



# Choix de la configuration d'une prise de terre de type piquet pour une protection optimale

## *Choice of the configuration of an earth electrode of the stake type for an optimal protection*

Houndedako S.<sup>1</sup>, Aredjodoun J.<sup>1</sup>, Vianou A.<sup>1</sup>, Espanet Ch.<sup>2</sup>, Adedjouma S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Electrotechnique, de Télécommunication et d'Informatique Appliquée (LETIA)  
Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey-Calavi 01 BP 2009 Cotonou, Bénin.

<sup>2</sup>FEMTO-ST Département Energie, Université de Franche-Comté, France.

E-mail : [hounde2003@yahoo.fr](mailto:hounde2003@yahoo.fr)

Reçu juin 2013 – Accepté mars 2014

### Résumé

La présente étude s'inscrit dans le cadre de la conception et du dimensionnement d'une prise de terre de type piquet dans le but d'optimiser la protection des systèmes électriques contre les défauts de courant de tout genre, qu'il s'agisse par exemple, des courants de choc dus à des coups de foudre ou bien de courant de défaut à 50 Hz. Elle s'est intéressée à l'évaluation de la résistivité apparente d'un sol hétérogène en vue du choix de la configuration d'une prise de terre de type piquet pour une protection optimale. Une étude comparative nous a permis de mieux apprécier les résultats obtenus. De l'analyse des résultats des simulations faites avec le logiciel Matlab, nous avons élaboré une démarche en sept points permettant de faire le choix de la configuration optimale d'une prise de terre de type piquet.

**Mots clés** : Choix de la configuration, prise de terre, protection optimale, type de piquet.

### Abstract

The present study lies within the scope of the design and the dimensioning of an earth electrode of the stake type with an aim of optimizing the protection of the electric systems against the defects of current of any kind, which it acts for example, of the impulse currents due to or fault current thunderbolts to 50 Hz. It was interested in the evaluation of the apparent resistivity of a heterogeneous ground for the choice of the configuration of an earth electrode of the stake type for an optimal protection. A comparative study enabled us to better appreciate the results obtained. Analysis of the results of the simulations made with the Matlab software, we worked out a step in seven points allowing making the choice of the optimal configuration of an earth electrode of the stake type.

**Keywords**: Choice of the configuration, earth electrode, optimal protection, standard stake.

### 1. Introduction

La protection des installations électriques, des personnes et des biens demande une approche systématique et globale pour minimiser les risques liés aux surtensions transitoires et autres perturbations. Par exemple, aucun paratonnerre ne peut capter et écouler sans risque l'énergie de la foudre sans une mise à la terre fiable.

La mise à la terre dans les réseaux électriques paraît être relativement simple ; cependant elle n'a cessé de présenter des difficultés. Les progrès récents accomplis tant en électrotechnique qu'en électronique de puissance ont fait apparaître de nouveaux problèmes, encore non parfaitement

résolus, dus à la coexistence d'équipements électroniques sensibles avec des installations susceptibles de produire des courants de court-circuit de plusieurs dizaines de kiloampères.

Une prise de terre a pour but d'écouler au maximum les courants de défaut dans le sol. Pour jouer efficacement ce rôle, sa résistance doit être aussi faible que possible. Donc la caractéristique principale d'une prise de terre est sa résistance qui doit respecter une certaine norme.

La configuration d'une prise de terre nécessite l'analyse préalable de la répartition du potentiel dans le sol autour de la prise de terre. Cette répartition étant fonction des caractéristiques électriques du terrain c'est-à-dire de la résistivité du

sol, une question se pose : «comment évaluer la résistivité apparente d'un sol hétérogène lorsque ses paramètres sont connus afin de choisir une configuration de prise de terre de type piquet dont la résistance sera aussi faible que possible?».

Pour cela, notre étude se propose d'élaborer d'une part, une méthode permettant d'évaluer la résistivité apparente d'un sol hétérogène à deux couches lorsque ses paramètres sont connus et de trouver d'autre part, à l'aide d'une méthode numérique, la configuration d'une prise de terre de type piquet permettant d'obtenir une résistance de terre aussi faible que possible. Cette configuration prenant en compte la nature du sous-sol assurerait une protection optimale.

