	1	545,38
	2	160,85		2	699,95
	4	158,34		4	987,72
	8	150,8		8	618,27
	16	93,9		16	573,03
	32	93,69		32	40,01
	64	65,55		64	12,34
R2	1	236,25	R8	1	62,2
	2	380,76		2	85,45
	4	427,26		4	108,07
	8	201,06		8	100,53
	16	43,43		16	72,78
	32	31,77		32	42,83
	64	34,23		64	25,72
R3	1	92,99	R9	1	187,24
	2	133,2		2	50,27
	4	90,48		4	52,78
	8	85,45		8	24,43
	16	95,6		16	17,69
	32	90,28		32	28,75
	64	28,14		64	32,3
R4	1	153,94	R10	1	120,64
	2	155,82		2	154,57
	4	178,44		4	158,34
	8	160,85		8	80,42
	16	140,74		16	64,04
	32	166,48		32	50,06
	64	228,1		64	55,9
R5	1	191,64	R11	1	40,84
	2	130,69		2	52,78
	4	103,04		4	65,35
	8	100,53		8	70,37
	16	70,17		16	47,05
	32	49,86		32	40,82
	64	47,45		64	45,44
R6	1	243,79	R12	1	34,56
	2	209,86		2	43,98
	4	153,31		4	57,81
	8	90,48		8	60,32
	16	51,77		16	38,3
	32	36,19		32	42,83
	64	31,12		64	28,82

Tableau3.1 les valeurs de résistivité obtenues

3.3 Les étapes de démontonnement de réseau de terre :

Etape 1 : dimension de la grille et la résistivité du sol

La superficie occupée par la sous station est de :

$$A=454658,4 \text{ m}^2 \quad (\text{III.1})$$

Selon la formule (I.3) et les tableaux Des Valeurs De Résistivités Apparentes, la valeur moyenne de résistivité devrait être calculée comme la moyenne des différentes mesures prélevées aux différentes profondeurs.

La valeur moyenne de résistivité est de :

$$\rho = 133,9 \Omega \text{ m} \quad (\text{III.2})$$

Étape 2 : courant de défaut, durée de défaut, et section de conducteur

➤ Courant maximal de défaut à la terre

Selon les données mentionnées ci-dessus, le courant maximal de défaut à la terre pour chaque niveau de tension est de:

- Défaut à 400kV: 40kA courant de défaut phase-terre sur le côté du Transformateur Principal, considéré le transformateur principal comme point neutre isolé. Le réseau externe et la contribution de la centrale électrique ont été considérés.
- Défaut à 15kV: 7,5A - Mise à la terre à travers une résistance de mise à la terre de 6A (selon la documentation de GE).
- Défaut à 6,6kV: 665A
- Défaut à 400V: Neutre isolé

Selon les données mentionnées ci-dessus, le courant maximal de défaut du réseau à la terre correspond à un défaut à la terre de :

$$I_f = 40 \text{ kA} \quad (\text{III.3})$$

➤ Section du conducteur de mise à la terre

Le conducteur du réseau de terre doit être en cuivre étamé. Il sera dimensionné selon la norme 80-2000.

Le conducteur du réseau de terre sera dimensionné pour supporter tous les courants maximaux de court-circuit phase-terre sans endommagement ou détérioration.

Une fois le courant a attendu le conducteur de réseau à la terre auquel il est relié, le courant de défaut est divisé en parts égales. Par conséquent, les conducteurs du réseau ont seulement besoin d'être dimensionnés pour porter la moitié du courant de défaut total.

Pour le calcul du conducteur un temps de 1s sera utilisé exigence du client, et 0.5s Grid Code en considérant ce temps comme valeur maximale pour les protections HT pour déclencher et pour éliminer le défaut (critère conservatif).

Ainsi, le conducteur de mise à la terre sera dimensionné pour 40kA le courant maximal permissible pour le conducteur sera calculé par l'équation (III. 3) :

$$I_g = 0.5 * 40 \quad (III.4)$$

$$I_g = 20$$

La section maximale S du conducteur se calcul par l'équation (III.3) :

$$S = 20 \sqrt{\frac{1 * 0.00393 * 1.7241 * 10^4}{\frac{3.422}{\ln\left[1 + \frac{250 - 45}{234 + 45}\right]}}} \quad (III.5)$$

Avec:

TCAP = 3,422 J/cm³/°C [capacité thermique par unité de volume].

t = 1s [durée du courant]

$\alpha_r = 0,00393$ [coefficient thermique de résistivité à la température de référence Tr]

$\rho_r = 1,7241 \mu\Omega\text{cm}$ [résistivité du conducteur de terre à la température de référence Tr]

K0 = 234 [(1/ α_r)-Tr, selon le Tableau 1 de la Norme]

Tm = 250 °C [température maximale admissible]

Ta = 45°C [température ambiante]

Selon ce calcul, la section minimale nécessaire pour le conducteur de mise à la terre est de 119.90 mm².

Le câble standard choisi est : 1 x 120mm²

Étape3 : Les tensions tolérables de contact et de pas

La tension maximale admissible de pas et de contact est calculée selon la norme IEEE 80-2000.

Les considérations suivantes ont été prises :

- Le calcul des valeurs de tension admissibles sera réalisé pour une personne de 50 kg de poids.

- Le temps d'élimination en cas de défaut à 400kV considérée pour ce calcul est de t=0,5s.

➤ **Calcul de valeur maximale admissible de la tension de pas :**

Selon l'équation (II.4), la tension maximale de pas admissible est

$$V_{pas\ max} = (1000 + 6 * 1 * 133.86) \frac{0,116}{\sqrt{0,5}} \quad (III.6)$$

où:

$\rho_s = 133,9 \Omega m$ [résistivité]

$t = 0,5$ s [durée du courant]

$C_s = 1$ [facteur de déclasserement de la couche superficielle] (Couche superficielle à résistivité

élevée non considérée).

$$V_{pas\ max} = 295.8077$$

➤ **Calcul de valeur maximale admissible de la tension de contact :**

Selon l'équation (II.5), la tension maximale de contact admissible est de :

$$V_{touch\ max} = (1000 + 1,5 * 1 * 133.86) \frac{0,116}{\sqrt{0,5}} \quad (III.7)$$

$\rho_s = 133,9 \Omega m$ [résistivité]

$t_c = 0,5$ s [durée du courant]

$C_s = 1$ [facteur de déclasserement de la couche superficielle] (Couche superficielle à résistivité

élevée non considérée)

$$V_{touch\ max} = 196.9885 V$$

Etape 4 : la taille des mailles et profondeur de la grille :

Le réseau de terre proposée par le constructeur est le suivant.

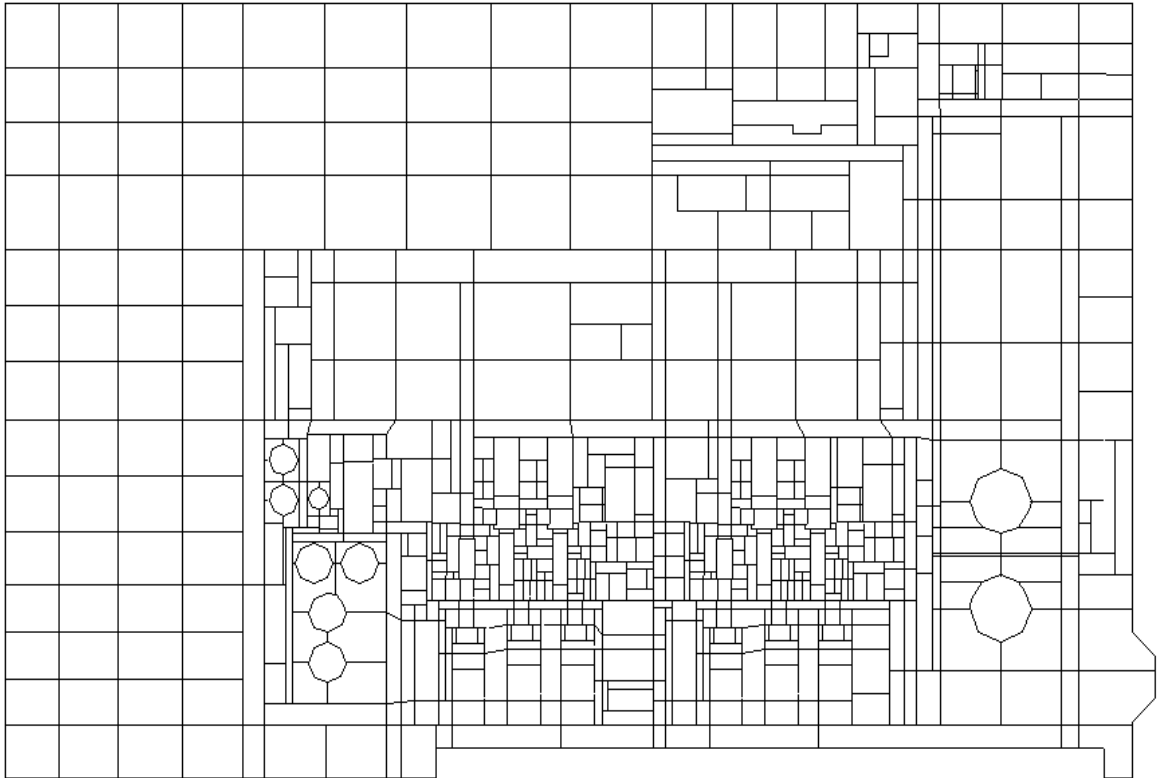


Figure 3.2 : le réseau de terre proposée

La longueur totale du cuivre :

$$L_m = 26596,5 \text{ m} \quad (\text{III.8})$$

Espacement maximale entre les conducteurs parallèles :

$$D = 62.2 \text{ m} \quad (\text{III.9})$$

La profondeur de la grille :

$$h = 0.8 \text{ m} \quad (\text{III.10})$$

Étape 5 : Résistance à la terre

Basé sur l'équation (II.10), la résistance à la terre est de :

$$R_g = 133.86 \left[\frac{1}{36318} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 454658,4}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.8 \sqrt{20/454658,4}} \right) \right] \quad (\text{III.11})$$

$$R_g = 0.092 \Omega$$

avec

$$\rho_s = 133,9 \Omega\text{m}$$

$$A = 454658,4 \text{ m}^2 \text{ (Aire de réseau de terre de la centrale électrique)}$$

$$h = 0,8 \text{ m}$$

L_M = longueur totale de cuivre enterré dans la réseau de terre

L_{cond} = 26596,5m longueur totale de câble enterré

L_{rod} = 0 m longueur totale des piquets

$L_M = L_r + L_c = 26596,5m$

Etape 6 : Le courant maximal de la grille I_G

Le courant maximal de la grille I_G est déterminé selon l'équation (II.11).

$$I_G = 40 * 0.5 * 1.12 \quad (III.12)$$

$$I_G = 44.79$$

Avec

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{0.127}{0.5} \left(1 - e^{-\frac{2*0.5}{0.127}}\right)} \quad (III.13)$$

$$D_f = 1.12$$

Et

$$t_a = 3.69 / (2 * 3.14 * 50 * 0.092) \quad (III.14)$$

$$t_a = 0.127$$

Etape 7 : L'élévation du potentiel

L'élévation maximale du potentiel à la terre du réseau de terre est résultat du courant de défaut multiplié par la résistance à la terre il doit être inférieur à la tension de contacte tolérable.

$$EPI = 44.79 * 0.092 \quad (III.15)$$

$$EPI = 4135,25$$

Où :

$I_G = 44.79$ kA

$R_G = 0,092 \Omega$

La valeur du EPI est supérieur à la tension de contact maximal admissible obtenu en étape 3, donc le dimensionnement n'est pas encore fini.

