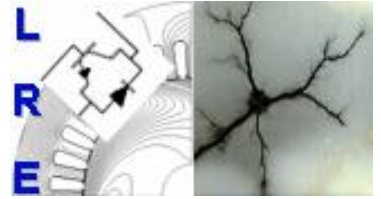




Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :
DINE Abdallah

Intitulé

Proposition d'un système critique de mise à la terre pour l'ouvrage énergétique de LBREG

Directeur(s) du mémoire :

TEGUAR Madjid

Professeur

ENP

ENP 2012

ملخص:

في هذه الدراسة قمنا باقتراح هيكل حديدي يستعمل للتأريض لمحطة التوليد الكهربائي لبرج ناجع واقل تكلفة، مع العلم بان هذا الاخير منجز و معقد و اكثر تكلفة . لهذا تم اقتراح عدة هياكل حديدية مساوية للأبعاد الحقيقية (ذات شكل L معكوس) ، و ذات بتخطيط مربع او مستطيل الشكل. يتم اختيار الهيكل المناسب على حساب عدة عوامل (امنية، اقتصادية ...). من أجل ذلك، قمنا بعرض محاكات تحت بيئة CYMGRD. الشكل الناجع و المثالي و الاقتصادي اعطى نتائج جيدة (قيمة توتر الخطوة و توتر اللمس ضعيفة).

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

Résumé :

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

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

Abstract:

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

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

Sommaire

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

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

I.1. Introduction	2
I.2. Définitions	3
I.2.1 Prise de terre	3
I.2.3.Éléments d'une mise à la terre.....	4
I.2.4.Masse	5
I.2.5. Conducteur de terre	5
I.2.6.Réseau de terre	5
I.2.7. Terre de référence.....	6
I.2.9. Potentiel surfacique de terre.....	6
I.2.10. Élévation du potentielle de terre(EPT)	7
I.2.11. Tension de pas (VS)	7
I.2.12. Tension de contact (VT)	7
I.2.12.1. Contact direct.....	8
I.2.12.2. Contact indirect	8
I.6. Caractéristiques électriques du sol	9
I.6.1. Résistivité	9
I.7. Principales méthodes de mesure de la résistivité de sol	9
I.7.1. Méthode de Wenner.....	10
I.7.2. Méthode de Schlumberger.....	10
I.7.3. Méthodes de mesure à 3 pôles.....	11
I.10 Conclusion	12

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

II.1. Introduction	13
II.2. Données réelles du réseau de terre de l'ouvrage de LABRE.....	13
II.3. Mesures de la résistivité du terrain environnant le système de mise à la terre de l'ouvrage de LABREG.....	13
II.4. Configurations de mise à la terre proposées pour l'ouvrage énergétique de LABREG.....	14
II.4.1. Première Configuration : Grille rectangulaire	14
II.4.1.1. Présentation	14
II.4.1.2. Analyse du sol	15
II.4.1.3. Résultats de simulation.....	15
II.4.1.4. Effets de la longueur totale et de la profondeur de la grille.....	16
II.4.1.4.1. Effet de la longueur totale de la grille.....	16
II.4.1.4.2. Effet de la profondeur du réseau de terre	20
II.4.2. Deuxième configuration : Grille en forme de L inversé	22
II.4.2.1. Présentation et résultats.....	22
II.5. Traitement de la couche superficielle du sol.....	23
II.5.1. Traitement par variation de l'épaisseur.....	24

Sommaire

II.6. Configuration optimale.....	25
II.7. Conclusion	27
Conclusion générale	29
Bibliographie	31

Introduction :

Tous les ouvrages électriques de production ou du transport sont soumis à des défauts électriques plus ou moins intenses. Ils exposent les exploitants et les clients aux dangers, nuisent à la pérennité des équipements, et coutent à la société des montants colossaux année dans le monde.

Parmi les dispositions mises en œuvre pour se prémunir contre ces défauts, le système de mise à la terre est aujourd'hui, sans conteste, le moyen le plus sûr et le plus efficace.

Le système de mis à la terre d'une installation électrique assure l'écoulement vers le sol des courants de défaut. Il prévient les chocs électriques et les dommages à la propriété, limite la tension sur les réseaux et les circuits, facilite le fonctionnement de l'appareillage (tel les dispositifs de protections contre les surintensités, etc...) et limite la tension due la foudre.

Un système de mise à la terre efficace implique que le trajet à la terre parcourus par les circuits, l'appareillage et l'enveloppe doit être permanant et continue. Ce trajet doit avoir un courant admissibles suffisant, c.-à-d. doit être capable de transporter de façon sécuritaire le courant susceptible de leur être imposé. Il doit aussi avoir une impédance suffisamment basse à fin de limiter l'élévation du potentiel du site par apport à la terre de référence et permettre aux dispositifs de protections contre les surintensités de fonctionner dans les délais prescrits pour éliminer la faute.

L'objective de notre travail dans une étape préliminaire de faire une étude détaillée sur les systèmes de mise à la terre.

Dans une deuxième étape nous proposons le calcule de système de mis à la terre par la norme IEEE80 et le code de calcule et de simulation CYMGrd.

Nous déterminons cette étude par une application à un cas réel (ouvrage énergétique de LABREG)

I.1. Introduction

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

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

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

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

I.2. Définitions

I.2.1. Mise à la terre

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

I.2.2 Prise de terre

Corps conducteur enterré, ou ensemble de conducteurs enterrés et connectés, assurant une liaison électrique avec la terre (câble, piquet, grille) [EDF, 1997]. On distingue deux types de prise de terre en fonction de leur profondeur d'enfouissement, une prise de terre profonde et une prise de terre de surface.

I.2.3. Éléments d'une mise à la terre

Une prise de terre est habituellement composée d'une ou de plusieurs électrodes verticales (piquets) ou horizontales (grilles). La forme de la prise de

terre est normalement commandée par l'emplacement physique des appareils et des structures métalliques à mettre à la terre. Par exemple, la prise de terre d'un poste de transformation ou de distribution est généralement constituée d'un réseau maillé de conducteurs enfouis dans le sol et formant le treillis du poste [Klajn et Markiewics, 2004].

I.2.4. Masse

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

I.2.5. Conducteur de terre

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

I.2.6. Réseau de terre

Un réseau de terre est constitué d'un ensemble de conducteurs enterrés, en contact direct avec le sol et reliés électriquement entre eux. D'une manière générale, il a pour but :

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

I.2.7. Terre de référence

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

I.2.8. Potentiel surfacique de terre

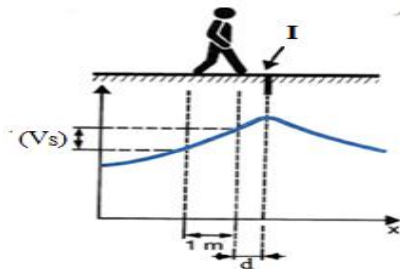
C'est la tension entre un point x de la surface du sol et la terre de référence [Nzuru, 2009].