## 2. Matériel et Méthode

### 2.1. Evaluation de la résistivité apparente du sol de chaque site

#### 2.1.1. Paramètres des sols des sites expérimentaux ( $\rho_1, \rho_2, h_1$ )

Pour mener cette étude de minimisation de la résistance d'une prise de terre, nous choisissons trois sites expérimentaux de façon à avoir des sols de moyenne et grande résistivité. Les paramètres ( $\rho_1, \rho_2, h_1$ ) de ces trois localités : Porto-Novo ; Bembèrèkè et Abomey-calavi sont consignés dans le **tableau I** ( Degbo 2002, Houndedako 2000 ).

**Tableau I : Paramètres des sols des sites expérimentaux**

Paramètres Sites	Résistivité de la première couche $\rho_1$ ( $\Omega.m$ )	Résistivité de la deuxième couche $\rho_2$ ( $\Omega.m$ )	Hauteur de la première couche h (m)
Porto-Novo	170	85	1,5
Bembèrèkè	1160	196	2,5
Abomey-Calavi	122,6016	245,6314	2,66

Les sols des sites expérimentaux sont hétérogènes et présentent chacun un modèle de sol à deux couches.

#### 2.1.2. Programmation de l'expression analytique de la résistivité apparente

Pour concevoir économiquement des prises de terre, il est nécessaire d'obtenir la valeur précise de la résistivité du sol. Le but visé dans ce paragraphe est de développer une méthode numérique qui pourrait évaluer la résistivité apparente d'un modèle de sol à deux couches. Cette méthode basée sur l'équation

(1) (Houndedako 2000, Tagg 1964) se fait dans l'environnement MATLAB.

$$\rho_a = \rho_1 \left[ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{k^n}{\left\{ 1 + \left( \frac{2nh}{a} \right)^2 \right\}^{1/2}} - \frac{k^n}{\left\{ 4 + \left( \frac{2nh}{a} \right)^2 \right\}^{1/2}} \right) \right] \quad (1)$$

où  $\rho_a$ , la résistivité apparente du modèle de sol à deux couches ( $\Omega.m$ ),

$\rho_1$ , la résistivité de la couche supérieure ( $\Omega.m$ ),

$\rho_2$ , la résistivité de la couche inférieure ( $\Omega.m$ ),

$a$ , la distance entre deux électrodes adjacentes de mesure (m) et

$k$ , le coefficient de réflexion donné par la relation

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}.$$

Cette relation est très importante et est la base d'un certain nombre de méthodes de calcul de la résistivité apparente du sol.

Les trois paramètres qui caractérisent le modèle de sol à deux couches sont choisis comme variables d'entrée et la résistivité apparente est la variable de sortie comme le représente le **tableau II**.

**Tableau II : Variables d'entrée et de sortie**

Variables d'entée	Variable de sortie
Résistivité de la couche supérieure $\rho_1$	Résistivité apparente du sol $\rho_a$
Epaisseur de la couche supérieure h	
Résistivité de la couche inférieure $\rho_2$	

## 2.2. Etude de la minimisation de la résistance d'une prise de terre de type piquet

### 2.2.1. Cas d'une électrode cylindrique verticale (piquet)

#### 2.2.1.1 Fonction objectif

Plusieurs auteurs ont travaillé sur la modélisation de la résistance d'une prise de terre constituée d'un piquet. Ils ont trouvé des relations qui donnent pratiquement les mêmes valeurs.

Dans ce travail, nous prenons comme fonction objectif la relation de Dewight-Sunde (Nsekere 2009) :

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

Avec  $\rho_a$  : résistivité apparente du sol,  
d : diamètre de l'électrode,  
l : longueur en mètre de l'électrode.

### 2.2.1.2. Recherche des valeurs optimales par la méthode de Newton-Raphson

Le problème se résume à la détermination de la longueur optimale de l'électrode afin d'obtenir une résistance aussi faible que possible.

$$\frac{dR}{dl} = \frac{\rho_a}{2\pi l^2} \left( 2 - \ln \left( \frac{8l}{d} \right) \right) \quad (3)$$

$$\frac{dR}{dl} = 0, \text{ ce qui implique que } l_0 = \frac{d}{8} e^2$$

Le tableau de variation se présente comme suit :

L	0	$\frac{d e^2}{8}$	$+\infty$
$\frac{dR}{dl}$		+	-
R	0	$R(l_0)$	0

On remarque que la fonction objectif n'admet pas un minimum.

Pour que la résistance soit minimale, il faut que la longueur de l'électrode prenne des valeurs très grandes.

