

Étude du Rayonnement Électromagnétique Émis par les CPL Parcourant les Lignes de Transports d'Énergie et le Réseau Domestique

S. Khedimallah*, M. Chouki*, L. Boufenneche*, D. Sekki*, I. Boudouda*, et B. Nekhoul*

*Laboratoire LAMEL, Université de Jijel, BP 98, Ouled Aissa -Jijel - 18000 - Algérie,
E-mail : sofianekhedimallah@yahoo.fr

Résumé – Depuis plusieurs années, la technologie des courants porteurs en ligne (CPL) est utilisée par les transporteurs de l'énergie électrique pour la surveillance et la conduite du réseau électrique. En effet en plus du signal à fréquence industriel et à forte énergie, sur le même support (ligne ou câble), un signal de fréquence plus importante et de faible énergie est injecté pour véhiculer l'information entre le centre de contrôle et conduite et les capteurs disposés au sein même du réseau. Malheureusement, le rayonnement de ces derniers est parfois responsable en premier d'une auto pollution électromagnétique qui affecte et perturbe les équipements électronique et numérique propre au contrôle du réseau. Ceci constitue un sérieux problème de compatibilité électromagnétique et risque d'entraîner de sérieux dysfonctionnement dans le contrôle et la gestion du réseau électrique. Il devient donc nécessaire de caractériser le rayonnement des CPL pour une meilleure utilisation.

Mots clés – Courants Porteurs en Ligne, Rayonnement Electromagnétique des CPL, Réseaux des Lignes et des Câbles.

I. INTRODUCTION

L'objectif des CPL est d'offrir un service de télécommunication à haut débit en utilisant l'infrastructure existante que constituent les réseaux de distribution d'électricité.

On distingue deux parties différentes dans l'utilisation de ces réseaux suivant leur application : soit à usage privé dans un appartement, une maison individuelle ou en intranet, soit à usage public comme en internet. Il s'agit dans tous les cas de permettre à des ordinateurs de correspondre entre eux à des débits importants et compétitifs par rapport aux systèmes spécifiques existants, ce qui a pour conséquence de nécessiter une très large bande passante. En résumé, il s'agit d'offrir des solutions techniques alternatives à tous les systèmes actuels, qu'ils soient filaires, comme l'ADSL, ou sans fil comme les satellites et le Wi-fi.

Pour cela, les modems appropriés sont couplés aux lignes électriques qui assurent le transport des données vers les autres usagers. C'est le

développement de ces modems et du protocole de transmission associé qui est censé constituer l'innovation technologique à laquelle le monde informatique s'intéresse [1].

Les lignes électriques de n'importe quel réseau de distribution n'ont pas été conçues pour autre chose que transporter l'énergie électrique avec le moins de pertes possible aux fréquences de 50 et 60 Hz, selon les pays. Utiliser ces lignes pour mettre en place des communications CPL signifie qu'elles devront transmettre des signaux à des fréquences allant de quelques kilohertz à plusieurs dizaines de mégahertz. Or, dans ces gammes de fréquences, les câbles électriques deviennent perméables, ce qui signifie qu'une partie de la puissance des signaux émane sous la forme d'un rayonnement électromagnétique. Les lignes électriques peuvent alors être considérées comme des antennes linéaires. N'ayant pas été dimensionnées pour optimiser le rayonnement, leur efficacité ou rendement en tant qu'antennes est globalement mauvais mais suffisant pour donner naissance à un champ électromagnétique qui vient perturber l'environnement.

Notre intérêt est surtout pour le rayonnement électromagnétique des câbles de transport d'énergie et domestique. En absence de résultats de mesures, nous validons notre modélisation, en utilisant le modèle de Schelkunoff [2], en confrontant nos calculs réalisés par un réseau aérien à ceux obtenus par le logiciel NEC-4 (numerical electromagnetic code) [3]. Notons que le logiciel NEC-4 n'est pas en mesure de traiter le cas d'un câble blindé ou domestique.

Après validation du modèle, nous réalisons des applications sur des câbles.

