

# Analyse des Performances des Systèmes CPL par le Biais de la Fonction de Transfert du Réseau Électrique Domestique

S. Khedimallah\*, L. Boufenneche\*, M. Chouki\*, H. Blila\*, A/H. Bendakir\*, et B. Nekhoul\*

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

**Résumé** – Plusieurs technologies se prêtent à la réalisation d'un réseau électrique domestique, en fonction du support de transmission mis en oeuvre : Ethernet, WiFi, Courants Porteurs en Ligne (CPL). Dans le contexte de ce travail, nous nous intéressons à la transmission des hauts débits sur support filaire (CPL). Le réseau électrique domestique n'étant pas initialement conçu pour supporter des transmissions à haut débit, les performances des systèmes CPL qu'il véhicule ne sont pas optimisées. C'est pourquoi nous analysons les performances des systèmes CPL, par le biais de la fonction de transfert du réseau électrique domestique. Nous avons utilisé l'approximation du modèle multi-trajet qui nous a permis d'effectuer une étude des principaux paramètres engendrant des perturbations sur la fonction de transfert tels que la connexion d'appareils sur le réseau électrique.

**Mots clés** – Courants Porteurs en Ligne, Fonction de Transfert, Réseau Électrique Domestique, Câbles Domestiques.

## I. INTRODUCTION

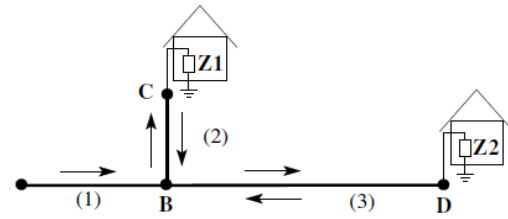
La synthèse qui suit est issue pour l'essentiel de la théorie des lignes de transmission, approche largement exploitée dans la littérature. Les premiers travaux dans le domaine sont ceux de Philipps [1] et Zimmermann [2] et constituent aujourd'hui les références les plus largement citées en ce qui concerne la modélisation du canal CPL. Dans [3] est également proposée une modélisation sous forme de matrices cascables ABCD, modélisation directement héritée de la théorie des lignes de transmission. Des études complémentaires ont permis par la suite d'apporter une précision supplémentaire à la modélisation du canal. On peut notamment citer les résultats de Sartenauer [4]-[5] basés sur la théorie des lignes multiconducteurs, ou ceux de Galli [6] prenant en compte de façon précise les phénomènes liés à l'utilisation de prises de terre.

L'intérêt de notre travail n'est donc pas de fournir un outil permettant de modéliser le canal CPL lors de simulations mais simplement de comprendre les phénomènes qui régissent le transfert de l'information d'un point à un autre d'un réseau de lignes électriques.

## II. REPONSE D'UN RESEAU FILAIRE ARBORESCENT

Le support physique de la transmission consiste en un réseau filaire arborescent de longueur très variable comportant des dériviations. Chacune de ces dériviations met en jeu une charge dont l'impédance

n'est a priori pas adaptée à l'impédance caractéristique de la ligne. En un point donné du réseau, le signal reçu est ainsi composé de plusieurs versions du signal d'origine, chacune d'entre elles étant caractérisée par un certain retard  $\tau_i$  et une certaine atténuation complexe  $C_i$  due aux effets cumulés des facteurs de réflexions ou de transmissions (Fig. 2). Fig. 1 donne une illustration des différents chemins parcourus par l'onde sur un cas simple de réseau filaire à une seule dérivation. Nous sommes donc confrontés à ce qui est communément appelé une propagation à trajets multiples.



Chemin direct:  $A-B-D$

Exemples de chemins secondaires:

$A-B-C-B-D$      $A-B-C-B-C-B-D$   
 $A-B-D-B-D$      $A-B-C-B-D-B-C-B-D$

Fig. 1 Propagation Multi-Trajet sur un Câble Électrique d'une seule Branche de Dérivation [7]

