

Etude de la Propagation des CPL (Outdoor) sur les lignes Electriques par Matrice [S]

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

*LAMEL Laboratoire, Université de Jijel, BP 98 Ouled Aissa 18000 Jijel, Algérie Email: Daoud.jijel@yahoo.fr

Résumé – Dans cette étude nous nous intéressons à la propagation des CPL (power line communication), pour cela nous traitons la modélisation des signaux HF dans le réseau électrique. nous présentons les éléments mathématiques pour la représentation d'un tube (ligne multifilaire ou câble) par matrice S ; suivra ensuite un exposé sur l'approche topologique par matrice S que nous utiliserons pour modéliser la propagation HF dans un réseau (radial ou maillé) multifilaire.

Mots-Clés – PLC, Modélisation, Outdoor, Matrice [S]

I. INTRODUCTION

Le réseau d'énergie électrique, à l'origine, n'a pas été conçu pour la communication et la transmission de données en haut débit. Plusieurs phénomènes s'y produisent, les atténuations fortes et les perturbations empêchent la transmission de signaux à très haute fréquence, et donc limitent un haut débit. Jusqu'à nos jours, les technologies pour réseau dit « indoor » sont arrivées à maturité, plusieurs modems sont commercialisés sur le marché.

Mais aujourd'hui on a besoin de déployer les services sur une zone plus large dit réseau « outdoor », qui pourrait tout à fait correspondre au réseau de distribution d'énergie électrique. L'idéal serait de pouvoir utiliser un réseau déjà existant, ceci permettrait son exploitation pour des services en plus de celui de la fourniture de l'énergie électrique (transmettre sur le même support des signaux HF et le signal à fréquence industriel). Cet vision si elle se réalise va permettre de réduire les coûts d'investissement tout en évitant une multiplicité des réseaux câblés qui endommage l'environnement.

La technologie CPL, en anglais PLC (Power Line Communications), vise à transmettre des données sur une ligne électrique. Cette ligne fait donc office de support de la transmission des données. Contrairement à d'autres supports de communication, comme les câbles Ethernet, coaxiaux, fibre optique, etc., ce rôle de support de transmission des données n'est pas la fonction principale du câble électrique. Le transport des données doit donc s'ajouter à celui de l'énergie électrique dans les câbles permettant d'alimenter les équipements électriques en énergie à partir du réseau public d'électricité. Destinés à une application censée être à large diffusion publique, les produits CPL doivent rester compétitifs et les adaptations au réseau électrique qui les relie doivent

être minimisées.

II. BREF APERCU SUR LA MATRICE [S]

Considérons un tube d'extrémités L et R, de longueur L et ayant une source de tension U_F série et une source de courant shunt IF en un point de la ligne situé à $x = \zeta$ ($0 < \zeta < L$).

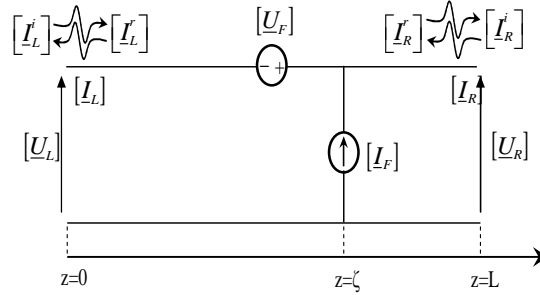


Fig. 1 Déterminations des Paramètres de Diffusion pour un Tube Excité en un Point $z=\zeta$

La solution générale des équations des lignes de transmissions multifilaires 'MTL' pour un tube dans le domaine fréquentiel est donnée par les deux équations précédemment déduites:

$$[\underline{U}(z)] = [\underline{Z}_c] \cdot [\underline{T}] \cdot \left(e^{-\gamma_m \cdot z} \cdot [\underline{I}_m^+] + e^{+\gamma_m \cdot z} \cdot [\underline{I}_m^-] \right) \quad (1)$$

$$[\underline{I}(z)] = [\underline{T}] \cdot \left(e^{-\gamma_m \cdot z} \cdot [\underline{I}_m^+] - e^{+\gamma_m \cdot z} \cdot [\underline{I}_m^-] \right) \quad (2)$$

Avec :

Z_c représente l'impédance caractéristique calculée à partir des paramètres linéiques publiée on [1].