Pour la suite, prenons  $R = 5\Omega$  et cherchons la valeur de la longueur  $l^*$  qui annule la fonction :

$$h(l) = R(l) - 5.$$

La méthode de Newton-Raphson permet d'approcher par itérations la valeur  $l^*$  au moyen de la relation suivante :

$$l_{k+1} = l_k - \frac{h(l_k)}{h'(l_k)}, \quad (4)$$

avec  $l_k$  la valeur d'essai

### 2.2.2. Cas de plusieurs piquets verticaux

Pour calculer la résistance équivalente de n électrodes cylindriques (piquets) implantées verticalement dans un espace rectangulaire, l'expression suivante peut être utilisée (Nsekere 2009, Gouda 2006):

$$R(n, l) = \frac{\rho_a}{2\pi n l} \left[ \ln \left( \frac{8l}{d} \right) - 1 + \frac{2K_1 l}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right] \quad (5)$$

où

n : le nombre de piquets,

l : la longueur des piquets,

d : le diamètre des piquets,

A : l'aire de la surface rectangulaire,

$K_1$  : le coefficient relatif à la forme de la surface rectangulaire. Il peut être calculé par l'équation  $K_1 = -(0.04) X + 1.41$ , avec X le rapport de la longueur sur la largeur.

Le tracé de la surface représentative de la fonction  $R(n, l)$  montre qu'elle ne possède pas un minimum comme le montre la **figure 1**.

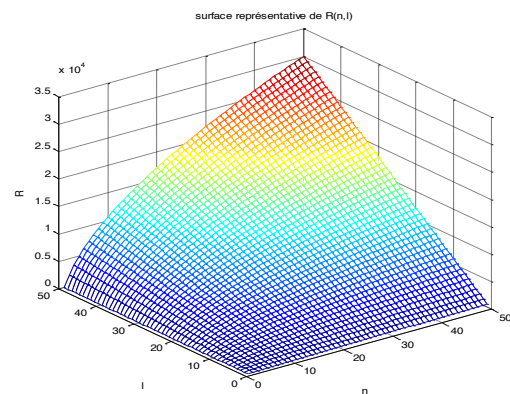


Figure 1. Surface représentative de  $R(n, l)$

On remarque que la surface représentative de la fonction 'objectif' ne possède pas un minimum.

Au vue de cela, pour conduire cette optimisation, on procèdera par la simulation de l'expression de la résistance équivalente  $R(n, l)$  d'une prise de terre à n piquets à l'aide du logiciel Matlab.

## 3. Résultats et interprétations

### 3.1. Evaluation de la résistivité apparente du sol de chaque site

Les résultats de simulation sont consignés dans le **tableau III**.

Tableau III. Résistivité apparente du sol de chaque site

Sites	Résistivité apparente du sol $\rho_a$ ( $\Omega.m$ )
Porto-Novo	104,8842
Abomey-Calavi	156,0795
Bembéréké	608,1536

Pour la suite, le sol de chaque site est supposé homogène avec sa résistivité apparente  $\rho_a$ .

### 3.2. Choix de la configuration de prise de terre de type piquet

#### 3.2.1. Usage d'un piquet

Les valeurs successives de la longueur du piquet obtenues par itération sont :

$l = 50.0000 ; 48.9841 ; 49.1293 ; 49.1112 ; 49.1135 ; 49.1132 ; 49.1133 ; 49.1133 ; 49.1133 ; 49.1133.$

On remarque qu'il y a convergence au bout de la 7<sup>ème</sup> itération. La valeur de la longueur de l'électrode est  $l=49.1133\text{m}$  pour le site d'Abomey-Calavi. En prenant d'autres valeurs pour la résistance R, on a le **tableau IV**.

**Tableau IV. Longueur du piquet selon la valeur de la résistance pour les trois sites**

Résistance en ( $\Omega$ )	Longueur en (m)		
	Porto-Novo	Bembèrèkè	Abomey-Calavi
5	31,5234	220,4321	49,1133
10	14,4609	102,8362	22,6321
20	6,5722	47,7004	10,3435
30	4,1219	30,3405	6,5126
40	2,9521	21,9748	4,6791
50	2,2747	17,0935	3,6151

Des résultats du tableau IV, nous constatons que, pour obtenir une résistance normalisée de  $5 \Omega$  par exemple, il faut un piquet de longueur très élevée. Non seulement l'implantation d'un tel piquet est coûteuse puisqu'elle nécessite un forage, mais aussi elle crée d'interférence avec les ondes électromagnétiques des pylônes électriques. Pour solutionner ce problème, il faut donc multiplier le nombre de piquets à implanter.