Etape 8 : Les tensions de pas et de contacte

1- calcul du facteur géométrique, pour une grille rectangulaire :

Selon l'équation (II.23) :

$$n_a = \frac{2 \cdot 35462}{2680,8} \quad (\text{III.16})$$

$$n_a = 26.46$$

Avec :

$$L_p = 2680,8 \text{ m}$$

Et l'équation (II.24) :

$$n_b = \sqrt{\frac{2680,8}{4 \sqrt{454658,4}}} \quad (\text{III.17})$$

$$n_b = 0.99$$

Pour une grille rectangulaire :

$$n_c = 1 \quad (\text{III.18})$$

$$n_d = 1 \quad (\text{III.19})$$

Le facteur géométrique est :

$$n = 26.46 * 0.99 * 1 * 1 \quad (\text{III.20})$$

$$n = 26.37$$

Le facteur de correction de la géométrie de la maille selon l'équation (II.20)

$$K_i = 0,644 + 0,148 * 26.37 \quad (\text{III.21})$$

$$K_i = 4.55$$

Le facteur K_{ii} :

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 * 26.37)^{\frac{2}{26.37}}} \quad (\text{III.22})$$

$$K_{ii} = 0.74$$

K_h le facteur de correction relative à la profondeur se calcul selon l'équation (II.19)

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.8}{1}} \quad (\text{III.23})$$

$$K_h = 1.34$$

K_s Le facteur de pas :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \cdot 0.8} + \frac{1}{62.2 + 0.8} + \frac{1}{62.2} (1 - 0.5^{26.37-2}) \right] \quad (III.24)$$

$$K_s = 0.21$$

L_s : Longueur effective du conducteur

$$L_s = 0.75 * 26596,5 + 0.85 * 0 \quad (III.25)$$

$$L_s = 26596,5$$

Grâce aux résultats précédents :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{62.2^2}{16 \cdot 0.8 \cdot 0.012} + \frac{(62.2 + 2 \cdot 0.8)^2}{8 \cdot 62.2 \cdot 0.012} - \frac{0.8}{4 \cdot 0.012} \right] + \frac{0.74}{1.34} \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot 26.37 - 1)} \right] \right] \quad (III.26)$$

$$K_m = 1.35$$

Donc, on peut utiliser l'équation (III.15) pour calculer la tension de contact :

$$V_{touch} = \frac{133.86 \cdot 1.35 \cdot 4.55 \cdot 44.79}{26596,5} \quad (III.27)$$

$$V_{touch} = 1038.23$$

Et l'équation (III.16) pour calculer la tension de pas :

$$V_{pas} = \frac{133.86 \cdot 0.21 \cdot 4.55 \cdot 44.79}{L_s} \quad (III.28)$$

$$V_{pas} = 214$$

Etape 9 et 10 : Comparaison de la tension admissible et de la tension obtenue

Une fois les tensions de pas et de contact sont calculées, Nous allons les comparer avec les tensions maximales. Les résultats obtenus en (III.6), (III.7), (III.27), (III.28) montre que :

$$V_{pas \ max} > V_{pas}$$

Et

$$V_{touch \ max} < V_{touch}$$

Etape 11 : Optimisation du réseau

Pour améliorer la grille, nous utiliserons une couche superficielle de 0,2 m, afin d'élever les valeurs maximales de pas et de contact.

Selon l'équation (II.6), la tension maximale de pas admissible est de :

$$V_{pas} = (1000 + 6 * 0.7 * 8534.4) \frac{0.116}{\sqrt{0.5}} \quad (\text{III.29})$$

$$V_{pas} = 7045.7 \text{ V}$$

Où :

Le facteur de déclassement de la couche superficielle se calcul par l'équation (II.9)

$$C_s = (1 - 0.91((1 - 133.86)/8534.4))/(2 * 0.8 + 0.09) \quad (\text{III.30})$$

$$C_s = 0.7$$

Avec

$$K = (133.86 - 8534.4)/(133.86 + 8534.4) \quad (\text{III.31})$$

$$K = -0.91$$

Selon l'équation (II.7), la tension maximale de contact admissible est de :

$$V_{touch} = (1000 + 1.5 * 0.7 * 8534.4) \frac{0.116}{\sqrt{0.5}} \quad (\text{III.32})$$

$$V_{touch} = 1884.5 \text{ V}$$

où:

$\rho = 133,86 \text{ } \Omega\text{m}$ [résistivité]

$\rho_s = 8534.4 \text{ } \Omega\text{m}$ [résistivité de la couche superficielle]

$t = 0,5 \text{ s}$ [durée du courant]

$h_s = 0,2\text{m}$ [épaisseur de la couche superficielle]

$k = -0.91$ [facteur de réflexion entre les différentes résistivités des matériaux]

$C_s = 0,7$ [facteur de déclassement de la couche superficielle]

Comme montrent les résultats (III.32) (III.29), (III.27), (III.28) Les valeurs maximales sont supérieures aux valeurs réelles.

$$V_{pas \text{ max}} > V_{pas}$$

Et

$$V_{\text{cont max}} > V_{\text{cont}}$$

Etape 12 la conception finale

La conception obtenue répond et respecte tous les étapes à suivre, d'où on admet ce dimensionnement.

Le fichier Excel est présenté en annexe B et C

3.4 Conclusion

Selon l'exemple théorique traité dans ce chapitre on conclut les équations et les hypothèses établies par la norme sont vérifiées, et on a pu concevoir un dimensionnement d'une sous-station sans prendre en considération les ouvrages de ce dernier.

4.1 Introduction :

Ce chapitre est composé de deux parties, une pour l'analyse et l'amélioration de réseau de terre proposé par le constructeur, a deuxième partie sera réservée pour la proposition d'un nouveau dimensionnement pour le projet, Ensuite, il y aura une comparaison entre le comportement des deux structures proposé, pour réaliser ce travail on va utiliser l'AUTOCAD pour dimensionner le réseau et l'ETAP pour la simulation.

4.2 Présentation AUTOCAD MEP :

AUTOCAD MEP est un logiciel de documentation de conception et de construction créé par AUTODESK pour les professionnels de la mécanique, de l'électricité et de la plomberie (MEP) ; y compris les ingénieurs, les concepteurs et les dessinateurs. AUTOCAD MEP est basé sur la plate-forme logicielle AUTOCAD et offre donc un environnement AUTOCAD familier. Les outils et fonctions spécifiques à une discipline inclus dans AUTOCAD MEP sont optimisés pour améliorer le flux de travail et accélérer la création de conceptions MEP.

4.3 Présentation d'ETAP 12.6 :

Ce programme peut effectuer des analyses de résistivité du sol. Il peut tracer la résistivité mesurée et calculée sur le même graphique, pour permettre la vérification facile de la qualité du modèle de sol. Cette analyse est nécessaire pour arriver à un modèle de sol qui sera, par la suite, utilisé pour l'analyse des élévations de potentiel. Le module supporte l'analyse du sol uniforme ou stratifié horizontalement en deux couches de résistivité différente.

ETAP calcule les tensions maximales admissibles de pas et de contact, selon la norme IEEE 80- 2000. L'utilisateur peut définir l'amplitude future de courant de défaut, l'épaisseur et la résistivité des couches de matériau (exemple : la pierre concassée) appliquées à la surface du terrain, le poids corporel et la durée prévue d'exposition.

En plus, il calcule le dimensionnement des électrodes de terre et l'élévation de potentiel à la surface du sol (GRP). Il peut également déterminer la résistance

équivalente des grilles de mise à la terre, de configuration arbitraire constituée de conducteurs de terre, de piquets de terre et d'arcs, puisqu'il emploie des méthodes matricielles pour résoudre la distribution de courant à terre. Des électrodes directement sous tension et/ou passives, non connectées à la grille mise sous tension, peuvent être modélisées afin d'évaluer les effets de proximité.

ETAP fait les analyses en se basant sur la Méthode des éléments finis.

4.4 Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis peut transformer une relation fonctionnelle en un système d'équations linéaires. La FEM a connu un grand développement depuis les années 1970, elle est devenue une méthode très populaire dans de nombreux domaines de la physique à cause de son utilisation à des structures complexes.

4.4.1 Description :

Elle consiste à trouver numériquement une solution approchée d'une équation aux dérivées partielles. Pour résoudre un problème par éléments finis avec conditions aux limites, il faut effectuer les opérations suivantes :

- Formulation vibrationnelle
- Choix des fonctions de bases
- Choix du domaine de travail et du maillage
- Résolution du système linéaire et calcul de la solution
- Affichage de données intéressantes.

4.4.2 Choix du maillage :

Le choix du maillage consiste à diviser le domaine de travail Ω en parties égales ou non, afin d'obtenir un espace discret. L'espace ainsi obtenu s'appellera espace d'interpolation, et aura toutes les propriétés d'un sous-espace vectoriel de Ω .

Les solutions héritées seront de ce fait, approchées. Les sous-divisions obtenues sont appelées éléments finis Figure (IV.1). Les points de jonction entre les éléments sont les

nœuds. Il faut noter que plus on a d'éléments, plus précise est la solution.