II. EXPRESSION GENERALE DU CHAMP ELECTROMAGNETIQUE PAR LE MODELE DE SCHELKUNOFF

Soit une antenne filiforme (Fig. 1), tel que son rayon soit très petit par rapport à sa longueur (théorie des fils minces), située dans un espace libre qui est l'air et parcourue par un courant harmonique $i(z,w)$.

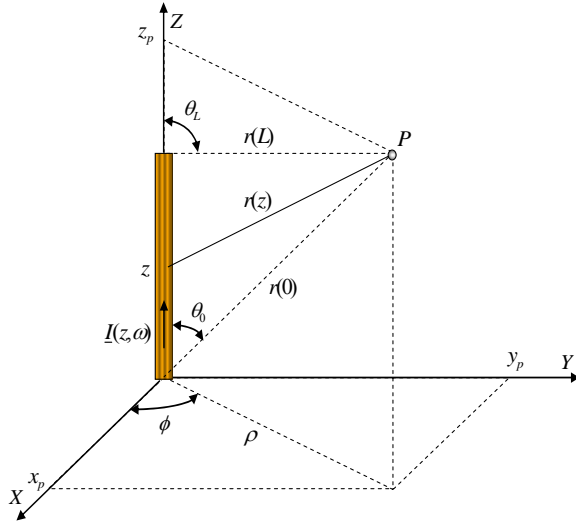


Fig. 1 Illustration Graphique des Grandeurs Utilisées dans les Expressions du Champ Electromagnétique Rayonné par une Ligne de Longueur L

Les expressions du champ électromagnétique données en [4] sont comme suit:

A. Composante Longitudinale du Champ Electrique :

$$E_z = \frac{1}{4\pi j\omega\epsilon_0} \left[I'(0) \frac{e^{-j\gamma_0 r(0)}}{r(0)} - I'(L) \frac{e^{-j\gamma_0 r(L)}}{r(L)} + I(0) \frac{\partial}{\partial z} \left| \frac{e^{-j\gamma_0 r(z)}}{r(z)} \right|_{z=0} - I(L) \frac{\partial}{\partial z} \left| \frac{e^{-j\gamma_0 r(z)}}{r(z)} \right|_{z=L} \right] \quad (1)$$

B. Composante Radiale du Champ Electrique :

$$E_\rho = \frac{1}{4\pi j\omega\epsilon_0\rho} \left[I'(L) e^{-j\gamma_0 r(L)} \cos\theta_L - I'(0) e^{-j\gamma_0 r(0)} \cos\theta_0 + I(0) \left(j\gamma_0 \cos^2\theta_0 - \frac{\sin^2\theta_0}{r(0)} \right) e^{-j\gamma_0 r(0)} - I(L) \left(j\gamma_0 \cos^2\theta_L - \frac{\sin^2\theta_L}{r(L)} \right) e^{-j\gamma_0 r(L)} \right] \quad (2)$$

C. Composante Azimutale du Champ Magnétique :

$$H_\phi = \frac{1}{4\pi\rho} \left[I'(L) \frac{e^{-j\gamma_0 r(L)}}{j\gamma_0} - I'(0) \frac{e^{-j\gamma_0 r(0)}}{j\gamma_0} + I(0) e^{-j\gamma_0 r(0)} \cos\theta_0 - I(L) e^{-j\gamma_0 r(L)} \cos\theta_L \right] \quad (3)$$

$$E_\phi = H_\rho = H_z = 0 \quad (4)$$

où :

$$I'(0) = \left| \frac{\partial I(z)}{\partial z} \right|_{z=0} = -Y.V(0) \quad (5)$$

$$\text{et } I'(L) = \left| \frac{\partial I(z)}{\partial z} \right|_{z=L} = -Y.V(L)$$

Pour déterminer les champs électromagnétiques en coordonnées cartésiennes, nous utilisons la matrice de transformation suivante :

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_\rho \\ F_\phi \\ F_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

avec :

$$\cos(\phi) = \frac{x_p}{\rho}, \quad \sin(\phi) = \frac{y_p}{\rho}, \quad (7)$$

$$\rho = \sqrt{(x_p^2 + y_p^2)}$$

III. CONTRIBUTION DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES DUS AU SOL (EFFET DU SOL)

Une ligne de transport d'énergie est un ensemble de deux conducteurs (aller et retour). Dans le cas d'une ligne aérienne, le sol tient le rôle du conducteur de retour.

