

Calcul et réduction du champ électrique au voisinage d'une ligne de transport d'énergie électrique HT

R. DJEKIDEL, D. MAHI, A. AMEUR, A. OUCAR

Electrical Engineering Department, AMAR TELIDJI University of LAGHOUAT, ALGERIA

Résumé— L'évaluation précise de l'impact environnemental des champs électromagnétiques de très basse fréquence produits par les lignes électriques aériennes HT under the high voltage overhead lines have caused wide a provoqué des public concern. préoccupations du public. In this paper charge simulation method is Cet article présente une méthodologie de simulation pour analyser la distribution du champ électrique généré par une ligne aérienne à haute tension 400 KV et l'étude de moyen de réduction et d'atténuation de l'intensité de ce champ au moyen des écrans. Le code de calcul du champ électrostatique développé basé sur la méthode des charges fictives (charge simulation method) sous l'environnement MATLAB. Les résultats de simulation sont comparés, avec succès, à ceux obtenus par un logiciel multi physique (comsol 3.5a) basé sur la méthode des éléments finis.

Mots clés— champ électrique, ligne aérienne de transport, haute tension, méthode des charges fictives, Effet d'écrans.

1. INTRODUCTION

Le développement des réseaux électriques à H.T fait apparaître des problèmes liés aux champs électromagnétiques [1], [2], [3], élevés qui peuvent causer des dommages sur l'environnement notamment des objets situés à proximité de ces réseaux [4]. Ainsi, il devient nécessaire de réduire le niveau d'exposition à ces champs électromagnétiques. Le moyen de réduction le plus efficace est l'installation des conducteurs écrans [1]. On se propose de calculer le champ électrique sous et au voisinage d'une ligne à très haute tension 400 kV sans et avec réduction, utilisant la méthode de simulation des charges. Le but étant d'évaluer l'efficacité des écrans installés sous la ligne. Les résultats obtenus ont été comparés avec ceux issus d'un logiciel de simulation basée sur la Méthode des Eléments Finis comsol 3.5a.

2. LE PRINCIPE DE LA METHODE DES CHARGES FICTIVES

La méthode de simulation des charges est basée sur les notions des charges discrètes. Le principe consiste à remplacer la distribution des charges électriques surfaciques des conducteurs par des charges fictives discrètes placées à l'intérieur des conducteurs (Charge ponctuelle, charge linéiques de longueur infinie ou finie, charge annulaire). Par exemple, sur la figure (1), qui montre trois charges q_1 , q_2 et q_3 , dans l'espace libre. En appliquant le principe de superposition, une relation peut

être trouvée entre le potentiel V_i au point c_i et le nombre des charges fictives [05].

$$V_i = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2} + \frac{q_3}{4\pi\epsilon_0 r_3} = \sum_{j=1}^3 P_{ij} q_j \quad (1)$$

Le potentiel V_i du point c_i dû à toutes les charges fictives q_j

Introduites sera donné par:

$$V_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} q_j \quad (2)$$

Où:

q_j : La charge fictive ;

P_{ij} : Le coefficient de potentiel dépendant des types de charges et de la distance entre les points i et j ;

V_i : Le potentiel du point i ;

n : Le nombre total des charges fictives.

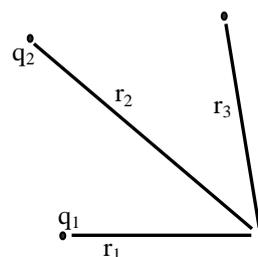


Fig. 1. Trois points de charges dans un espace libre.

L'expression de l'intensité du champ électrique est calculée par la superposition des grandeurs vectorielles de différents composants. Par exemple, dans un système de coordonnées cartésiennes, la composante E_i du champ électrique d'un point i est donnée par :

$$E_i = \sum_{j=1}^n F_{ij} \cdot q_j \quad (3)$$

F_{ij} : Le coefficient de champ électrique est exprimé par:

$$F_{ij} = -\frac{\partial P_{ij}}{\partial x} \quad (4)$$

L'application de l'équation (2) pour un nombre de points d'un contour choisi dont le potentiel V_{ci} est connu, nous permet d'établir la forme matricielle suivante :

$$[q_j] = [P_{ij}]^{-1} \cdot [V_{ci}] \quad (5)$$

Après avoir déterminé les valeurs des charges fictives, on choisit alors n autres points de vérification (P_{vi}) situés aux frontières des conducteurs, et on calcule les potentiels V_{vi} donnés par les charges (q_j).