Pour les segments du tube (Fig. 1), à gauche et à droite des sources localisées, la solution générale est comme suit :

Pour $0 \leq x < \zeta$

$$[\underline{U}(x)] = [\underline{Z}_c] \cdot [\underline{T}] \cdot \left([\underline{I}_L^+] e^{-\gamma_m x} + [\underline{I}_L^-] e^{+\gamma_m x} \right) \quad (3)$$

$$[\underline{I}(x)] = [\underline{T}] \cdot \left([\underline{I}_L^+] e^{-\gamma_m x} - [\underline{I}_L^-] e^{+\gamma_m x} \right) \quad (4)$$

Pour $\zeta \leq x < L$

$$[\underline{U}(x)] = [\underline{Z}_c] \cdot [\underline{T}] \cdot \left([\underline{I}_R^+] e^{-\gamma_m x} + [\underline{I}_R^-] e^{+\gamma_m x} \right) \quad (5)$$

$$[I(x)] = [T] \cdot \left([I_R^+] e^{-\gamma_m x} - [I_R^-] e^{+\gamma_m x} \right) \quad (6)$$

Les indices L (left) et R (right) dans les vecteurs des constantes indéterminées ($[I_R^\pm]$ et $[I_L^\pm]$), représentent respectivement les segments gauche et droite [22].

D'après le schéma en Fig. 1, nous avons en $x = \zeta$:

$$- [Z_C] \cdot [T] \cdot \left([I_L^+] e^{-\gamma_m \zeta} + [I_L^-] e^{+\gamma_m \zeta} \right) + [Z_C] \cdot [T] \cdot \left([I_R^+] e^{-\gamma_m \zeta} + [I_R^-] e^{+\gamma_m \zeta} \right) = [U_F] \quad (7)$$

$$- [T] \cdot \left([I_L^+] e^{-\gamma_m \zeta} - [I_L^-] e^{+\gamma_m \zeta} \right) + [T] \cdot \left([I_R^+] e^{-\gamma_m \zeta} - [I_R^-] e^{+\gamma_m \zeta} \right) = [I_F] \quad (8)$$

Ajoutons et soustrayons ces deux équations, nous aboutissons aux deux expressions suivantes :

$$[I_L^+] - [I_R^+] = -\frac{1}{2} e^{+\gamma_m \zeta} \cdot [T]^{-1} \cdot [Z_C]^{-1} \cdot ([U_F] + [Z_C] \cdot [I_F]) \quad (9)$$

$$[I_L^-] - [I_R^-] = -\frac{1}{2} e^{-\gamma_m \zeta} \cdot [T]^{-1} \cdot [Z_C]^{-1} \cdot ([U_F] - [Z_C] \cdot [I_F]) \quad (10)$$

Les courants aux extrémités de la ligne peuvent être logiquement décomposés en deux ondes incidente et réfléchie. En évaluant (4) à $x = 0$ et (6) à $x = L$, nous avons [2]:

$$[I_L] = [I(0)] = [I_L^r] + [I_L^i] \quad (11)$$

$$[I_R] = -[I(L)] = [I_R^r] + [I_R^i] \quad (12)$$

Où :

$$[I_L^r] = [T] \cdot [I_L^+] \quad (13)$$

$$[I_L^i] = -[T] \cdot [I_L^-] \quad (14)$$

$$[I_R^i] = -[T] e^{-\gamma_m L} \cdot [I_R^+] \quad (15)$$

$$[I_R^r] = [T] e^{+\gamma_m L} \cdot [I_R^-] \quad (16)$$

Les indices i et r indiquent respectivement incident et réfléchie.