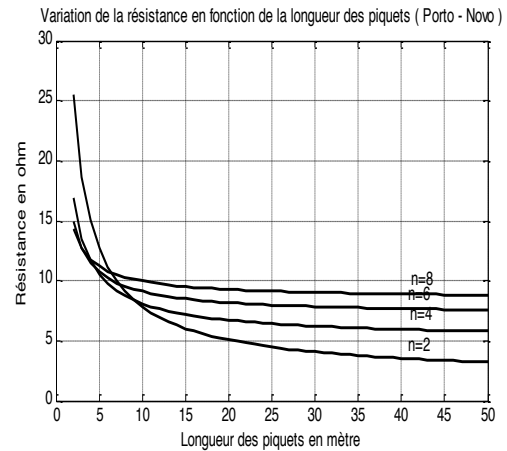
#### 3.2.2. Usage de plusieurs piquets

Dans cette partie, nous étudions la variation de la résistance équivalente d'une prise de terre constituée de n piquets. Pour cela on choisit une surface rectangulaire d'aire égale à  $4 \text{ m}^2$  et de coefficient  $K_1=1,21$ . Le diamètre des piquets est fixé à  $0,02 \text{ m}$ . Les résultats de ces simulations sont présentés en deux séries de courbes :

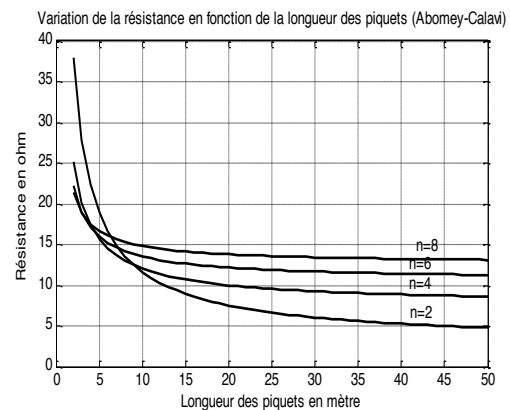
- la première série nous permet de constater l'évolution de la résistance lorsque la longueur des piquets varie.
- la deuxième série de courbes nous montre l'allure de la résistance en fonction du nombre de

piquets constituant la prise de terre ; la longueur des piquets étant fixée.

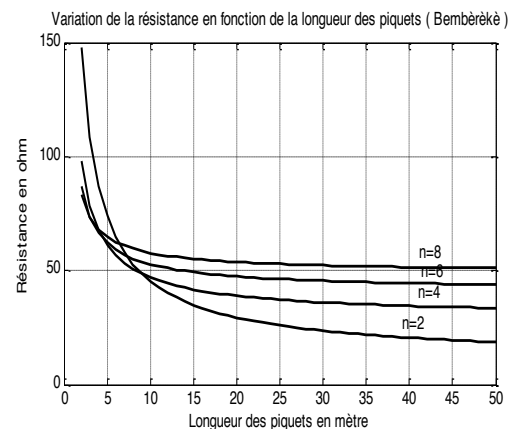
#### a. La première série de courbes



**Figure 2. Variation de la résistance équivalente en fonction de la longueur des piquets pour  $n=2, n=4, n=6$  et  $n=8$  (Porto-Novo)**



**Figure 3. Variation de la résistance équivalente en fonction de la longueur des piquets pour  $n=2, n=4, n=6$  et  $n=8$  (Abomey-Calavi)**



**Figure 4. Variation de la résistance équivalente en fonction de la longueur des piquets pour  $n=2, n=4, n=6$  et  $n=8$  (Bembèrèkè)**

#### b. La deuxième série de courbes

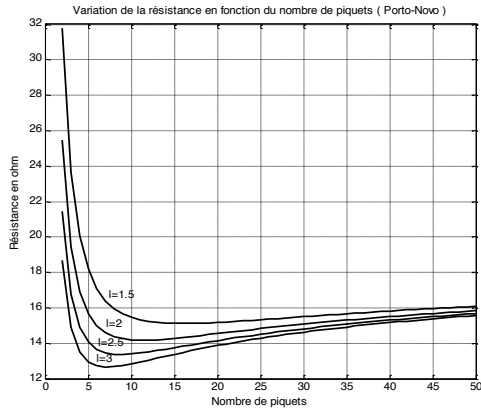


Figure 5. Variation de la résistance équivalente en fonction du nombre de piquets pour  $l=1,5$  ;  $l=2$  ;  $l=2,5$  et  $l=3$  (Porto- Novo)

