

## Contribution à la modélisation des résistivités électriques des sols à plusieurs couches.

Nzuru Nsekere J.P.<sup>1\*</sup>

### Abstract

#### Contribution to the multilayers soils electrical resistivities modeling

Published online:  
27 July, 2014

**Keywords:**  
*Soil electrical resistivity, grounding, finite elements, multilayers soils*

The design of earthing electrical installations requires a good knowledge of soil resistivity, which is a very variable parameter, and the only way to know about resistivity is to measure it. Soils are modeled either as a single layer (homogeneous soil) or in two layers of different resistivities. This paper proposes soils electrical resistivities modeling algorithm. Important steps in the process are: preliminary modeling of the soil (number of layers and depth of each), resistance measurement of a simple grounding cylindrical electrode buried in the soil, and calculation by finite elements method of the grounding cylindrical electrode resistance with data from measured resistivities of the different layers of the soil. Comparison between measured value of electrode resistance (considered as the reference) and calculated resistance allows validating the preliminary soil model. The measurements were performed in the city of Kinshasa, D. R. Congo. It is clear that this approach can be applied to any soil in any location. The results obtained demonstrate the approach validity.

<sup>1</sup>Departement de Génie électrique et Informatique, Université de Kinshasa, République Démocratique du Congo

\* To whom correspondence should be address. Prof Dr Nzuru Nsekere JP, e-mail: [jp.nzuru@unikin.ac.cd](mailto:jp.nzuru@unikin.ac.cd), [nsekere@yahoo.fr](mailto:nsekere@yahoo.fr)

### INTRODUCTION

La conception des mises à la terre des installations électriques requiert une bonne connaissance de la résistivité des sols, laquelle est une grandeur très variable, et la seule manière de la connaître est de la mesurer. La résistivité des sols varie souvent avec la profondeur. Dans ce cas, on parle d'un sol en plusieurs couches de résistivités différentes. Dans la littérature existante, les sols sont représentés, soit en une seule couche (sol homogène), soit en deux couches (sol stratifié en deux couches de résistivités différentes) [Tagg, 1964], [IEEE, 2000], [Nzuru, 2009]. Pourtant, en réalité, certains sols présentent des résistivités qui peuvent être modélisées en plusieurs couches.

Il est important que la modélisation des sols à plusieurs couches reflète la réalité physique pour que la

conception des mises à la terre soit bien réalisée. Les mesures des résistivités des sols s'effectuant à des profondeurs bien précises, il est important de connaître comment ces résistivités varient par rapport à la profondeur. Les résistivités des différentes couches ainsi mesurées sont utilisées comme données pour le calcul, par éléments finis, de la résistance d'une électrode de terre de forme cylindrique simple installée et dont la résistance a été mesurée. Les valeurs mesurée et calculée de la résistance de l'électrode de terre sont comparées pour la validation du modèle de résistivité du sol en plusieurs couches. Les mesures ont été effectuées en cinq différents sites, dans la ville de Kinshasa, en République Démocratique du Congo. Il est clair que cette modélisation peut être appliquée, par le même algorithme, à n'importe quel sol en un quelconque lieu.

## MODELISATION DES RESISTIVITES DES SOLS

En général, les modèles du sol uniforme et à deux couches de résistivités différentes, sont les plus utilisés [Tagg, 1964], [IEEE, 2000], [Nzuru, 2009], mais pour plus de précision dans les calculs des mises à la terre, il est judicieux d'adopter le modèle de sol à plusieurs couches de résistivités différentes.

### Sol homogène

Cette modélisation fait l'hypothèse du sol homogène en une seule couche de résistivité  $\rho$ . 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.

### Sol à deux couches de résistivités différentes

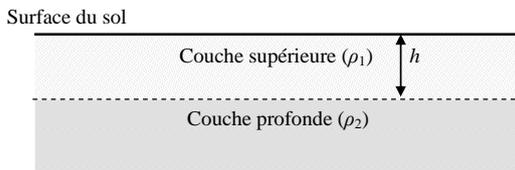


Figure I | Sol à deux couches de résistivités différentes

La modélisation du sol à deux couches de résistivités différentes est la plus utilisée dans les calculs de mise à la terre (Figure I). 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 est alors donnée par la relation (1), établie par Tagg [1964].

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

avec  $a$ , la distance entre les électrodes de terre lors de la mesure,  $h$ , la profondeur de la couche supérieure de résistivité  $\rho_1$ ,  $K$ , coefficient de réflexion, donné par la relation  $K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ ,  $\rho_2$ , la résistivité de la couche profonde du sol et  $n$  un entier naturel, paramètre de la somme infinie.