$$[V_{vi}] = [P_{vi}] \cdot [q_j] \quad (6)$$

L'écart entre le potentiel calculé V_{vi} et le potentiel réel V auquel est soumis le conducteur actif au point P_{ci} représentera la précision du calcul.

$$\varepsilon = \left| \frac{V_{ci} - V_{vi}}{V_{ci}} \right| \cdot 100 \quad (7)$$

La simulation est acceptable si cette valeur est inférieure à la précision du calcul souhaitée sinon il faudra redistribuer les charges et refaire tous les calculs. Dans le cas général, la détermination de la distribution des charges fictives se base sur l'expérience de l'utilisateur de cette méthode. Néanmoins, il existe certaines relations empiriques permettant d'optimiser ces emplacements dans certains cas de figures simples [05].

A. Simplification de la géométrie de la ligne électrique

La forme géométrique la plus juste d'un conducteur suspendu entre deux pylônes peut être décrite en sachant les paramètres tels que la distance entre les deux points de suspension, la flèche S , la hauteur minimale h (à la mi-portée) et la hauteur maximale H , comme elle représente la figure (02). Si on prend en considération l'effet du fléchissement dû au poids de la ligne, la courbe dessinée par la ligne est supposée de forme parabolique, donnée par la relation suivante [06]:

$$h = h_{\min} + S \left(\frac{2 \cdot z}{L} \right)^2 \quad (8)$$

Certains calculs considèrent les conducteurs de la ligne de transport comme droits, parallèles à un sol plat, en annulant l'effet du fléchissement dû au poids de la ligne. Dans ce cas, on introduit la notion de la hauteur

moyenne entre la hauteur maximale et la hauteur minimale de la ligne.

La hauteur moyenne d'une ligne est définie par la relation suivante :

$$h_{\text{moy}} = h_{\text{max}} - \left(\frac{2}{3} \right) S \quad (9)$$

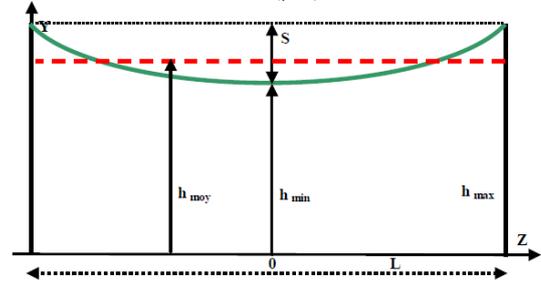


Fig. 2. Dimensions d'une ligne électrique aérienne.

Où:

S : La flèche de la ligne ;

L : La longueur de la ligne ;

h_{\min} : La hauteur minimal (au niveau de la flèche) ;

h_{\max} : La hauteur maximal (au voisinage du pylône) ;

h_{moy} : La hauteur moyenne (ligne sans flèche).

Les formes générales des coordonnées des points contours et des charges sont données par les formules suivantes :

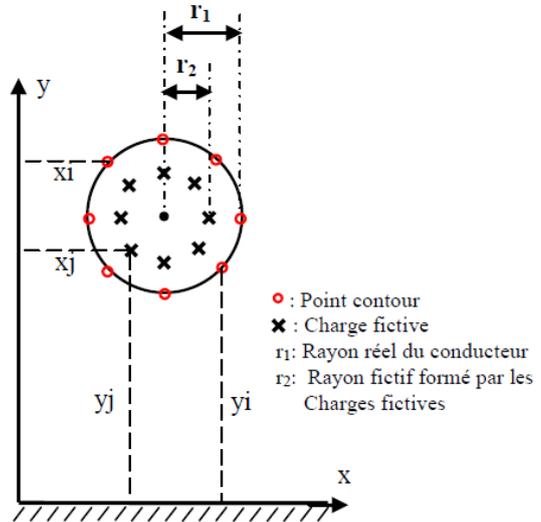


Fig. 3. Distribution des charges linéiques dans la section du conducteur.