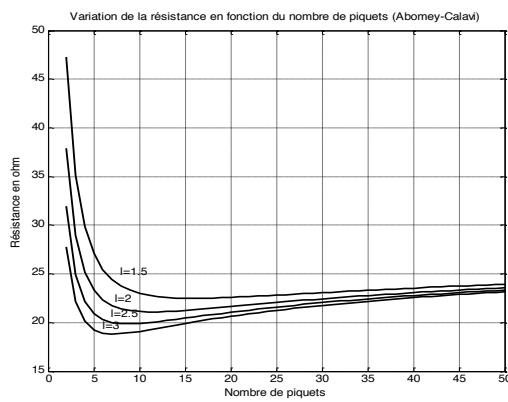


Figure 6. Variation de la résistance équivalente en fonction du nombre de piquets pour  $l=1,5$  ;  $l=2$  ;  $l=2,5$  et  $l=3$  ( Abomey-Calavi )

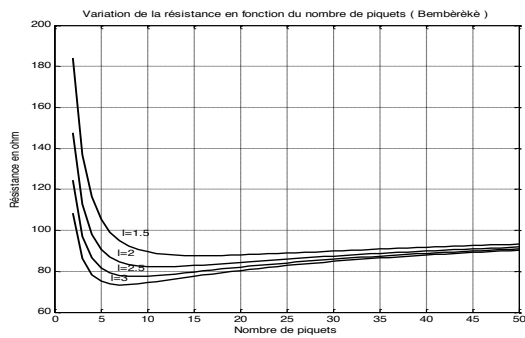


Figure 7. Variation de la résistance équivalente en fonction du nombre de piquets pour  $l=1,5$  ;  $l=2$  ;  $l=2,5$  et  $l=3$  (Bembérékè).

**Interprétations des résultats**

Au vue des courbes des figures 2 à 7, on peut retenir que :

- La résistance augmente autant que la résistivité du sol est élevée.
- Pour les trois localités, la valeur de la résistance diminue autant que la longueur des piquets augmente.

- Pour la localité où le sol présente une faible résistivité, la résistance prend des valeurs appréciables.
- Pour des piquets de courte longueur (2 à 3 mètres environ), l'augmentation jusqu'à un nombre donné de piquets permet d'obtenir une résistance plus faible.
- A partir d'une valeur donnée de la longueur des piquets, l'augmentation du nombre de piquets entraîne celle de la résistance équivalente.
- La longueur des piquets à partir de laquelle il n'est plus prudent d'augmenter le nombre de piquets diminue pour un nombre élevé de piquets.

**Influence du diamètre des piquets**

Pour l'étude de l'influence du diamètre des piquets, nous utilisons quatre types de piquet de diamètre 0,01 m, 0,02 m, 0,03 m, et 0,04 m. Les nombres de piquets utilisés pour les simulations sont successivement égaux à 2 et 6. L'illustration se fera uniquement pour les localités de Porto-Novo et de Bembérékè.

Les résultats des simulations sont portés dans les figures 8, 9, 10 et 11 qui suivent :

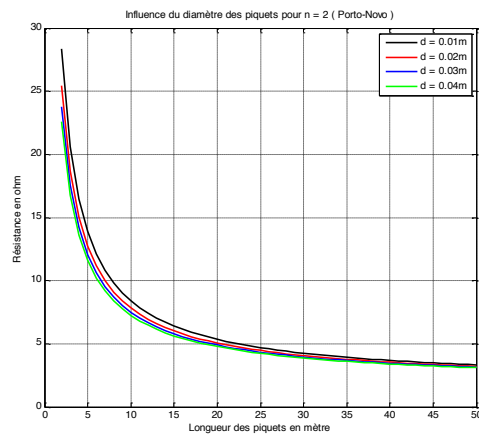


Figure 8. Influence du diamètre des piquets pour  $n = 2$  (Porto-Novo)

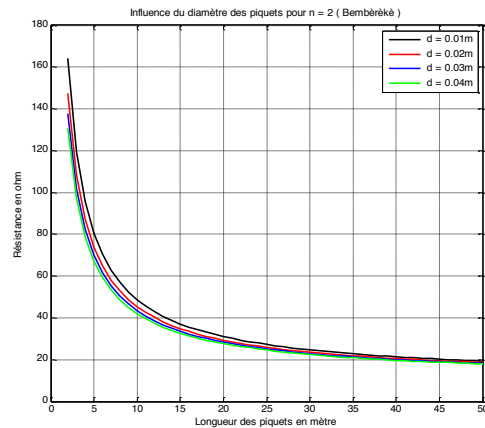


Figure 9. Influence du diamètre des piquets pour  $n = 2$  (Bembérékè)