### Sol à plusieurs couches de résistivités différentes

Cette modélisation de sol à différentes couches (elles peuvent être verticales ou horizontales) requiert des

méthodes numériques ou graphiques car les méthodes analytiques sont limitées. La modélisation des mises à la terre par éléments finis développée précédemment n'est astreinte à aucune limitation à ce niveau.

Dans la littérature, le modèle de sol à plusieurs couches de résistivités différentes est ramené au modèle d'un sol homogène [IEEE, 2000]. Dans ce cas, la résistivité apparente  $\rho_a$  du sol supposée homogène est trouvée par les relations (2) et (3).

$$\rho_a = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} \quad (2)$$

$\rho_{a(1)}, \rho_{a(2)}, \rho_{a(3)}, \dots, \rho_{a(n)}$  sont respectivement les résistivités de  $n$  différentes couches du sol mesurées avec la méthode de 4 électrodes.

$$\rho_a = \frac{\rho_{a(\max)} + \rho_{a(\min)}}{2} \quad (3)$$

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

## MESURE DES RESISTIVITES DES SOLS : METHODE A QUATRE ELECTRODES

La résistivité du sol est un élément important pour la résistance d'une prise de terre. Il faut la connaître pour calculer la résistance lors de l'étude des installations de mise à la terre. On peut mesurer la résistivité du sol  $\rho$  avec l'appareil de mesure de résistance de terre par la méthode de Wenner. Quatre perches aussi longues que possible sont plantées dans le sol, espacées d'une distance  $a$ , et reliées à l'appareil de mesure par les bornes E, ES, S et H (Figure II). La longueur habituelle des perches est de 30 à 50 cm. Si le terrain est mauvais conducteur (sable, etc.), on peut utiliser des perches plus longues.

La profondeur à laquelle elles sont enfoncées ne doit pas dépasser  $1/20$  de la distance  $a$ .

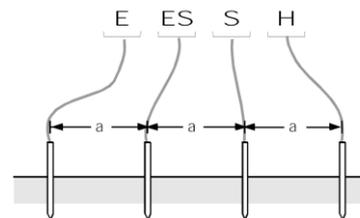


Figure II | Mesure de la résistivité du sol par la méthode à quatre électrodes

La variation de la distance entre les électrodes de mesure,  $a$ , permet de mesurer la résistivité moyenne à une profondeur égale à  $0.75 \times a$ . Il est donc possible, en faisant

varier la distance  $a$ , d'obtenir des informations sur la stratigraphie du sous-sol.

La résistivité du sol se calcule avec la formule suivante :

$$\rho = 2\pi a R \quad (4)$$

Avec :  $\pi = 22/7$ ,  $a$  la distance en mètres entre les perches.  $R$ , la valeur de la résistance déterminée en  $\Omega$  (cette valeur correspond à  $R$  déterminée avec la méthode à 4 fils).

## RESISTANCE D'UNE ELECTRODE DE TERRE

### Calcul de la résistance d'une électrode de terre par éléments finis (EF)

#### Brève description de la méthode des éléments finis

Pour résoudre un problème (représenté sous la forme d'une équation différentielle ou aux dérivées partielles à satisfaire dans un domaine  $\Omega$ , avec les conditions aux limites à sa frontière  $\Gamma$ ) par la méthode des éléments finis, on procède par les étapes suivantes [Richard, 1976], [Kenneth et al., 1982], [Dular, 1996], [Nzuru, 2009]:

- Choisir une formulation intégrale du système différentiel à résoudre et de ses conditions aux limites : c'est la *formulation variationnelle* ou plus généralement formulation faible du problème.
- Diviser le domaine  $\Omega$  en  $n$  sous domaines  $\Omega_i$  : c'est le *maillage*.
- Trouver des valeurs à attribuer aux nœuds ou plus généralement à des entités géométriques (nœuds, arêtes, facettes, volumes) pour décrire la solution approchée : c'est la *discrétisation*.
- Résoudre le problème discret : c'est la *résolution*.
- Construire la solution approchée à partir des valeurs trouvées aux nœuds et déduire d'autres grandeurs : c'est le *post-traitement*.

Dans cet article, uniquement les applications de cette méthode relatives au calcul de la résistance de terre en courant constant sont présentées.

#### Calcul par éléments finis (EF) de la résistance d'une mise à la terre en courant constant (modèle électrocinétique)

Pour plus de simplicité, considérons une électrode hémisphérique pour décrire le modèle qui peut être étendu à un piquet cylindrique vertical [Nzuru, 2009].