I.2.9. Élévation du potentielle de terre (EPT)

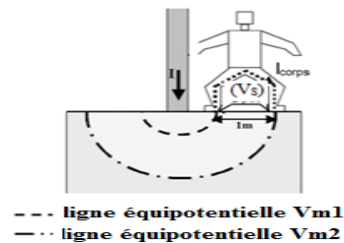
Lorsqu'un courant circule dans une impédance de mise à la terre, une élévation de potentiel se développe entre l'électrode de mise à la terre et une terre lointaine (à potentiel nul) [Georges, 2001].

I.2.10. Tension de pas (V_S)

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



a) Tension de pas suivant le gradient de potentiel



(b) Tension de pas entre deux équipotentiel

Figure I.1: Tension de pas

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

I.2.11. Tension de contact (V_T)

La tension de contact est définie comme étant la différence de potentiel entre la main d'une personne, touchant une structure mise à la terre, et son pied [Nzuru, 2009].

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

I.2.11.1. Contact direct

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

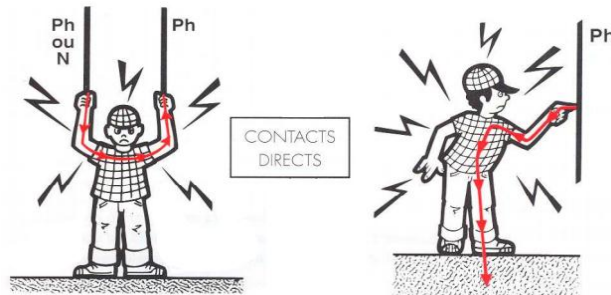


Figure I.2 : Contact direct [Bonnefoy et Lepeut, 2008]

I.2.11.2. Contact indirect

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

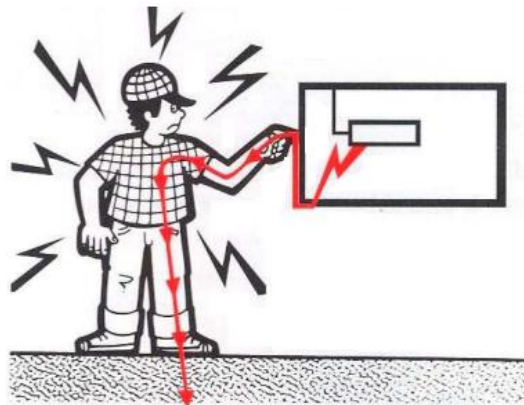


Figure I.3 : Contact indirect [Bonnefoy et Lepeut, 2008]

I.3. Caractéristiques électriques du sol

Comme pour tout milieu conducteur, le comportement électrique du sol est caractérisé par les trois grandeurs suivantes :

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

Le sol est composé de plusieurs matériaux dont la proportion va avoir une influence sur chacune de ces grandeurs (notamment l'eau, dont la proportion varie en fonction du temps) [Legrand, 2007].

Résistivité

Le sol (la terre) est constitué de matériaux à faible conductivité. Celle-ci est due aux sels et aux impuretés entre les isolants (oxyde de silice et oxyde d'aluminium).

A cause de la faible conductivité de la terre, tout courant qui passe à travers elle crée une grande chute de tension, ce qui revient à affirmer que le potentiel de la terre n'est pas uniforme.

La conductivité du sol est principalement de type électrolytique. La résistivité (qui est l'inverse de la conductivité), notée ρ , est une quantité variable et la seule manière de la connaître avec précision est de la mesurer. Elle dépend de la densité de porteurs libres (ions) et est donc très étroitement liée à [Nzuru, 2009 ; Georges, 2001].

- la nature du sol ;
- la pression ;
- la dimension des grains ;
- la porosité (pourcentage de volume des vides dans le sol) ;
- le pourcentage d'eau contenu dans le sol ;
- le pourcentage de sels solubles ;
- le pourcentage d'acides et de bases ;
- la température.

I.4. Propriétés électriques d'une prise de terre

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

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

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

I.5. Résistance de terre et répartition de potentiel :

Le cas le plus simple est celui d'une électrode hémisphérique de rayon r , enterrée dans un sol supposé homogène, de résistivité ρ . Le potentiel à une distance x du centre de l'hémisphère (Figure I.4) parcouru par un courant I est donné par la relation analytique suivante [James, 1947].

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

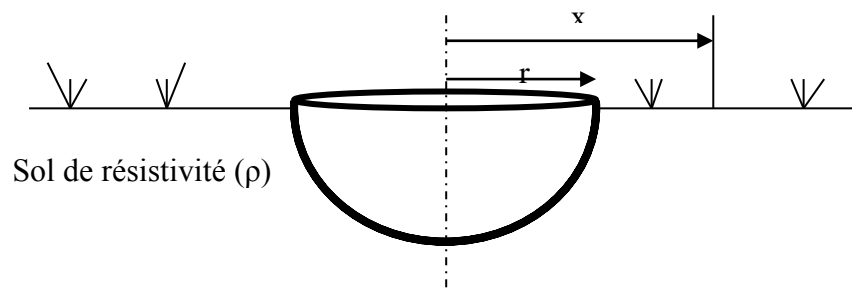


Figure I.4 : Electrode hémisphérique

I.6. Modélisation de la résistivité des sols

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

I.6.1. Sol homogène

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

I.6.2. Sol en deux couches de résistivités différentes

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

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

ou :

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

n : nombre entier variant de 1 à ∞ ;

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

K : coefficient de réflexion, donné par la relation ;

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (I.3)$$

ρ_2 : la résistivité de la couche profonde du sol.

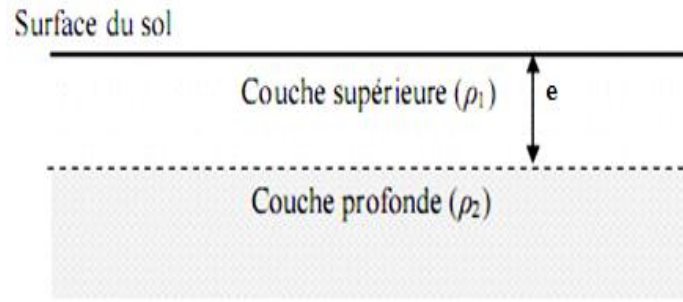


Figure I.5 : Sol en deux couches de résistivités différentes

I.6.3. Sol en plusieurs couches de résistivités différentes

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

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

$$\rho_a = \frac{\rho(a_1) + \rho(a_2) + \rho(a_3) + \dots + \rho(a_n)}{n} \quad (I.4)$$