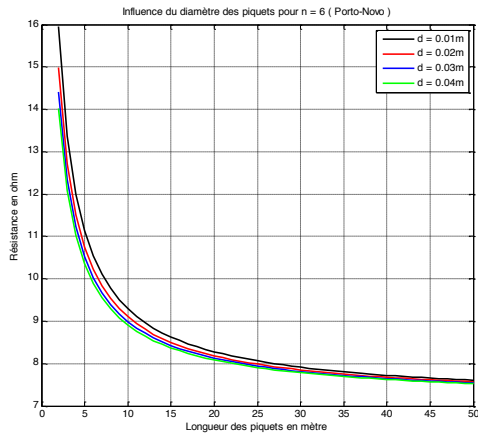


Figure 10. Influence du diamètre des piquets pour n = 6 (Porto-Novo)

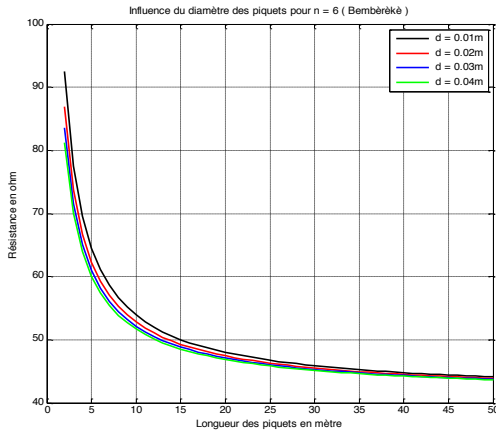


Figure 11. Influence du diamètre des piquets pour n = 6 (Bembéréké)

L'observation des figures 8, 9, 10, et 11 permet de dire que l'augmentation du diamètre des piquets permet de réduire légèrement la valeur de la résistance équivalente. On peut aussi remarquer que la variation du diamètre des piquets n'a pas d'influence lorsque la longueur de ces derniers prend des valeurs suffisamment élevées.

**Influence de la surface de réalisation de la prise de terre**

L'influence de la surface de réalisation d'une prise de terre est étudiée dans cette section. Des simulations sont faites avec différentes surfaces rectangulaires. Les nombres de piquets sont pris égaux successivement à 2 et 6.

Les résultats des simulations sont portés dans les figures 12, 13, 14 et 15.

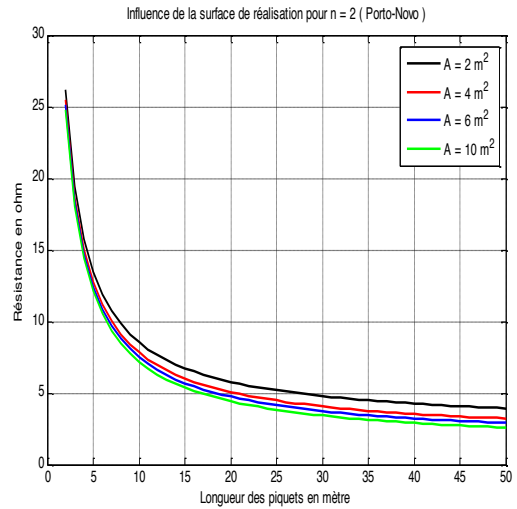


Figure 12. Influence de la surface de réalisation pour n = 2 (Porto-Novo)

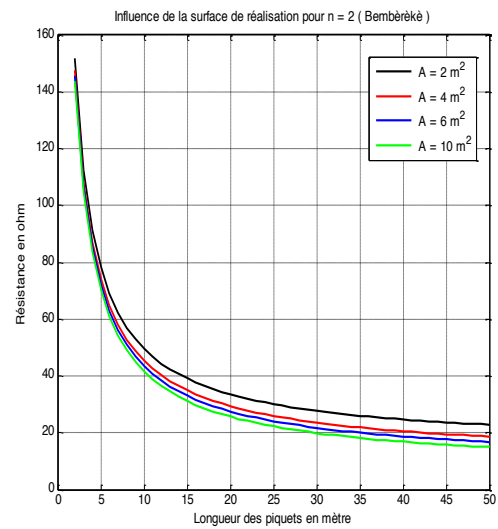


Figure 13. Influence de la surface de réalisation pour n = 2 (Bembéréké)