Les formes générales des coordonnées des points contours et des charges fictives sont données par les formules suivantes :

$$\left. \begin{aligned} x_k &= x_{\text{con}} + R \cdot \cos \left(\left(\frac{\pi}{n-1} \right) \cdot (k-1) \right) \\ y_k &= h_{\text{con}} + R \cdot \sin \left(\left(\frac{\pi}{n-1} \right) \cdot (k-1) \right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ou:

$$R = \begin{cases} r_1 & \text{if } k = i \\ r_2 & \text{if } k = j \end{cases}$$

n : le nombre des charges fictives.

x_{con} : coordonnée horizontale du conducteur
 h_{con} : hauteur du conducteur par rapport au sol.

B. Calcul du champ électrique par la méthode des charges fictives

L'exemple étudié est une ligne de transmission alternative 400 kV en nappe horizontale (figure 4). Les lignes L1, L2 et L3 sont des conducteurs phases. Chaque phase est constituée d'un faisceau horizontal de deux conducteurs séparés de 40 cm. Le diamètre d'un sous rayon d'un sous-conducteur est 14,31 mm. Les charges sont de types linéiques infinis (la longueur du conducteur est beaucoup plus grande que les autres dimensions), tandis que le câble de garde est de fil métallique ayant un seul faisceau de charges linéiques, et porté au potentiel $V=0$ (V).

Les conducteurs se trouvent à une hauteur de 26m, la distance de séparation entre conducteurs est de 12 m, le câble de garde (rayon 11.2 mm) est à une hauteur de 36 m, la portée de la ligne de 300 m. Les conducteurs phases sont posés de manière à respecter une flèche de 8 m, et 5 m pour les câbles de garde.

Les composantes de l'intensité du champ en tout point (x, y) , peuvent être calculées à l'aide des relations suivantes [7] :

$$E_x = \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{2\pi\epsilon} \left[\frac{x-x_j}{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} - \frac{x-x_j}{(x-x_j)^2 + (y+y_j)^2} \right] \quad (11)$$

$$E_y = \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{2\pi\epsilon} \left[\frac{y-y_j}{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} - \frac{y+y_j}{(x-x_j)^2 + (y+y_j)^2} \right]$$

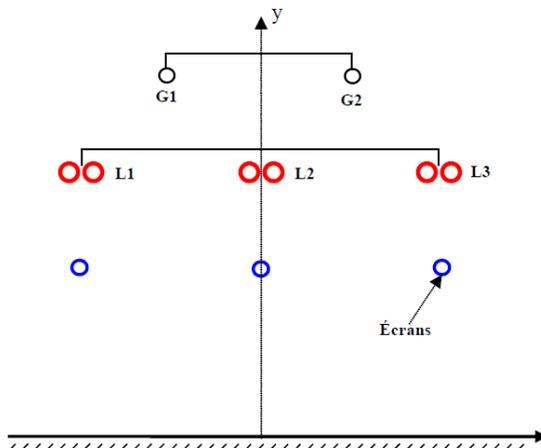


Fig. 4. Géométrie d'une ligne triphasée en nappe horizontale.

Avec :

- x : Abscisse du point contour ;
- x_j : Abscisse de la charge fictive ;
- y : Ordonnée du point contour ;
- y_j : Ordonnée de la charge fictive.

On peut alors calculer le champ électrique résultant par la relation suivante :

$$E_i = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (12)$$

C. Réduction du champ électrique généré par une ligne aérienne

Il existe en général deux moyens pour réduire l'intensité du champ sous les lignes :

Le premier est un choix convenable de la hauteur des pylônes, déterminant la hauteur des conducteurs de phase au dessus du sol, associé à la disposition la plus favorable des indices horaires des tensions. Le second est l'utilisation de conducteurs jouant le rôle d'écrans, placés entre les conducteurs phases et le sol, pour calculer la réduction du champ obtenu par la mise en place des conducteurs écrans, on incorpore les caractéristiques de position des conducteurs dans la matrice des coefficients de potentiel. On calcule les charges portées par tous les conducteurs en affectant aux conducteurs écrans le potentiel $V=0$ (V), puis on calcule le profil du champ électrique résultant [1], [8].

Les câbles de garde et les conducteurs écrans sont de même type. Les conducteurs écrans sont placés à 20 m au-dessus du sol.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Nous avons réalisé un programme de simulation de la méthode des charges fictives pour le calcul du champ électrique à n'importe quelle distance de la ligne et le long de la portée à une hauteur de 2 m à partir du sol. On utilise la mesure des erreurs pour estimer la précision de la méthode des charges fictives, pour une tension complexe de 400 KV sur une ligne électrique aérienne en nappe horizontale. Nous avons trouvés les résultats suivants.