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

$$\rho_a = \frac{\rho_{a(\max)} + \rho_{a(\min)}}{2} \quad (I.5)$$

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

I.6.4. Résistance d'une électrode horizontale dans un sol en deux couches

Tagg (1964) a établi la relation donnant la résistance d'une électrode cylindrique horizontale de longueur l et de rayon r , enterrée à une profondeur e ($e < z$) dans un sol en deux couches de résistivité ρ_1 et ρ_2 (Figure I.6) Elle est donnée par la relation [Nzuru, 2009]:

$$R = R_1 + R_a$$

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

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

La résistance R_a est donnée par la relation suivante [Nzuru, 2009] :

$$R_a = \frac{\rho_1}{2\pi l} \sum_{i=1}^{\infty} k^i \left[4 \ln \left(\frac{1 + \sqrt{\left(\frac{2iz}{l}\right)^2 + 1}}{2i\frac{z}{l}} \right) + 8i\frac{z}{l} - 4\sqrt{\left(\frac{2iz}{l}\right)^2 + 1} \right] \quad (I.7)$$

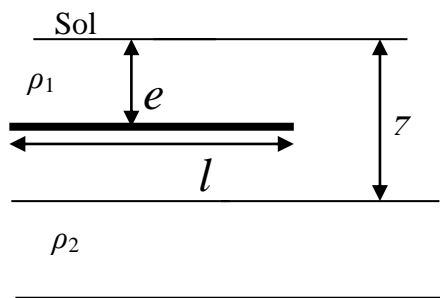


Figure I.6 : Electrode horizontale dans un sol en deux couches

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

I.7.1. Méthode de Wenner

Le principe de mesure consiste à utiliser quatre électrodes qui sont disposées en ligne le, équidistantes d'une distance a (Figure II.9), ces électrodes sont enfoncés dans le sol à une profondeur de $(3a/4)$. Entre les deux électrodes extrêmes E et H, on injecte un courant de mesure I grâce à un générateur. E et H s'appellent électrodes de courant. Entre les deux électrodes centrales S et ES, on mesure le potentiel ΔV grâce à un voltmètre. S et ES s'appellent électrodes de potentiel. Le terme V/I est la résistance R qui est mesurée avec un telluromètre à quatre bornes [Chauvin, 2010].

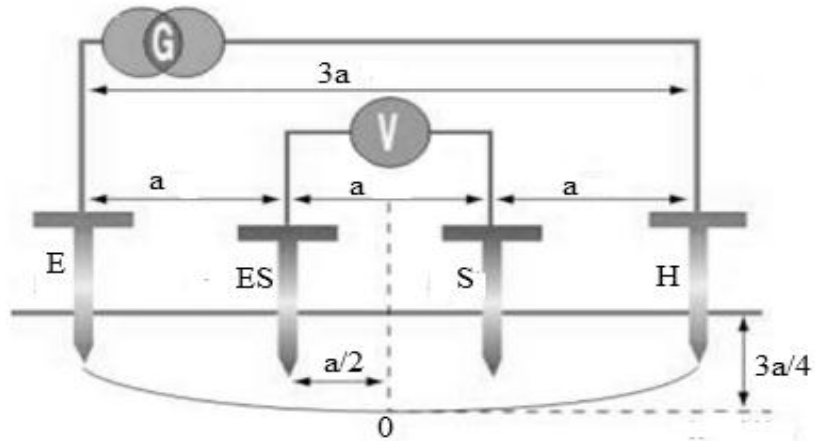


Figure I.7 : Schéma de principe de la méthode de Wenner

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

$$\rho = 2 \pi a R \quad (I.8)$$

où :

ρ : résistivité [Ωm] ;

a : distance entre les sondes [m] ;

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

La méthode de Wenner est utilisée souvent pour la stratification verticale des terrains [Chouteau et Giroux, 2006].

I.7.2. Méthode de Schlumberger

La méthode de Schlumberger est basée sur le même principe de mesure de Wenner. La seule différence se situe au niveau du positionnement des électrodes (Figure II.10) :

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

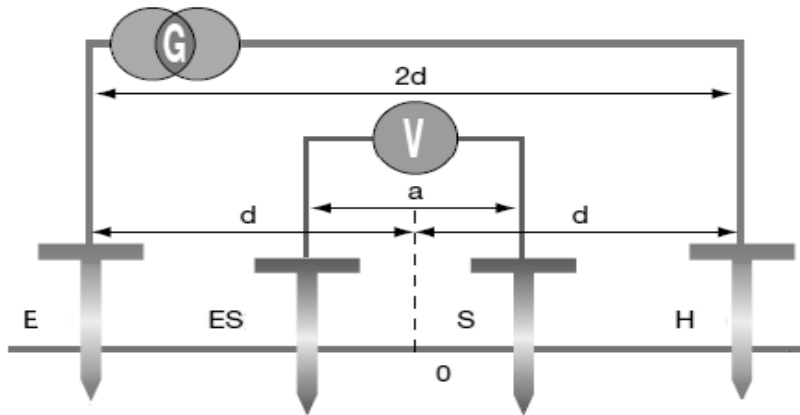


Figure I.8 : Schéma de mesure de la méthode de Schlumberger

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

$$\rho = \left[\pi \left(d^2 - \frac{a^2}{4} \right) R \right] / 4 \quad (I.9)$$

I.8. Conclusion

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

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

Il existe une multitude de méthodes de mesure de la résistance de terre la méthode de Wenner et celle de Schlumberger sont utilisées pour la mesure de la résistance du sol.

II.1. Introduction

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

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

II.2. Données réelles du réseau de terre de l'ouvrage de LABREG

II.2. 1. Paramètres contractuels

Ces paramètres consistent en :

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

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

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

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

Tableau II.1 : Mesure de résistivités du terrain

II.4. Configurations de mise à la terre proposées pour l'ouvrage énergétique de LABREG

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

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

II.4.1. Première Configuration : Grille rectangulaire

II.4.1.1. Présentation

Nous considérons une grille rectangulaire de la figure II.1. Les dimensions adoptées pour la dite grille est de 435 m de longueur et 300 m de largeur. Ces dimensions correspondent exactement à celles réelles du système de mise à la terre de l'ouvrage de LABREG.

