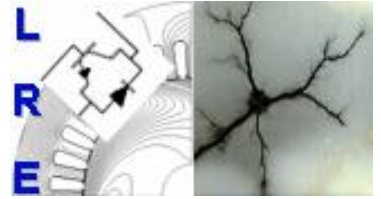




Ecole Nationale Polytechnique  
Département d'Electrotechnique  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



## Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :  
**ALIK Benamrane**

**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.

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

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

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

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

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

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

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

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

En général, les relations décrivant la résistance de mise à la terre proviennent de l'hypothèse que le sol a une structure homogène et une résistivité constante [Georges, 2001]. Le recours aux mesures est indispensable pour l'obtention des valeurs réelles. La mesure de la résistance des sols permet de choisir le meilleur emplacement pour les prises de terre. La détermination réelle de la valeur de la résistance de mise à la terre permet de dimensionner avec exactitude les dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels, par exemple).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



## I.1. Introduction

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

- des méthodes expérimentales, consistant à utiliser des équations empiriques obtenues pour différentes formes de système mise à la terre [Legrand, 2007 ; Nzuru, 2009] ;
- des méthodes numériques, nécessitant des recours aux ordinateurs pour obtenir des solutions rapides et optimales.
- des codes de calcul, permettant l'analyse des systèmes de mise à la terre, comme :
  - EMTP (Electromagnetic Transients Program),
  - TRAGSYS (Computer Software for Transient Analysis of Grounding Systems) [Legrand, 2007],
  - GetDP (General environment for the treatment of Discrete Problems) [Nzuru, 2009],
  - AutogridPro: [AutogridPro, 2006].
  - CYMGrd (CYME Ground) [CYMGrd, 2006].

Nous présentons brièvement dans ce qui suit, le code de calcul et de simulation CYMGrd.

## I.2. Présentation de CYMGrd

Ce code peut effectuer des analyses de résistivité du sol. Il peut tracer les résistivités mesurée et calculée sur le même graphique. Cette analyse est nécessaire pour arriver à un modèle de sol qui sera, par la suite, utilisé pour l'analyse des élévations de potentiel. Le module de ce code supporte l'analyse du sol uniforme ou stratifié horizontalement en deux couches de résistivités différentes (ce code ne tient pas compte de la stratification verticale du sol). CYMGrd calcule les tensions maximales admissibles de pas et de contact, selon la norme IEEE 80-2000. L'utilisateur peut définir l'amplitude future du courant de défaut, l'épaisseur et la résistivité des couches de matériau appliquées (exemple : la pierre concassée) à la surface du terrain, le poids corporel et la durée prévue d'exposition de la victime.

En plus, il le dimensionne les électrodes de terre et calcule l'élévation de potentiel de terre (EPT). Il peut également déterminer la résistance équivalente des grilles de mise à la terre, de configurations arbitraires, constituées de conducteurs de terre, de piquets de terre et d'arcs, puisqu'il emploie des méthodes matricielles pour résoudre la distribution de courant à la terre. Des électrodes directement sous tension et/ou passives, non connectées à la grille mises sous tension, peuvent être modélisées, afin d'évaluer les effets de proximité.

CYMGrd calcule en outre, les gradients de potentiel de contact, de pas et de surface dans n'importe quel point d'intérêt de la zone d'étude. Ce code peut également produire les contours équipotentiels des potentiels de contact, de pas et de surface, ainsi que les profils des tensions de contact, de pas et de surface dans n'importe quelle direction. La codification couleur permet de visualiser les résultats en deux ou trois dimensions, facilitant ainsi l'évaluation de la sécurité du personnel et la protection des équipements entourant les électrodes de mise à la terre.

### **I.3. Influence de la géométrie de l'assiette de l'ouvrage à étudier sur les différents paramètres du système mise à la terre:**

Le réseau de terre doit vérifier deux principes fondamentaux :

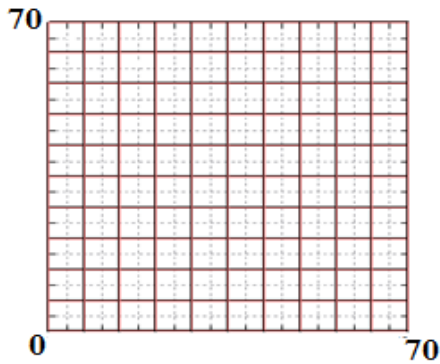
- être équipotentiel, c'est-à-dire minimiser les différences de potentiel auxquelles les équipements du poste et les personnes sont susceptibles d'être soumis ;
- avoir une résistance de terre faible afin de favoriser l'écoulement dans le sol du courant engendré par les défauts.

En raison de ces objectifs, on se base sur le code CYMGrd pour concevoir le réseau de terre d'un ouvrage électrique en présence d'un défaut dans le cas d'un transformateur 115 kV /13 kV raccordé en triangle - étoile. Pour cela, nous proposons la conception des différents formes de grilles (carrée, rectangle, L et U), ayant une même surface (4900 m<sup>2</sup>), et même nombre (100) et même forme (carrée de 7m de côté) de mailles. Ces quatre configurations sont représentées sur la figure (I.1).

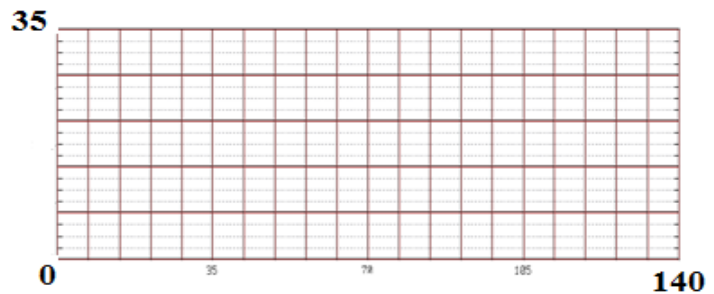
Les données d'une telle conception sont montrées dans le tableau (I.1) suivant.

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

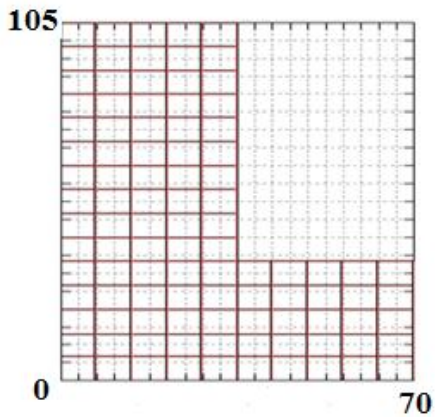
Tableau I.1: Données de conception des grilles de surface 4900 m<sup>2</sup> sans piquets [IEEE Standard 80-2000]



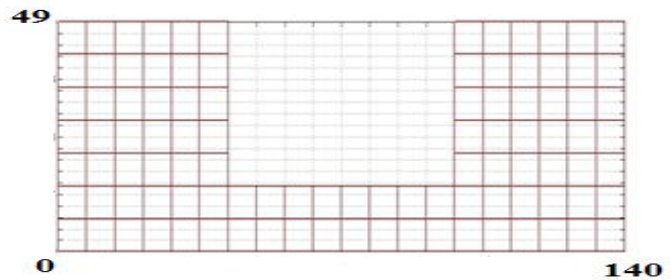
(a) Grille carrée (70 m x 70) m



(b) Grille rectangulaire 140 m x 35 m



(c) Grille en L



(d) Grille en U

Figure I.1 : Représentation des différentes configurations de la grille de surface de 4900m<sup>2</sup>

Les résultats obtenus en utilisant le code CYMGrd sont donnés dans le tableau (I.2)

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

Tableau I.2 : Comparaison des résultats lors de l'utilisation des différentes formes de grilles en utilisant le code CYMGrd

D'après ce tableau, nous constatons que :

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

#### 4. Conclusion

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



## 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  $2 \times 140.5$  MW. Son système de mise à la terre (Figure IV.1), déjà existant, est très complexe et coûteux. Cette présente étude est faite dans le but de trouver à la dite centrale, un autre système de mise à la terre à la fois, simple, performant, optimisé et moins coûteux.

En se 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. Présentation succincte de l'ouvrage énergétique de LABREG

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

## II.3. Equipements et Données de base :

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

- ✓ Une turbine à combustion utilisant le gaz naturel et le fuel liquide comme combustible.
  - Type de centrale : Turbine à gaz ;
  - Nombre de groupes : 02 ;
  - Puissance totale :  $2 \times 140.5$

- Combustible principal : Gaz Naturel ;
  - Combustible de secours : Fuel (Stockage pour une autonomie de 6 jours) ;
  - Localisation : LABREG (Wilaya de Khenchela);
  - Evacuation de l'énergie : vers le poste 220 kV de LABREG.
- 
- ✓ Un alternateur synchrone.
  - ✓ Les auxiliaires mécaniques nécessaires au groupe turbo-alternateur :
    - Système d'admission d'air ;
    - Pompage et filtration de fioul ;
    - Système gaz ;
    - Protection incendie groupe ;
    - Système d'admission d'air et d'échappement de gaz chauds y compris la cheminée ;
    - Système de refroidissement du groupe turbo-alternateur.
- 
- ✓ Les auxiliaires électriques du groupe turbo-alternateur :
    - Transformateur principal ;
    - Disjoncteur principal ;
    - Transformateur de soutirage ;
    - Centre de contrôle des moteurs.
- 
- ✓ Les auxiliaires mécaniques en communs entre les deux tranches :
    - Lavage du compresseur TG à l'arrêt et en fonctionnement ;
    - Poste gaz ;
    - Protection incendie site ;
    - Traitement d'eau ;
    - Système d'air comprimé ;
- 
- ✓ Les auxiliaires électriques en communs entre les deux tranches :
    - Transformateur des auxiliaires site ;
    - Un tableau moyen tension ;
    - Un groupe électrogène 6.6 kV ;
    - Un tableau d'alimentation alternative basse tension ;
    - Un tableau d'alimentation courant continu ;

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

#### II.4. Données réelles du réseau de terre de l'ouvrage de LABREG

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  $< 1 \Omega$  ;
- ✓  $I_g = 14,9$  kA.

#### II.5. 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 model 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 [LGE, 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.5.1. 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.6. 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 (grille rectangulaire, en L inverse avec maillage rectangulaire et maillage carré). Le choix de telles configurations est effectué selon plusieurs critères (sécuritaire, économique, contractuel, etc.). Ces trois configurations sont représentées sur la figure (II.1).

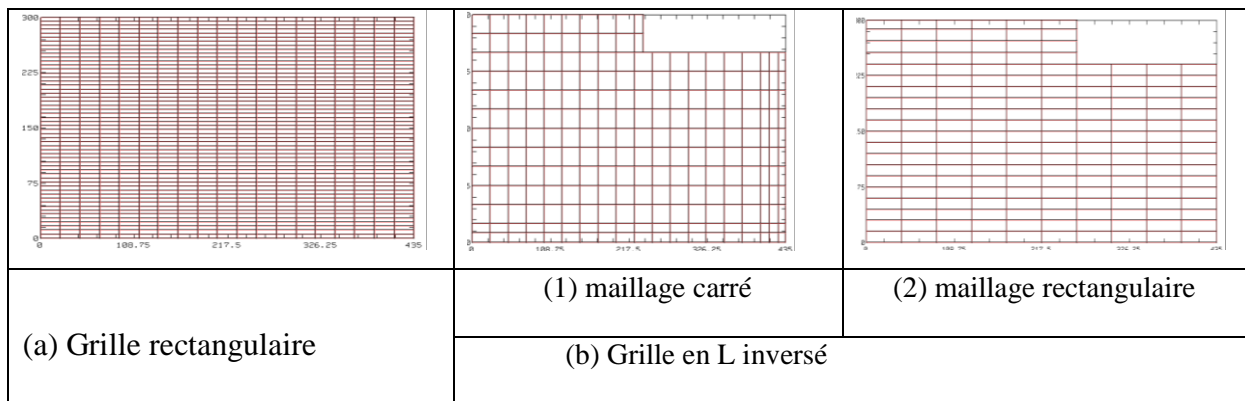


Figure II.1 : Représentation des différentes configurations de la grille de surface de 4900m<sup>2</sup>

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.