Soit une électrode hémisphérique enterrée dans un sol considéré comme homogène. Le problème électrocinétique défini dans le domaine  $\Omega = \Omega_c \cup \Omega_c^C$

(avec une partie conductrice  $\Omega_c$  et une partie non conductrice  $\Omega_c^C$ ) délimité par la frontière  $\Gamma = \Gamma_e + \Gamma_j$  est représenté par la Figure III, en axisymétrique (*haut*) et en 3D respectivement (*bas*).

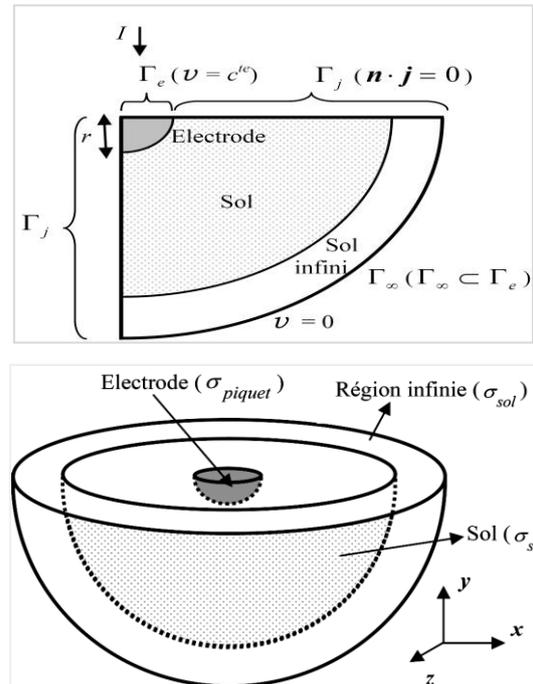


Figure III| Modèle électrocinétique d'une électrode hémisphérique, calcul axisymétrique (*haut*).  
Modèle électrocinétique d'une électrode hémisphérique, calcul 3D (*bas*).

#### Formulation du problème

Les équations de Maxwell (5) et (6), la loi de comportement (7) et les conditions aux limites (8) et (9) caractérisant le problème électrocinétique dans le domaine  $\Omega$  sont :

$$\text{rot } \mathbf{e} = 0 \quad (5)$$

$$\text{div } \mathbf{j} = 0 \quad (6)$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{e} \quad (7)$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{e} /_{\Gamma_e} = 0 \quad (8)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{j} /_{\Gamma_j} = 0, \quad (9)$$

avec  $\mathbf{e}$  le champ électrique,  $\mathbf{j}$  la densité du courant électrique,  $\sigma$  la conductivité électrique et  $\mathbf{n}$  la normale unitaire extérieure à  $\Omega$ .

La relation (5) implique que le champ électrique  $\mathbf{e}$  peut être exprimé en terme de potentiel scalaire  $v$ , c'est-à-dire

$$\mathbf{e} = -\text{grad } v. \quad (10)$$

Les équations (5) et (6) sont respectivement la loi de Faraday ( $\mathbf{rot} \mathbf{e} = -\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t}$ ) en régime stationnaire

( $-\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} = \mathbf{0}$ ) et celle de la conservation de la charge, en approximation quasi-statique.

La condition aux limites (8) et la relation (10) impliquent qu'à la frontière  $\Gamma_e$ , on définit un potentiel scalaire constant. La frontière infinie  $\Gamma_\infty$  fait partie de  $\Gamma_e$  et on y impose un potentiel de référence nul (condition aux limites de Dirichlet). Ceci implique que tout le courant qui s'écoule dans la terre depuis l'électrode sort du domaine par la frontière infinie.

En réalité, la frontière infinie se situe à une distance finie. Le modèle a bel et bien des dimensions réelles finies. Cependant, l'infini est pris en compte par une transformation géométrique [Henrotte et al., 1999].

La condition aux limites (9) s'appliquant à la frontière  $\Gamma_j$  signifie que la composante normale de la densité de courant y est nulle. Dans le modèle axisymétrique, cette condition s'applique aussi sur l'axe de symétrie. Appliquée à la frontière entre la terre et l'air, cette condition signifie qu'il n'y a pas de courant qui s'écoulerait du sol vers l'air.

Deux approches sont possibles pour définir la source : soit on impose un courant constant entrant par la surface supérieure de l'électrode, soit on impose un potentiel donné (non nul) dans tout le volume de l'électrode. Dans le cas de cette étude, c'est la première approche qui est utilisée.