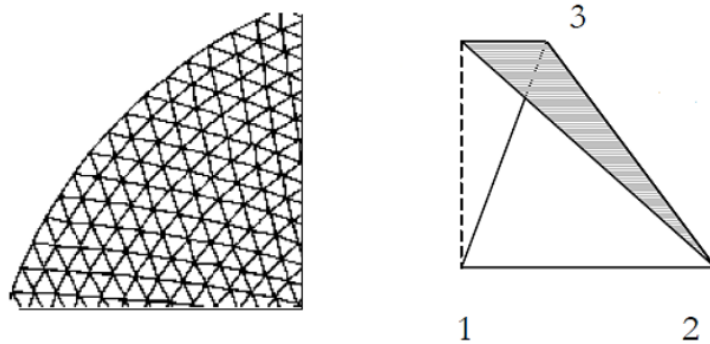


Figure 4.1: Maillage triangulaire (gauche) et un élément fini triangulaire (droite)

4.4.3 Vecteurs de base :

Ils constituent la base canonique de l'espace d'interpolation. Cette base est choisie en fonction du maillage adopté. De ce fait, toute solution de l'équation différentielle sera décomposée sur la base canonique de cet espace d'interpolation. Les valeurs des vecteurs de base au bord du domaine, sont fixées par les conditions aux limites du problème.

Les conditions les plus utilisées sont :

- Les conditions aux limites de type Dirichlet : la solution est nulle sur le bord du domaine.
- Les conditions aux limites de type Neumann : la dérivée normale de la solution est nulle au bord du domaine.

4.4.4 Formulation du système d'équations :

Cette partie contient trois étapes :

- Formulation des équations élémentaires dans chaque élément en utilisant soit la méthode de Ritz, soit celle de Galerkin.
- Somme des équations élémentaires dans tous les éléments pour former un système d'équations. Ce processus est connu sous le nom d'assemblage.
- Imposition des conditions aux limites pour obtenir le système d'équations final près à la résolution.

4.5 analyse de réseau de terre proposé par le constructeur :

4.5.1 le réseau de terre proposé par le constructeur :

Comme indiqué dans le schéma suivant, la structure proposé est une grille rectangulaire de 800 m x 500 m, la longueur totale du cuivre utilisé est 35462.00 m, Distribué en fonction du positionnement des structures métalliques dans la station, donc Le réseau sera encombré dans le centre où se trouve la partie active de la station où sont installer les générateurs, les turbines les réservoirs et tout ce qui est métallique.

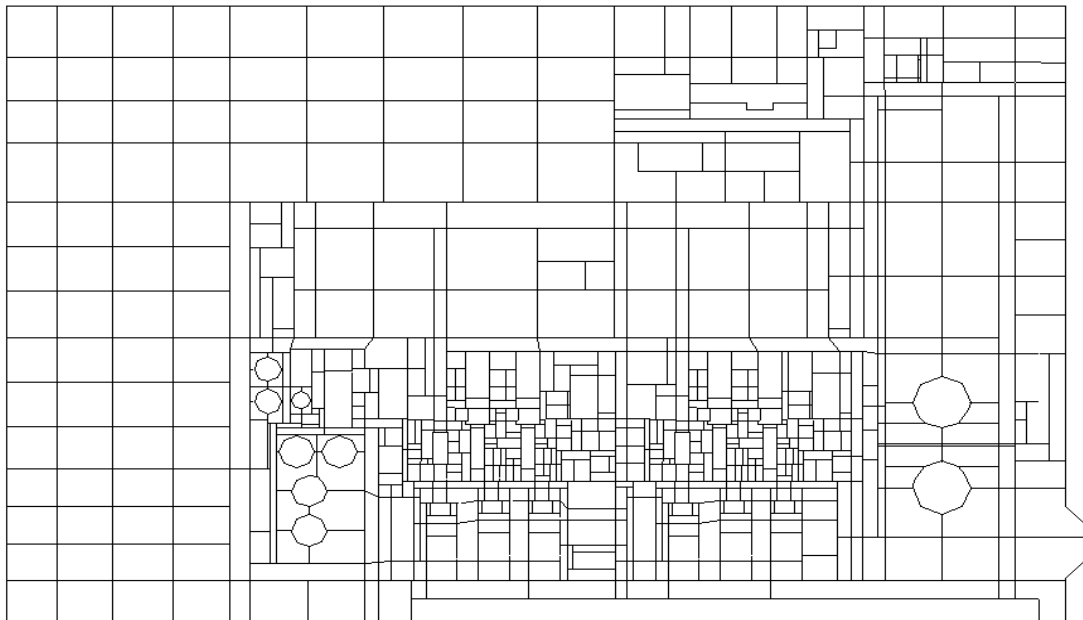


Figure 4.2 le réseau de terre proposé par le constructeur

L'image suivante représente l'interface principale du programme ETAP 12.6

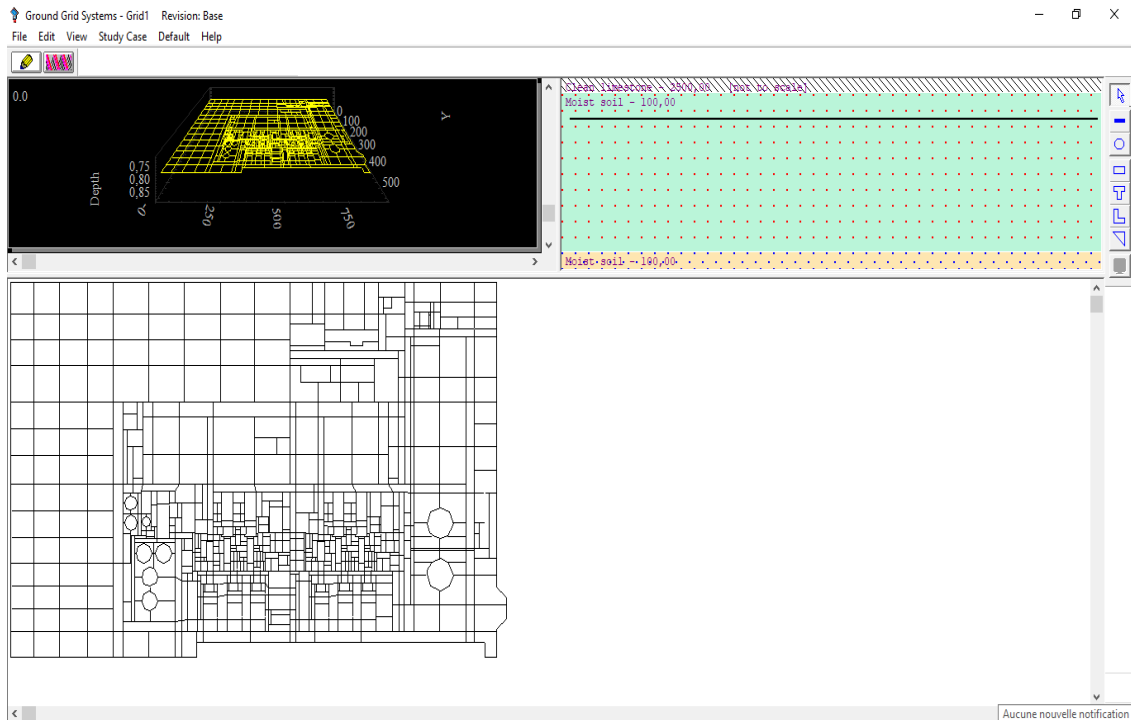


Figure 4.3 l'interface principale du programme ETAP 12.6

Les calculs des valeurs de tension admissibles seront réalisés pour une personne de 50 kg de poids.

En réalité, la durée de défaut est 0.3 s au maximum, mais nous utilisons la valeur de 0.5 s pour réduire la marge d'erreur et obtenir un système plus Sécurisé, même chose pour le facteur de division nous utilisons la valeur de 100% au lieu de 60% pour les mêmes raisons.

La fenêtre suivante est l'éditeur de cas d'étude utilisé pour remplir les données de base principale telle que le poids la durée de défaut.

Nous allons par la suite introduire les paramètres suivant dans la fenêtre de dialogue (GRD Study Case Editor) figure (4.4) :

- Le courant de défaut $I_{fg} = 40 \text{ Ka}$;
- Le calcul des valeurs de tension admissibles sera réalisé pour une personne de 50kg de poids ;
- La température ambiante $T_a = 45^\circ\text{C}$;
- Le temps d'élimination du défaut considéré pour ces calculs $t_s = 0.5 \text{ s}$;
- Le facteur de division de courant de défaut $S_{f=} 100\%$;
- Le facteur de projection $C_p = 100\%$.

- Rapport entre le système réactance inductive et la résistance $X/R= 40$, il indique le taux de décroissance de toute composante continue.

GRD Study Case Editor

Study Case ID: GRD1

Reports & Plots:
 Auto Display Summary & Alert
 Report Details
Plot Step: 1
Boundary Extension: 0

Options:
Weight: 50 kg 70 kg
Ambient Temperature: 45 °C
Update:
 # of Conductors and Rods (Optimization)

Method:
 Finite Element
 IEEE 80 - 2000
 IEEE 80 - 1986
 IEEE 665 - 1995

Fault Durations:
tf: 0.5 Sec tc: 0.5 Sec ts: 0.5 Sec

Ground Short-Circuit Current:
 User Specified Ifg: 40 kA X/R: 40
 Short-Circuit Study

Grid Current Factors:
Sf: 100 %
Cp: 100 %

Remarks 2nd line:

< GRD1 > Help OK Cancel

Figure 4.4 L'éditeur de cas d'étude

L'étape suivante consiste à remplir les données du sol telles que le type et la résistivité du sol, Dans notre cas le sol est sec avec une résistivité de 133.86 ohm-m, Le sol sera recouvert par une couche de 0.2 m de gravier avec une résistivité de 8534.4 ohm-m.