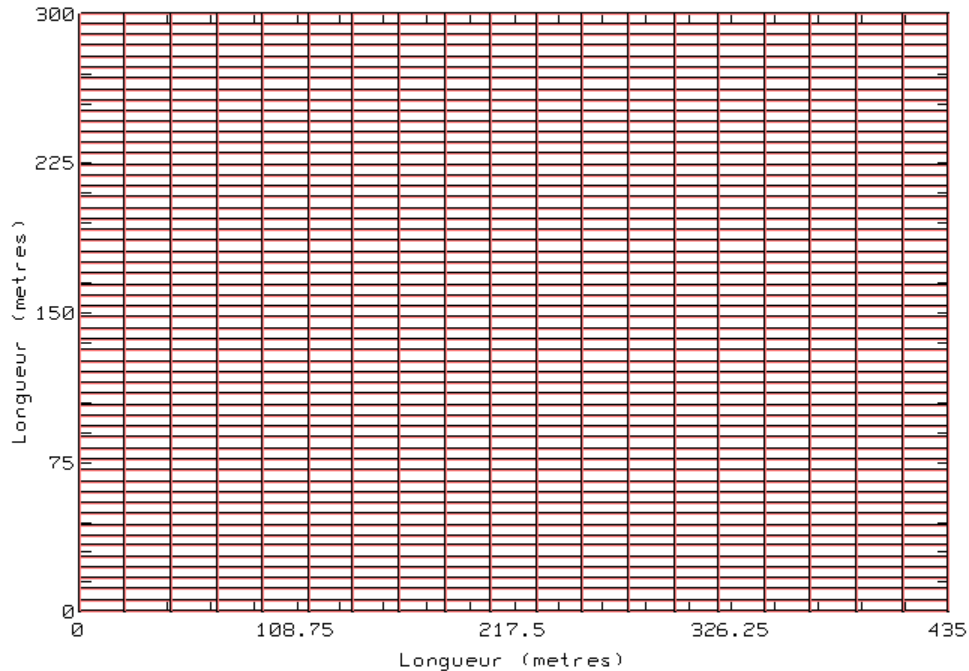


Figure II.1: Première Configuration (Grille rectangulaire)

II.4.1.2. Analyse du sol

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

- ✓ Epaisseur de la couche supérieure est 3.45 m ;
- ✓ Résistivité de la couche supérieure est 53.67 $\Omega.m$;
- ✓ Résistivité de la couche inférieure est 8.08 $\Omega.m$.

II.4.1.3. Résultats de simulation :

Les différents résultats de simulation donnés par CYMGrd sont :

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

✓ Potentiels de contact : $V_T=76.6057 \text{ V}$.

Il est clair que les tensions de contact et de pas sont largement inférieures à celles de contact et de pas maximales admissibles ($V_T = 76.6057 \text{ V} \ll V_{T \max 50} = 177.26 \text{ V}$ et $V_S = 9.17 \text{ V} \ll V_{S \max 50} = 216.88 \text{ V}$). De même, la résistance de la grille est largement inférieure à celle exigée ($R_g=0.0125 \Omega \ll 1 \Omega$).

II.4.1.4. Effets de la longueur totale et de la profondeur de la grille

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

II.4.1.4.1. Effet de la longueur totale de la grille

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

Pour cela, nous gardons les différents paramètres site en paragraphe (III.4.1.3) et nous diminuons (graduellement) la quantité (et donc la longueur totale) du cuivre de 10% à 80% par palier de 10 % de la quantité (de la longueur) totale du cuivre utilisée dans la configuration initiale.

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

L'espacement (D) entre les conducteurs parallèles citée au chapitre II. Les résultats ainsi trouvés sont représentés dans le tableau (II.2) suivant.

%	L_T (m)	D (m)	R_G (Ω)	EPT (V)	V_{SURF} (V)	V_S (V)	V_T (V)
0	3036 0	x=7,8 ; y=15	0.012580 2	206.37 6	178.97	9.17	76.605 7
10	2732 4	9.82	0.012867 4	211.08 7	182.14	9.77	85.907 4
20	2428 8	11.10	0.013153 9	215.78 8	180.43	10.1 1	92.337 6
30	2125	12.72	0.013534	222.02	190.16	10.8	100.73

	2		1	4		7	4
40	1821 6	14.90	0.014046 7	230.43 3	194.36	10.8 1	111.41 3
50	1518 0	18.00	0.014726 6	241.58 7	196.46	13.2 4	124.24 7
60	1214 4	22.90	0.015803 2	259.24 8	219.94	17.3 4	143.52 8
70	9108	31.20	0.017634 3	289.28 8	212.90	15.4 7	174.83 8
80	6072	48.90	0.021371 0	350.58 6	295.09	30.2 1	236.41 6

Tableau II.2 : Variation des différents paramètres en fonction de la longueur totale des conducteurs

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

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

Nous traçons maintenant les différentes caractéristiques (Figures II.2 à II.5) donnant la variation de l'élévation du potentiel de terre, la résistance de la grille, la tension de pas et celle de contact en fonction de la longueur totale de la grille de terre.

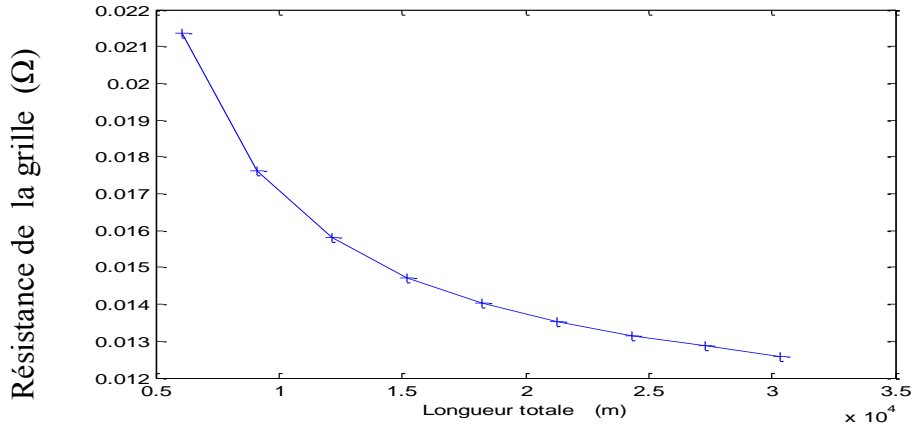


Figure II.2 : Résistance de la grille en fonction de la longueur totale

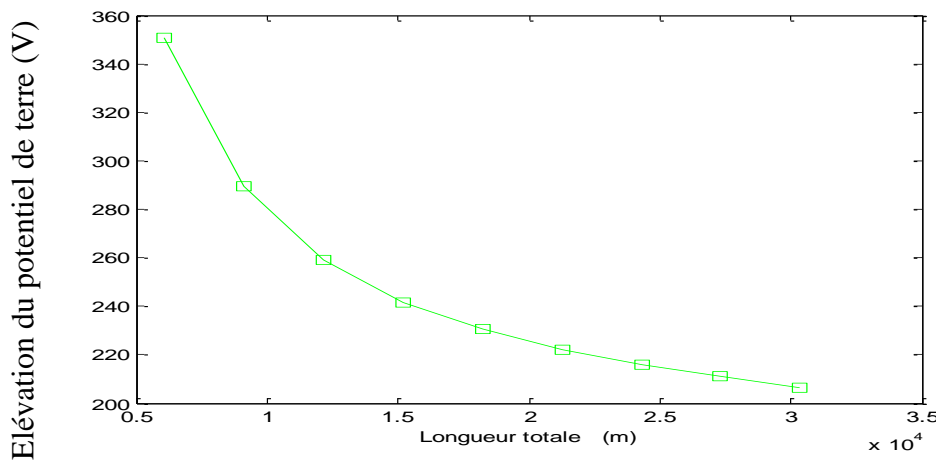


Figure II.3 : Elévation du potentielle de terre en fonction de la longueur totale