- Champ électrique d'une ligne sans flèche $E=3,778$ KV/m.
- Champ électrique au pied du pylône $E=2.21$ KV/m.
- Champ électrique au niveau de la flèche $E=5.27$ KV/m.

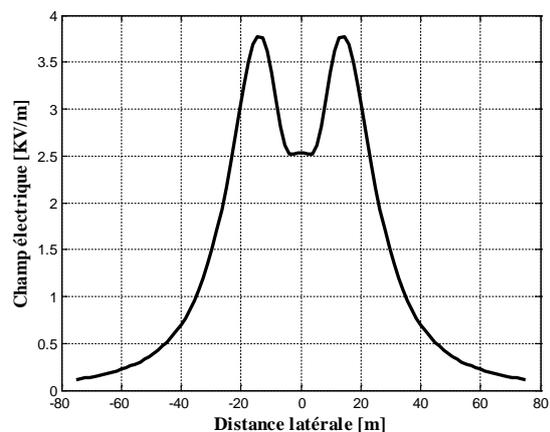


Fig. 5. Champ électrique d'une ligne en nappe horizontale de 400 KV sans flèche.

D'après la figure (5), montrant l'allure du champ électrique en fonction de la distance, sans prendre en considération le paramètre de la flèche, on remarque que le champ électrique à 2 m du sol, a une valeur $E= 3,778$

KV/m. Cette valeur reste constante le long de la portée de la ligne. Le champ électrique augmente à partir du point, matérialisant le centre des trois phases ($x = 0$) et atteint un maximum pour $x = \pm 14.4$ m. Quand on s'éloigne de ce point, l'intensité du champ électrique décroît exponentiellement en fonction du carré de la distance latérale. Tandis que si l'effet de la flèche est en considération (figure 6). On constate que le champ électrique atteint les valeurs maximales $E_{\max} = 5.27$ (KV/m) au niveau de la flèche et $E_{\max} = 2.21$ (KV/m) au niveau du pied du pylône. L'écart est attribué au fait que les conducteurs à mi-portée n'ont pas la même hauteur qu'au voisinage du pylône.

D'après la figure (7), on remarque que la valeur du champ électrique passe de 2.21 KV/m, au pied du pylône à 5.27 KV/m, au niveau de la mi-portée. Cela montre que le champ électrique au niveau du sol n'est pas constant le long de la portée. Par contre si la ligne est considérée sans flèche, la valeur du champ électrique calculée $E_{\max} = 3,778$ KV/m, reste constante le long de la portée. Ceci montre que l'utilisation de la hauteur moyenne dans le calcul du champ électrique ne reflète pas le cas réel.

La figure (8) montre la répartition du champ électrique le long de la zone définie par la mi-portée de la ligne (au niveau de la flèche $z = 0$), et l'axe de l'emprise de la ligne de transport. La variation des niveaux du champ électrique est due à la variation de la hauteur des conducteurs au dessus du sol, entre les pylônes de suspension.

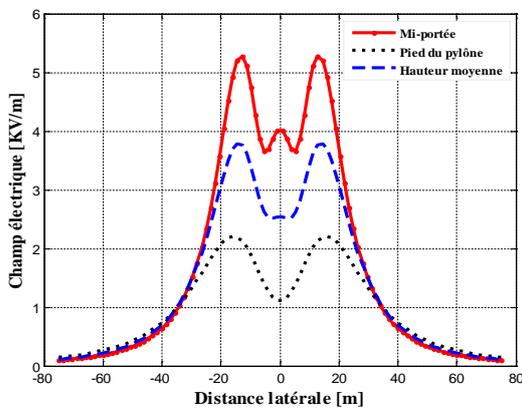


Fig. 6. Champ électrique d'une ligne en nappe horizontale de 400 KV avec et sans flèche.

Les Figures (9) et (10) présentent le profil tridimensionnel du champ électrique de la ligne de transport avec et sans flèche, sur une zone équivalente à une coupe transversale de 150 mètres. La distance entre les pylônes de suspension est équivalente au profil longitudinal de la ligne de transport, qui dans ce cas est égal à 300 mètres. Les valeurs des champs les plus intenses se retrouvent uniquement dans une petite zone au milieu de la portée, ceux-ci diminuent rapidement en se déplaçant vers les pylônes et encore plus rapidement quand on s'éloigne de la ligne.