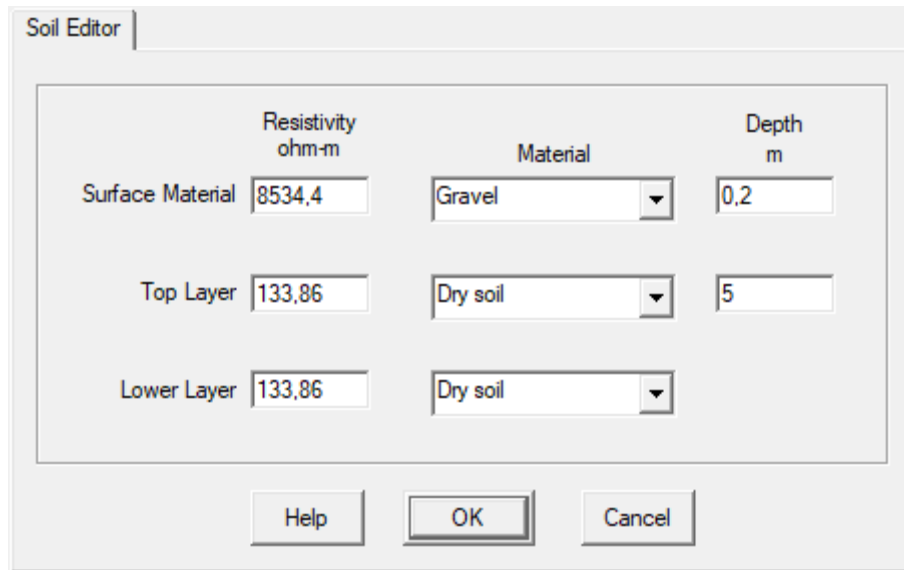


Figure 4.5 L'éditeur du sol

Après avoir entré les données, le logiciel fournit deux diagramme, un pour la répartition de la tension de pas, le deuxième pour la répartition du courant de contact, et un module d'analyse du gille ou on peut tirer les informations suivantes.

Rg Résistance de la grille ohm	GPR Elévation de potentiel	Tension de contact max			Tension de pas max		
		Tolérable V	Calculé V	Pourcentage %	Tolérable V	calculé V	Pourcentage %
0.092	4125.3	1884.5	1078	57.2	7045.7	258.8	3.7

Tableau 4.1 Module d'analyse pour le réseau de terre proposé par le constructeur

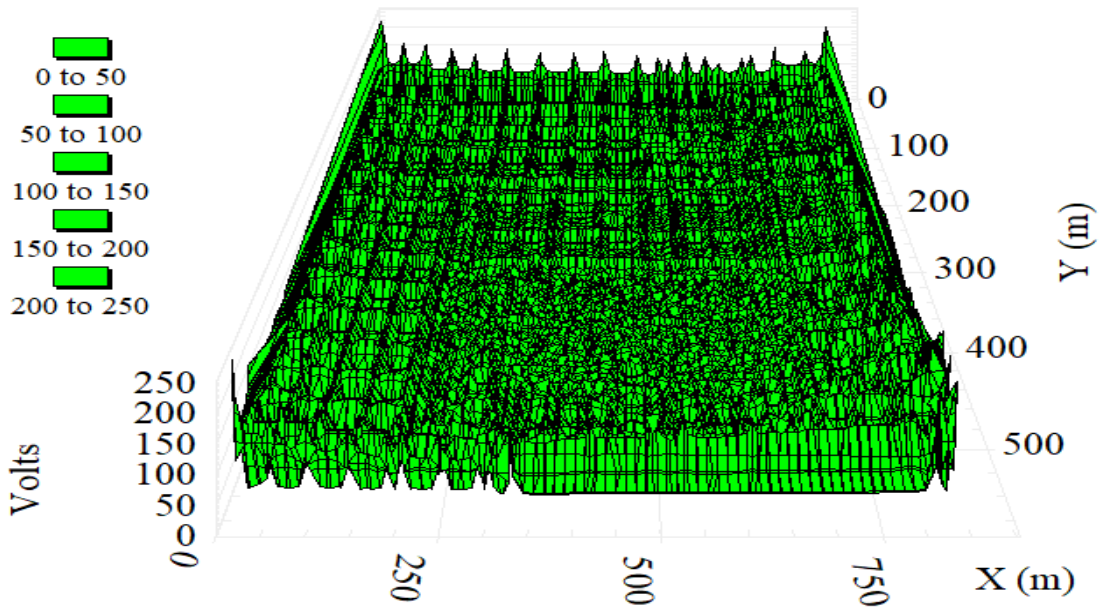


Figure 4.6 Diagramme de distribution de tension de pas

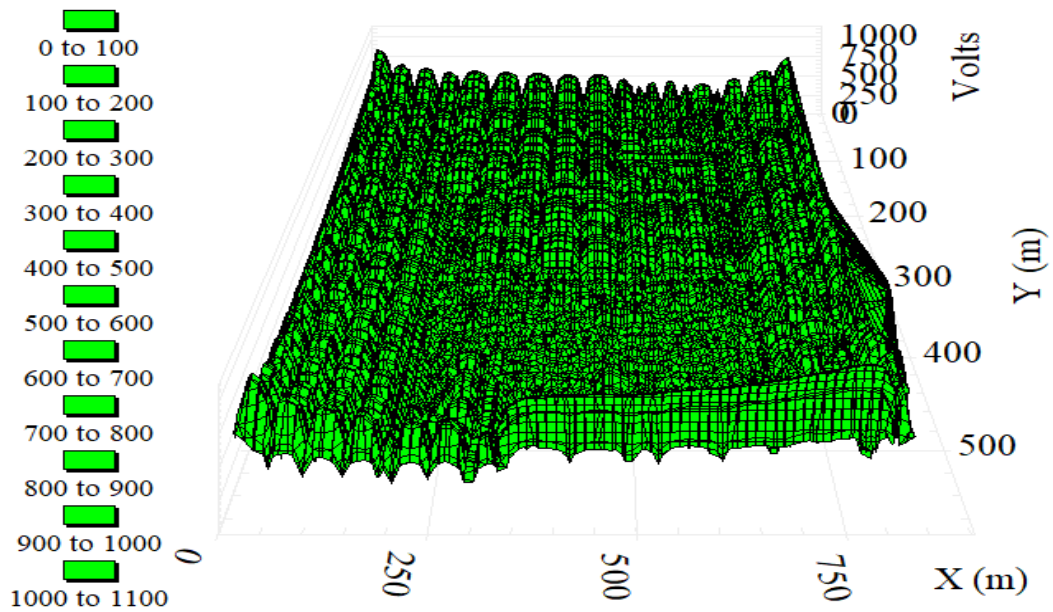


Figure 4.7 Diagramme de distribution de tension de contact

Commentaire :

Grâce aux résultats préliminaires et les diagrammes de Répartition de tension de pas et de contact nous constatons que les critères d'un bon dimensionnement sont déjà obtenus, Où la résistance de terre inférieure a un, et les tensions de pas et de contact de la grille inférieure aux tensions tolérable.

Le problème dans cette étude, est-ce le besoin d'utiliser une couche de gravier sur toute la surface de la station, ce qui représentera une charge supplémentaire pour le client, dans les aspects financiers et techniques, cela nous oblige à redimensionner le réseau afin d'obtenir des résultats positifs sans avoir besoin d'une couche de gravier.

4.5.2 L'amélioration du réseau :

d'après les diagramme de répartition des tension de contact et de pas pour le reseau proposer par le constructeur sans la couche superficiel, Nous avons remarqué que le niveau de protection dans le centr de la station est bon, contrairement aux autres zones qui apparaissent en rouge.

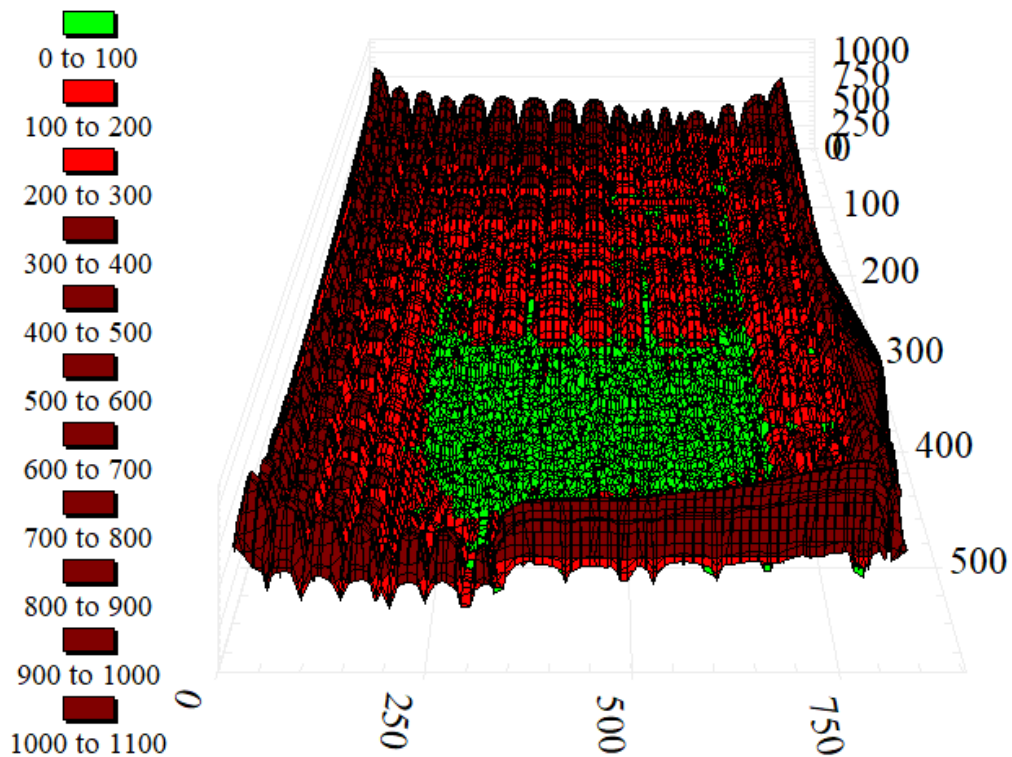


Figure 4.8 Diagramme de repartition de tension de contacte sans couche superficiel