Les résultats obtenus en utilisant le code CYMGrd sont donnés dans le tableau (II.2)

	$R_G (\Omega)$	EPT (V)	$V_{surf}$ (V)	$V_{Smax}$ (V)	$V_{Tmax}$ (V)	$V_S$ (V)	$V_T$ (V)	$L_{total}$ (m)
Rectangulaire	0.0176	289.288	212.90	216.88	177.2	15.47	174.83	9108
L Maillage rectangulaire	0.0164	251.975	231.69	216.88	177.2	19.59	176.38	11499
L de Maillage carrée	0.0166	253.481	219.17	216.88	177.2	19.59	174.75	11255

Tableau 2 : Comparaison des résultats lors de l'utilisation des différentes formes de grilles en utilisant le code CYMGrd

D'après ce tableau, nous constatons que la grille rectangulaire présente de meilleurs résultats. Cependant, nous avons opté pour la grille en L inversé possédant la même superficie et la même forme que celles réelles. Par ailleurs, le maillage adopté est celui carré.

## II.7. Effet de la profondeur du réseau de terre

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

Les résultats trouvés dans ces conditions sont représentés sur les figures (II.2) à (II.6).

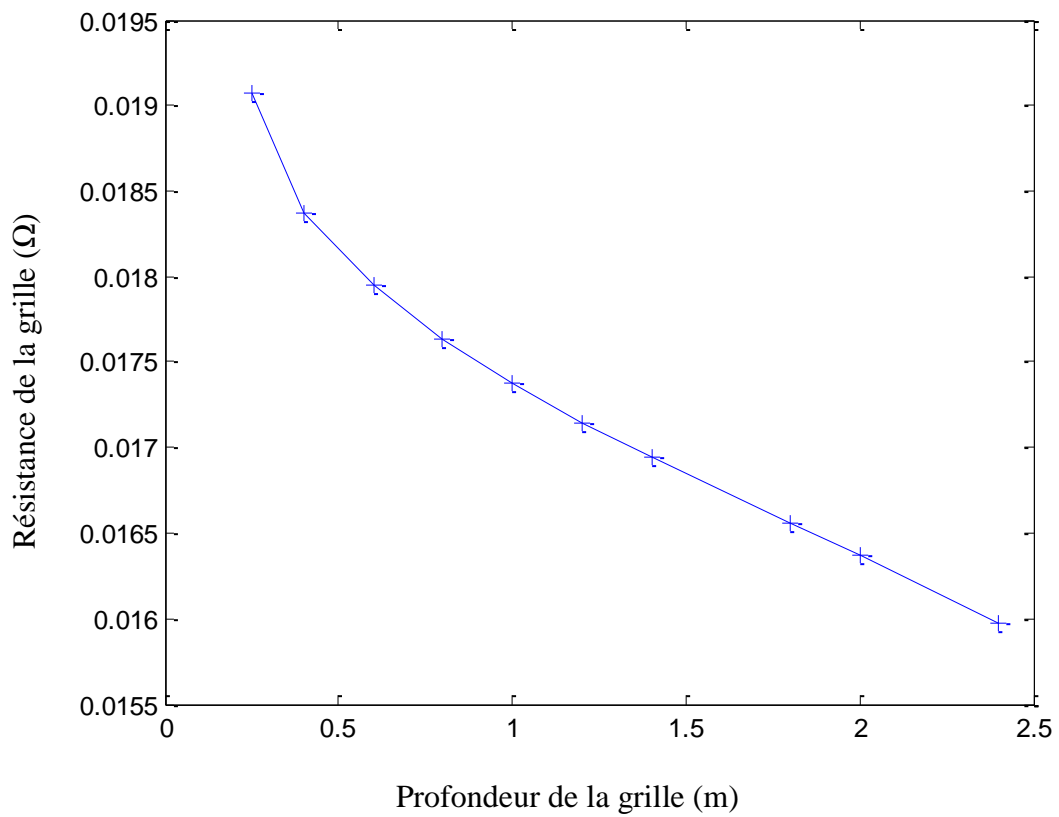


Figure II.12 : Résistance de la grille en fonction de la de la profondeur

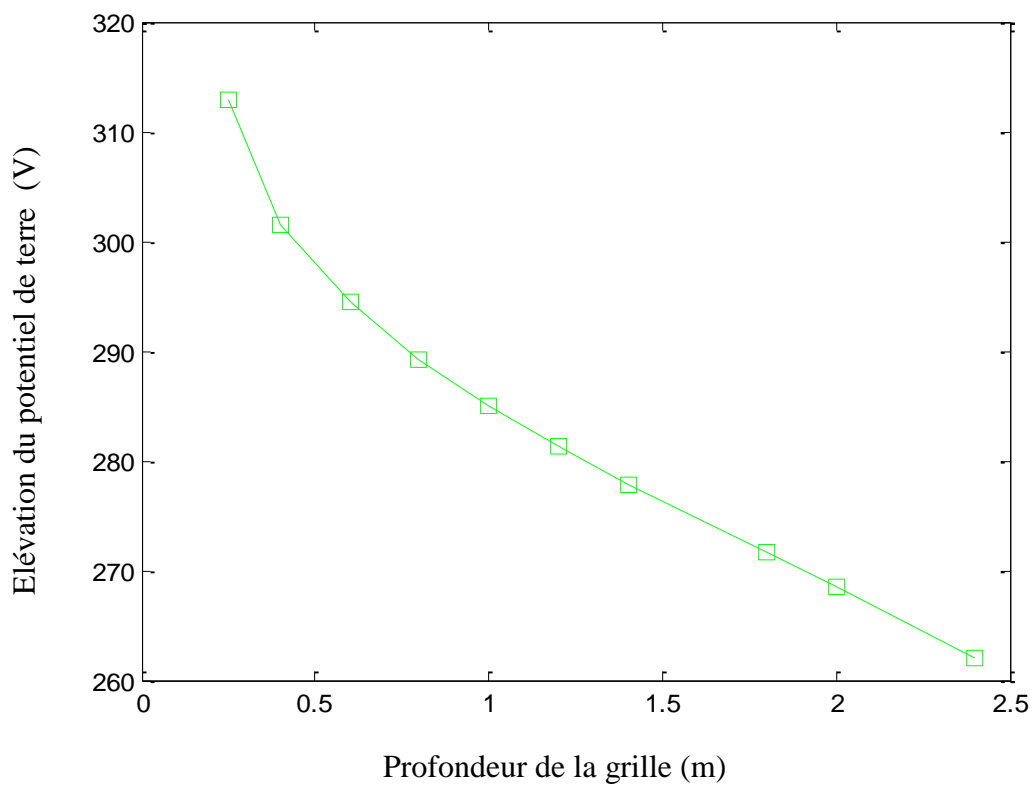


Figure II.3 : Elévation de potentiel de terre en fonction de la de la profondeur

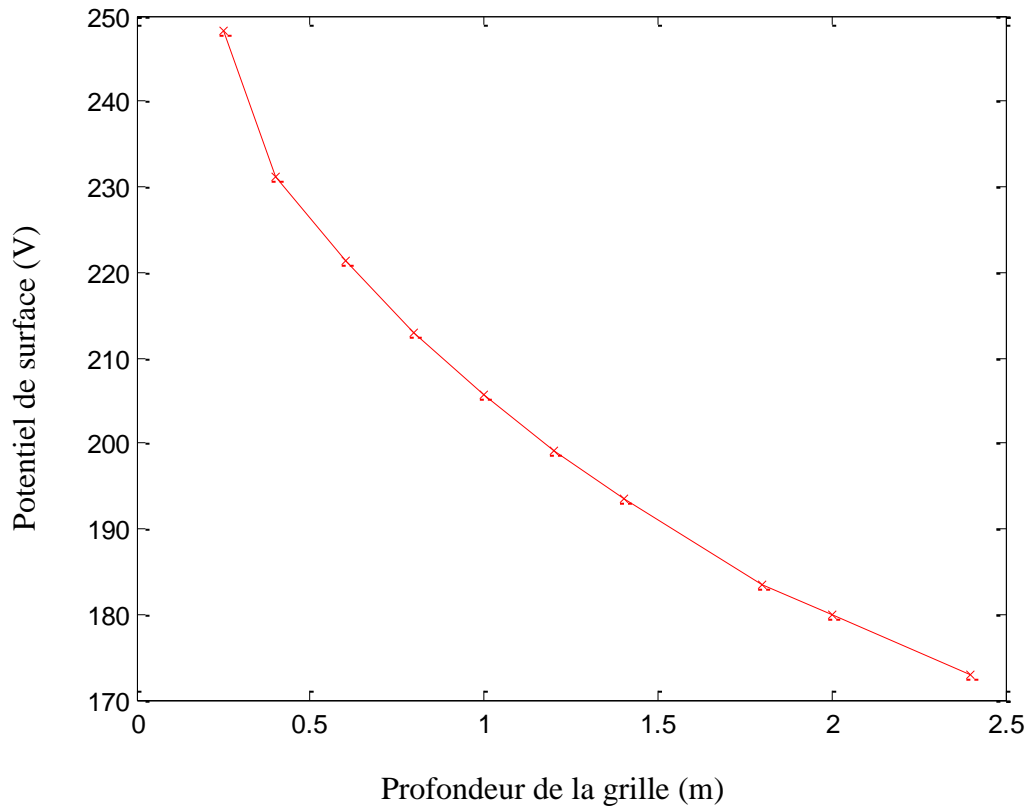


Figure II.4 : Potentiel de surface en fonction de la de la profondeur

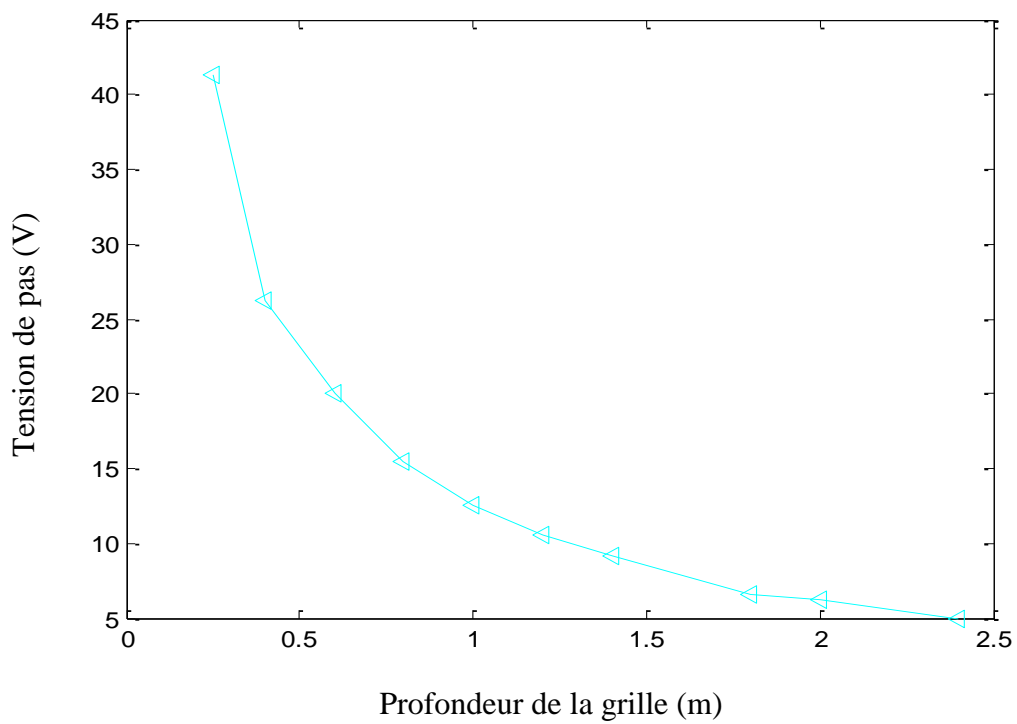


Figure II.5 : Potentiel de pas en fonction de la de la profondeur

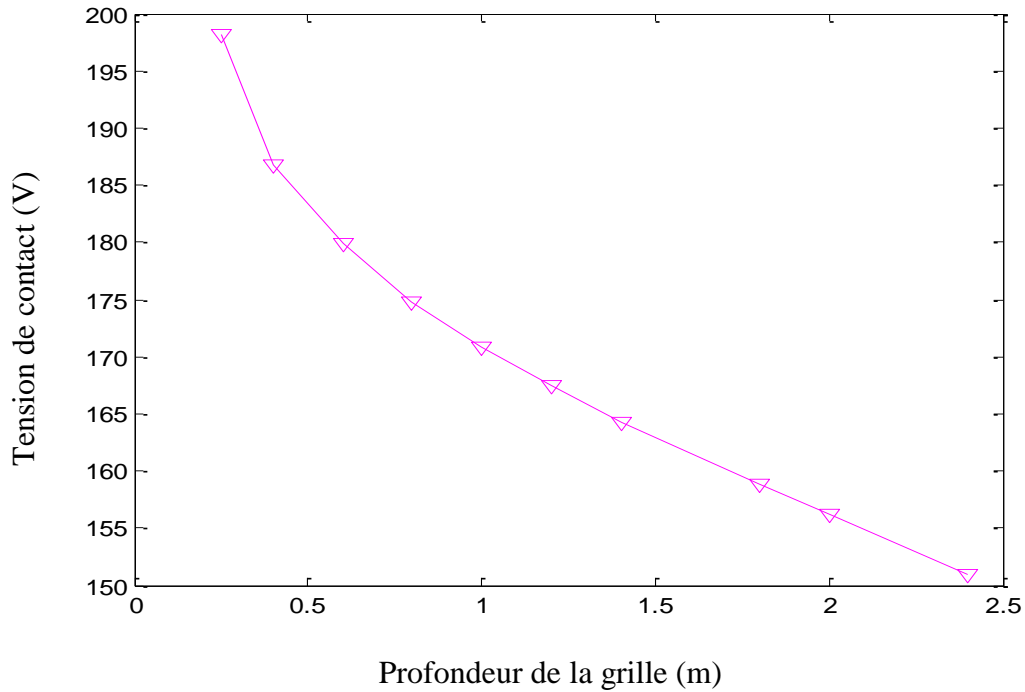


Figure II.6 : Tension de contact en fonction de la de la profondeur

Uniquement pour récapituler les caractéristiques précédentes, nous les rassemblons et présentons sur la figure II.7. Etant donné l'aspect physique de chaque paramètre électrique caractérisant la grille rectangulaire, nous ne pouvons en aucun cas comparer les uns aux autres