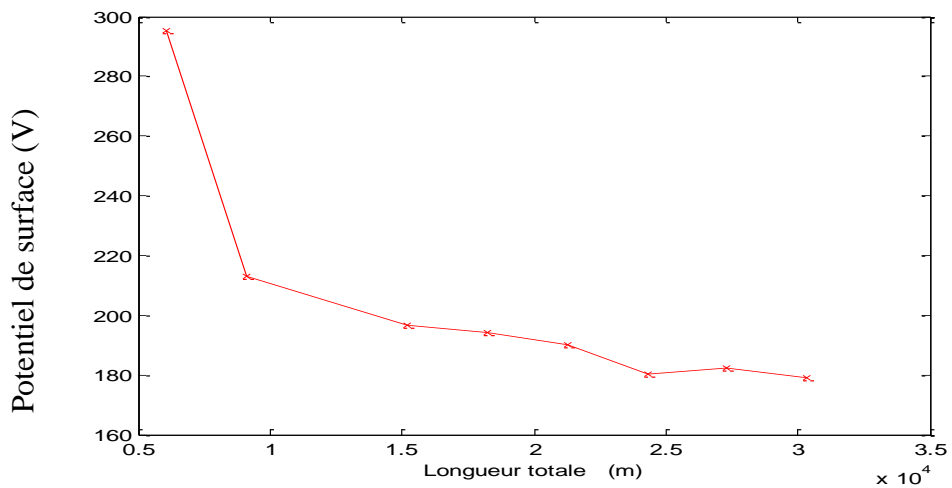


Figure II.4 : Potentiel de surface en fonction de la longueur totale

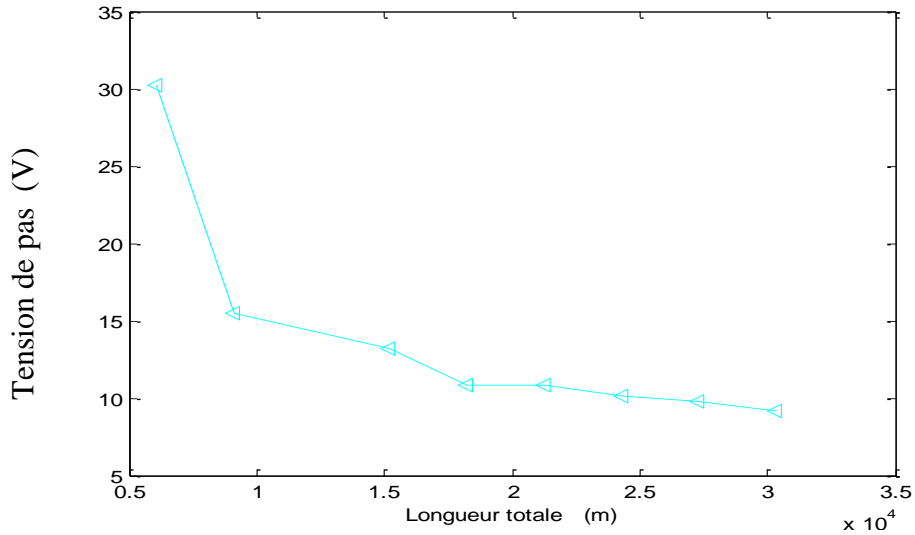


Figure II.5 : Potentiel de pas en fonction de la longueur totale

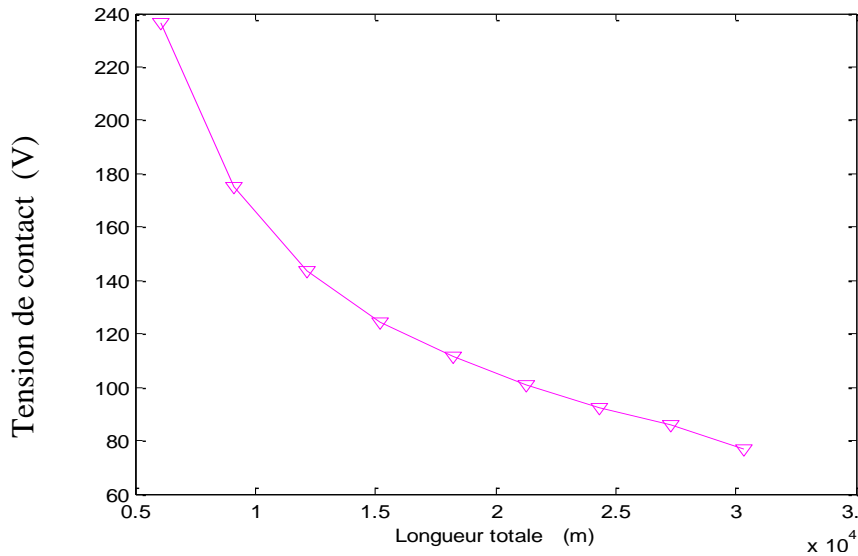


Figure II.6 : Potentiel de contact en fonction de la longueur totale

D'après le tableau II.2 et les figures II.2 à II.6, nous pouvons conclure qu'avec l'augmentation de la longueur totale des conducteur (et donc l'augmentation du nombre de mailles) la résistance de la grille de terre, l'élévation du potentiel de terre, ainsi que les tensions de contact et de pas diminuent pour les longueurs inférieures à 20000 m, et lentement ailleurs. Les grandeurs électriques susmentionnées tendent vers un palier constant.

II.4.1.4.2. Effet de la profondeur du réseau de terre

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

Les résultats trouvés dans ces conditions sont représentés dans le tableau II.3 et sur les figures (II.7) et (II.8).

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

Tableau II.3 : Variation des différents paramètres en fonction de la profondeur de la grille de terre

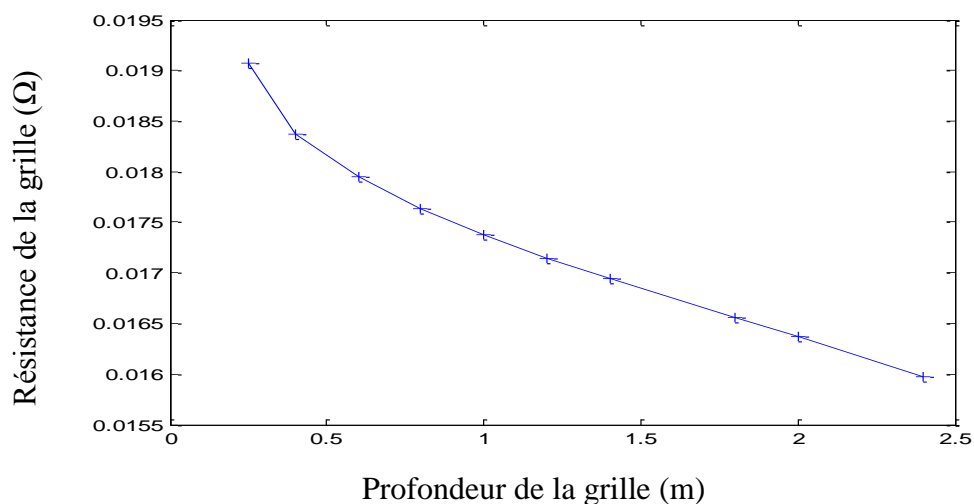


Figure II.7 : Résistance de la grille en fonction de la de la profondeur

Uniquement pour récapituler les caractéristiques précédentes, nous les rassemblons et présentons sur la figure II.8. Etant donné l'aspect physique de chaque paramètre électrique caractérisant la grille rectangulaire, nous ne pouvons en aucun cas comparer les uns aux autres.