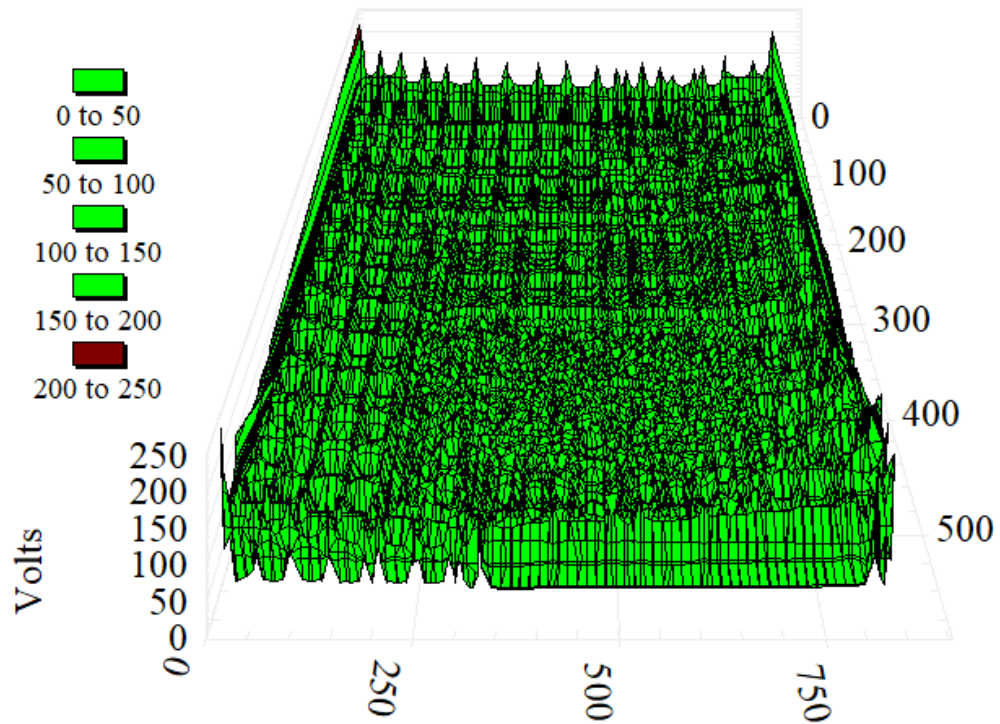


Figure 4.9 Diagramme de repartition de tension de pas sans couche superficiel

L'amélioration proposée consiste à renforcer la grille Dans les endroits où la tension de contact est inacceptable en réduisant la distance entre les conducteur.

le réseau proposé est le suivant :

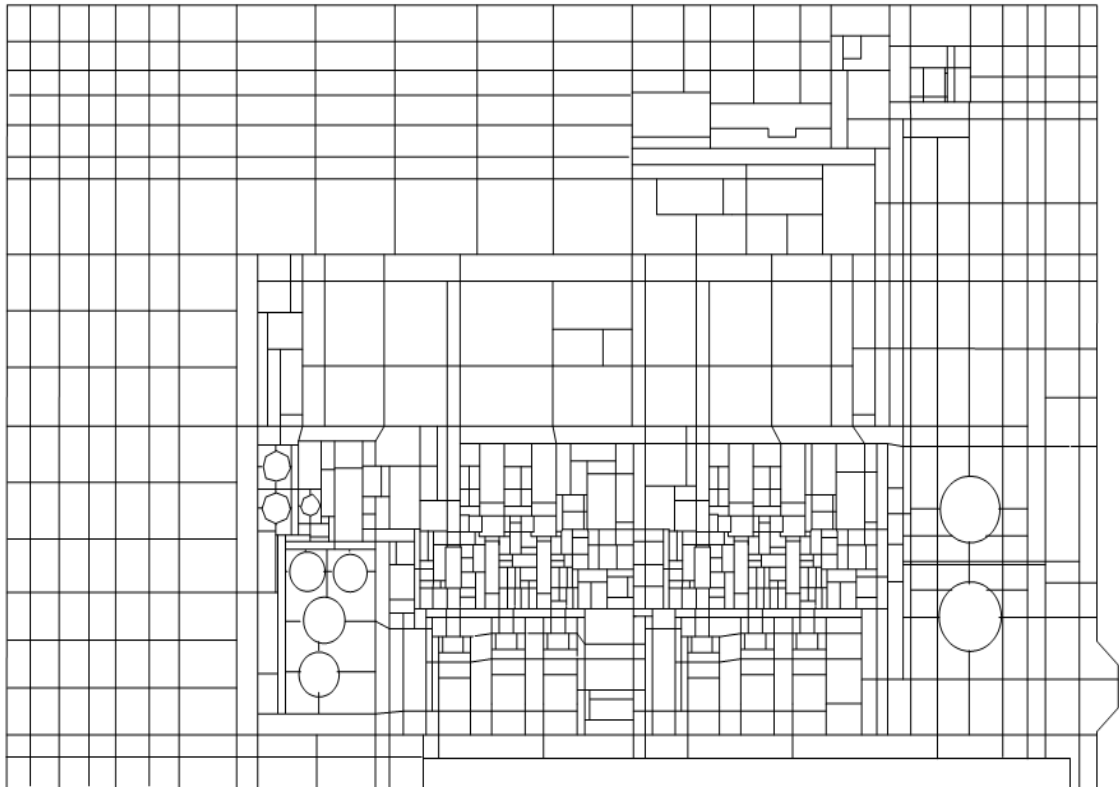


Figure 4.10 le réseau de terre amélioré

Comme dans le cas précédent, le programme fournira un nouveau module d'analyse et de nouveaux diagrammes de distribution, Où pouvons-nous tirer les résultats suivants.

Rg Résistance de la grille ohm	GPR Elévation de potentiel	Tension de contact max			Tension de pas max		
		Tolérable V	Calculé V	Pourcentage %	Tolérable V	calculé V	Pourcentage %
0.090	4041.5	197	1046.7	531.3	295.8	224.9	76.0

Tableau 4.2 Module d'analyse pour le réseau de terre amélioré

le nouveau module d'analyse indique qu'il y a une diminution de la valeur de la résistance de la grille, même chose pour l'élévation de potentiel, par contre, la valeur de tension de contact est supérieure à la valeur tolérable, Nous devons donc étudier le diagramme de distribution suivant afin de connaître l'efficacité du réseau.

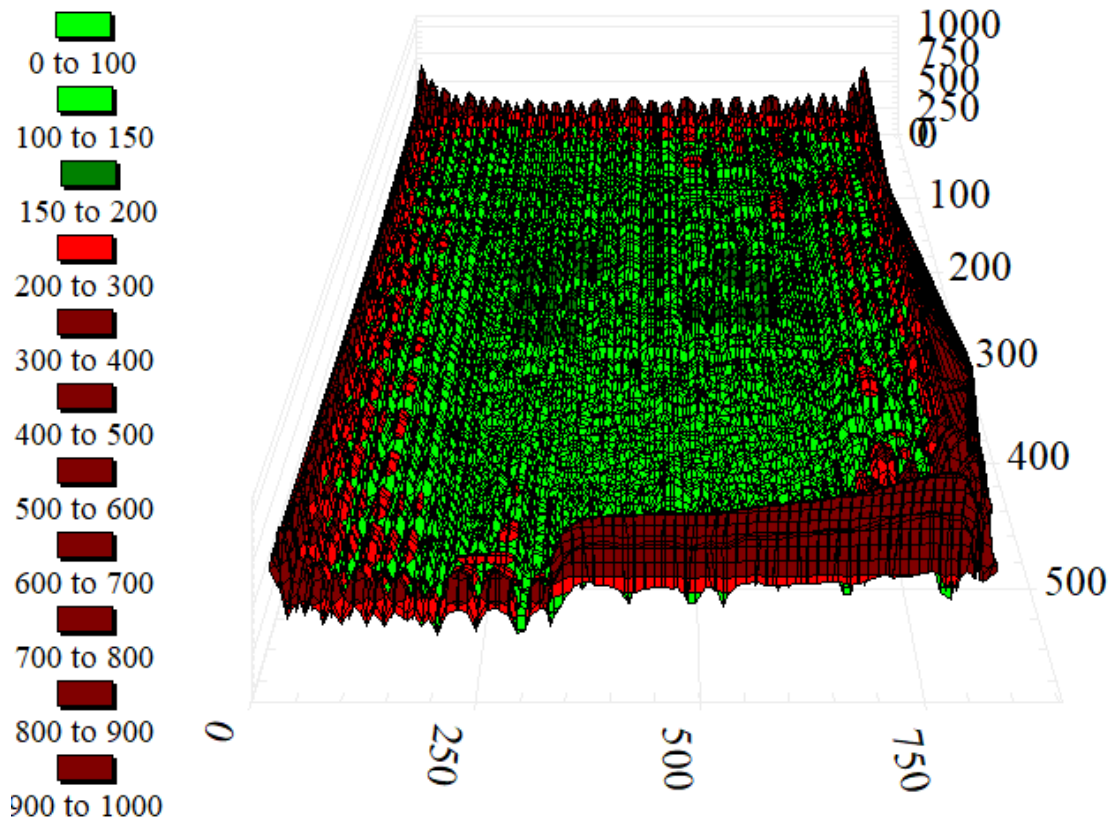


Figure 4.11 Diagramme de distribution de tension de contact

Commentaire :

Grâce au plan général de la station au-dessous, On voit que Les zones où la tension de contact dépasse la valeur tolérable, et Qui sont situés sur les côtés de la station, Ce sont des espaces ouverts, libres de toute structure métallique, Par conséquent, le risque d'électrification entre l'utilisateur et les objets métalliques soumis à un courant électrique est absent dans ces zones, Nous concluons que ce réseau est capable d'assurer la sécurité de l'installation en toutes circonstances sans avoir besoin d'utiliser la couche superficiel.