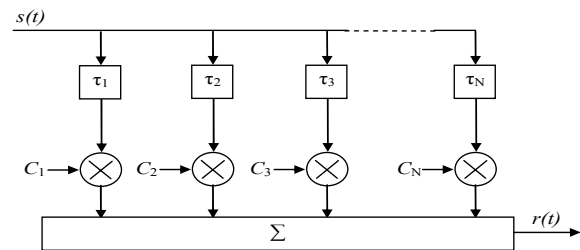


Fig. 2 Structure de Base du Modèle d'Echo

La réponse du canal peut être décrite simplement par un modèle multi-trajet (modèle d'écho). En considérant un total de  $N$  trajets distincts (Fig. 2), la réponse impulsionnelle du canal en bande de base s'écrit alors :

$$h(t) = \sum_{i=1}^N C_i \cdot \delta(t - \tau_i) \quad (1)$$

En passant dans le domaine dual par la transformée de Fourier, la fonction de transfert du canal s'exprime :

$$H(f) = \sum_{i=1}^N C_i \cdot e^{-j2\pi f \tau_i} = \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N \underbrace{g_i(f)}_{\text{gain}} \cdot \underbrace{e^{-(a_0 + a_1 \cdot f^k) d_i}}_{\text{atténuation}} \cdot \underbrace{e^{-j2\pi f \tau_i}}_{\text{retard}}$$

Le retard  $\tau_i$  résulte du temps de propagation du  $i^{\text{ème}}$  trajet, et peut être évalué en divisant la longueur  $d_i$  du trajet par la vitesse de phase  $v_i$  de l'onde :

$$\tau_i = \frac{d_i}{v_i} \quad (3)$$

$$v_i = \frac{\omega}{\beta}, \quad \omega = 2\pi f \quad (4)$$

Le coefficient de réflexion  $\Gamma$  est déterminé pour une charge de terminaison, une connexion série par un câble et plusieurs câbles connectés dans une jonction. Ces cas sont définis en Fig. 3 par (5), (6) et (7), respectivement [8,9].

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c} \quad (5)$$

$$\Gamma = \frac{Z_{ct} - Z_c}{Z_{ct} + Z_c} \quad (6)$$

$$\Gamma = \frac{\{Z_{c1} \| Z_{c2} \| \dots \| Z_{cn}\} - Z_c}{\{Z_{c1} \| Z_{c2} \| \dots \| Z_{cn}\} + Z_c} \quad (7)$$

avec  $\{Z_{c1} \| Z_{c2} \| \dots \| Z_{cn}\}$  la combinaison parallèle de plusieurs impédances caractéristiques  $Z_{c1}, Z_{c2}, \dots, Z_{cn}$ , tandis que le coefficient de transmission  $T$  est en conséquence estimé par :

$$T = 1 + \Gamma \quad (8)$$

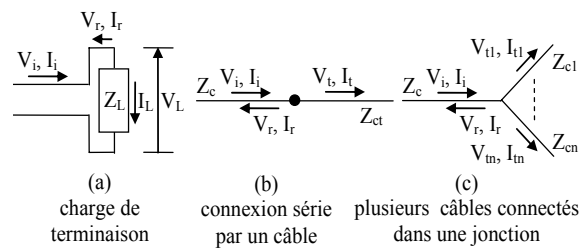


Figure. 3 Different Types de Connexion avec un Câble d'Impedance Caracteristique  $Z_c$

### III. APPROXIMATION DU MODELE MULTI-TRAJET [10,11]

Pour un réseau électrique de  $N$  branches, si les réflexions en arrière des branches sont ignorées, la fonction de transfert totale de ce réseau peut être se rapprochée par la multiplication des fonctions de transfert de  $N$  réseaux, chacun contient une seule branche, comme le montre la Fig. 4.

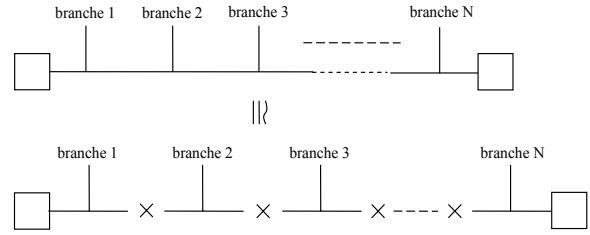


Fig. 4 Approximation de la Fonction de Transfert pour un Réseau de N Branches

Avec l'approximation ci-dessus, l'analyse de réseau peut être réalisée par un simple réseau d'une branche comme le montre la Fig. 5.