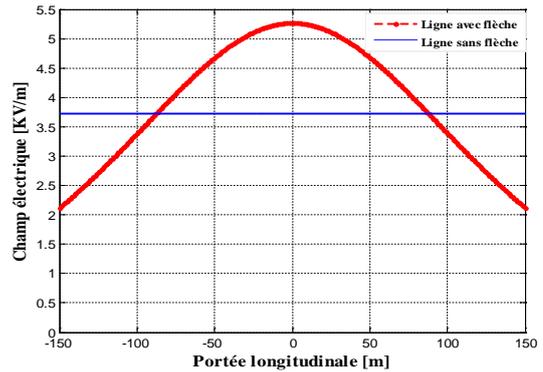


Fig. 7. Variation du champ électrique à 2m du sol pour une ligne en nappe de 400 KV le long de la portée.

L'efficacité de l'écran, exprimée par le rapport entre le champ maximal original à 2 m au-dessus du sol et le champ en présence d'écrans. Pour étudier l'efficacité du nombre des conducteurs écrans sur la réduction du champ électrique, Dans les figures (11) et (12), on a pris la valeur maximale du champ électrique de la configuration de base à 400 KV au niveau de la flèche, ce qui correspond à 5,27 (KV/m) et en augmentant à chaque fois le nombre de conducteurs écrans, on voit une réduction significative du champ électrique[01,08].

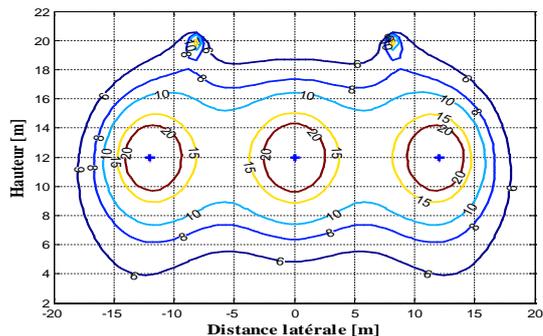


Fig. 8. Plan en coupe transversale du contour de l'intensité du champ électrique pour une ligne en nappe au niveau de la flèche.

On constate (tableau 1), que l'augmentation du nombre des écrans permet une réduction appropriée du champ électrique au niveau de la distance latérale (figure 11), et au niveau la portée longitudinale (figure 12), mais cette réduction n'est pas proportionnelle avec le nombre des conducteurs écrans. Afin d'évaluer l'efficacité des résultats obtenus par cette méthode, Il est proposé d'utiliser les résultats de simulation d'un cas identique obtenus à l'aide du logiciel de simulation multi-physique par éléments finis COMSOL 3.5a afin de les comparer, La distribution du champ électrique calculé par COMSOL 3.5a sans et avec écrans est tracée sur les figures (13) et (14). La comparaison de la représentation graphique de la figure (15) montre un bon accord entre les résultats obtenus. On constate sur cette figure, que les quatre simulations se superposent presque parfaitement. Cette procédure permet de s'assurer de l'efficacité et de validation de la méthode de simulation.

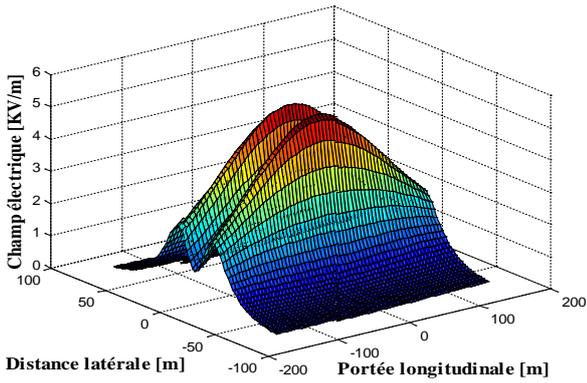


Fig. 9. Représentation en 3 Dimensions du champ électrique pour une ligne avec flèche.