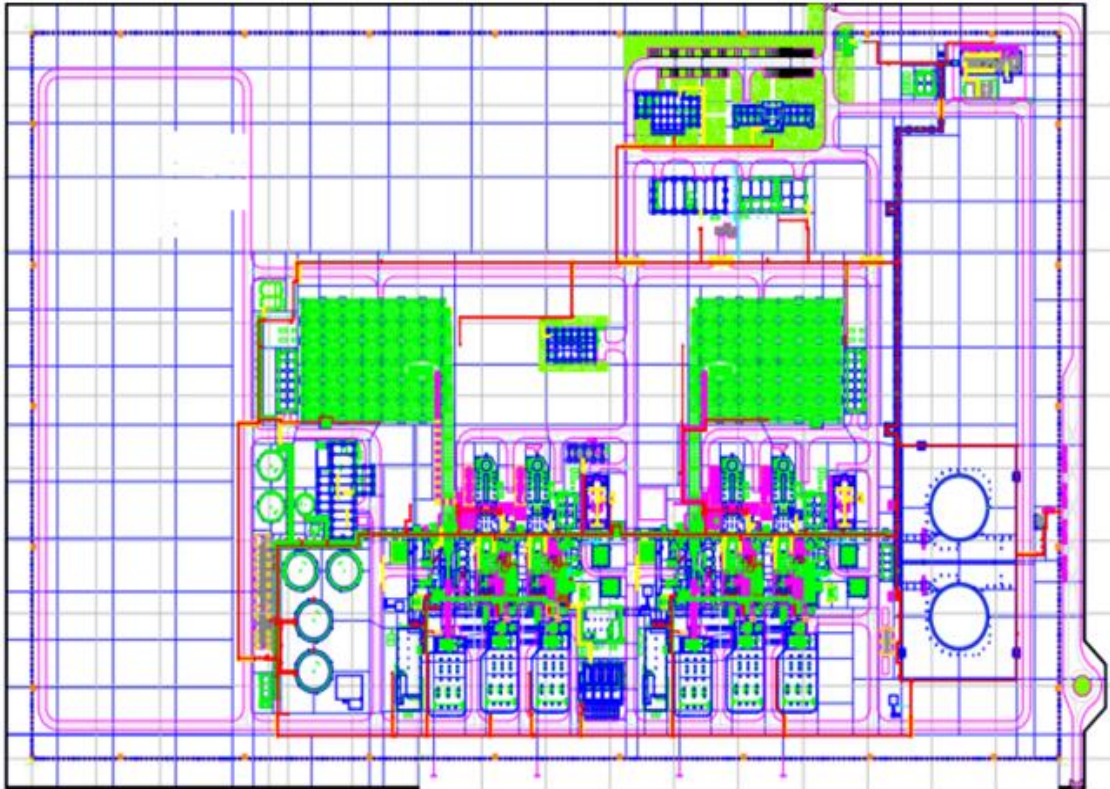


Figure 4.12 Plan général de la station

4.6 Le nouveau dimensionnement :

4.6.1 Premier dimensionnement :

La conception préliminaire débute par une boucle de conducteurs, entourant la surface de la centrale et des conducteurs en travers, formant un réseau maillé pour le raccordement des équipements au système, avec l'implantation des ouvrages de la centrale (réservoirs, Transformateurs, Turbine). Dans un premier temps, l'utilisation de piquets de terre n'est pas considérée.

Nous assumons une disposition préliminaire d'une grille rectangulaire de 800 m x 500 m avec les conducteurs équidistants, représenté dans la figure, avec l'espacement entre deux conducteurs successifs de $D=40\text{m}$, et une profondeur de grille $h=0.8\text{ m}$, la grille préliminaire est la suivante :

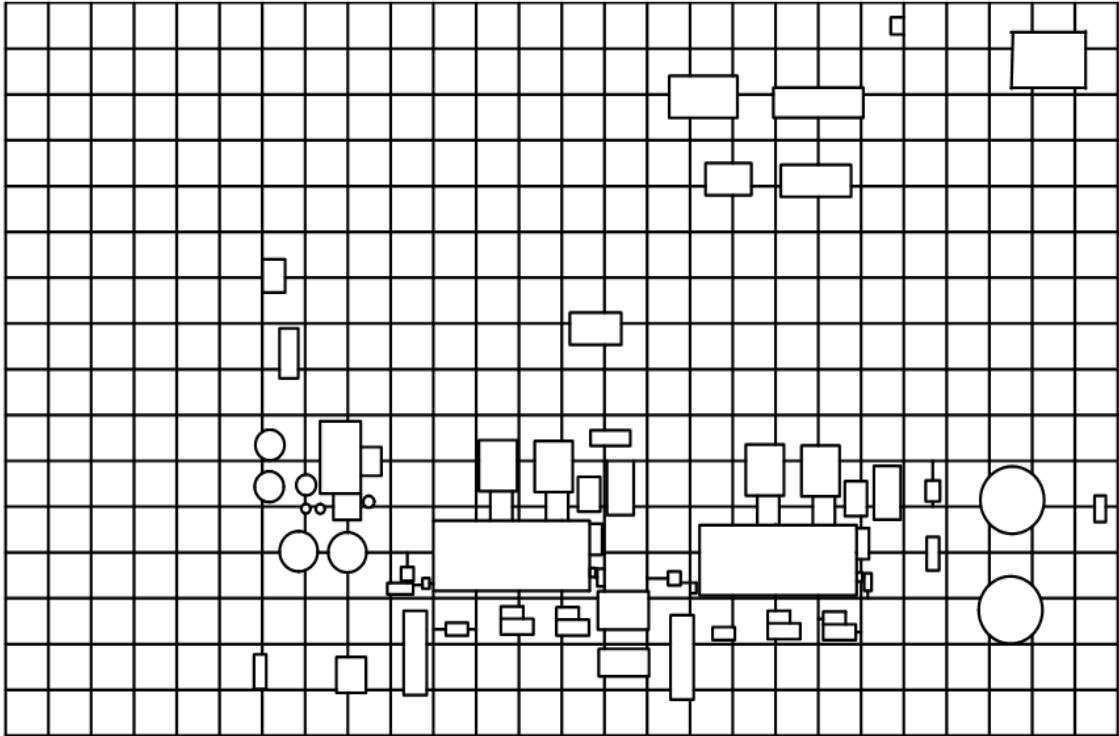


Figure 4.13 Maillage préliminaire

a. Analyse de la grille préliminaire :

Après avoir dimensionné la grille et entré les données le logiciel fournit deux diagramme un pour la répartition du courant de pas, le deuxième pour la répartition du courant de contacte, et un module d'analyse du gille ou on peut tirer les informations suivantes :

Rg	GPR	Tension de contact max			Tension de pas max		
		Tolérable	Calculé	Pourcentage	Tolérable	calculé	Pourcentage
Résistance de la grille ohm	Elévation de potentiel	V	V	%	V	V	%
0.097	4334.2	197.0	981.8	498.4	295	241.9	81.8

Tableau 4.3 module d'analyse pour le réseau de terre préliminaire

Grâce aux résultats préliminaires nous constatons qu'il y a des objectives déjà obtenus, comme la résistance de terre inférieur a 1, et la tension de pas de la grille moins que la tension admissible.

b. Répartition de tension de pas :

Le diagramme suivant représente la répartition de tension de pas sur toute la surface de la centrale.

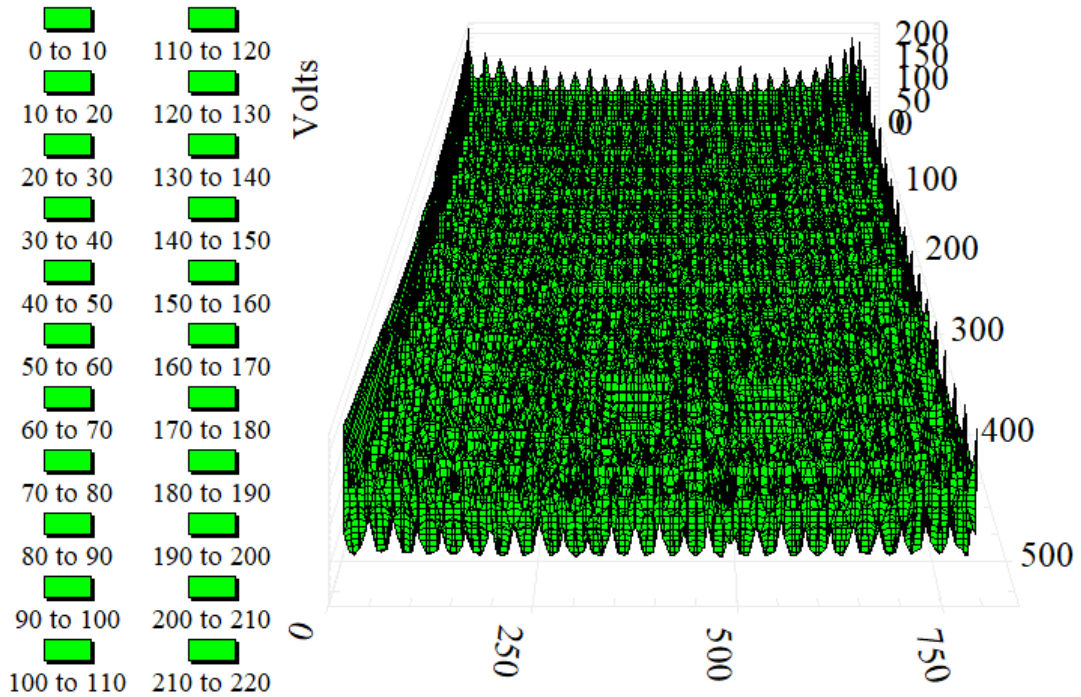


Figure 4.14 Diagramme de distribution de tension de pas

Selon le code couleur tout la surface en couleur verte, le crêter de tension de pas est vérifier, car elle ne dépasse pas la tension de pas tolérable.

c. Répartition de tension de contact :

Le deuxième diagramme c'est le diagramme de tension de contact

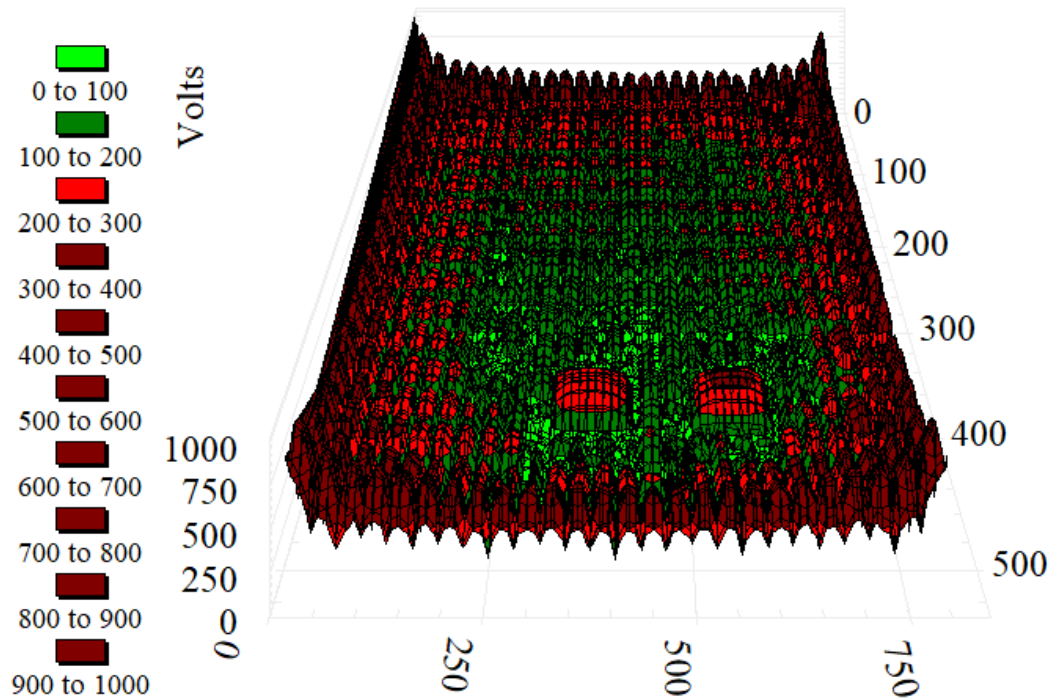


Figure 4.15 Diagramme de distribution de tension de contact

Commentaires :