Nous désignons l'onde incidente comme la portion qui entre à l'extrémité et l'onde réfléchie celle qui sort et nous considérons aussi que la composante contenant $e^{-\gamma_m x}$ se propage à droite et la composante $e^{+\gamma_m x}$ se propage à gauche [2].

Pour être conforme avec les résultats de la section précédente, les courants du tube sont dirigés vers

l'intérieur de celui-ci aux deux extrémités. En combinant (9), (10), (13) à (19), nous pouvons exprimer les composantes réfléchies en fonction de celle incidentes :

$$[I_L^r] = -([T] e^{+\gamma_m L} \cdot [T]^{-1}) \cdot ([I_L^i] - \frac{1}{2} ([T] e^{+\gamma_m \zeta} \cdot [T]^{-1}) \cdot ([I_F] + [Z_C]^{-1} \cdot [U_F]) \quad (17)$$

$$[I_R^r] = -([T] e^{+\gamma_m L} \cdot [T]^{-1}) \cdot ([I_R^i] - \frac{1}{2} ([T] e^{+\gamma_m (L-\zeta)} \cdot [T]^{-1}) \cdot ([I_F] - [Z_C]^{-1} \cdot [U_F]) \quad (18)$$

Le signe de ce résultat dépend de la direction choisie du courant total aux extrémités du tube.

En notation matricielle, le système d'équations (17 et 18) s'exprime comme suit :

$$\begin{bmatrix} [I_L^r] \\ [I_R^r] \end{bmatrix} = \underline{S} \cdot \begin{bmatrix} [I_L^i] \\ [I_R^i] \end{bmatrix} + [I_T] \quad (19)$$

Où :

$$\underline{S} = \begin{bmatrix} [0] & [\Gamma] \\ [\Gamma] & [0] \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\Gamma = -[T] e^{+\gamma_m L} \cdot [T]^{-1} \quad (21)$$

$[I_T]$: vecteur source du courant dû aux sources d'excitations localisées à $x = \zeta$, il est donné par :

De même on peut montrer que :

$$\begin{bmatrix} [U_L^r] \\ [U_R^r] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [0] & [\Gamma] \\ [\Gamma] & [0] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [U_L^i] \\ [U_R^i] \end{bmatrix} = [U_T] \quad (22)$$

III. FORMALISME TOPOLOGIQUE PAR MATRICE S EN COURANT ET EN TENSION

A. Principe de l'Analyse

Pour déduire les ondes de courants et de tensions en chaque nœud du réseau mixte, nous utilisons le formalisme topologique proposé par S. Kaouche. [3]. Ce formalisme consiste à résoudre un ensemble d'équations de propagations (pour l'ensemble des tubes) en tenant compte des relations électriques aux extrémités des tubes. De manière très schématique pour un réseau mixte à n nœuds nous devons construire un système d'équations linéaires : ayant la forme suivante :

$$[A] \cdot [X] = [B] \quad (23)$$

Que nous explicitons comme suit :

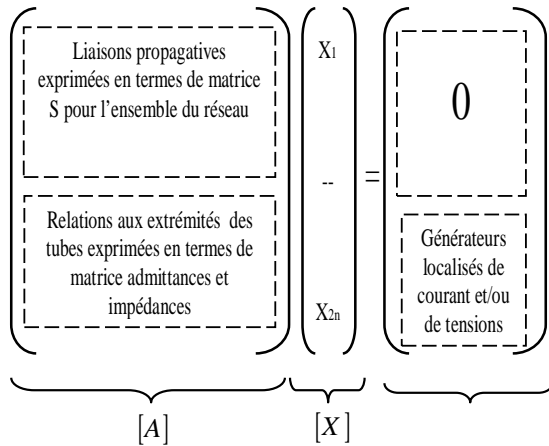


Fig. 2 Construction du Système Matriciel

Cette représentation met en évidence une matrice $[A]$ composée de deux sous matrices tel que :

$$[A] = \begin{bmatrix} [A_1] \\ [A_2] \end{bmatrix} \quad (24)$$

$[A_1]$: sous matrice déduite de la représentation par matrice S des tubes de propagation ;

$[A_2]$: sous matrice déduite des lois de Kirchhoff (KCL et KVL) pour les réseaux (réseau d'extrémité et d'interconnexion) ;

$[X]$: vecteurs des inconnues (ondes de courants et de tension aux nœuds) ;

$[B]$: vecteur source (source de courant et/ou de tension).