L'effet du sol est pris en compte (par application de la théorie du plan complexe [5]) en superposant au champ rayonné par le conducteur réel en tout point de l'espace, le champ rayonné par le conducteur image, supposé enterré à une profondeur égale à la hauteur de la structure filaire plus deux fois l'épaisseur de peau et traversé par le courant inverse (Fig. 2).

L'épaisseur de peau est donné comme suit :

$$p = 1/\sqrt{j\omega\mu_0 \cdot \sigma_s} \quad (8)$$

où : σ_s la conductivité du sol.

Remarque [6] :

Il va sans dire que si la fréquence du signal transmis est trop basse, les équations de Schelkunoff sont à utiliser telles quelles puisque le plan de masse fictif se trouverait à une profondeur telle que la contribution des images devient négligeable.

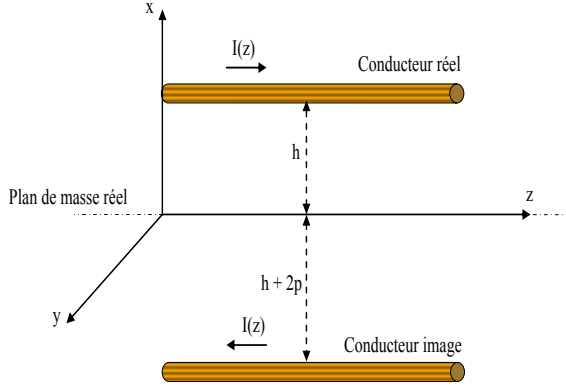


Fig. 2 Rayonnement d'une Antenne Horizontale

IV. VALIDATION

Afin de valider notre travail, nous confrontons nos résultats de calcul à ceux que nous obtenons en utilisant le logiciel de recherche NEC-4 (Numerical Electromagnetic Code) utilisant le formalisme des antennes [3].

A. Réseau en Y

Nous traitons le cas de trois lignes triphasées connectées en Y. les phases *a*, *b* et *c* de chaque ligne de ce réseau sont respectivement situés à une hauteur de 10m, 10.25m et 10.5m au-dessus du sol dont la conductivité est de 0.01 S/m et la permittivité $\epsilon_{r\text{ sol}} = 10$, les paramètres géométriques de cette configuration sont donnés en Fig. 3.

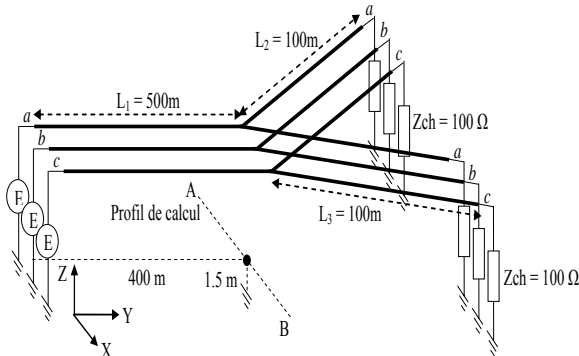


Fig. 3 Réseau Y Triphasé Étudié

1) Calcul du Champ Electromagnétique le Long d'un Profil

Le profil de calcul est défini comme suit : A(-200m, 400m, 1.5m) et B(200m, 400m, 1.5m). Le générateur de tension harmonique a pour amplitude 2 volts et successivement une fréquence de 5 MHz, 10 MHz et 20 MHz. L'angle entre la deuxième ligne et la troisième ligne est de 60 degré.