Selon le code couleur tout la surface en couleur Rouge, le crête de tension de contact n'est pas vérifier, car la tension de contact dépasse la tension de contact tolérable donc le réseau de terre nécessite un nouveau dimensionnement

4.6.2 Deuxième dimensionnement :

Le deuxième dimensionnement Consiste à renforcer le réseau le long des côtés et entourer la partie active de la sous-station où les transformateurs et les turbines sont installés par neuf piquets, la configuration est la suivante :

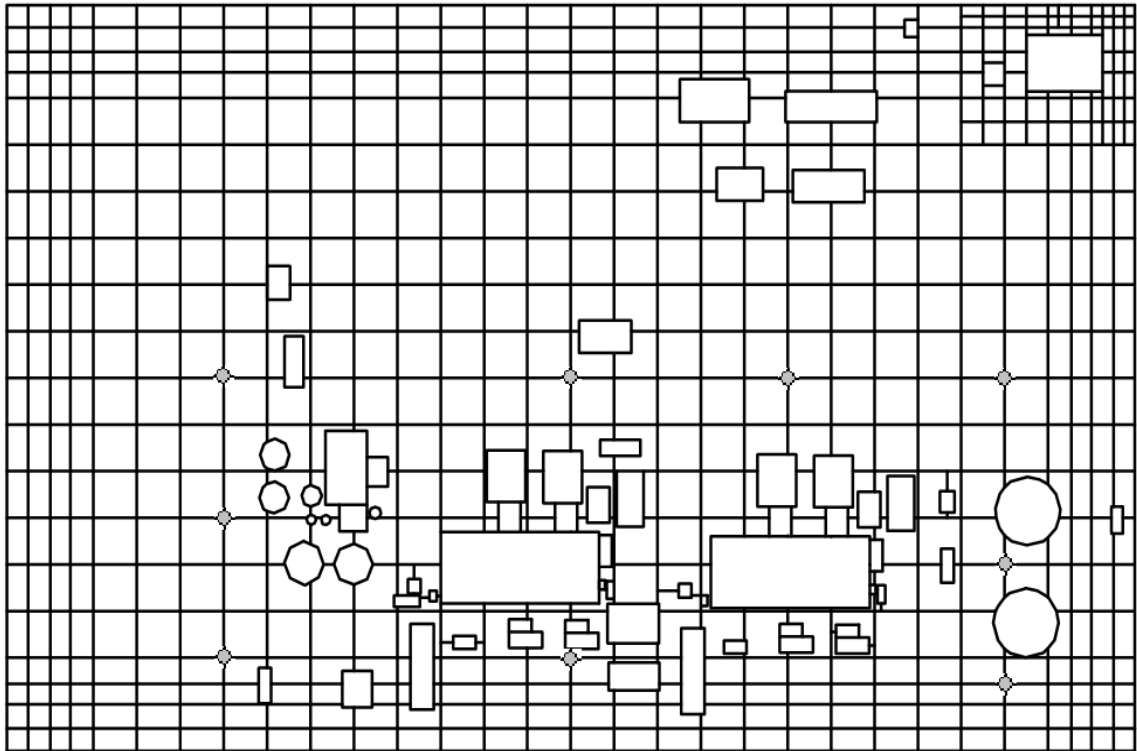


Figure 4.16 Maillage améliorée

Comme le premier dimensionnement, Le programme nous donnera un Deuxième module d’analyse de la grille ou on peut tirer les informations suivantes

Rg	GPR	Tension de contact max			Tension de pas max		
		Tolérable	Calculé	Pourcentage	Tolérable	calculé	Pourcentage
Résistance de la grille ohm	Elévation de potentiel	V	V	%	V	V	%
0.094	3800.5	197.0	689	498.4	295	241.9	81.8

Tableau 4.4 module d’analyse pour le réseau de terre améliorée

Après avoir resserré le maillage en rajoutent des conducteurs et des piquets de terre nous constatons que l’élévation de potentiel a encore diminué, ainsi que la résistance de terre, et le potentiel de pas et inferieur a la tension de pas admissible, mais malgré la modification du dimensionnement le potentiel de contact est supérieur à la tension de contact admissible.

a. Répartition de tension de pas :

Comme nous l'avons vu précédemment, le problème de la tension de pas a déjà été résolu par le premier dimensionnement, le module d'analyse et le diagramme suivant montrent que la tension de pas a diminué plus.

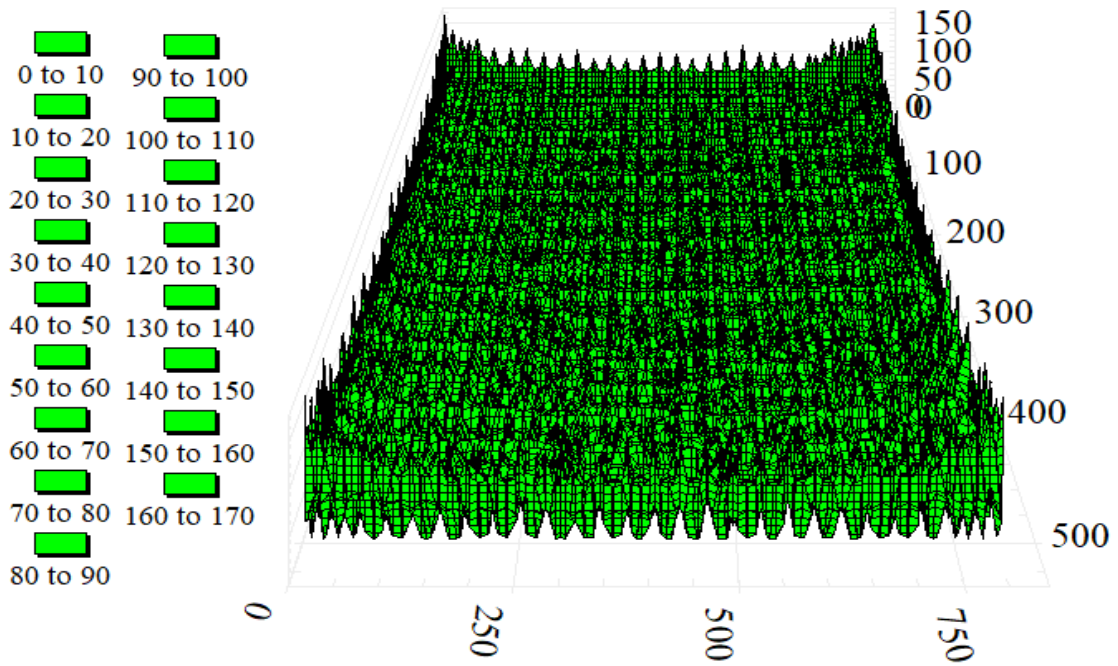


Figure 4.17 Diagramme de Répartition de tension de pas

b. Répartition de tension de contact :

Le diagramme de répartition de tension de contact après avoir amélioré le réseau est le suivant :

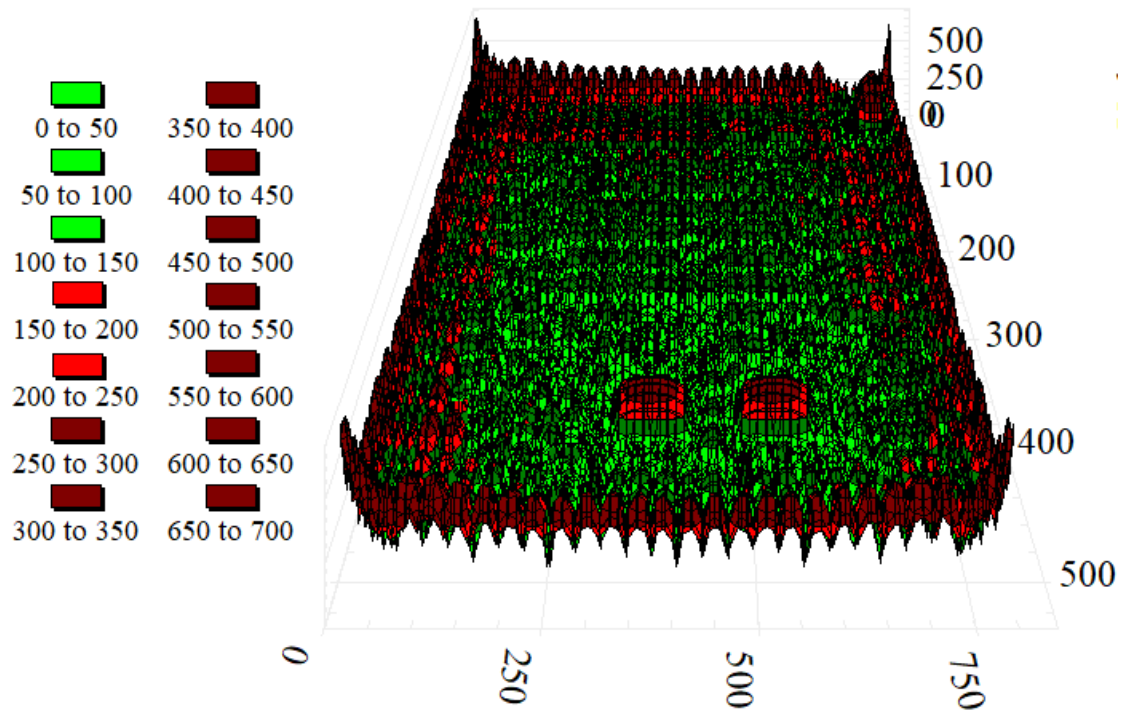


Figure 4.18 Diagramme de Répartition de tension de pas

Commentaires :

Selon le diagramme et le code couleur, on voit un dépassement de la tension de contact admissible sur les côtés, en plus de deux zones dans la partie active de la station.