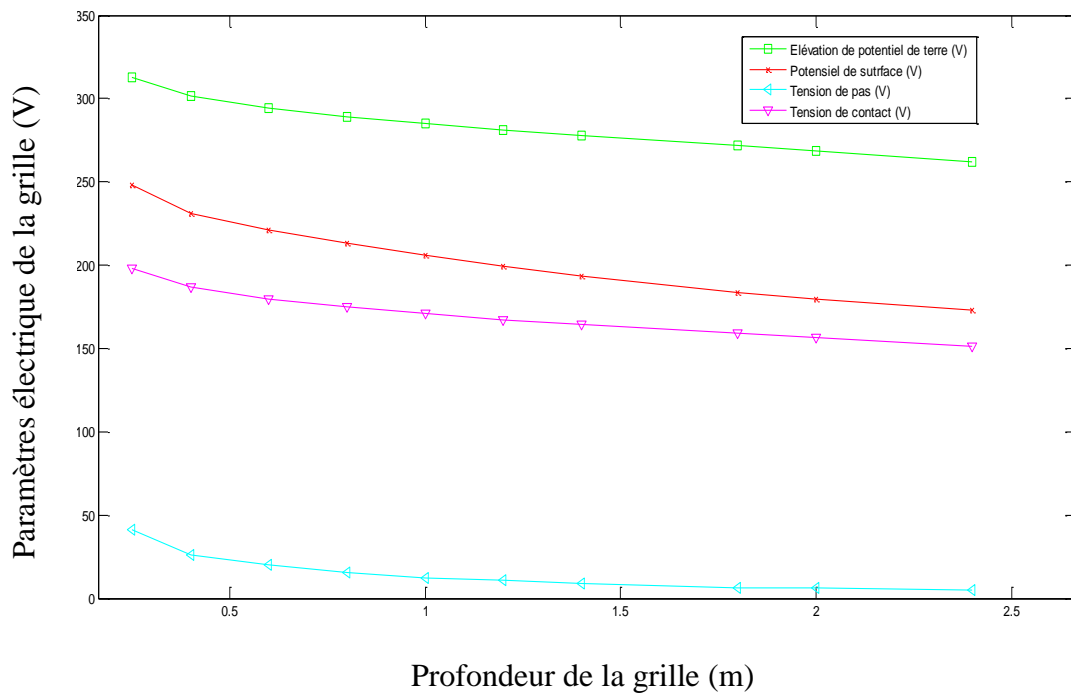


Figure II.7 : Association les différents tensions en fonction de la de la profondeur

Les caractéristiques représentées aux figures (II.2) à (II.7) 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.8. Influence de l'ajout des piquets de terre**

### **II.8.1. Influence du nombre et de l'emplacement des piquets de terre**

Nous considérons le cas d'une grille de terre en forme de L inversé, ayant un maillage carré (Figure II.1.1). Cette grille est implantée à une profondeur de 0.8 m. Nous renforçons cette grille en ajoutant des piquets conducteurs dont les caractéristiques sont :

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

Trois emplacements des piquets ont été considérés :

- ✓ Piquets ajoutés sur le périmètre de la grille (Figure II.8) ;
- ✓ Piquets ajoutés horizontalement (Figure II.9) ;
- ✓ Piquets ajoutés verticalement (Figure II.10).

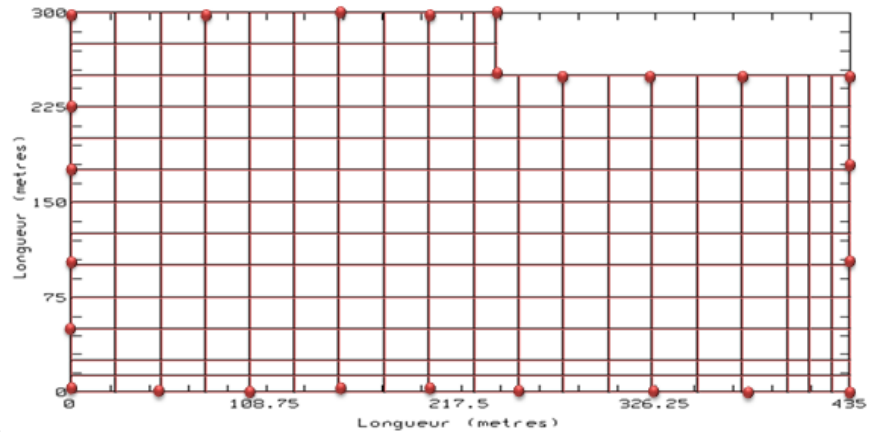


Figure II.8 : Distribution des piquets de terre sur le périmètre de la grille

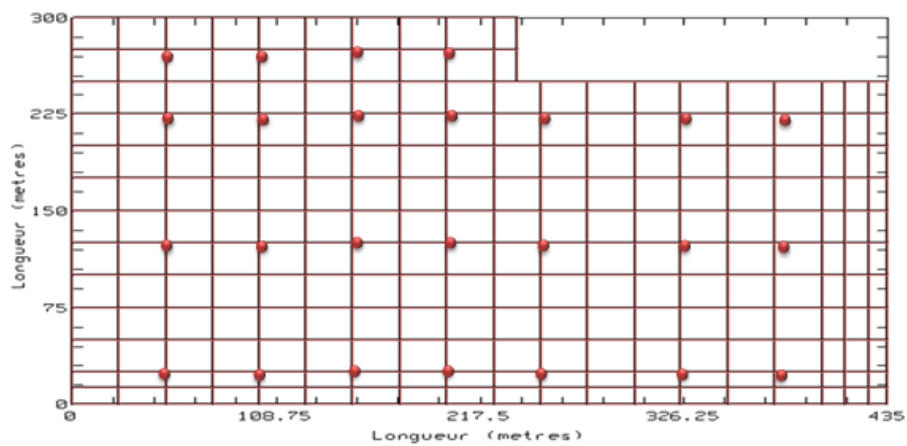


Figure II.9 : Distribution horizontale (ou selon l'axe des X) des piquets de terre

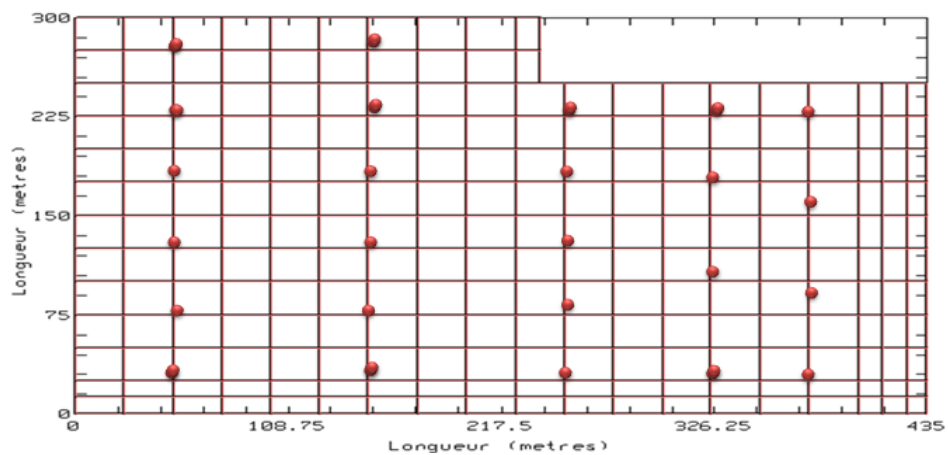


Figure II.10 : Distribution verticale (ou selon l'axe des Y) des piquets de terre

Pour les trois cas susmentionnés, nous avons varié le nombre des piquets de 10 à 150. Après l'analyse des telles configurations en utilisant le code de calcul CYMGrd, nous obtenons les résultats des différentes tensions ainsi que la résistance de terre en fonction du nombre de piques. Ces résultats sont illustrés sur les figures (II.11) à (II.15).