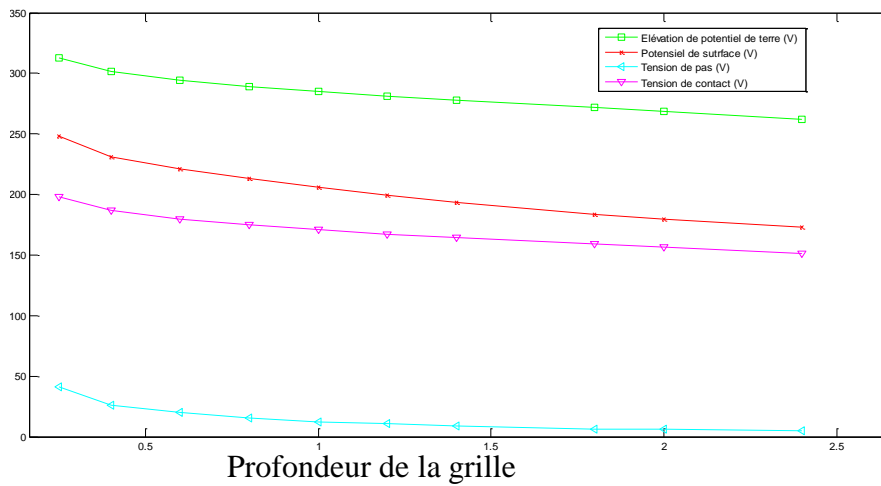


Figure II.8: Association les différents tensions en fonction de la de la profondeur

Le tableau (II.3) ainsi que les caractéristiques représentées aux figures (II.7) et (II.8) indiquent que :

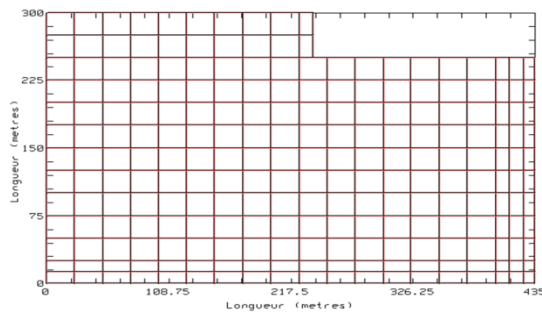
- ✓ L'augmentation de la profondeur de l'emplacement de la grille de terre contribue considérablement dans l'affaiblissement de l'élévation du potentiel de terre, de la résistance du système de mise à la terre et de la tension de pas et celle de contact ;
- ✓ L'intervalle de la profondeur entre [0.5m,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

II.4.2. Deuxième configuration : Grille en forme de L inversé

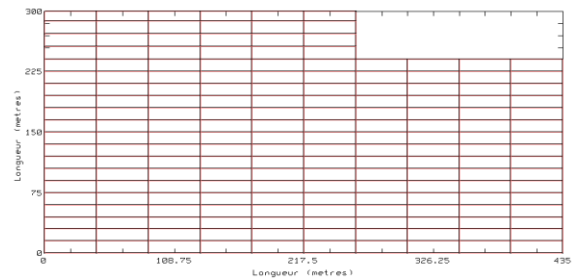
II.4.2.1. Présentation et résultats

En se basant sur le plan d'arrangement des équipements de l'ouvrage énergétique de LABREG et en éliminant les parties inutiles de la configuration précédente, nous obtenons la forme « L inversé » illustrée à la figure (II.9).

Pour une telle forme, nous étudions les deux cas de maillage à savoir carré (Figure III.9.a) et rectangulaire (Figure III.9.b). Ceci nous permettra de préciser le cas où la longueur totale critique est minimale. Une fois le cas et longueur déterminés, nous examinons l'impact d'un certain nombre de paramètres (ajout des piquets, longueurs des piquets et l'emplacement des piquets) sur le comportement du système de terre adopté.



(a) maillage carré



(b) maillage rectangulaire

II.9. Grille en L inversé

Les résultats de calcul sont présentés dans le tableau (III.4) et le diagramme de potentiel de contact sur la figure II.9.

	Maillage rectangulaire		Maillage carré	
	Configuration initiale	Configuration critique	Configuration initiale	Configuration critique
x(m)	7.5	43.5	12.5	25.0
y(m)	25.6	16.0	12.5	25.0

L_T (m)	23035	11499	20085	11255
R_G (Ω)	0.0139	0.0164	0.0141	0.0166
EPT (V)	213.847	251.975	216.783	253.481
V_{SURF} (V)	198.26	231.69	198.58	219.17
V_S (V)	8.95	19.59	11.59	17.16
V_T (V)	138.637	176.385	138.983	174.751

Tableau II.4 : Variation des différents paramètres en fonction de la forme du maillage de grille en forme de L inversé

Selon les résultats ainsi obtenus et présentés dans le tableau (II.4) et la figure (II.9), les systèmes des configurations initiales (maillages carré et rectangulaire) sont largement sécurisés. Ceci est évident car la configuration en L inversé a été inspirée de celle rectangulaire.

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

II.5. Traitement de la couche superficielle du sol

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

II.5.1. Traitement par variation de l'épaisseur

Dans cette section, nous nous sommes intéressés au traitement par variation de l'épaisseur de la couche superficielle. Cette épaisseur a été variée de 0 à 1 m. La résistivité de la couche en question a été fixée à 2000 $\Omega.m$. Après l'analyse des différentes configurations, nous obtenons les résultats présentés sur les figures (II.10) et (II.11).