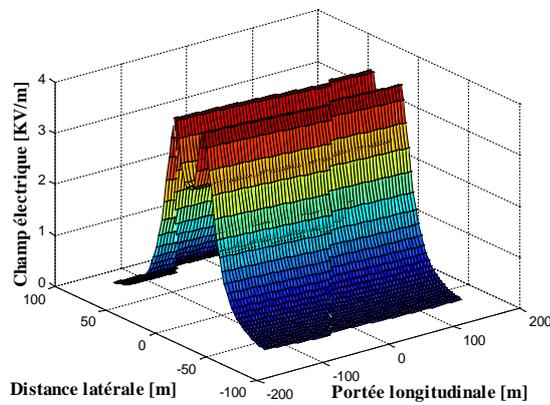


Fig. 10. Représentation en 3 Dimensions du champ électrique pour une ligne en nappe sans flèche 400 KV.

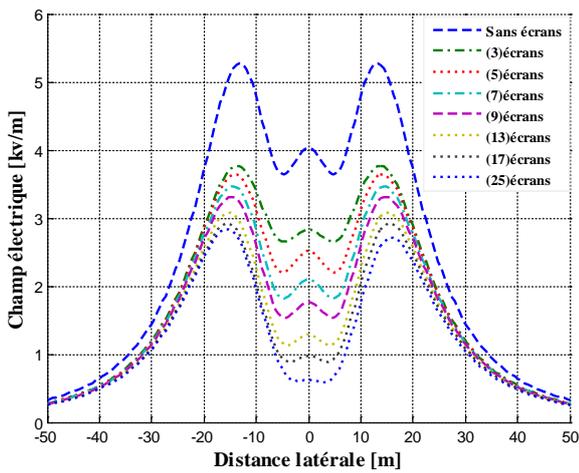


Fig. 11. Champ électrique à 2m du sol pour une ligne en nappe 400 KV sans et avec écrans au niveau de la flèche.

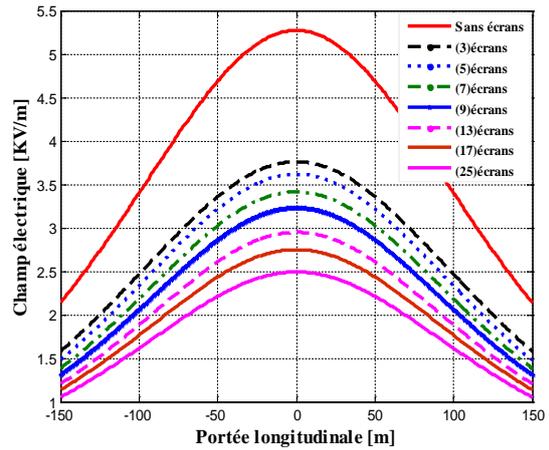


Fig. 12. Champ électrique à 2m du sol pour une ligne en nappe 400 KV sans et avec écrans le long de la portée.

Tableau 1. Efficacité des écrans sur la réduction du champ électrique au niveau de la flèche.

Nombre des écrans	0	3	5	7	9	13	17	25
Efficacité des écrans	1	1.4	1.45	1.52	1.59	1.71	1.8	1.85

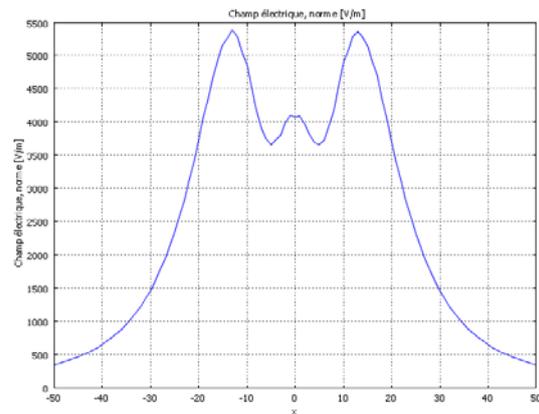


Fig. 13. La distribution du champ électrique calculé par COMSOL 3.5a du cas simulé sans écrans.

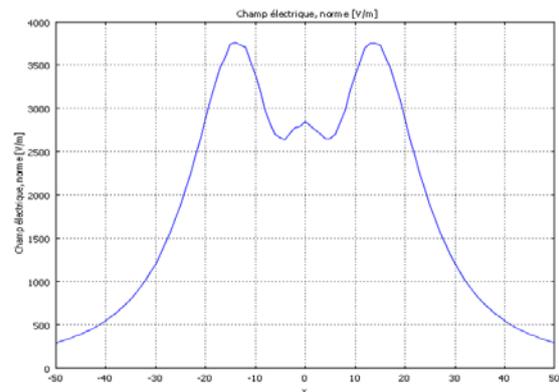


Fig. 14. Distribution du champ électrique calculé par COMSOL 3.5a du cas simulé avec (03) écrans.