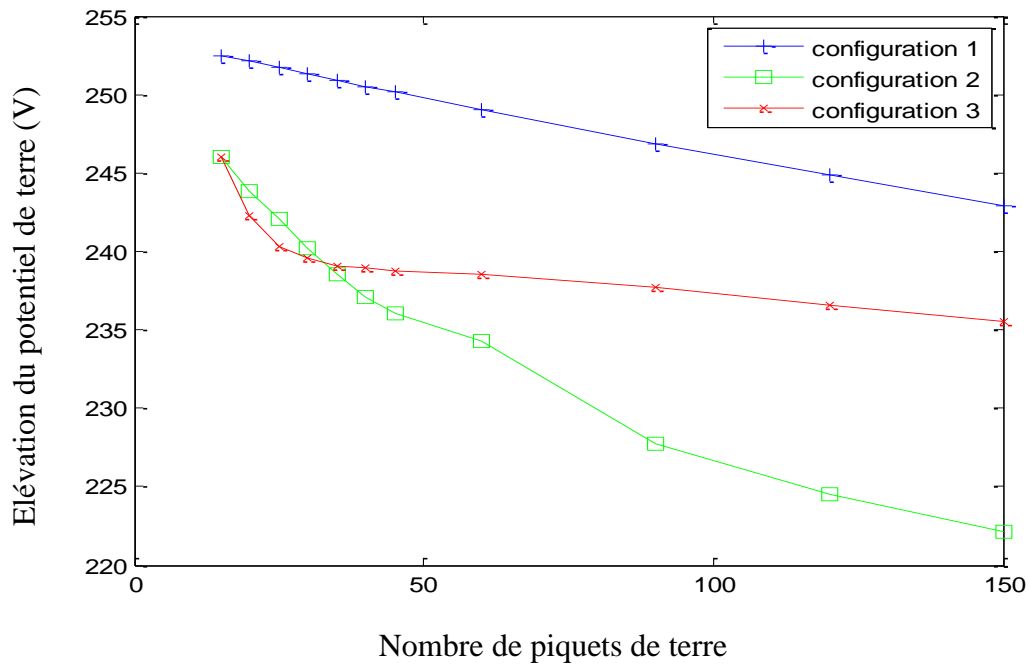


Figure II.11 : Variation de l'élévation du potentiel de terre en fonction du nombre des piquets

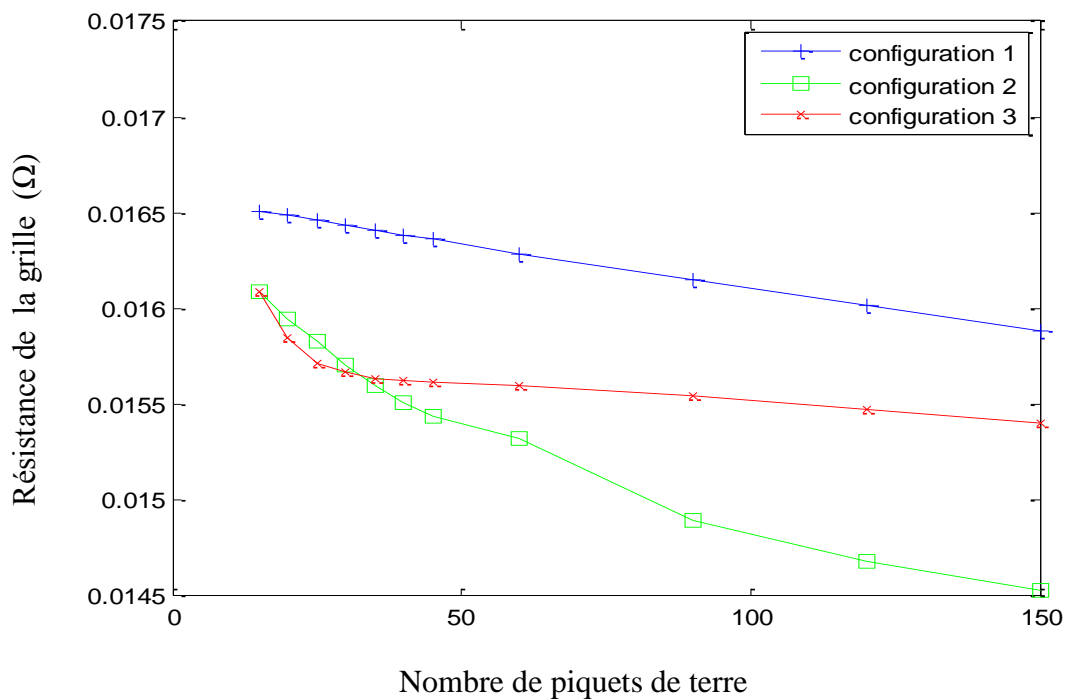


Figure II.12 : Variation de la résistance de la grille en fonction du nombre des piquets



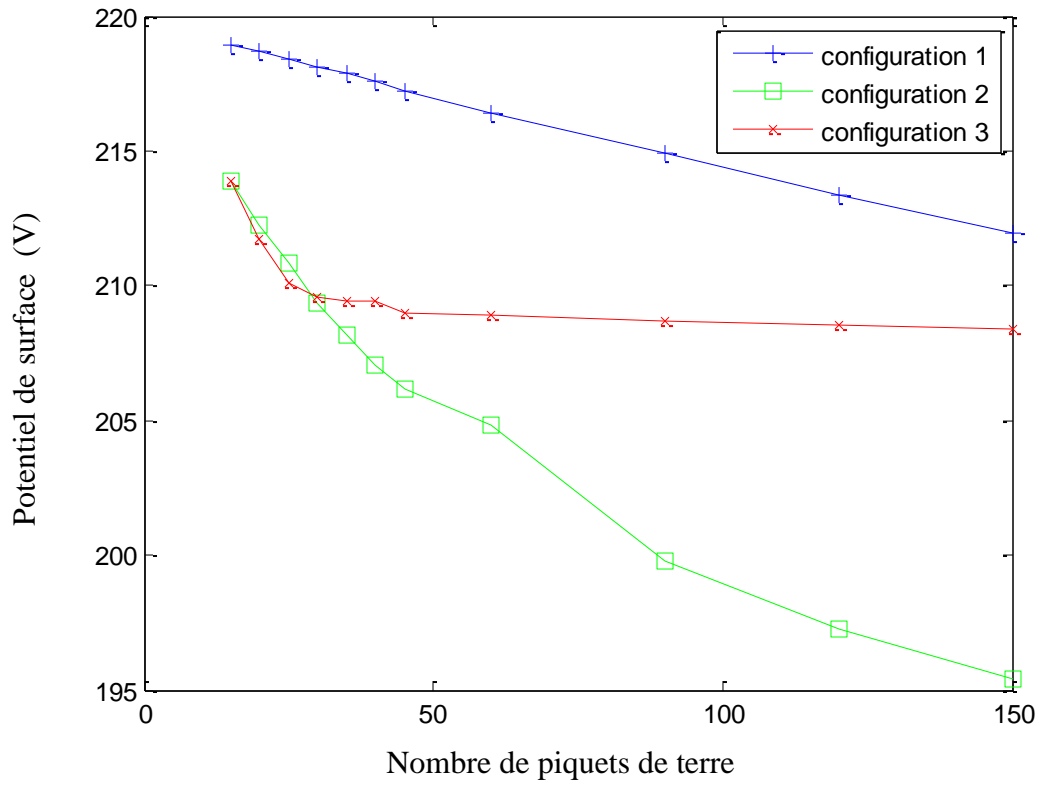


Figure II.13 : Variation du potentiel de surface en fonction du nombre des piquets

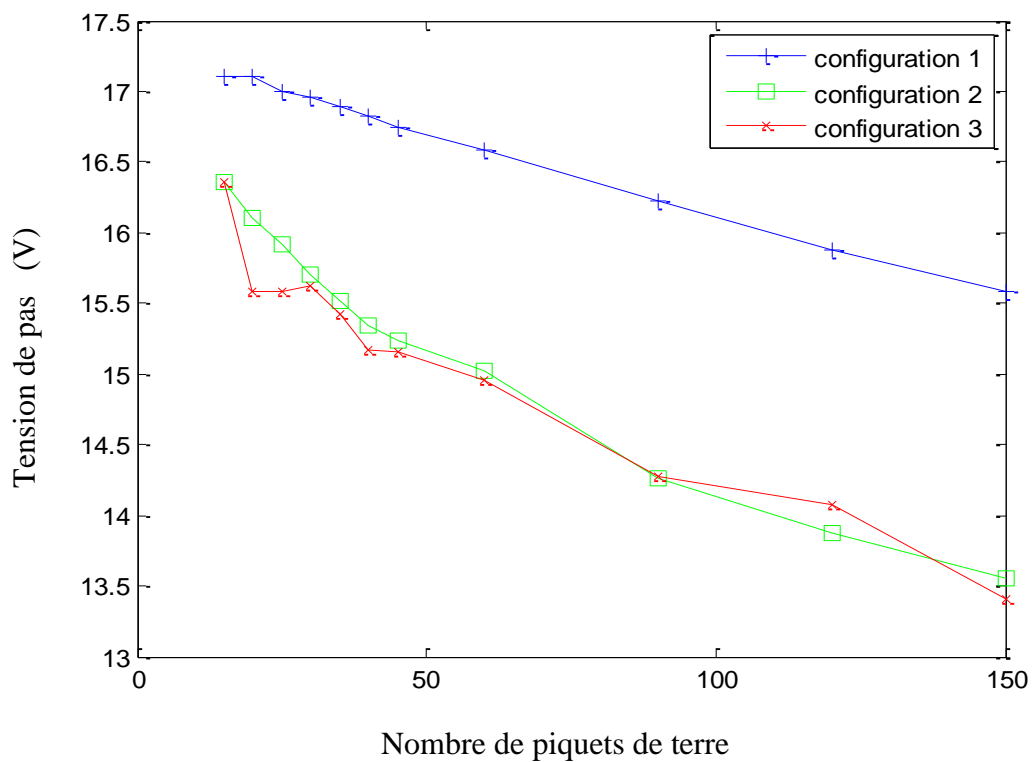


Figure II.14 : Variation de la tension de pas en fonction du nombre des piquets

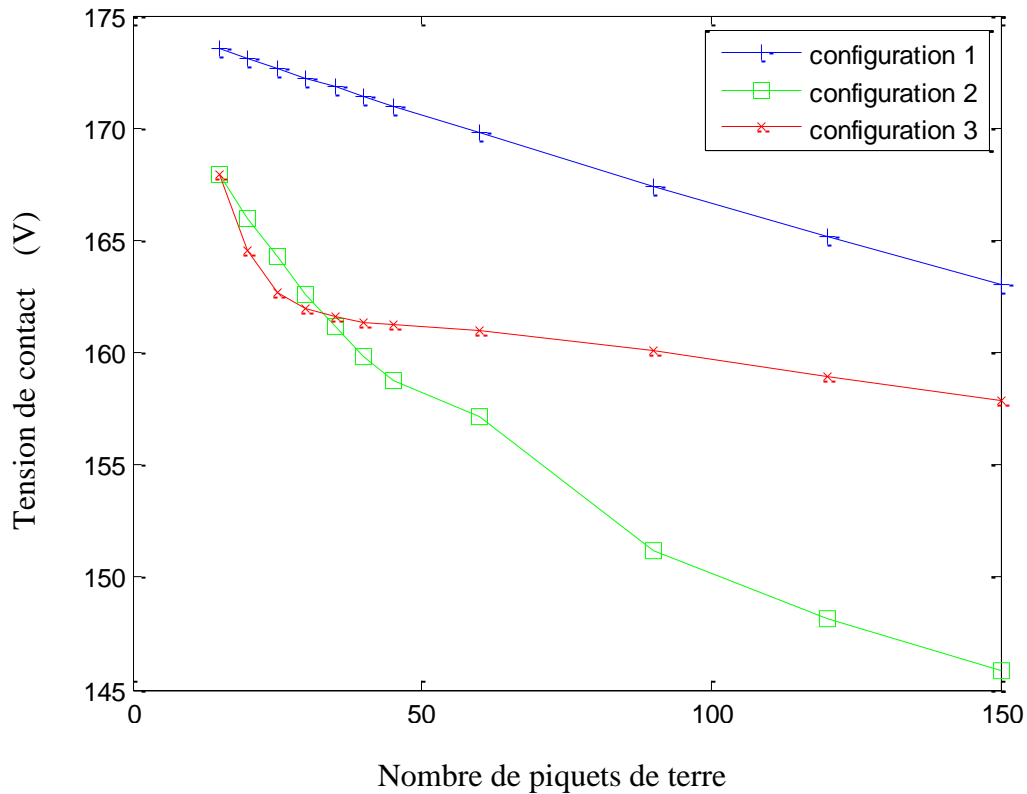


Figure II.15 : Variation de la tension de contact en fonction du nombre des piquets

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

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

#### IV.8.2. Influence de la longueur des piquets

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que l'introduction des piquets ayant une longueur constante, a considérablement amélioré nos résultats de simulation. Dans cette

partie, nous avons effectué une simulation pour différentes longueurs des piquets, dans le cas d'une grille en L ayant 15 piquets répartis sur le périmètre (Figure II.8). En effet, cette longueur a été variée de 3 à 30 m.