La propriété de l'opérateur "**div**", appliquée aux champs vectoriel  $\mathbf{u}$  et scalaire  $v$  dans le domaine  $\Omega$  s'écrit

$$\mathbf{div}(v \cdot \mathbf{u}) = \mathbf{u} \cdot \mathbf{grad} v + v \cdot \mathbf{div} \mathbf{u} . \quad (11)$$

En intégrant dans le volume  $\Omega$  délimité par la frontière  $\partial\Omega$ , la relation (11) devient

$$\int_{\Omega} \mathbf{div}(v \cdot \mathbf{u}) d\Omega = \int_{\Omega} (\mathbf{u} \cdot \mathbf{grad} v) d\Omega + \int_{\Omega} (v \cdot \mathbf{div} \mathbf{u}) d\Omega . \quad (12)$$

En appliquant le théorème de la divergence au membre de gauche de l'équation (12), on obtient la relation (13).

$$\int_{\partial\Omega} ((\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}) \cdot v) d\partial\Omega = \int_{\Omega} (\mathbf{u} \cdot \mathbf{grad} v) d\Omega + \int_{\Omega} (v \cdot \mathbf{div} \mathbf{u}) d\Omega . \quad (13)$$

Soit une fonction test  $v'$ , la relation (13) reste encore valable si on remplace  $\mathbf{u}$  par  $\mathbf{j}$  et  $v$  par la fonction test  $v'$ . On obtient alors la relation (14).

$$\int_{\Omega} (\mathbf{j} \cdot \mathbf{grad} v') d\Omega - \int_{\partial\Omega} ((\mathbf{n} \cdot \mathbf{j}) \cdot v') d\partial\Omega = - \int_{\Omega} (v' \cdot \mathbf{div} \mathbf{j}) d\Omega \quad (14)$$

En utilisant les relations (6), (7) et (10), on obtient la formulation faible (15) en potentiel électrique scalaire pour le problème électrocinétique.

$$\int_{\Omega} (\sigma \mathbf{grad} v \cdot \mathbf{grad} v') d\Omega + \int_{\Gamma} ((\mathbf{n} \cdot \mathbf{j}) \cdot v') d\Gamma = 0 \quad \forall v' \in F(\Omega) \quad (15)$$

$F(\Omega)$  est l'espace fonctionnel défini dans  $\Omega$  contenant les fonctions de base  $v$  et la fonction test  $v'$  [Dular et al., 1998].

La relation (15) est la formulation faible du problème électrocinétique.

Au niveau de la caractérisation des éléments,  $F(\Omega)$  est approximé avec des éléments finis nodaux.

Une fonction de base globale est associée à chaque partie non connexe de  $\Omega$ . Elle est égale à l'unité sur cette partie et varie continûment dans  $\Omega$  jusqu'à zéro sur d'autres portions.

Au niveau de la caractérisation, une telle fonction peut être définie comme la somme des fonctions de base des nœuds de la frontière. Cette fonction, appliquée comme fonction test dans la relation (15), permet de déterminer le courant qui s'écoule depuis la frontière associée.

La résolution de l'équation (15) permet de trouver le potentiel électrique scalaire  $v$  en tout point du domaine  $\Omega$ . La résistance de mise à la terre est calculée à partir de

la relation  $R = \frac{U}{I}$  où  $U$  et  $I$  sont respectivement le potentiel et le courant au point d'injection de celui-ci dans le domaine.

L'avantage de cette méthode par rapport aux formules analytiques est la réduction, dans la mesure du possible, des approximations faites dans l'établissement des solutions analytiques qui éloignent le problème de la réalité physique. Ainsi, par exemple, on peut représenter la terre par ses couches de résistivités différentes. Dans la littérature [Tagg, 1964], [IEEE, 2000], [Nzuru, 2009], on fait usage de la représentation de la terre soit par une seule couche (terre homogène), soit par deux couches de résistivités différentes pour de nombreuses applications. Cette modélisation a une limite dans le cas où les résistivités des différentes couches du sol varient dans des larges proportions.

## Mesure des résistances des réseaux de terre : méthode de mesure à quatre fils

La méthode à quatre fils, appelée aussi « méthode à chute de potentiel » [Nzuru, 2009], illustrée par la Figure IV, s'utilise en cas de résistance de ligne élevée entre la prise de terre et les bornes de l'appareil (E, ES, S et H). Cette méthode consiste à effectuer la mesure de la résistance de la mise à la terre (E) à l'aide de deux électrodes de mesure (S et H).