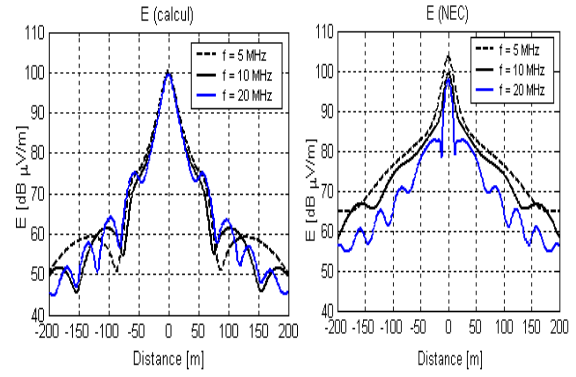


Fig. 4 Variation du Module de Champ Electrique le Long du Profil de Calcul

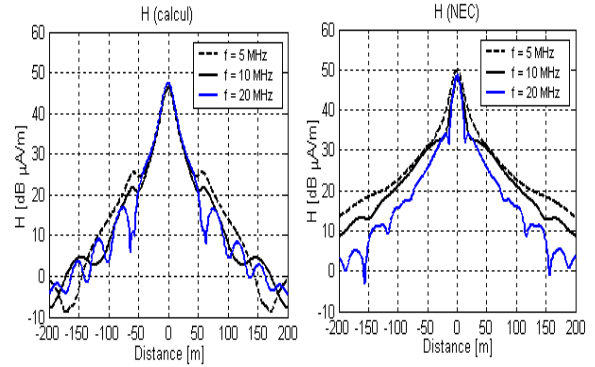


Fig. 5 Variation du Module de Champ Magnétique le Long du Profil de Calcul

De ces résultats (Fig. 4 et 5), nous pouvons affirmer que le formalisme des lignes complété par celui de Schelkunoff est une modélisation idéale très simplifiée du rayonnement électromagnétique des CPL. Notons cependant que la limite fréquentielle de 10 MHz est un inconvénient pour la modélisation des transmissions haut débit. L'inconvénient majeur de la théorie des antennes est son inadaptation aux structures longues, ce formalisme est préconisé dans le cas où l'antenne a une longueur de quelques longueurs d'ondes, à 10 MHz la longueur d'onde est de 30 m, modéliser le rayonnement électromagnétique des lignes de transport d'énergie par la théorie des antennes devient alors illusoire.

V. APPLICATIONS

A. Réseau de Câbles Multicouche Aériens en Y

Nous considérons un réseau aérien de câbles blindés de transport d'énergie connectés en Y comme le montre la Fig. 6. Un tronçon de câble de longueur $L_1 = 500\text{m}$ arrive sur une jonction où il y a deux autres tronçons de câbles de même longueur $L_2 = L_3 = 100\text{m}$. Les câbles sont au-dessus d'un sol de conductivité $\sigma_{\text{sol}} 0.01 \text{ S/m}$ et de permittivité $\epsilon_{r\text{ sol}} = 10$, à une hauteur de 10m.

Les données physiques et géométriques des câbles étudiés sont les suivantes :

Les rayons de l'âme, de l'écran et du blindage sont respectivement : $r_2 = 1.25\text{mm}$, $r_4 = 5\text{mm}$ et $r_6 = 8.75\text{mm}$;

Les rayons du premier isolant (entourant l'âme), du deuxième isolant (entourant l'écran) et du troisième isolant (entourant le blindage) sont respectivement : $r_3 = 3.75\text{mm}$, $r_5 = 7.5\text{mm}$ et $r_7 = 11.25\text{mm}$;

Les conductivités de l'âme, de l'écran et du blindage sont respectivement : $\sigma_1 = 1 \cdot 10^8 \text{ S/m}$, $\sigma_2 = 0.58 \cdot 10^8 \text{ S/m}$ et $\sigma_3 = 0.58 \cdot 10^8 \text{ S/m}$;

Les perméabilités relatives de l'âme, de l'écran et du blindage sont : $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 1$;

Les perméabilités relatives des trois isolants sont : $\mu_{i1} = \mu_{i2} = \mu_{i3} = 1$;

Les permittivités relatives des trois isolants sont : $\epsilon_{i1} = \epsilon_{i2} = \epsilon_{i3} = 1$;

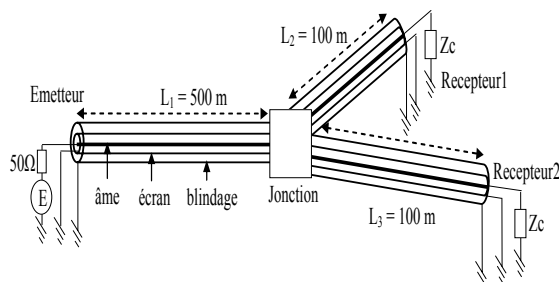


Fig. 6 Réseau de Câbles Aériens en Y

Le profil de calcul est défini comme suit : A(-200m, 550m, 1.5m) et B(200m, 550m, 1.5m). Le générateur de tension harmonique a pour amplitude 2 volts et successivement une fréquence de 1 MHz, 10 MHz et 20 MHz. L'angle entre la deuxième ligne et la troisième ligne est de 60 degré.