Après l'analyse des configurations choisies, nous illustrons les résultats relatifs aux différents paramètres électriques en fonction de la longueur des piques sur les figures (II.16) à (II.20).

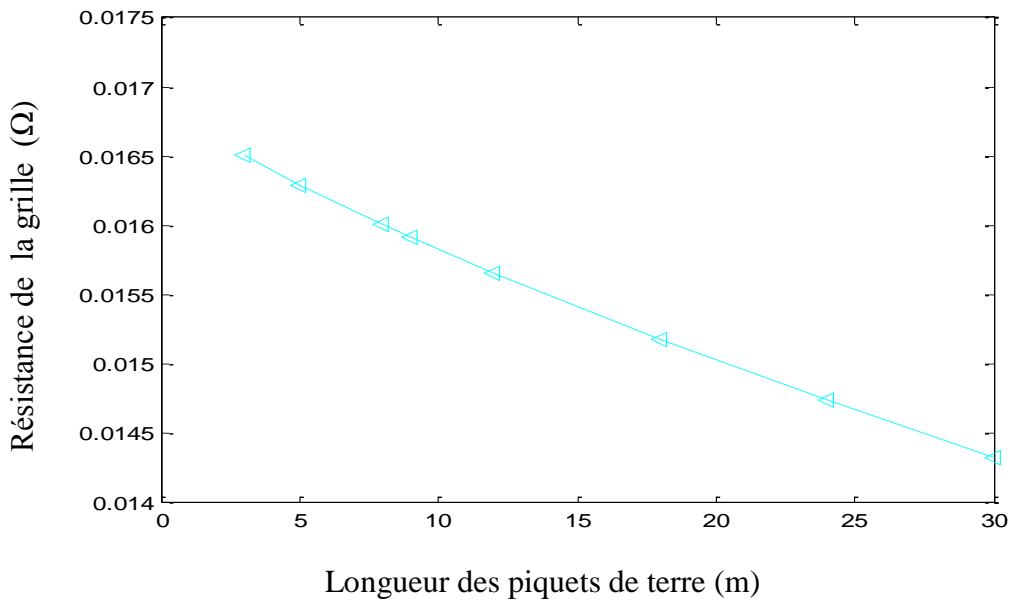


Figure II.16: Variation de la résistance en fonction de la longueur des piquets

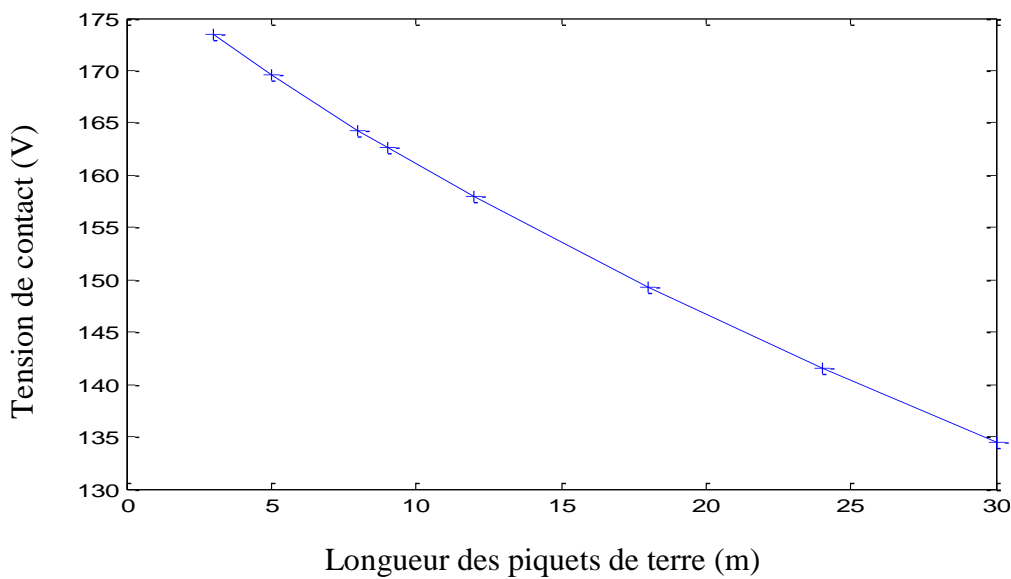


Figure II.17 : Variation de la tension de contact en fonction de la longueur des piquets

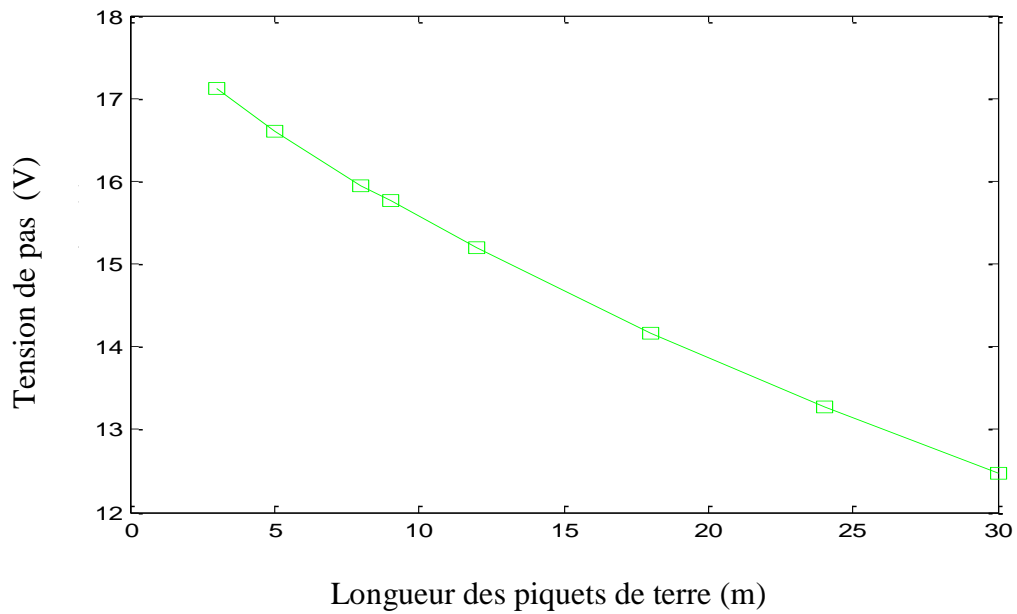


Figure II.18 : Variation de la tension de pas en fonction de la longueur des piquets

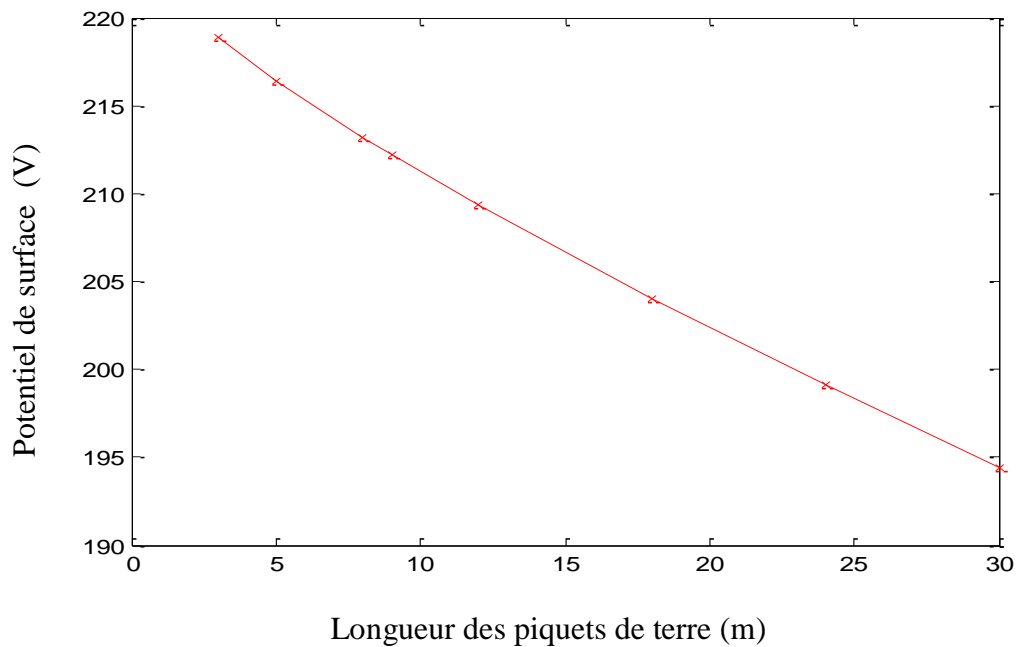


Figure II.19 : Variation du potentiel de surface en fonction de la longueur des piquets

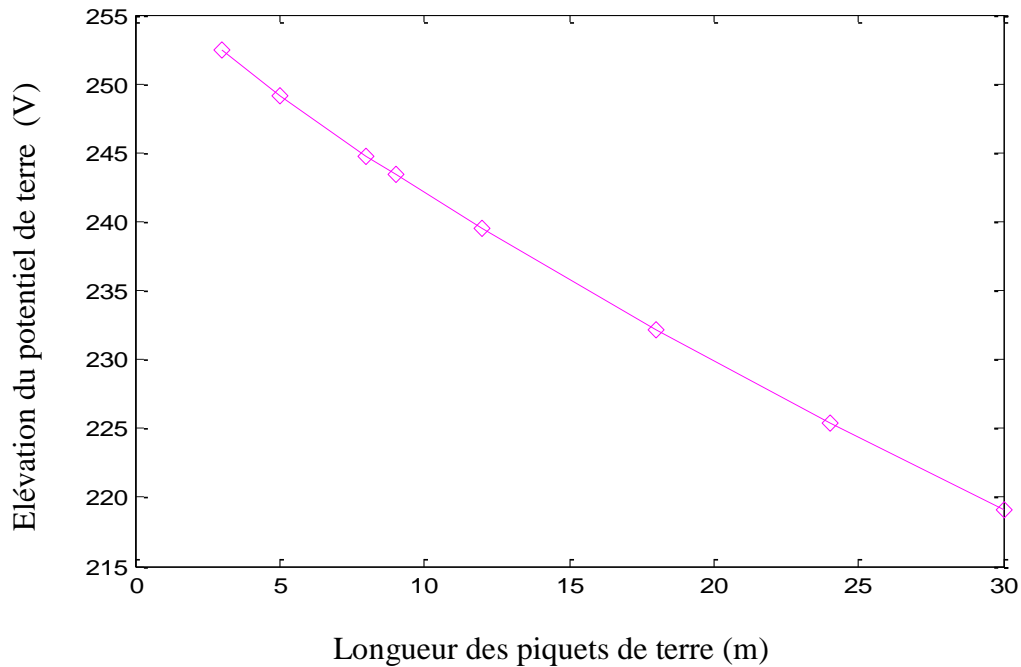


Figure II.20 : Variation de l'élévation du potentiel en fonction de la longueur des piquets

Selon les caractéristiques des figures (II.16) à (II.20), nous concluons que l'augmentation de la longueur des piquets engendre une diminution considérable de tous les paramètres électriques à savoir l'élévation du potentiel de terre, les tensions de contact et de pas ainsi que la résistance du système de mise à la terre.