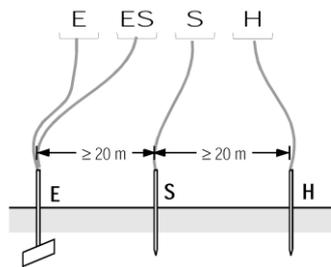


Figure IV | Mesure de la résistance de terre par la méthode à quatre fils

## VALIDATION DES MODELES DES RESISTIVITES DES SOLS

### Introduction

Comme dit dans les sections précédentes, la résistivité du sol est une quantité variable et la seule manière de la connaître avec précision est de la mesurer. Elle varie en fonction de plusieurs facteurs : la nature des sols, le taux d'impuretés, la salinité, le taux d'humidité, la température, etc.

Cette résistivité des sols est importante dans la conception des mises à la terre, surtout dans une région où les caractéristiques électriques des sols ne permettent pas une conception aisée des mises à la terre.

### Modélisation des résistivités des sols

La résistivité des sols n'est pas en pratique uniforme, elle varie en plusieurs couches en fonction de la profondeur considérée. Il faut, de ce fait, mesurer celle-ci en plusieurs couches.

Après la mesure, il est important de valider le modèle par des calculs en utilisant la méthode des éléments finis. L'algorithme proposé est présenté à la Figure V.

## EXEMPLES

### Prédétermination des modèles des résistivités des sols

Pour illustrer cette modélisation (Figure V), considérons le modèle de résistivité des sols en deux et quatre couches représenté sur la Figure VI et la Figure VII.

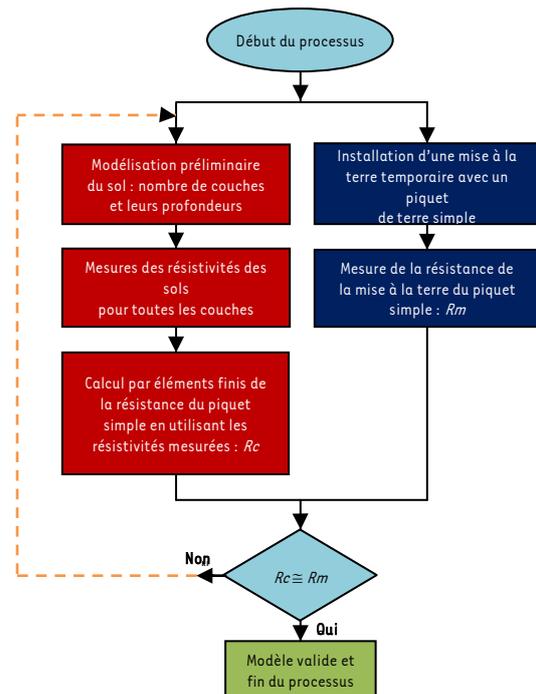


Figure V | Algorithme de modélisation des résistivités des sols

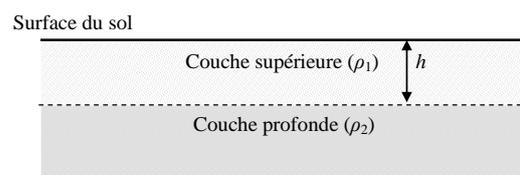


Figure VI | Modélisation des sols en deux couches

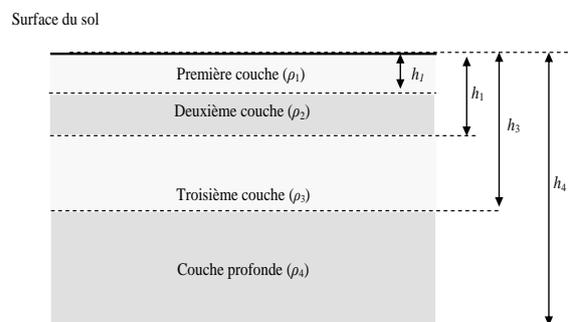


Figure VII | Modélisation des sols en quatre couches

## Mesures effectuées et résultats des calculs

### Appareils utilisés pour les mesures

Pour les mesures, la méthode de chute de potentiel a été utilisée. La littérature [Nzuru, 2009] renseigne que cette méthode est la seule fiable pour la mesure de la résistance et des résistivités des mises à la terre. Les appareils utilisés sont les mesureurs de terre de modèles GEOHM 5 et GEOHM C.

Les plages de mesures indiquées pour ces appareils sont : de 0.11 à 19.99 kΩ pour la résistance et de 0 à 1999 kΩm pour la résistivité électrique. La précision garantie

par le fabricant, pour les plages de mesures effectuées dans ce cas, varie entre 2% et 5% des valeurs mesurées.