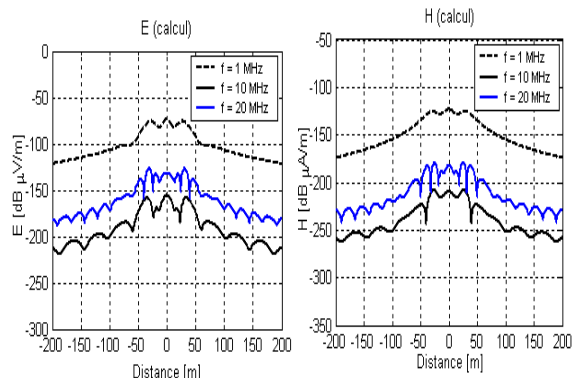


Fig. 7 Variation du Module de Champ Electrique et Magnétique le Long du Profil de Calcul

Nous présentons maintenant la variation du champ électromagnétique le long de la plage [1-20] MHz.

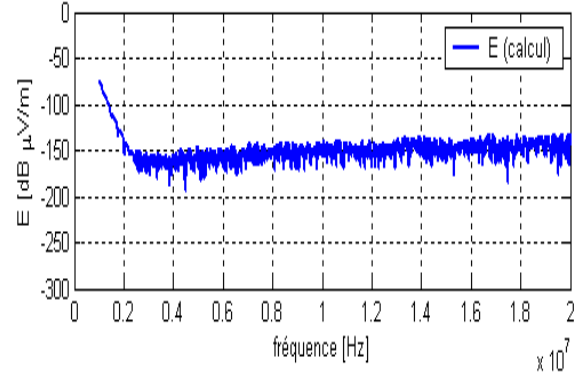


Fig. 8 Variation du Module de Champ Electrique le Long de la Plage [1-20] MHz

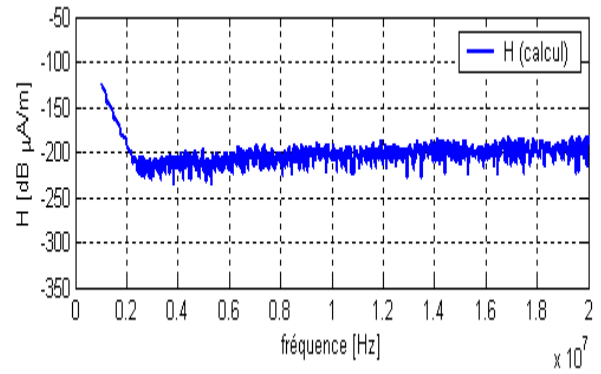
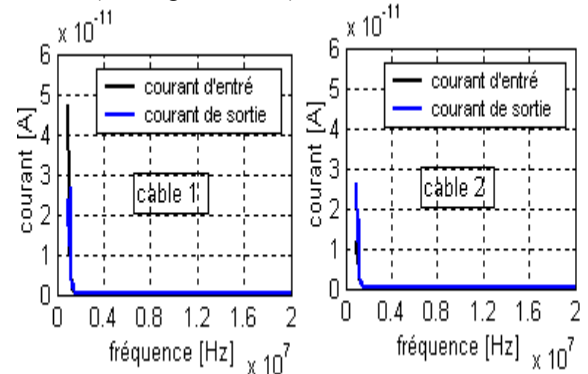


Fig. 9 Variation du Module de Champ Magnétique le Long de la Plage [1-20] MHz

Cet ensemble de résultats (Fig. 7 à 9) montre bien que le rayonnement électromagnétique des CPL des câbles blindés est très faible.