### II.8.3. Détermination du paramètre prépondérant entre la longueur totale et le nombre des piquets

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

Nous avons considérés deux cas distincts ayant une même quantité de cuivre donc une même longueur totale des conducteurs. Dans le premier, seule la longueur des piquets qui varie (de 3 m à 30 m) ; le nombre de piquets étant égal à 15. Dans le deuxième cas, nous faisons varier uniquement le nombre de piquets (de 15 à 150 piquets) ; la longueur des piquets étant égale à 3 m. Pour cela, nous adoptons le cas où les piquets sont répartis suivant le périmètre (configuration 1). Les évolutions des différents paramètres électriques sont

suivies en fonction de la de longueur totale du cuivre et (donc la même quantité du cuivre).  
 Les résultats ainsi obtenus sont présentée sur les figures (II.21) à (II.25).

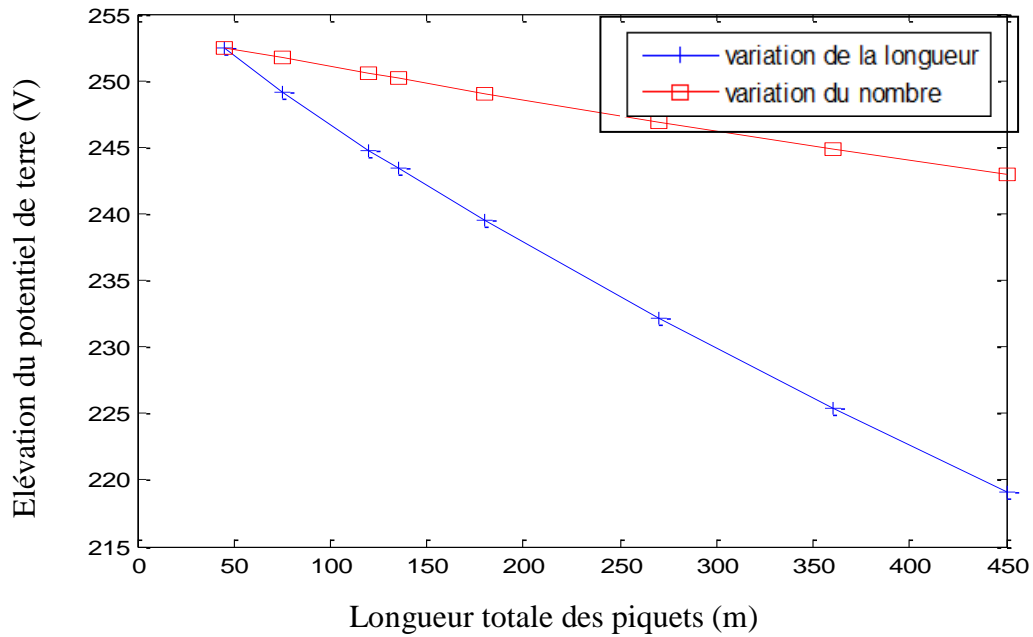


Figure II.21 : Variation de l'élévation du potentiel de terre en fonction de la longueur totale des piquets

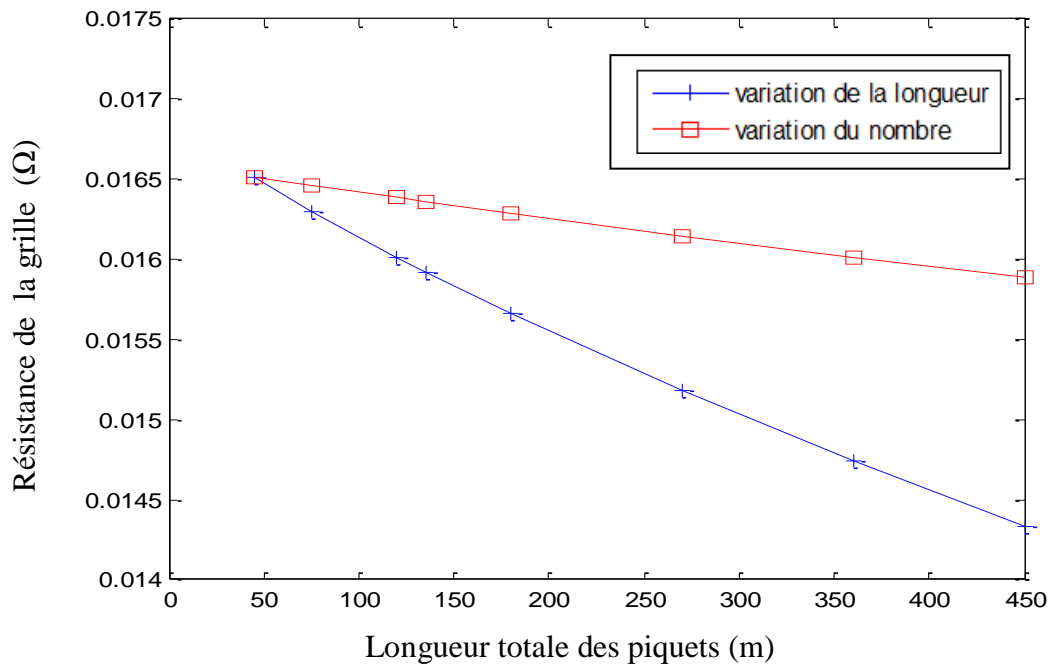


Figure II.22 : Variation de la résistance de la grille en fonction de la longueur totale des piquets

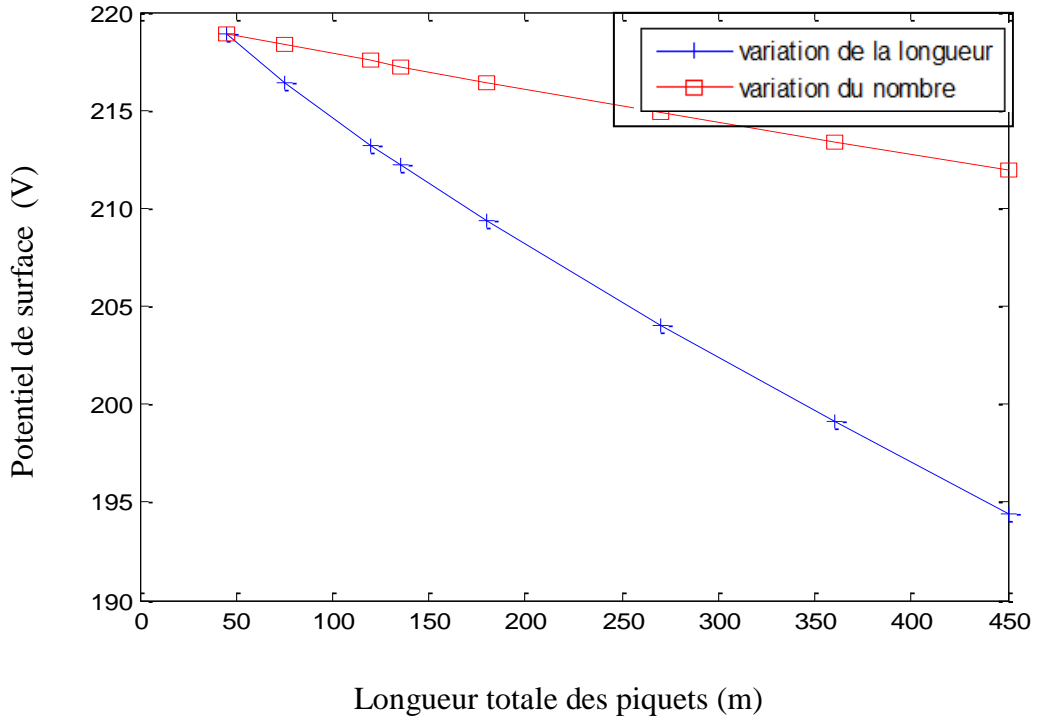


Figure II.23 : Variation du potentiel de surface en fonction de la longueur totale des piquets

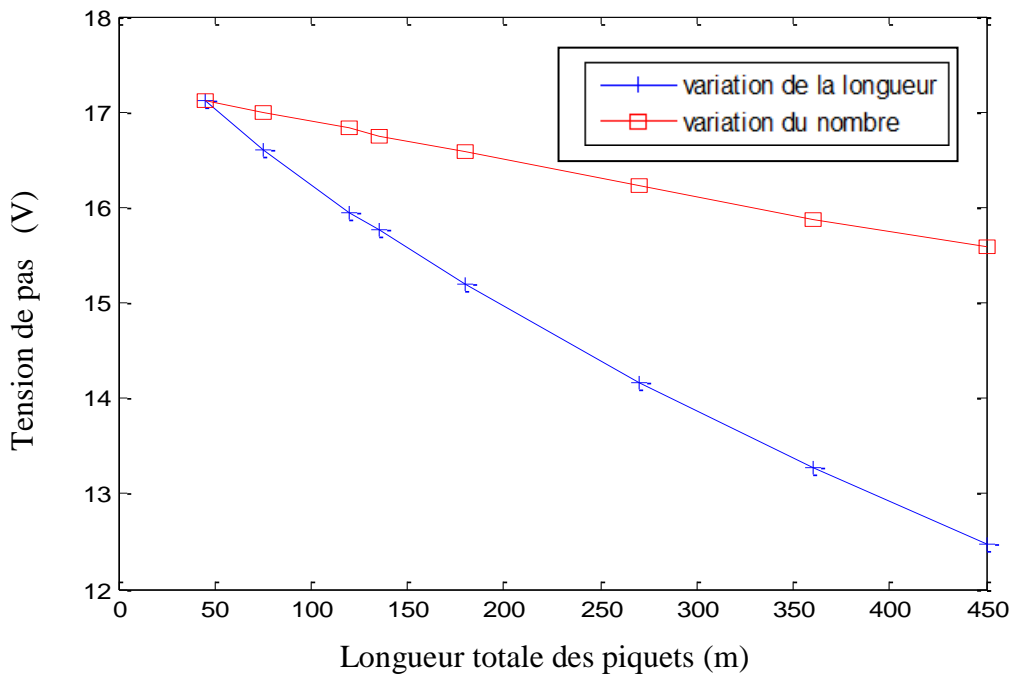


Figure II.24: Variation de la tension de pas en fonction de la longueur totale des piquets