### Mesure des résistivités des sols

Les mesures ont été effectuées aux cinq sites suivants de la ville de Kinshasa, en septembre 2012 (saison de pluies) : ISPT-KIN, KASA-VUBU, NGABA, UNIKIN et UPN. Ces sites sont représentatifs des différents types de sols de la ville de Kinshasa, comme représentés à la Figure VIII [Nzuru, 2009].



Ho	: Alluvions de fond de vallée et de basses terrasses (terrains marécageux)
Ccb	: Grès très tendres, généralement blanchâtres (sable en hauteur)
Q	: Alluvions de moyenne terrasse et alluvions anciennes de Stanley-Pool (sable en vallée)
QPs	: Sables plus ou moins argileux, gris clair, jaune ocre, rouges, souvent avec gravier à la base, reposant sur des aplanissements d'érosion (terre jaune)
QSo	: Sables plus ou moins argileux, gris clair à jaune ocre, provenant en grande partie du remaniement, au Pliocène et au Pléistocène, de la série des sables ocre (Néogène) et de la série des « grès polymorphes » (Paléogène) et reposant sur des formations plus anciennes que cette série ou parfois sur des lambeaux de celle-ci. (terre jaune en hauteur)
I	: Quartzites et schistes de la Luvuvu

Figure VIII | Différents types des sols de la ville de Kinshasa

Les coordonnées géographiques des ces différents sites de mesure sont données dans le Tableau I.

Tableau I. Coordonnées géographiques des différents sites de mesures

Lieux	Coordonnées géographiques	
ISPT-KIN	4°19'27.40" S	15°17'28.91" E
KASA-VUBU	4°20'21.72" S	15°18'33.60" E
NGABA	4°22'33.00" S	15°19'02.75" E
UNIKIN	4°25'09.76" S	15°18'29.52" E
UPN	4°24'11.62" S	15°15'27.42" E

Les résultats des mesures des résistivités des sols sont représentés dans la Figure IX.

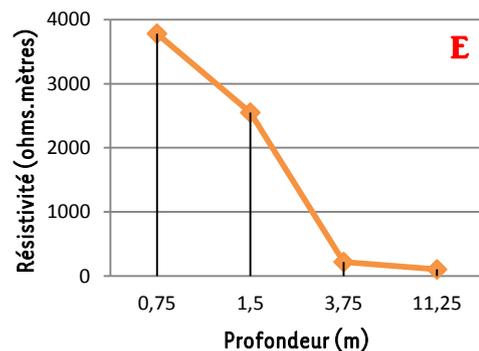
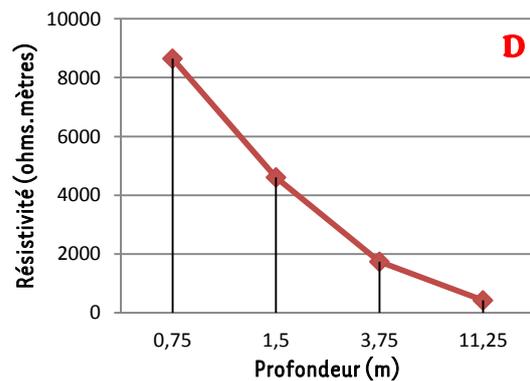
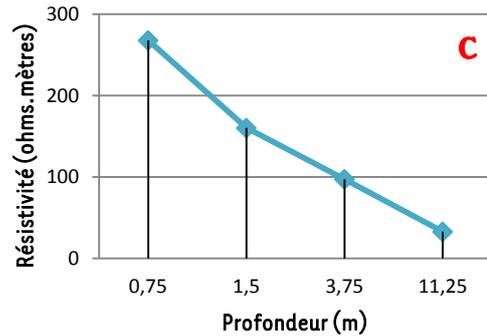
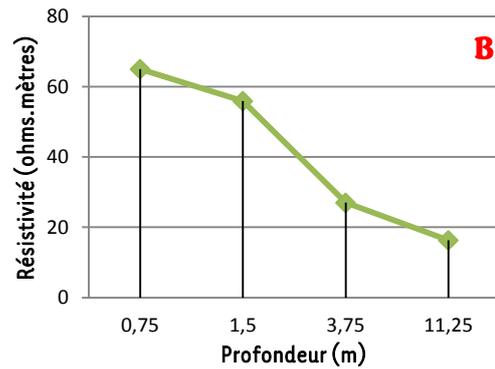
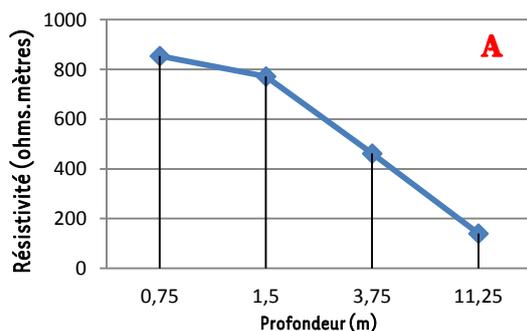


Figure IX. (A) Valeurs mesurées des résistivités du sol (ISPT); (B) Valeurs mesurées des résistivités du sol (Kasa-Vubu); (C) Valeurs mesurées des résistivités du sol (Ngaba) (D) Valeurs mesurées des résistivités du sol (UNIKIN); (E) Valeurs mesurées des résistivités du sol (UPN).