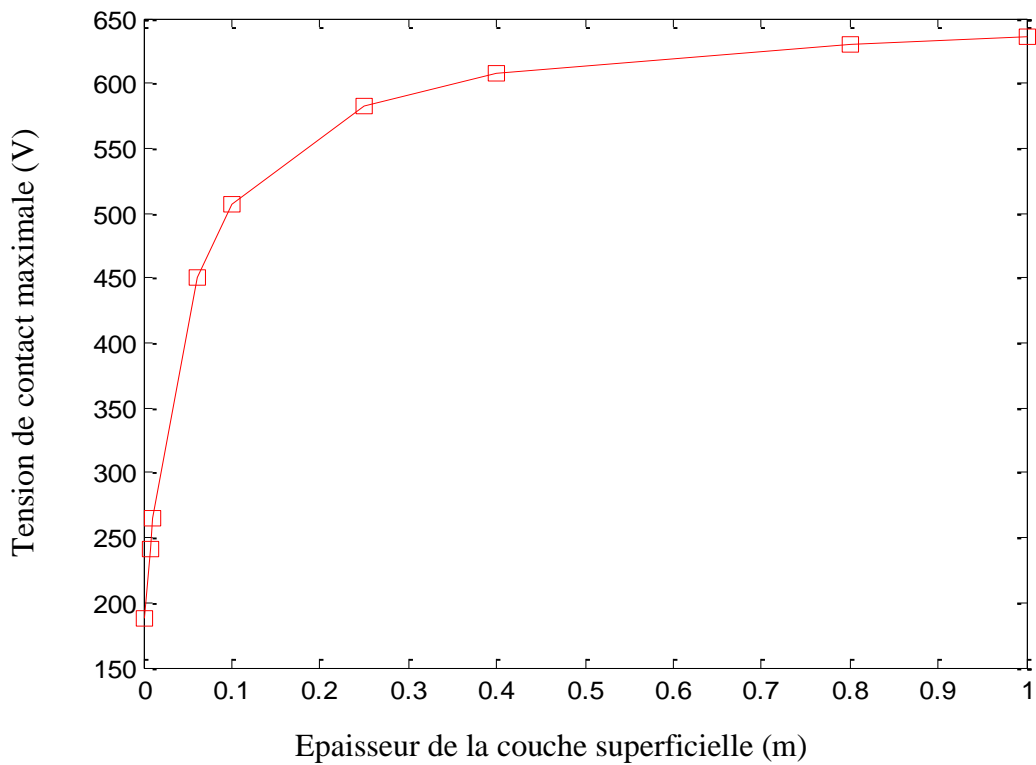


Figure II.10 : Impact de l'épaisseur de la couche superficielle sur la tension de contact maximale

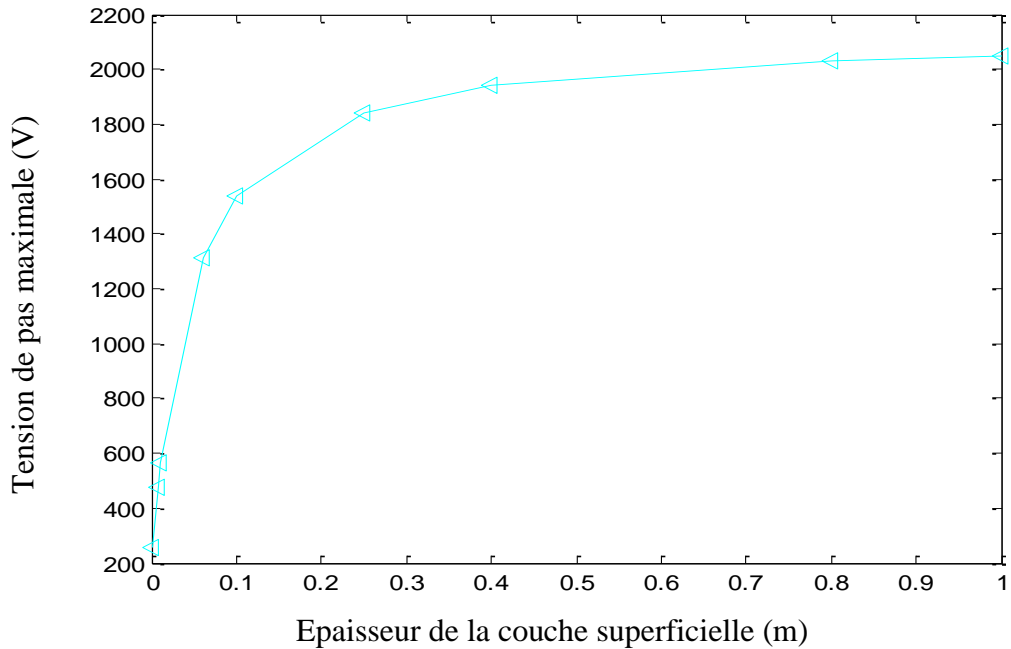


Figure II.11 : Impact de l'épaisseur de la couche superficielle sur la tension de pas maximale

D'après les caractéristiques précédentes, nous constatons que l'épaisseur de la couche superficielle contribue considérablement dans l'augmentation du facteur de réduction C_s et tensions maximales de pas V_{Smax} et de contact V_{Tmax} . Avec l'augmentation de l'épaisseur en question, ces grandeurs suscités augmentent rapidement pour les épaisseurs comprises entre 0 et 0,2 m, et lentement ailleurs, en tendant vers un palier constant. Il est important de noter que pour une valeur de l'épaisseur e_s avoisinant 0,1 m, la valeur du facteur de réduction C_s a atteint la valeur optimale (trouvée auparavant). Cette dernière avoisine 0,7. Ces deux valeurs relatives à l'épaisseur et facteur de réduction vont être prises en compte lors de la mise en œuvre du réseau de terre optimisé.

II.6. Configuration optimale

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

Pour cela, nous considérons une grille de terre en forme de L inversé, sans piquets de terre ayant un maillage carré (Figure II.9.a). Cette grille est implantée à une profondeur de 0,8 m, que l'épaisseur de la couche superficielle (e_s) est de 0,1 m, la résistivité de la couche superficielle est de 3000 $\Omega.m$.

Nous renforçons la grille par des conducteurs et des piquets dans les endroits de l'emplacement des groupes turbo-alternateurs et des transformateurs. Les figures (II.12) et (II.13) représentent respectivement les différents renforcements par ajout des conducteurs et de piquets. Dans le premier, nous avons fixé une longueur totale des conducteurs primaires enterrés à 12495 m. Par ailleurs, nous avons considérés 32 piquets, de longueur 10 m et diamètre 12.7 mm.