En effet, pour le câble blindé considéré, l'onde électromagnétique doit traverser deux couches conductrices (écran et blindage) pour rayonner dans l'air, pour les fréquences considérées nous pouvons affirmer que l'onde électromagnétique est bien atténuée dans le câble comme le confirme les résultats en Fig. 10 qui donne les courants sur la dernière couche (blindage) du câble.



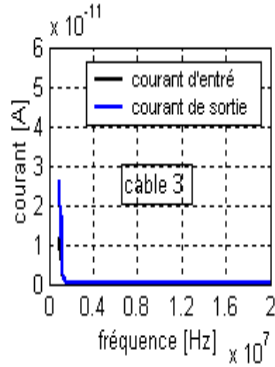


Fig. 10 Courants d'Entrée et de Sortie du Blindage des Trois Câbles

B. Réseau Domestique Arborescent

Considérons la Fig. 11, correspondant à un tronçon du réseau électrique constitué par des câbles normalisés de type NYM 3 x 2.5 mm²; ce tronçon est situé à une hauteur $h = 20\text{cm}$ au-dessus d'un sol de conductivité finie $\sigma_{\text{sol}} = 0.01\text{ S/m}$ et de permittivité $\epsilon_r = 10$.

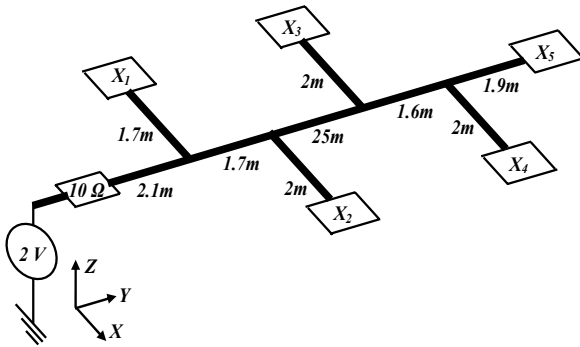


Fig. 11 Tronçon du Réseau Electrique d'une Installation Domestique

Le calcul du champ est effectué pour trois fréquences différentes (10 MHz, 20 MHz et 30 MHz). Le point d'observation varie le long du profil de calcul AB (A(-50m, 15m, 1m) et B(50m, 15m, 1m)).

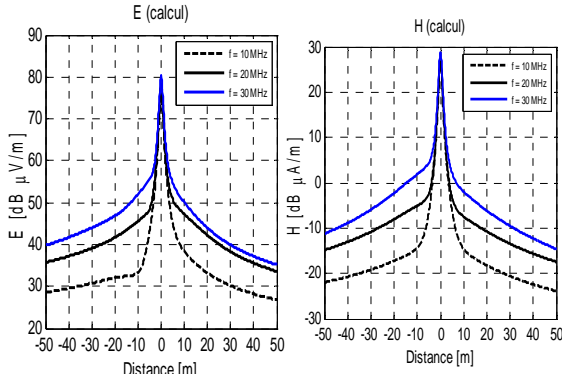


Fig. 12 Variation du Module de Champ Electrique et Magnétique le Long du Profil de Calcul

En gardant la même configuration du réseau, nous calculons maintenant le champ dans la plage [1-30] MHz au point d'observation défini comme suit : P(0, 15m, 1m).

Nous analysons les cas suivants :

- 1) toutes les prises sont ouvertes ;
- 2) toutes les prises sont adaptées ;
- 3) les appareils Lampe, TV, Livebox, Sèche-cheveux et Lampe (Fig. 13) sont respectivement connectées aux prises X_1, X_2, X_3, X_4 et X_5 .