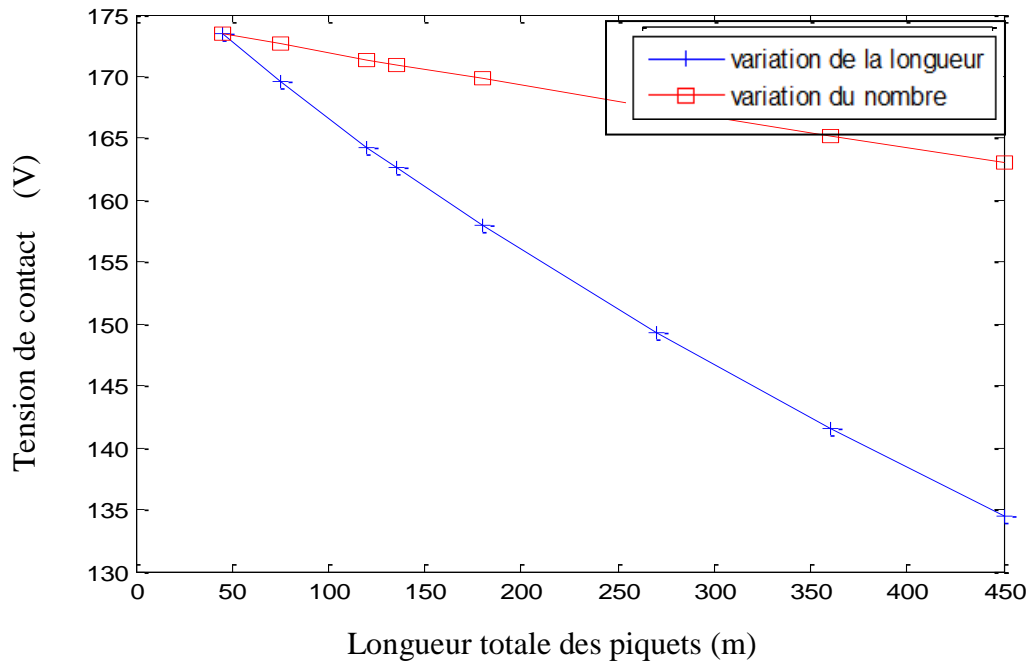


Figure II.25 : Variation de la résistance de la grille en fonction de la longueur totale des piquets

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

## II.9. Traitement de la couche superficielle du sol

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

### IV.9.1. Traitement par la modification de la résistivité

Afin d'étudier l'impact du traitement surfacique du terrain, nous faisons varier la résistivité de la couche superficielle du sol avoisinant le système de mise à la terre de  $0 \Omega.m$  à



4000  $\Omega.m$ . Nous supposons, pour ce faire, que l'épaisseur de la couche superficielle ( $e_s$ ) est de 0.1 m. Nous considérons, pour cette section une grille de terre en forme de L inversé, sans piquet de terre ayant un maillage carré (Figure II.1.1). Cette grille est implantée à une profondeur de 0.8 m. Nous nous intéressons plus particulièrement aux variations du facteur de réduction du courant de défaut ( $C_S$ ), de la tension de contact maximale et celle de pas maximale. Les résultats que nous avons obtenus sont présentés sur les figures (II.26) à (II.28).

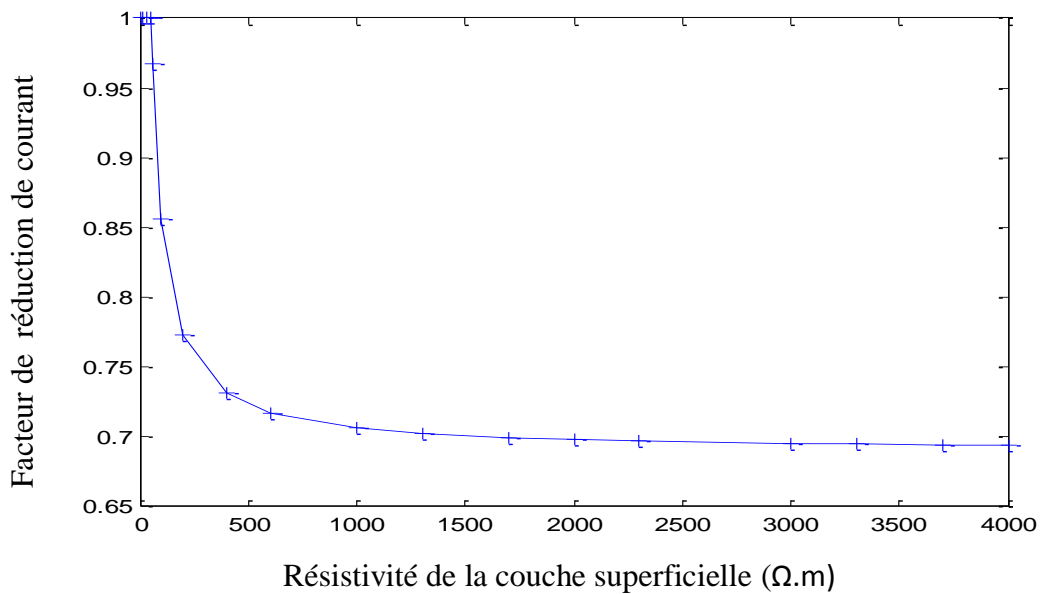


Figure II.26 : Impact de la résistivité de la couche superficielle sur le facteur de réduction de courant

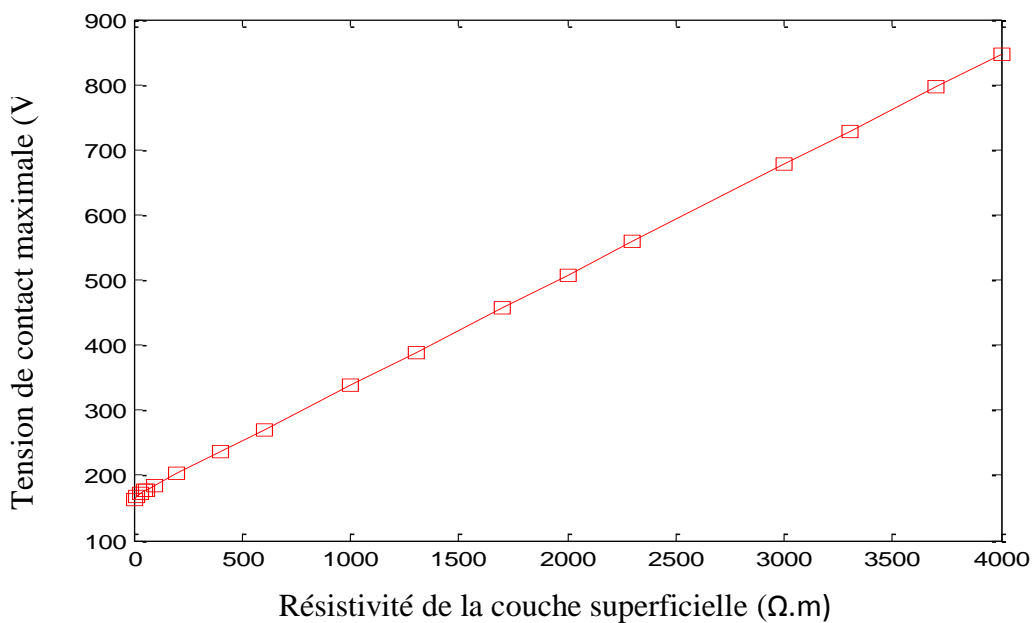


Figure II.27 : Impact de l'épaisseur de la couche superficielle sur la tension de contact maximale

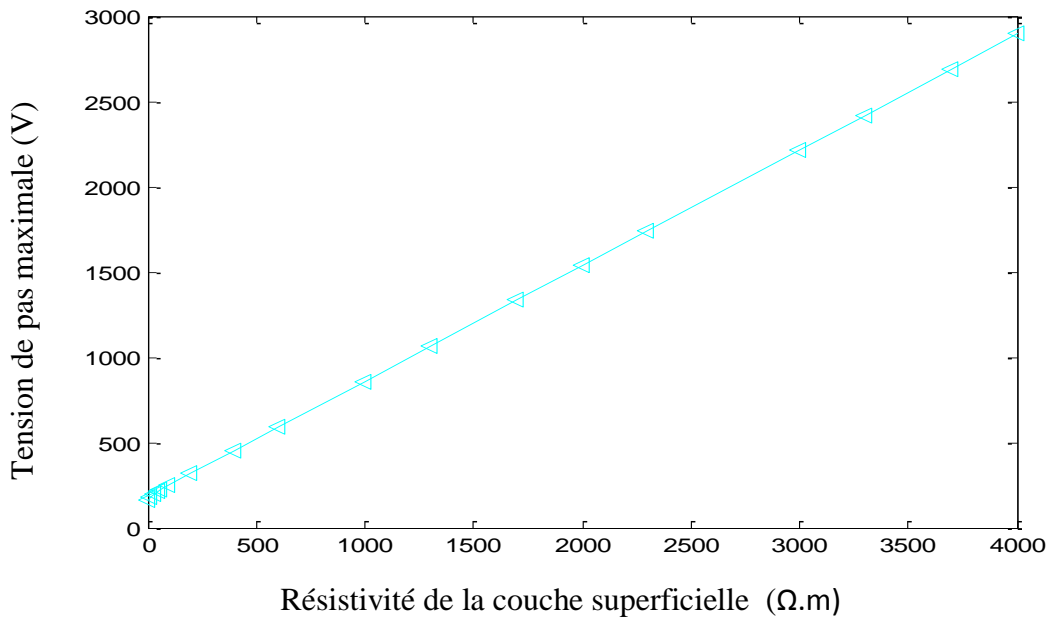


Figure II.28 : Impact de l'épaisseur de la couche superficielle sur la tension de pas maximale

D'après ces caractéristiques, nous constatons qu'avec l'augmentation de la résistivité de la couche superficielle, le facteur de réduction  $C_s$  diminue rapidement pour les résistivités inférieures à 600  $\Omega.m$  environ, et lentement ailleurs en tendant vers un palier constant. Ce palier avoisine 0.7.

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

#### IV.9.2. Traitement par variation de l'épaisseur

Dans cette section, nous nous sommes intéressés au traitement par variation de l'épaisseur de la couche superficielle. Cette épaisseur a été variée de 0 à 1 m. La résistivité de la couche en question a été fixée à 2000  $\Omega.m$ . Après l'analyse des différentes configurations, nous obtenons les résultats présentés sur les figures (II.29) à (II.31).

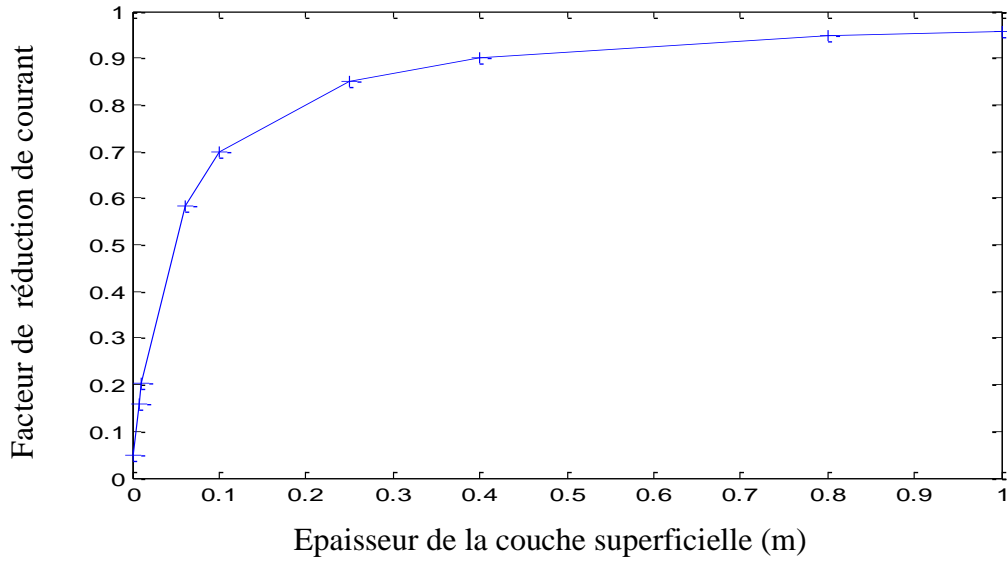


Figure II.29 : Impact de l'épaisseur de la couche superficielle sur le facteur de réduction de courant  $C_s$ .