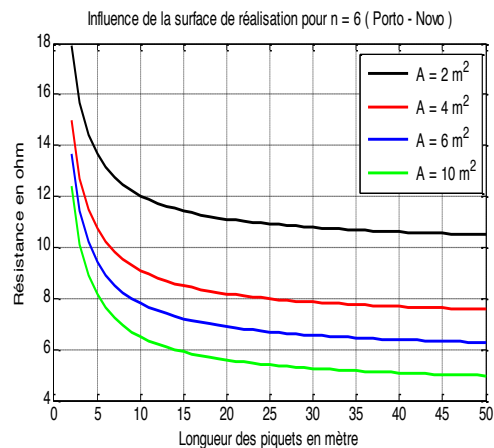
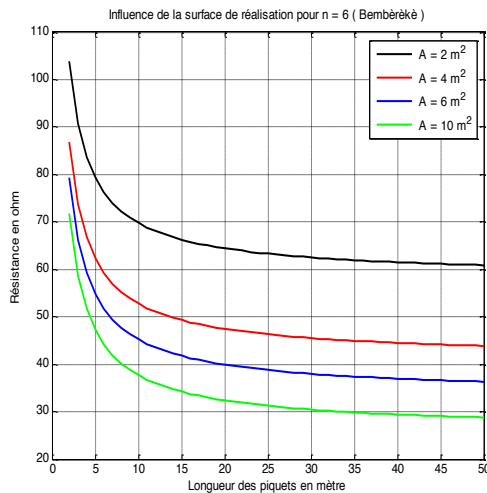


Figure 14. Influence de la surface de réalisation pour n = 6 (Porto - Novo)





**Figure 15. Influence de la surface de réalisation pour n = 6 (Bembéréké)**

De l'analyse des *figures 12 à 15*, on se rend compte que :

- Pour un nombre réduit de piquets (deux piquets par exemple) et pour une longueur faible des piquets (2 à 3 mètres environ), la variation de la surface de réalisation a très peu d'influence sur la valeur de la résistance.
- Pour une longueur élevée des piquets, l'augmentation de la surface de réalisation réduit la valeur de la résistance.
- Lorsque le nombre de piquets augmente, l'augmentation de la surface de réalisation entraîne une diminution considérable de la résistance équivalente de la prise de terre.

#### Démarche pour le choix d'une configuration de prise de terre de type piquet

Avant toute réalisation d'une prise de terre, nous devons avoir une idée sur la valeur maximale que doit prendre sa résistance pour qu'elle puisse assurer efficacement ses fonctions de protection des biens et des personnes.

Au vu de tout ce qui précède, nous pouvons définir la démarche pour le choix de la configuration d'une prise de terre de type piquet de la façon suivante :

- 1- Mesurer les résistivités apparentes pour différentes valeurs de la distance  $a$  entre les électrodes de mesure.
- 2- Exploiter les résultats de mesure pour déterminer les paramètres du sol sur lequel sera réalisée la prise de terre. Ces paramètres sont par exemple  $(\rho_1, \rho_2, h_1, \rho_a)$  pour un modèle de sol à deux couches.

#### ➤ Cas d'un piquet de terre

- 3- Fixer le diamètre du piquet à 2 cm, puis tracer à l'aide de la simulation la courbe de la résistance en fonction de la longueur du piquet.
- 4- Si la longueur du piquet donnant la résistance souhaitée est élevée alors augmenter la valeur du

diamètre de piquet tout en tenant compte du marché.

#### ➤ Cas de n piquets verticaux

5- Fixer le diamètre du piquet à 2 cm et la surface de réalisation à 4 m<sup>2</sup>. La constante de la surface rectangulaire est prise égale à 1.21. Tracer par simulation les courbes donnant les variations de la résistance équivalente en fonction de la longueur et du nombre des piquets.

6- Augmenter le diamètre et/ou la surface de réalisation lorsqu'il est nécessaire jusqu'à obtenir la valeur de la résistance souhaitée avec une longueur normale des piquets.

7- Prendre des mesures complémentaires (recouvrir par exemple l'électrode d'une couche de terre fine et grasse ou de charbon) pour améliorer la résistivité du sol lorsqu'il est difficile de trouver la valeur de la résistance escomptée.

Il est à noter que, les contraintes lorsqu'elles existent doivent être prises en compte dans le choix de la configuration. Elles peuvent limiter la surface de réalisation, la longueur et/ou le diamètre des piquets, etc.