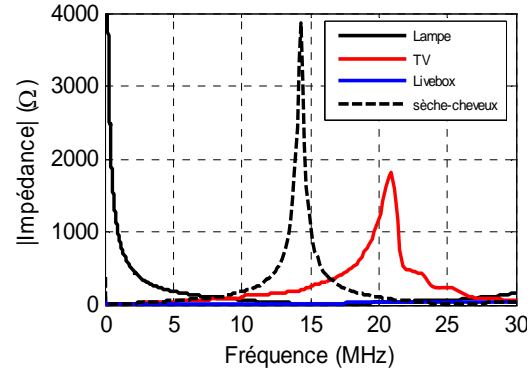


Fig. 13 Impédances des Charges Lampe, TV, Livebox et Sèche-cheveux

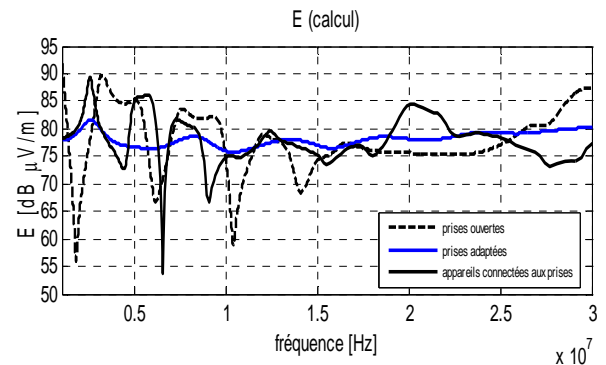


Fig. 14 Variation du Module de Champ Electrique le Long de la Plage [1-30] MHz

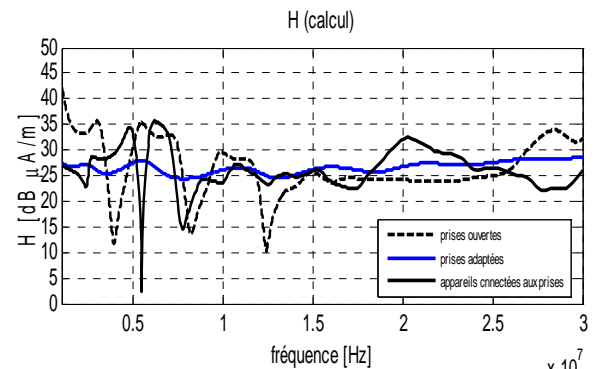


Fig. 15 Variation du Module de Champ Magnétique le Long de la Plage [1-30] MHz

De cet ensemble de résultats (Fig. 12, 14, et 15), nous pouvons affirmer que le rayonnement électromagnétique des CPL en domestique est notable et doit faire l'objet d'une atténuation très particulière.

L'utilisation de prise adaptée permet de diminuer relativement le rayonnement mais ne peut constituer une solution définitive en l'absence de connaissance des seuils d'émissions de l'appareillage électrique très bas niveaux aujourd'hui utilisé.

VI. CONCLUSION

Pour l'étude du rayonnement électromagnétique, nous avons utilisé le modèle de Schelkunoff pour le calcul du champ émis par les CPL parcourant aussi bien les lignes de transports d'énergie que le réseau domestique. L'utilisation de ce modèle est un moyen acceptable pour la quantification du champ électromagnétique émis par les CPL.

Nous avons montré que le rayonnement électromagnétique des CPL en domestique dépend de l'état de fonctionnement des appareils électroménagers connectés derrière.

VII. REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes remerciements sincères à tous ceux qui m'ont encouragé, avec leur soutien et suggestions, tout au long de cet article. Je tiens à remercier aussi le président et tous les membres de cette conférence.

VIII. REFERENCES

- [1] Jacques Mézan de Malartic – F2MM, "Les CPL ou le Cancer des Ondes Courtes", 26-Dec-2004. thf.refunion.org/CPL/cpl_f2mm.pdf.
- [2] S. A. Schelkunoff, "Electromagnetic Waves", D. Van Nostrand Inc. 1956.
- [3] Gerald J. Burke, "Numerical Electromagnetic Code – NEC-4: Method of Moments", Janvier, 1992.
- [4] V. Costa, S. Caniggia, L. Catello, "On the Computation of Electromagnetic Field Components From a Transmission Line: Theory and Application", IEEE, 1990.
- [5] C. Gary, "Approche Complète de la propagation Multifilaire en Haute Fréquence par Utilisation des Matrices Complexes", EDF Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, série BN° ¾, pp. 5-20, 1976.
- [6] R. S. Shi, "Rayonnement Electromagnétique des Réseaux Electriques à Topologie Complexe", Thèse de Doctorat de l'INPG. Grenoble 1992.