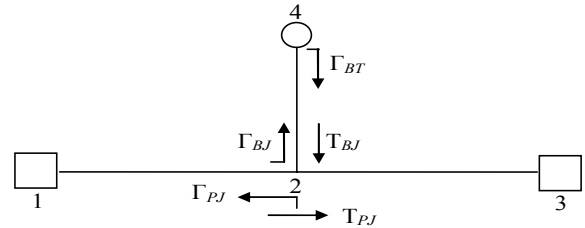


Fig. 5 Propagation du Signal sur un Réseau d'une seule Branche

Ce réseau est défini par les terminaisons 1, 3, 4, et la jonction 2. Il est constitué de trois segments de longueurs  $l_{12}$ ,  $l_{23}$  et  $l_{24}$ , d'impédances caractéristiques  $Z_{12}$ ,  $Z_{23}$  et  $Z_{24}$ .  $\Gamma_{BT}$  : est le coefficient de réflexion de la terminaison de la branche.  $\Gamma_{PJ}$  et  $\Gamma_{BJ}$  sont respectivement les coefficients de réflexion du tronçon de la ligne et de la branche à la jonction, et  $T_{PJ}$  et  $T_{BJ}$  sont les coefficients de transmission respectifs. Les trajets (les chemins) de propagation du signal sont résumés dans le tableau I [10, 12].

TABLEAU I  
TRAJETS DE SIGNAL DANS LE RESEAU

NUMÉRO DU TRAJET	TRAJET DU SIGNAL	FACTEUR D'ATTÉNUATION ( $g_i$ )	LONGUEUR DU TRAJET ( $d_i$ )
1	$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$	$T_{PJ}$	$l_{12} + l_{23}$
2	$1 \rightarrow 2 \rightarrow 4$ $\rightarrow 2 \rightarrow 3$	$T_{PJ} \cdot \Gamma_{BT} \cdot T_{BJ}$	$l_{12} + 2 \cdot l_{24} + l_{23}$
N	$1 \rightarrow 2 \rightarrow (4 \rightarrow 2)^{N-1} \rightarrow 3$	$T_{PJ} \cdot \Gamma_{BT} \cdot (\Gamma_{BJ} \cdot \Gamma_{BT})^{N-2} \cdot T_{BJ}$	$l_{12} + 2(N-1) \cdot l_{24} + l_{23}$

Les coefficients de réflexion et de transmission sont définis par les équations suivantes :

$$\Gamma_{BT} = \frac{Z_4 - Z_{24}}{Z_4 + Z_{24}} \quad (9)$$

$$\Gamma_{PJ} = \frac{\{Z_{23} \parallel Z_{24}\} - Z_{12}}{\{Z_{23} \parallel Z_{24}\} + Z_{12}} \quad (10)$$

$$\Gamma_{BJ} = \frac{\{Z_{12} \parallel Z_{23}\} - Z_{24}}{\{Z_{12} \parallel Z_{23}\} + Z_{24}} \quad (11)$$

$$T_{PJ} = 1 + \Gamma_{PJ} \quad (12)$$

$$T_{BJ} = 1 + \Gamma_{BJ} \quad (13)$$

avec :  $Z_4$  est l'impédance de charge de la terminaison 4.

*Remarque :*

Pour les deux modèles multi-trajet et leur approximation, nous avons représenté la fonction de transfert pour un générateur de tension idéal ( $Z_s = 0$ ). Pour un réseau électrique pratique, c'est-à-dire l'impédance  $Z_s$  n'est pas nulle (Fig. 6), le calcul de la fonction de transfert implique l'addition d'un facteur scalaire [8, 13]. La nouvelle expression de la fonction de transfert devient donc comme suit :

$$H(f)_{nouvelle} = \frac{Z_c}{Z_c + Z_s} \cdot H(f) \quad (14)$$

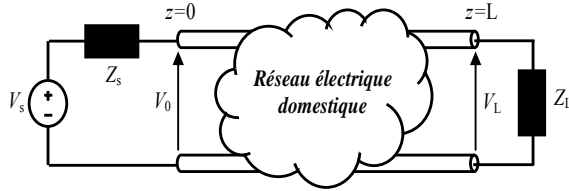


Fig. 6 Représentation Générale d'un Réseau Electrique Domestique

#### IV. VALIDATION POUR UN RESEAU ARBORESCENT

La configuration du réseau utilisé est illustrée en Fig. 7, dont les terminaisons des trois branches sont en circuit ouvert.