B. Construction de la Sous Matrice $[A_1]$

Dans le paragraphe II nous avons brièvement rappelé les deux relations suivantes pour un tube de longueur L :

$$\begin{bmatrix} [I_L^r] \\ [I_L^r] \end{bmatrix} = \underline{S} \cdot \begin{bmatrix} [I_L^i] \\ [I_L^i] \end{bmatrix} + [I_T] \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} [U_L^r] \\ [U_L^r] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [0] & [\Gamma] \\ [\Gamma] & [0] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [U_L^i] \\ [U_L^i] \end{bmatrix} = [U_T] \quad (26)$$

La contribution dans la sous matrice $[A_1]$ du tube d'indice i ayant comme nœuds d'extrémités j et k sera déduite à partir des deux relations (19 et 22) comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & [0] & [\Gamma_i] & [0] & [0] & [\Gamma_i] & [0] & [0] & \dots \\ \dots & [\Gamma_i] & [0] & [0] & [0] & [0] & [\Gamma_i] & [0] & \dots \\ \dots & [0] & [0] & [0] & [\Gamma_i] & [0] & [0] & -[\Gamma_i] & [0] & \dots \\ \dots & [0] & [0] & -[\Gamma_i] & [0] & [0] & [0] & [0] & [\Gamma_i] & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Avec $[I_i]$, la matrice identité d'ordre égale au nombre de conducteur du tube i .

C. Construction de la Sous Matrice $[A_2]$

La sous matrice $[A_2]$, correspond aux représentations de tous les nœuds (réseaux d'extrémités et d'interconnexion) du réseau de transmission. Cette sous matrice est obtenue en appliquant les théorèmes de Thévenin et Norton en chaque réseau (nœud).

Supposons, par exemple, que nous désirons caractériser le réseau d'interconnexion ' m ', qui effectue l'interconnexion des trois tubes : i , j et k , comme il est illustré en Fig. 3.

Les tensions et les courants de ces tubes, en ce réseau m , peuvent être liés entre eux par la relation suivante :

$$\sum_{l=1}^{NT} \left([Y_l^m] \cdot [U_l^m] + [Z_l^m] \cdot [I_l^m] \right) = [P^m] \quad (27)$$

Avec :

NT : C'est le nombre de tube

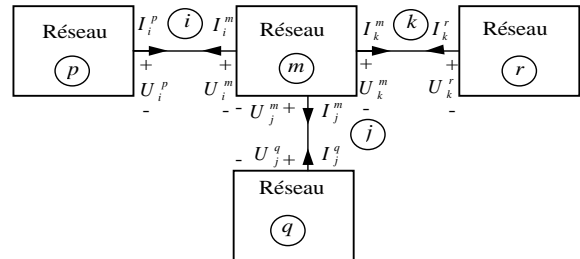


Fig. 3 Définition des Tensions et des Courants dans un Réseau de Transmission

Avec :

$[Y_l^m]$: matrice résultant de l'application des lois de Kirchhoff (KVL et KCL) dans le réseau m , qui peuvent contenir les valeurs : 0, 1, -1 ou des admittances suivant la topologie du réseau.

$[Z_l^m]$: matrice résultant de l'application des lois de Kirchhoff (KVL et KCL) dans le réseau m , qui peuvent contenir les valeurs : 0, 1, -1 ou des impédances suivant la topologie du réseau.

$[P^m]$: vecteur contenant les sources équivalentes de Thévenin et/ou Norton.