## 4. Discussion

Les résultats de nos recherches confirment les normes de réalisation d'une prise de terre par les spécifications techniques OPT pour les mises à la terre (MALT) et les protections contre les surtensions transitoires.

En général dans la sous-région et au Bénin en particulier, les disperseurs verticaux sont les plus utilisés dans la conception des réseaux de terre. Non seulement, ils sont faciles à implanter sur un espace restreint, mais aussi ils ont l'avantage de traverser plusieurs couches du sol lorsque leurs résistivités diminuent suivant la profondeur.

Quant aux simulations, nous sommes parvenus à de très bons résultats qui vérifient les normes : les piquets destinés à être enfouis dans le sol par percussion doivent être en acier cuivré, en cuivre ou en acier galvanisé. La longueur totale d'un piquet doit être comprise entre 1,5 et 3 mètres. Dans tous les cas, les diamètres des piquets doivent être supérieurs ou égal à 19 millimètres.

Ce travail contribuera efficacement au choix de la configuration de prise de terre de type piquet pour bien assurer la protection des personnes et des biens sans faire recours à d'autres types de prises de terre.

## 5. Conclusion

Dans ce travail, nous nous sommes proposés d'évaluer la résistivité apparente d'un sol hétérogène afin de pouvoir choisir la configuration de prise de terre de type piquet pour une protection optimale.

Par rapport à la résistivité apparente, nous avons évalué par la programmation dans l'environnement Matlab, celle du modèle de sol à deux couches. Ces résultats ont été validés par rapport à ceux trouvés

analytiquement et par la méthode des éléments finis (Houndedako, 2000).

S'agissant du choix de la configuration de prise de terre de type piquet, nous avons optimisé et plus précisément minimisé la résistance d'une prise de terre constituée d'un seul piquet par la méthode de Newton-Raphson. Nous avons aussi simulé l'expression donnant la résistance équivalente de la prise de terre constituée de  $n$  piquets verticaux à l'aide du logiciel Matlab.

Les résultats obtenus sont satisfaisants :

- Le choix de la configuration de prise de terre constituée d'un seul piquet n'est pas du mode lorsque la résistivité du sol est élevée car la longueur optimale du piquet est généralement très grande.

- Les courbes obtenues des simulations de l'expression de la résistance équivalente de prise de terre constituée de  $n$  piquets, permettent de faire le choix judicieux de configurations selon la valeur de terre fixée. Elles apportent également des informations sur l'importance de réalisation d'une prise de terre sur une grande surface.

- Une démarche en sept points est proposée pour le choix de la configuration de prise de terre de type piquet pouvant assurer une protection optimale.

Cette démarche d'identification de la configuration d'une prise de terre faciliterait, nous le pensons, la conception des prises de terre de qualité à la Société Béninoise d'Energie Electrique (SBEE) qui, jusque-là étaient réalisées sans étude approfondie préalable de la structure du sol et du choix de la configuration.

## REFERENCES

[1] J. AREDJODOUN, "Détermination de la résistivité apparente d'un sol hétérogène en vue du choix d'une configuration de prise de terre de type piquet pour une protection optimale," Mémoire de DEA, Université d'Abomey-Calavi, 2013.

[2] B. DEGBO, "Influence mutuelle des prises de terre : Détermination du circuit électrique équivalent d'un réseau de prise de terre," Mémoire de DEA, Université Nationale du Bénin, 2002.

[3] O. GOUDA, G. AMER, T. MEL-SAIED, "Optimum design of grounding system in uniform and non-uniform soils Using ANN," Faculty of Engineering, Cairo University, Egypt, IPEC 2006.

[4] S. HOUNDEDAKO, "Identification de la résistivité du sol et de la résistance de prise de terre en milieu hétérogène par la méthode des éléments finis," Thèse de doctorat, Université Nationale du Bénin, 2000.

[5] IEEE, "IEEE guide for safety in AC substation grounding," 2000, Standard 80-2000.

[6] N. NSEKERE, "Contribution à l'analyse et à la réalisation des mises à la terre des installations

électriques dans les régions tropicales," Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique, 168p, 2009.

[7] L. PIERRAT, "Maîtrise de la sécurité électrique dans les grandes installations: Optimisation de la conception, du dimensionnement et du coût des circuits de terre," communication France, 2009.

[8] Spécification d'Entreprise "Principes de conception et de réalisation des mises à la terre," Centre de normalisation (France), 1984.

[9] G.F. Tagg, "Earth resistances first published," George Newnes limited, London, 1964.