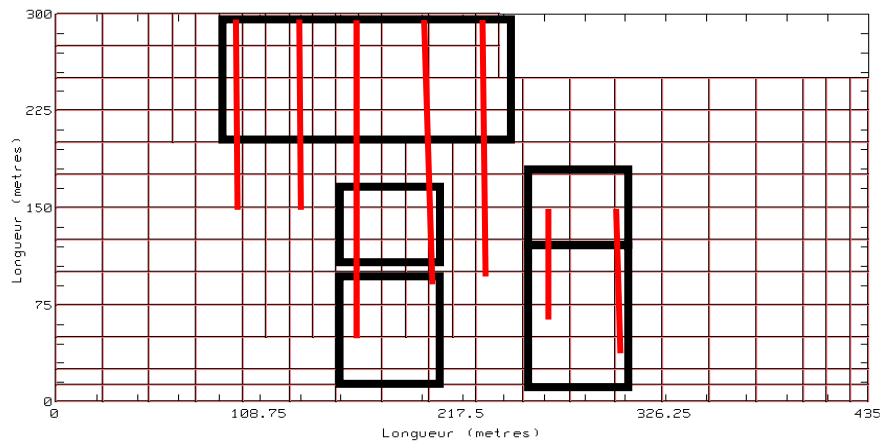


Figure II.12 : Renforcement de la grille par des conducteurs

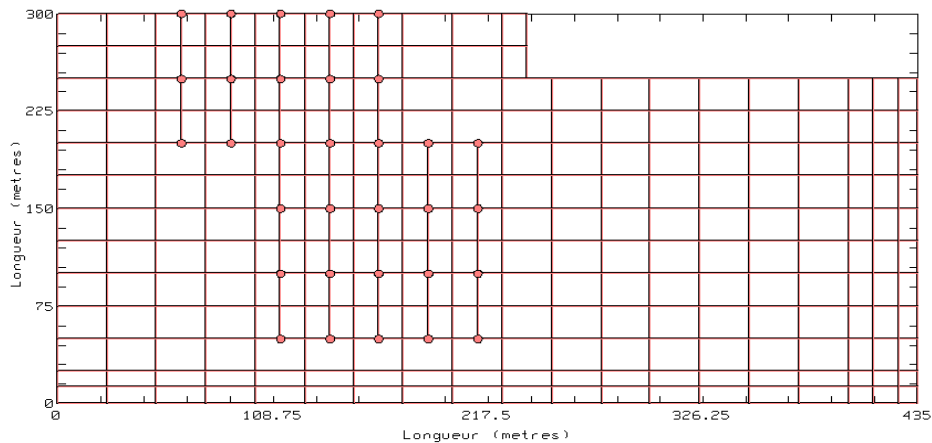


Figure II.13 : Renforcement de la grille par des piquets de terre

Les différents résultats de simulation obtenus lors du renforcement par ajout des conducteurs et par traitement de la couche superficielle sont :

	ajout des conducteurs	ajout des conducteurs piquets	ajout des conducteurs piquets et couche superficielle (ϵ_s de 0.1m, ρ_s de 3000 $\Omega.m$)
$R_G (\Omega)$	0.016126	0.0154945	0.0154945
$V_{Tmax} (V)$	177.26	177.26	677.26
$V_T (V)$	168.792	160.272	160.272
$V_{Smax}(V)$	216.88	216.88	2216.91
$V_S(V)$	16.54	15.49	15.49
$V_{surf} (V)$	214.25	210.44	210.44
EPT(V)	246.572	236.912	236.912
L_{TOTLE}	12495 m	12815 m	12815 m

Tableau II.5 : résultats de simulation des paramètres de configuration optimale .

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

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

II.7. Conclusion

Il ressort de cette étude les principales conclusions suivantes :

- ✓ L'augmentation de la longueur totale des conducteurs enfouis dans la terre entraîne une diminution de l'élévation du potentiel, de la résistance de la grille et des tensions maximales de contact et de pas.
- ✓ L'ajout des piquets ainsi que leur positionnement engendrent une diminution considérable des paramètres électriques susmentionnés caractérisant la grille de mise à la terre. L'emplacement des piquets d'une manière horizontale est le plus recommandé.
- ✓ Pour une même longueur totale des conducteurs, il est préférable d'augmenter la longueur que le nombre des piquets.
- ✓ La profondeur optimale pour le système de mise à terre est proche de 0.8 m.
- ✓ Les différentes grandeurs électriques simulées peuvent être également réduites en réalisant un traitement de la couche superficielle du sol.

- ✓ Pour des raisons économiques (longueur totale critique de conducteurs enterrés minimale), le maillage de forme carrée est recommandé que celui rectangulaire.

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

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

Nous avons retenu les conclusions suivantes :

- ✓ La concordance entre les valeurs de l'élévation du potentiel, la résistance de la terre, les tensions maximales de contact et de pas obtenues en utilisant à la fois le code de calcul CYMGRD et la norme IEEE 80-2000, valide l'utilisation de ce code de calcul.
- ✓ Avec l'augmentation de la longueur totale des conducteurs, les paramètres électriques a savoir, la résistance de la grille de terre, l'élévation du potentiel de terre, ainsi que les tensions de contact et de pas, diminuent rapidement pour les longueurs inférieures à 20000 m, et lentement ailleurs en tendent vers un palier constant.

- ✓ L'augmentation de la profondeur d'enfouissement, l'ajout des piquets, l'augmentation de la longueur et du nombre de tels piquets engendre une diminution considérable de toutes les grandeurs électriques ainsi étudiées.
- ✓ Les tensions de pas et de contact maximales augmentent linéairement avec la résistivité de la couche superficielle, ce qui augmente la sécurité des personnes et des équipements.
- ✓ Avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche superficielle, tensions maximales de pas et de contact ainsi que le facteur de réduction augmentent rapidement pour les épaisseurs comprises entre 0 et 0.2 m, et lentement ailleurs, en tendant vers limite. La valeur de l'épaisseur permettant l'obtention d'un facteur de réduction de 0.7, avoisine 0.1 m.
- ✓ Le traitement de la couche superficielle par modification de la résistivité et/ou l'épaisseur contribue donc considérablement au renforcement des systèmes de mise à la terre,
- ✓ Longueur totale critique de conducteurs est minimale dans le cas d'un maillage carré. En effet, sur le plan économique, ce maillage est recommandé que celui rectangulaire.

Bibliographie

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Georges S., « Evaluation de l'Effet de la Mer et du Contrepoids sur le Profil de la Tension d'un Système de Mise à la Terre d'une Ligne de Transport d'Energie à Haute Tension dans un

Bibliographie

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

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

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

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

Klajn A. & Markiewicz H., « Mise à la Terre, Aspects Fondamentaux de Construction, Section 6 : CEM et Mise à la Terre », Leonardo Energy, France, Août 2007. www.leonardo-energy.org

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

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

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

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

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

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

Nzuru N. J. P., « Contribution à l'Analyse et à la Réalisation des Mises à la Terre des Installations Electriques dans les Régions Tropicales », Thèse de Doctorat en Sciences, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgique, Février 2009.

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

Robinson. D.A, C.M.K. Gardner, J.D. Cooper, «Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and theta probes: comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity», Elsevier, Journal of Hydrology 223, pp 198-211, 1999.

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

Bibliographie

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

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

Stoffregen.H, U. Yamamanci, T. Zenker, G. Wessolek, “Accuracy of soil water content measurements using ground penetrating radar: comparison of ground penetrating radar and lysimeter data”, Elsevier, Journal of Hydrology 267, pp 201-206, 2002.

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

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

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

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

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