D. Construction Du Vecteur $[B]$

Ce vecteur est composé de deux sous vecteurs $[B_1]$ et $[B_2]$, tel que :

$$[B] = \begin{bmatrix} [B_1] \\ [B_2] \end{bmatrix} \quad (28)$$

Le sous vecteur $[B_1]$ est déduit à partir du système matriciel (19) et (22) pour chaque tube du réseau ; il prend en compte le second membre de ce système du à toute excitation extérieur distribuée.

Le second sous vecteur $[B_2]$ contient les générateurs localisés en chaque nœud (de tensions et/ou de courants), c'est-à-dire il englobe les seconds membres de la combinaison (27) écrite pour chaque réseau m .

Une fois que les sous matrices $[A_1]$, $[A_2]$ et le vecteur $[B]$ sont construits, nous pouvons alors résoudre le système (23) dont les inconnues sont les ondes de tensions et de courants.

IV. VALIDATION

Pour validé nos résultats nous faisons une comparons avec ceux obtenus par matrice ϕ , puisque c'est deux méthodes $[S]$ et ϕ sont tirés de la même théorie (théorie des lignes), nous allons étudier la variation fréquentielle de la fonction de transfert $(V(L)/V(0))$ du signal transmis. La Fig. 4, illustre une ligne triphasée en nappe alimentée par une source harmonique sur sa première phase. La ligne et de longueur $L = 1Km$ et de charge d'extrémité $Z_{ch} = Z_c$. Les conducteurs ont une conductivité égale à $5.10^7 S/m$ et celle du sol est $\sigma_s = 0.01 (S/m)$.

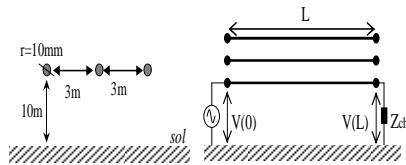


Fig. 4 Ligne en nappe sans câble de garde.

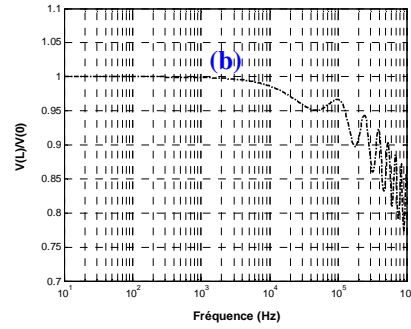
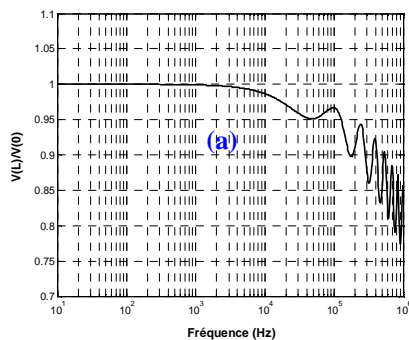


Fig. 5 Rapport de Tension sur L'âme $V(L)/V(0)$ (a : représentation $[S]$, b : représentation ϕ).

Ces deux premiers résultats (Fig. 5.a et Fig. 5.b) mettent en évidence l'excellente concordance des résultats obtenus par les deux formalismes pour le rapport en tension $V(L)/V(0)$. Nous pouvons affirmer que nos développements sont bien validés ; notons que nous avons quand même traités d'autres applications non présentées ici pour confirmer la validation de nos développements sous Matlab.

V. APPLICATIONS

A. Les Lignes Electriques Aériennes

Pour les trois configurations (nappe, triangle, et drapeau) analysées, les trois conducteurs de phases ainsi que le câble de garde sont considérés chargés par leurs impédances caractéristiques. Les conducteurs sont en cuivre et le sol est de conductivité finie $\sigma_s = 0.01 (S/m)$, la ligne est de longueur $1km$ pour les trois configurations.

Nous exciterons successivement une phase puis le câble de garde pour essayer de détecter une différence éventuelle.