Les données physiques sont :

L'impédance caractéristique du câble de la branche :  $Z_{cbr} = 50\Omega$  ;

L'impédance caractéristique du câble de la ligne principale :  $Z_c = 100\Omega$  ;

Les impédances des deux extrémités de la ligne principale :  $Z_s = 50\Omega$ ,  $Z_L = Z_c$  ;

La vitesse de propagation du signal :  $v = \sqrt{0,4} \cdot c$  ;

Paramètres empiriques utilisés :  $k = 1$ ,  $a_0 = 0$ ,  $a_1 = 7,8 \cdot 10^{-10}$ .

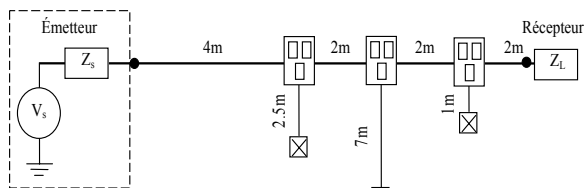


Fig. 7 Configuration du Réseau de Mesure

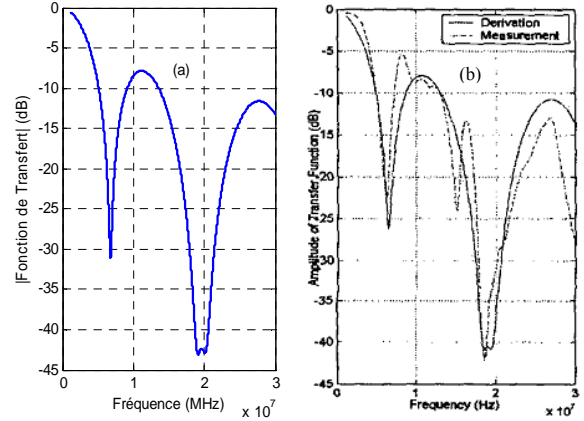


Fig. 8 Amplitude de la Réponse du Réseau à 3 Branches, (a) : Notre Résultats, (b) : Publiée en [10]

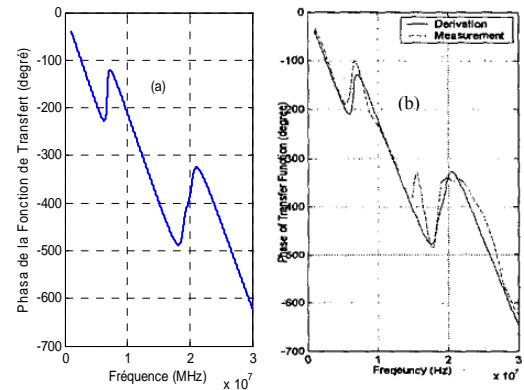


Fig. 9 Angle de Phase de la Réponse du Réseau à 3 Branches, (a) : Notre Résultats, (b) : Publiée en [10]

Nous constatons en Fig. 8.a que l'amplitude de la fonction de transfert calculée en utilisant l'approximation du modèle multi-trajet est assez proche de celle mesurée (Fig. 8.b [10]). Nous pouvons faire la même constatation sur la phase en Fig. 9.

#### V. APPLICATIONS

Nous considérons une ligne d'énergie électrique typique en basse tension. Nous présentons les résultats de notre analyse, appliquée à une variété de configurations de fil. Dans toutes les études, nous considérons  $Z_L = Z_s = 50\Omega$  et les paramètres linéiques de la ligne sont  $L = 0.327 \mu H / m$  et  $C = 66.9 pF / m$ .

##### A. Influence de la Longueur de Branche

L'étude est réalisée sur un canal avec une seule branche. La configuration correspondante est donnée en Fig. 10. Sur cette figure,  $l_1 = l_2 = 15m$  ( $l_1$  et  $l_2$  sont des longueurs des deux tronçons de ligne),  $d_{11}$  est la longueur de la branche qui varie suivant les valeurs 5m, 10m, 15m et 20m, la charge  $Z_{br11}$  a été terminée en circuit ouvert, tandis que  $Z_{c1}$ ,  $Z_{c2}$  et  $Z_{dc11}$  sont des impédances caractéristiques ( $Z_{c1} = Z_{c2} = Z_{dc11} = 69.9 \Omega$ ).