La modélisation en deux couches est considérée avec les résistivités respectivement à 3.75 m et à 11.25 m. Le Tableau II résume cette modélisation en deux couches.

Tableau II. Mesures des résistivités des sols, modèle en deux couches

Lieux	$\rho$ à 3.75 m ( $\Omega.m$ )	$\rho$ à 11.25 m ( $\Omega.m$ )
ISPT-KIN	462	140.2
KASA-VUBU	27	16.32
NGABA	97.4	32.8
UNIKIN	1740	425
UPN	221	105

## Valeurs calculées et mesurées de la résistance de l'électrode cylindrique

Pour la validation de ces modèles, aux différents sites, un piquet de terre cylindrique en cuivre ( $l = 1.5$  m et  $d = 0.016$  m) a été installé. Les valeurs des résistances mesurées sur ces électrodes et celles calculées par éléments finis (Equation 15), sont repris dans le Tableau III, respectivement pour les modèles des sols en deux et en quatre couches.

Tableau III. Résultats de calculs et mesures de la résistance de l'électrode cylindrique

Lieux	Résistance mesurée ( $\Omega$ )	Résistances calculées ( $\Omega$ )			
		Modèle en deux couches		Modèle en quatre couches	
		Résistance calculée ( $\Omega$ )	Erreur (%)	Résistance calculée ( $\Omega$ )	Erreur (%)
ISPT-KIN	112.6	256.48	127.7	462.3	310.5
KASA-VUBU	14.6	15.37	5.2	34.38	135.4
NGABA	25.7	54.24	111	121	370.8
UNIKIN	1388	960	30.8	3660	163.6
UPN	743	1376	85.2	1735	133.5

## Résultats obtenus

La Figure X présente les résultats des calculs, comparés aux mesures.

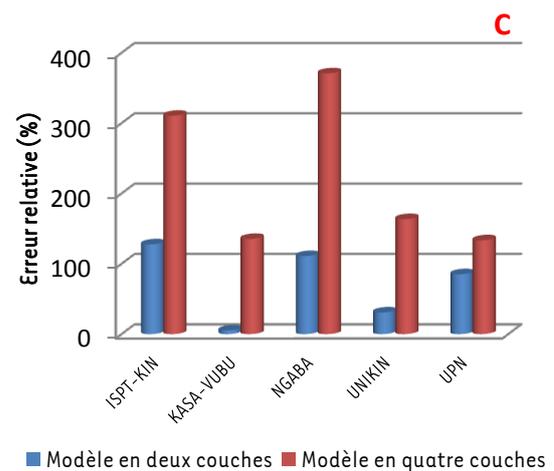
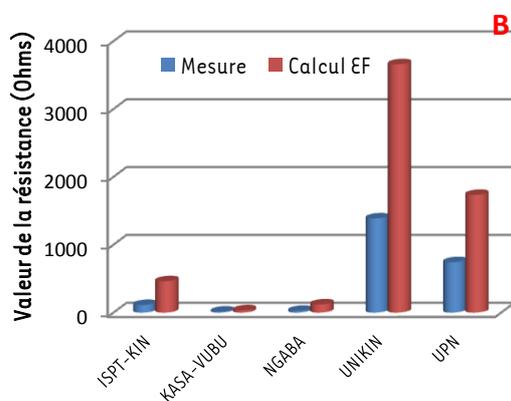
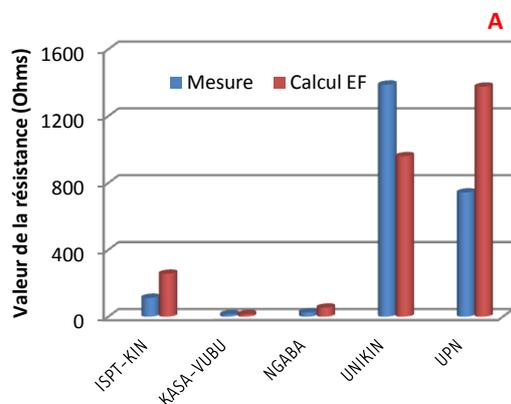