Grâce au plan général de la station , On voit que Les zones où la tension de contact dépasse la valeur tolérable, et Qui sont situés sur les côtés de la station, Ce sont des espaces ouverts, libres de toute structure métallique, Nous ne prenons donc pas en compte la tension du toucher dans ces zones, avec la possibilité d'ajouter une couche superficielle de gravier Dans les endroits où nous voulons élever la tension tolérable de contact pour assurer la sécurité, donc notre objective et atteint et on peut considérer que ce dernier dimensionnement est la conception finale de notre réseau de terre.

Comme nous l'avons déjà dit, la valeur de facteur de division et le temps de défaut sont exagérés, dans la partie suivante on va simuler le comportement de réseau de terre finale sous les conditions réelles. Donc le facteur de division Il devient 60% au lieu 100%, et le temps de défaut 0.3 s au lieu 0.5 s.

Le module d'analyse suivant indique qu'il y a un dépassement de la tension de contact par 17.34 %, et une valeur acceptable de la tension de pas, Nous constatons également une amélioration des résultats après l'utilisation des données réelles.

Rg	GPR	Tension de contact max			Tension de pas max		
		Tolérable V	Calculé V	Pourcentage %	Tolérable V	calculé V	Pourcentage %
Résistance de la grille ohm	Elévation de potentiel						
0.094	3800.5	254	435.2	117.34	381	108	28.34

Tableau 4.5 Le module d'analyse finale

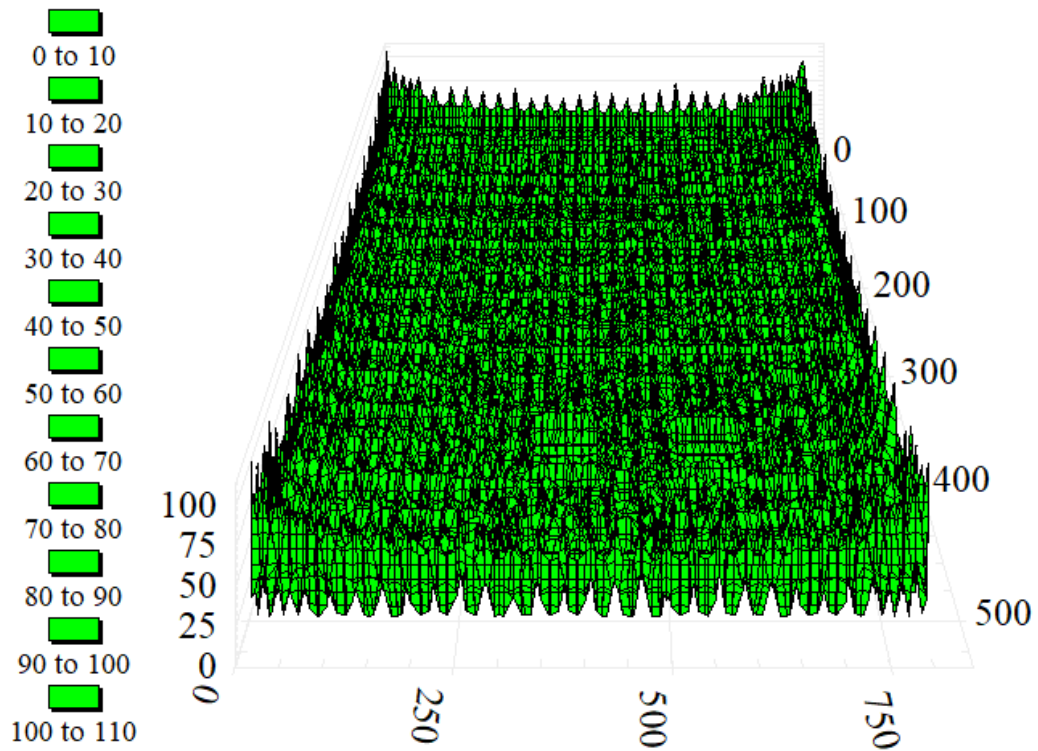


Figure 4.19 Diagramme de répartition de tension de pas finale

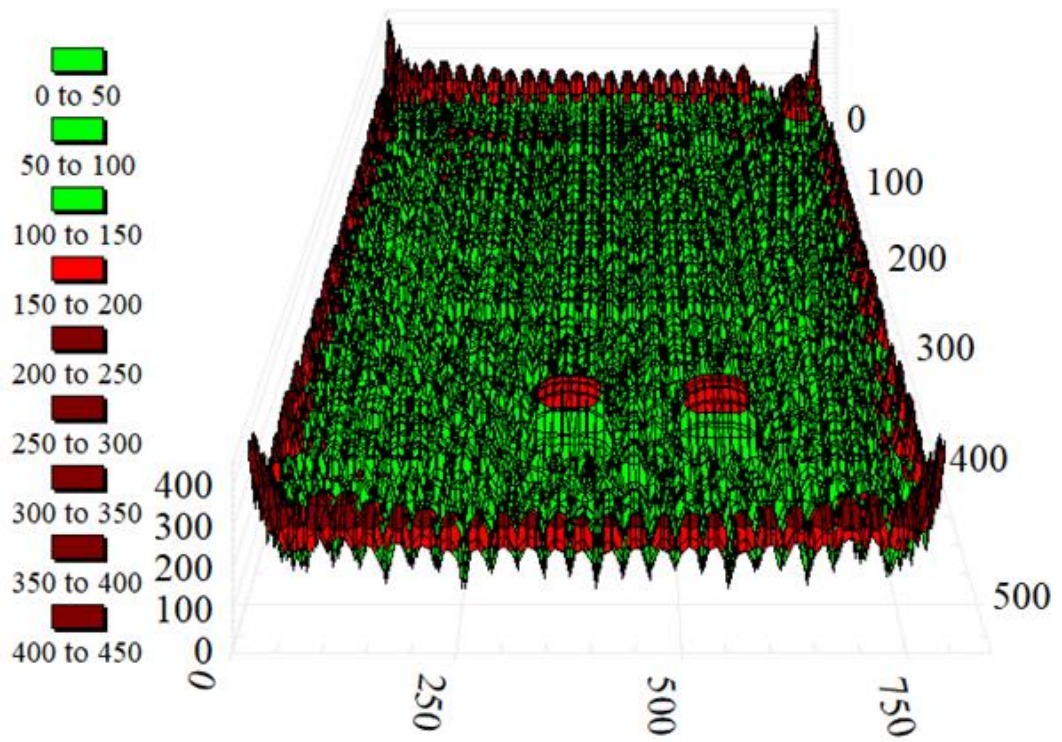


Figure 4.20 Diagramme de répartition de tension de contact finale

4.7 Comparaisent entre les résulte :

Cas	Résistance de sol	Élévation de potentiel	Tension de pas		Tension de contact		Couche superficiel
			Tolérable	Calculer	Tolérable	Calculer	
1-proposer par le bureau d'étude	0.092	4125.3	7045.7	258.8	1884.5	1078	0.2
2- amélioration de réseau de terre proposer par le bureau d'étude	0.090	4041.5	295.8	224.9	197	1046.7	0
3- nouveau dimensionnement	0.097	4334.2	295	241.9	197	981.8	0
4- amélioration de nouveau dimensionnement	0.094	3800.5	295	241.9	197	689	0

4.8 Conclusion :

Grâce à l'étude du réseau terre de la centrale de Djelfa en utilisant les logiciels AUTOCAD et ETAP, nous avons pu contrôler le niveau de tensions de contact et de pas, et donc la sécurité des personnes et des biens, en utilisant deux modèles de formes différentes et de résultats similaires, en tenant compte du cahier des charges qui nécessite des résultats requis sans utiliser la couche supérieure de gravier.

Bibliographique

- [1] **DF INGENIERÍA** « Note de Calcul de Dimensionnement de Système de mise à la terre et Justification Normative» Document No DJE EE 701 109
- [2] EDF (Electricité De France), « Prises de Terre pour Réseaux Electriques de Distribution », Electricité de France, Centre de Normalisation, HN 64-S-55, Avril 1997
- [3] IEEE Standard 80-2000, « IEEE guide for safety in AC substation grounding», Revision of IEEE Std 80-1986, New York, USA, 2000
- [4] Lefouili M., « Caractérisation Numérique d'une Prise de Terre à Géométrie Complexes », Thèse de Doctorat, Département d'Electrotechnique, Université de Ferhat Abbas, Setif, Juillet 2007.
- [5] **Prévé C. & Jeannot R.**, « Guide de Conception des Réseaux Electriques Industriels : 2- Les Régimes de Neutre », Schneider Electric, N° 6883427/A, Février 1997
- [6] **Klajn A. & Markiewicz H.**, « Mise à la Terre, Aspects Fondamentaux de Construction, Section 6 : CEM et Mise à la Terre », Leonardo Energy, France, Août 2007.
www.leonardo-energy.org
- [7] Georges S., « Evaluation de l'Effet de la Mer et du Contrepoids sur le Profil de la Tension d'un Système de Mise à la Terre d'une Ligne de Transport d'Energie à Haute Tension dans un Sol Résistif », Thèse de Doctorat, Département de Génie Electrique, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, Montréal, Septembre 2001
- [8] LEM Instruments Palmers strasse 2, « Mesures de mise à la terre », Document No A 99415 F,
Autriche. Site Internet : www.lem.com
- [9] Nzuru N. J. P., « Contribution à l'Analyse et à la Réalisation des Mises à la Terre des Installations Electriques dans les Régions Tropicales », Thèse de Doctorat en Sciences, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgique, Février 2009
- [10] Schneider Electric Industries, Christophe P. & Robert J., « Guide de conception des réseaux électriques industriels : Les régimes de neutre », DAS Transport et Distribution, Activité Ensembles et Applications, 6 883 427/A, France, Février 1997. Site internet : www.schneiderelectric.com
- [12] Chauvin Arnoux Group, « Guide de la Mesure de Terre : Contrôleurs de Terre et/ou de Résistivité », Catalogue de produits, Première édition 2010. Site internet : www.chauvinarnoux.fr

Bibliographique

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

[14] Electrotechnique-fr, « Mesure de la Prise de Terre : la Méthode », www.electrotechnique-fr.com

[15] : **BERNOU Assia** : « Caractéristiques des systèmes de la mise à la terre des installations HT utilisant CYMGRD et FEMM. Proposition d'un circuit électrique équivalent dans le cas des hautes fréquences ».Mémoire de Magister, décembre 2011.