Le but de cette application est d'analyser la différence entre la propagation des courants porteurs sur une phase et sur le câble de garde. Pour cet objectif, nous étudions la variation fréquentielle du rapport de la puissance de sortie sur la puissance injectée, des tensions sortie/entrée ainsi que celui de l'onde incidente sur l'onde réfléchi sur l'extrémité réceptrice.

A1. Configuration en Nappe

Soit une configuration en nappe pour une ligne triphasée avec câble de garde comme le montre la Fig. 6.

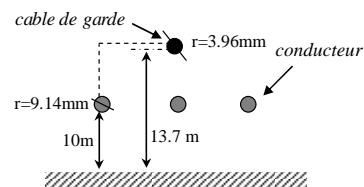


Fig. 6 Ligne en nappe sans câble de garde.

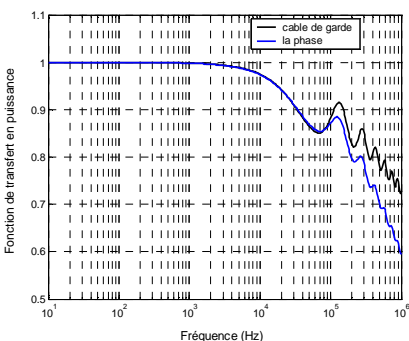
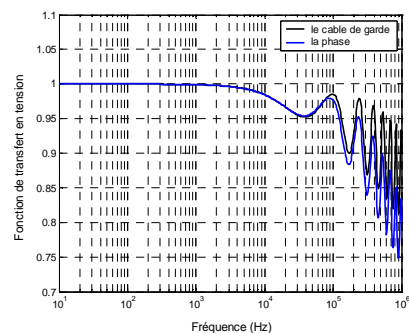


Fig. 7 La Variation Fréquentielle (a : fonction de transfert en tension,b : en puissance)

A2. Configuration en Triangle

Nous considérons maintenant une ligne en triangle comme le montre la Fig. 8.

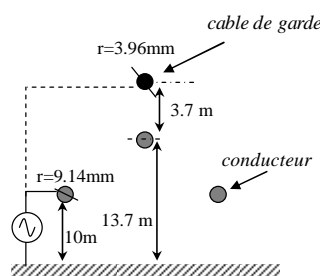


Fig. 8 Configuration d'une ligne en triangle avec câble de garde

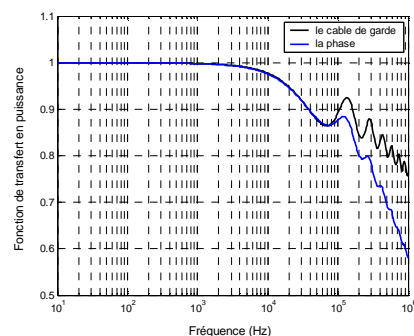
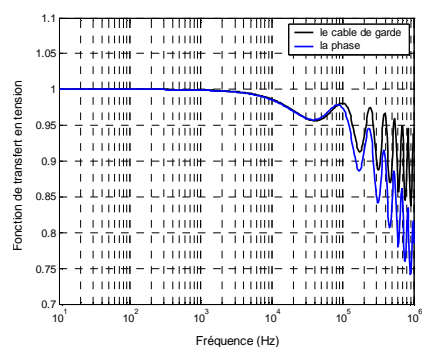


Fig. 9 La Variation Fréquentielle (a : fonction de transfert en tension,b : en puissance)

A3. Configuration en Triangle

La Fig. 10 ci-dessous représente une ligne en drapeau avec un câble de garde ; nos résultats sont représentés sur la Fig. 11.