Figure X| (A) Valeurs mesurées et calculées des résistances de mise à la terre, modélisation des sols en deux couches; (B) Valeurs mesurées et calculées des résistances de mise à la terre, modélisation des sols en quatre couches; (C) Erreurs relatives (résistances calculées et mesurées)

## CONCLUSION

Dans cet article, un algorithme consistant en la modélisation des résistivités électriques des sols à plusieurs couches est présenté. Les étapes importantes de la démarche sont: la modélisation préliminaire du sol (nombre de couches et leurs profondeurs), la mesure de la résistance de mise à la terre d'une électrode cylindrique simple implantée dans le sol et le calcul, par éléments finis, de la résistance de mise à la terre de l'électrode cylindrique avec comme données, les résistivités mesurées des différentes couches du sol. La comparaison entre la

valeur mesurée de la résistance de l'électrode et celle calculée par éléments permet de valider ou pas le modèle préliminaire du sol. La valeur de la résistance mesurée de l'électrode est prise comme référence.

Deux modélisations préliminaires des sols ont été utilisées : les modèles des sols en deux et en quatre couches de résistivités différentes. La modélisation des sols en deux couches donne des erreurs beaucoup plus faibles que la modélisation en quatre couches, avec des erreurs qui dépassent parfois 100% pour les deux modèles.

Parmi les cinq sites, seuls KASA-VUBU et UNIKIN indiquent une modélisation assez précise avec des erreurs de 5.2 % et 30.8 % pour le modèle en deux couches.

Les erreurs assez importantes pour les autres sites (par exemple 310.5 % pour le site de l'ISPT-KIN, modélisation en quatre couches) montrent que les modèles choisis ne sont pas précis. Donc il faut chercher à affiner le modèle pour ces sites.

## RESUME

Cet article illustre la modélisation des résistivités électriques des sols en plusieurs couches. La conception des mises à la terre des installations électriques requiert une bonne connaissance de la résistivité des sols, laquelle est une grandeur très variable, et la seule manière de la connaître est de la mesurer. La résistivité des sols varie souvent avec la profondeur. Dans ce cas, on parle d'un sol en plusieurs couches de résistivités différentes. Dans la littérature existante, les sols sont représentés soit en une seule couche (sol homogène) soit en deux couches (sol stratifié en deux couches de résistivités différentes) et pourtant, en réalité, certains sols présentent des résistivités qui peuvent être modélisées en plusieurs couches. Il est important que la modélisation des sols en plusieurs couches reflète la réalité physique pour que la conception des mises à la terre soit bien réalisée. Les mesures des résistivités des sols s'effectuant à des profondeurs bien précises, il est important de connaître comment ces résistivités varient par rapport à la profondeur.

Les résistivités des différentes couches ainsi mesurées sont utilisées comme données pour le calcul, par éléments finis, de la résistance d'une électrode de terre simple de forme cylindrique installée et dont la résistance est mesurée. Les valeurs mesurées et calculées de la résistance de l'électrode de terre sont comparées pour la validation du modèle de résistivité du sol en plusieurs couches. Les mesures ont été effectuées en différents lieux dans la ville de Kinshasa, en République Démocratique du Congo. Il est clair que cette modélisation peut être étendue, par le même algorithme, à n'importe quel sol en un quelconque lieu. Les résultats obtenus en certains lieux de la ville de Kinshasa démontrent la validité de l'algorithme.

## REFERENCES

- Dular P. (1996). "Modélisation du champ magnétique et des courants induits dans des systèmes tridimensionnels non linéaires, thèse de doctorat", Université de Liège, Collection des Publications de la Faculté des Sciences Appliquées n° 152.
- Dular P. et al. (1998). "Coupling of local and global quantities in various finite element formulations and its application to electrostatics, magnetostatics and magnetodynamics", *IEEE Transactions on Magnetics*, **34**(5): 3078-3081.
- Henrotte F. et al. (1999). "Finite element Modelling with transformation techniques", *IEEE Transactions on Magnetics*, **35**(3): 1434-1437.
- IEEE (2000). "Standard 80-2000: IEEE guide for safety in AC substation grounding".
- Kenneth H. et al. (1982). "The Finite Element Method for Engineers", Second edition, John Wiley & sons.
- Nzuru J.P. (2009). "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, Faculté des Sciences Appliquées.
- Richard H.G. (1976). "Introduction aux éléments finis", Editions Pluralis.
- Tagg G.F. (1964). "Earth resistances", first published, George Newnes Limited, London.