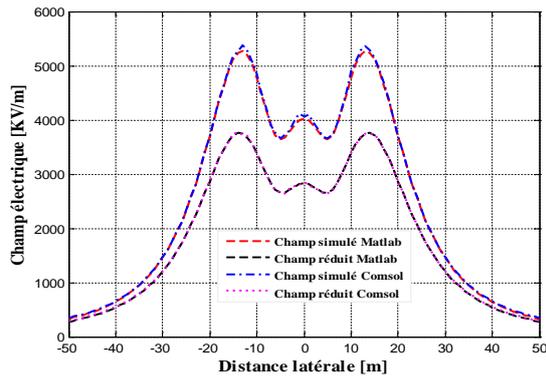


Fig. 15. Comparaison des valeurs calculées et réduites du champ électrique.

4. CONCLUSION

La méthode des charges fictives est une méthode intéressante pour le calcul du champ électrique généré par des lignes électriques haute tension, en tous points de l'espace du domaine étudié. Après l'exécution, le programme établi sous environnement MATLAB, nous donne les valeurs du potentiel et du champ électrique E au point contour. La comparaison faite entre les résultats des potentiels calculés avec ceux imposés aux points contours, fait remarquer que les résultats du potentiel calculé aux frontières sont confondus avec les valeurs exactes avec une faible erreur de simulation, ce qui signifie que le remplacement des charges surfaciques par des charges fictives discrètes se fait avec une bonne précision. L'influence de la géométrie de la flèche est largement remarquée pour le calcul du champ électrique, surtout au voisinage de la mi-portée où on remarque que le champ électrique devient très important et diminue au niveau du pylône. La flèche joue un rôle inévitable dans le calcul du champ électrique. Les résultats des champs électriques trouvés sous différents codes de calcul

présentent un assez bon accord et montrent de bonnes similarités. Nous pouvons en conclure que cette méthode de simulation des charges est validée par comparaison des résultats.

REFERENCES.

1. Cigré, Group de travail, 36.01, (Interférences et champs) , Champs électriques et magnétiques engendrés par les réseaux de transport. Exemple de calcul des perturbations électromagnétiques par la méthode CIGRE, Travail 21-43, 1980, Paris.
2. Girish Kulkarni, W.Z.Gandhare, Proximity Effects of High Voltage Transmission Lines on Humans, ACEEE Int. J. on Electrical and Power Engineering, vol. 03, No. 01, Feb 2012.
3. T. Horváth, The electric and magnetic field exposition of biological object due high voltage lines, Proceedings of the 3rd, Japan-Hungary Joint Seminar on Applied Electromagnetics in Materials and Computational Technology, 10 -13 July, 1994, Budapest.
4. Hayri YILDIRIM, Ozcan KALENDERLI, Computation of electric field induced currents on human body standing under a high voltage transmission line by using charge simulation method, Biomedical Engineering Days, Proceedings of the 2nd International Conference 1998.
5. S.Mouhoubi, M.Oukabi, Calcul du champ électrique par la méthode des charges fictives, Proceeding on the 2nd International Conférence on Electrotechnics, ICEL'2000, Oran, Algeria.
6. R. Amiri, H Hadi, M. Marich, The influence of sag in the Electric Field calculation around High Voltage Overhead transmission lines, 2006 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
7. Singer H., steinbigler H, Weiss P, A charge simulation method for the calculation of high voltage field, IEEE Trans. Pass 93, pp. 1660-1668, septembre-octobre 1974.
8. A.Bendaoud, M.Rahli, Reduction of the Electric Field Intensity under the H.V. Transmission Lines, Laboratory ICEPS (Intelligent Control & Electrical Power Systems) - University of S.B.A, Revue AMSE, Vol 56, N°4; 2004; pp 55-64.

E-mails:

dje_rabah@yahoo.fr,
d.mahi@mail.lagh-univ.dz,
a.ameur@mail.lagh-univ.dz