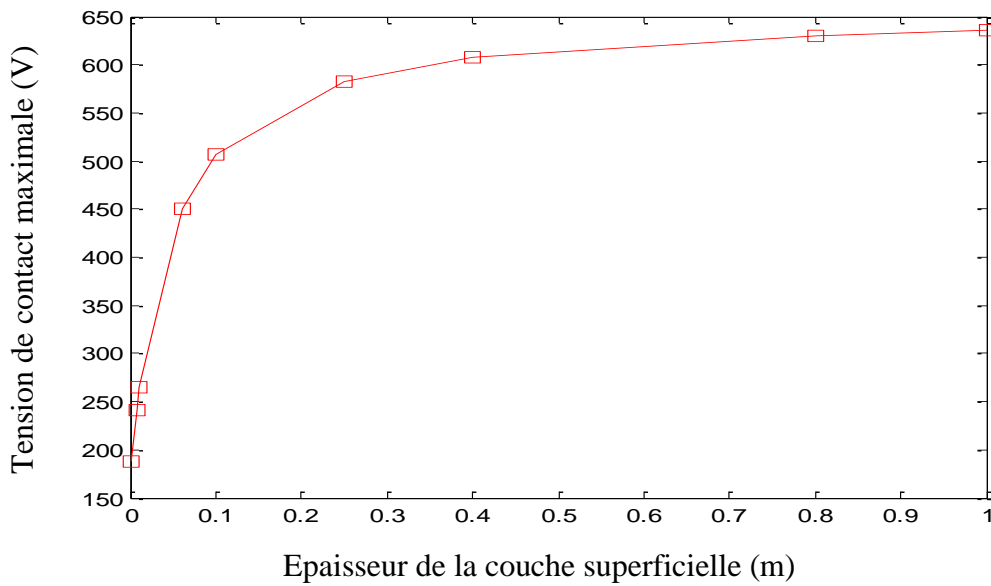


Figure II.30 : Impact de l'épaisseur de la couche superficielle sur la tension de contact maximale

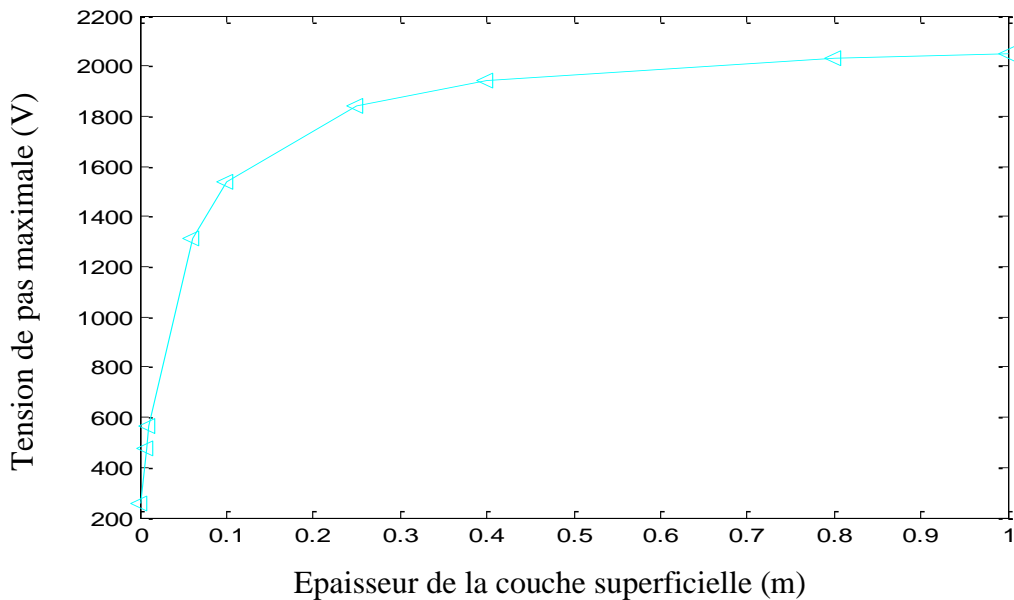


Figure II.31 : Impact de l'épaisseur de la couche superficielle sur la tension de pas maximale

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

#### IV.10. 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.1.1). 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.32) et (II.33) 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  $12495 \text{ m}$ . Par ailleurs, nous avons considérés 32 piquets, de longueur  $10 \text{ m}$  et diamètre  $12.7 \text{ mm}$ .

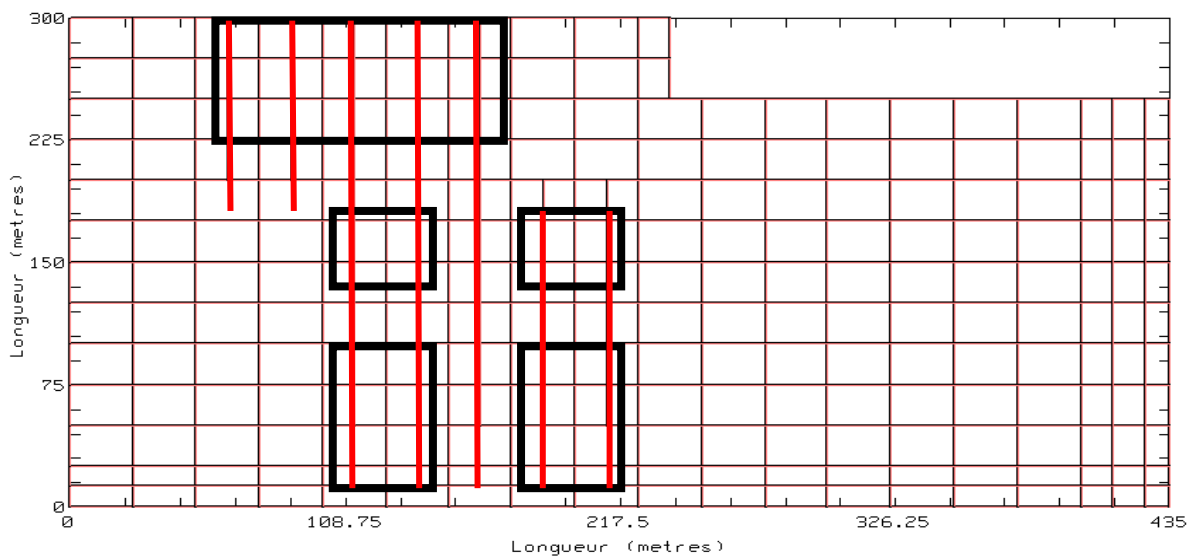


Figure II.32 : Renforcement de la grille par des conducteurs

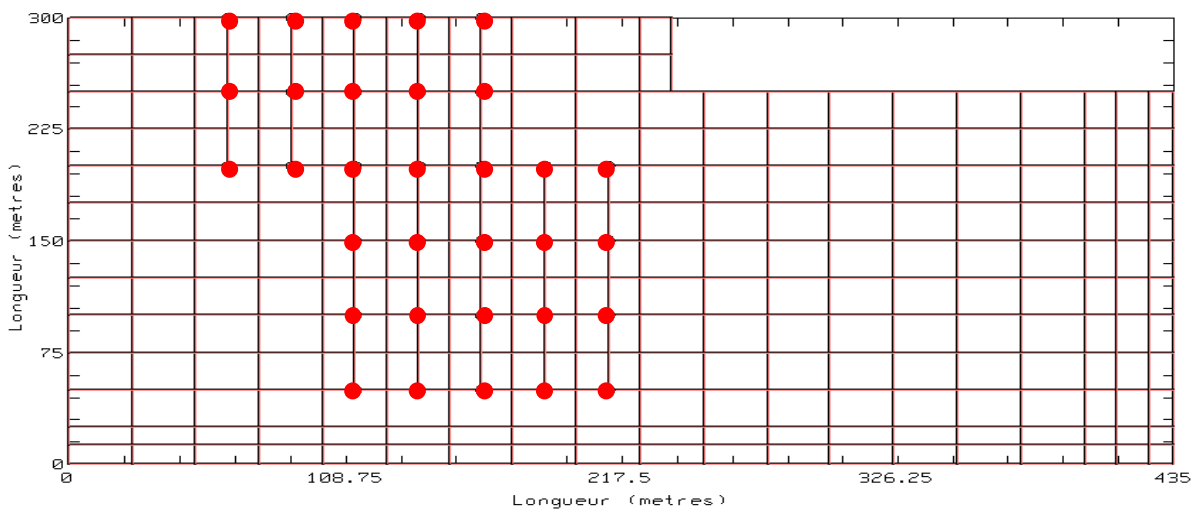


Figure II.33 : Renforcement de la grille par des piquets de terre

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

	ajout des conducteurs	ajout des conducteurs piquets	ajout des conducteurs piquets et couche superficielle ( $e_s$ de 0.1m, $\rho_s$ de 3000 $\Omega.m$ )
$R_G$ ( $\Omega$ )	0.016	0.015	0.015
$V_{Tmax}$ (V)	177.26	177.26	677.26
$V_T$	168.79	160.27	160.27
$V_{Smax}$	216.88	216.88	2216.91
$V_S$	16.54	15.49	15.49

Tableau 3 : Comparaison des résultats lors de l'utilisation des différents renforcements de grilles en utilisant le code CYMGrd

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

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

#### IV.11. Conclusion

Il ressort de cette étude les principales conclusions suivantes :

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

la terre. L'emplacement des piquets d'une manière horizontale est le plus recommandé.

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

## Conclusion générale

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

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

Nous avons retenu les conclusions suivantes :

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



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

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

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

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

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.

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

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.

# Sommaire

---

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

## Chapitre I : Présentation du code CYMGRD

II.1. Introduction .....	6
I.2. Présentation de CYMGRD .....	7
I.2.1. Modules d'analyse du logiciel .....	7
I.3. Influence de la géométrie de l'assiette de l'ouvrage a étudié .....	7
I.4. Conclusion .....	8

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

II.1. Introduction .....	9
II.2.Présentation succincte de l'ouvrage énergétique de LABREG ... ..	9
II.2.2. Equipements et Donnes de base .....	9
II.2.4. Données réelles du réseau de terre de l'ouvrage de LABRE.....	10
II.3. Configurations de mise à la terre proposée pour l'ouvrage énergétique de LABREG.....	11
II.4. Analyse du sol .....	12
II.5. Résultats de simulation.....	12
II.6. Effet de la longueur totale de la grille.....	14
II.7. Effet de la profondeur du réseau de terre .....	15
II.3.2.2. Influence de l'ajout des piquets de terre .....	18
II.3.2.2.1. Influence du nombre et de l'emplacement des piquets de terre.....	19
II. 3.2.2.2. Influence de la longueur des piquets.....	22
II.3.2.2.3. Détermination du paramètre prépondérant entre la longueur totale et le nombre des piquets .....	27
II.3.2.3. Traitement de la couche superficielle du sol.....	28
II.4.2.3.1. Traitement par la modification de la résistivité.....	30
II.4.2.3.2. Traitement par variation de l'épaisseur.....	31
II.4.3. Configuration optimale.....	33
II.5. Conclusion .....	35
Conclusion générale .....	36
Bibliographie .....	40