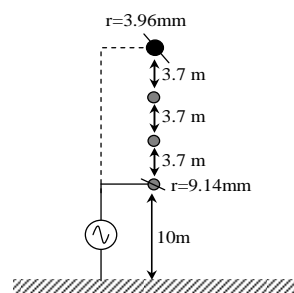


Fig. 10 Configuration d'une ligne en triangle avec câble de garde

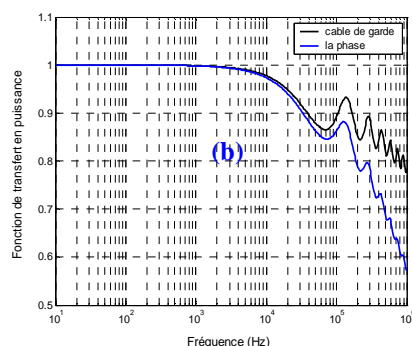
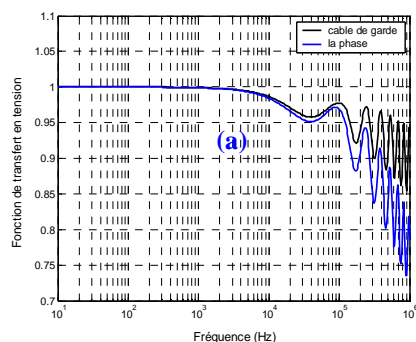


Fig. 11 La Variation Fréquentielle (a : fonction de transfert en tension, b : en puissance)

Le résultat en fig. 7, montre bien que la propagation du CPL sur le câble de garde est plus appropriée. Pour une fréquence qui ne dépasse pas les 10 KHz, nous

constatons que le rapport en puissance et en tension sur la deuxième extrémité est pratiquement le même aussi bien pour la propagation sur la phase que sur le câble de garde. La variation du rapport en puissance (figures IV.7.b, IV.9.b et IV.11.b) montre bien que la transmission de l'énergie du signal est acceptable aux alentours d'une fréquence légèrement supérieure à 100 KHz. Plus nous avançons dans la fréquence pour un meilleur débit, plus la transmission sur la phase se dégrade. Nous constatons que la seule analyse à partir des rapports de tension (Fig IV.7.a, IV.9.a et IV.11.a) n'est pas suffisante, car nous enregistrons une variation des rapports en puissance bien moindre.

Une première explication peut être donnée et consiste à affirmer que l'effet différentiel entre les phases et le câble de garde dégrade la propagation sur la phase ; ce qui justifie une plus grande utilisation du câble de garde pour la transmission des courants HF dans le réseau électrique. L'inconvénient majeur du câble de garde reste sa forte exposition aux perturbations de foudre.

VI. CONCLUSION

Afin d'adapter notre travail à la propagation des signaux HF à très faible énergie électrique sur des dispositifs à plusieurs entrées et plusieurs sorties, nous avons opté pour la modélisation par matrice S dite de répartition. L'utilisation de la matrice de répartition, ou matrice de paramètres S permet de caractériser un câble comme étant un élément de circuit aux caractéristiques connues représentable sous la forme d'un quadripôle.

Nous avons donc développé sous Matlab un code permettant la simulation de la propagation des signaux HF sur un réseau de câbles par matrice S. Afin de valider nos développements théoriques nous avons traités quelques applications. Nous avons traités la propagation sur le câble blindé en regardant l'effet de la charge. Les quelques applications que nous avons réalisées nous ont permis surtout de conclure qu'il est possible de traiter des problèmes liés à l'atténuation des signaux, à la bande passante ainsi qu'à l'effet de la dérivation en analysant surtout la puissance transmise.

VII. REFERENCE

- [1] M .Aguet et J. J. Morf, "*Energie Electrique*", Traité d'Electricité, Vol. XII.
- [2] Walter Blumer, Mireea Ianovici , *Sur les Méthodes de calcul de l'Exposant Linéique de Propagation et d'Impédance Caractéristique des Câbles Aériens et Enterrés*, ANN. TELECOMMUN.,39, N°. 9-10,1984.
- [2] S. Kaouche et B. Nekhoul, K. Kerroum et K. El Khamlichi Drissi, "Analyse des Défaits dans un Réseau de Lignes ou de Câbles", *présentée au Colloque Télécom'2003 & JFMMA*, Octobre 2003.