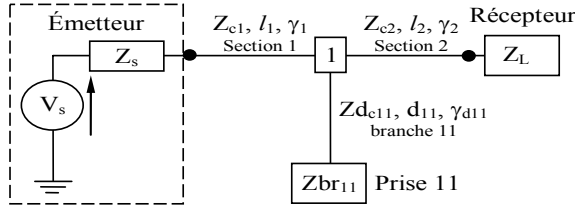


Fig. 10 Configuration du Réseau Etudié d'une seule Branche

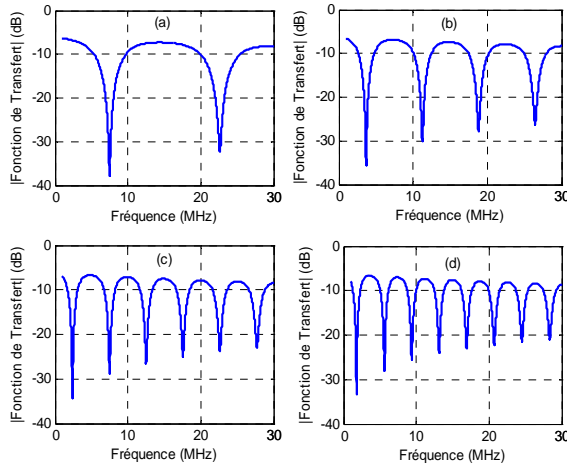


Fig. 11 Résultats de Simulation pour la Ligne Electrique d'une seule Branche de Dérivation de Longueur (a) 5 m, (b) 10m, (c) 15m et (d) 20m

En faisant varier la longueur de la dérivation, nous constatons (Fig. 11) que la fonction de transfert ne s'atténue pas mais présente plusieurs lobes et des encoches de même largeur de bande.

Quand la distance de branche augmente, le nombre de fréquences qui conduisent à une atténuation de -40 dB augmente ce qui réduit la bande passante.

### B. Influence le Nombre de Branches

Pour analyser l'effet du nombre de branches, nous considérons la configuration indiquée en Fig. 12. La longueur de la ligne principale (émetteur-récepteur) a été maintenue constante à 60 m, i.e :  $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = 15$  m, avec une, deux et trois branches distribuées. Toutes les branches ont été de 5 m de longueur ( $d_{11} = d_{21} = d_{31} = 5$  m) et les charges  $Z_{br11}$ ,  $Z_{br21}$  et  $Z_{br31}$  sont terminées en circuit ouvert, tandis que  $Z_{dc11}$ ,  $Z_{dc21}$  et  $Z_{dc31}$  sont les impédances caractéristiques.

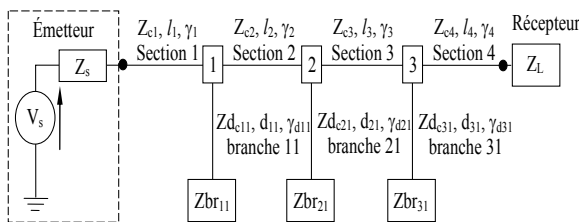


Fig. 12 Réseau Electrique d'une seule Branche à Chaque Nœud

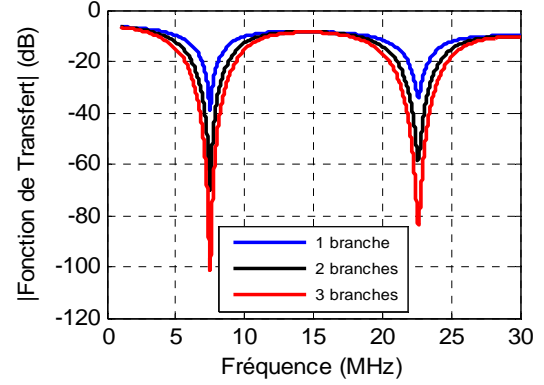


Fig. 13 Résultats de Simulation avec les Branches Distribuée, 1 Branche, 2 Branches et 3 Branches

La Fig. 13 représente la fonction de transfert pour différents nombres de branches. Nous avons noté que les positions des encoches ne sont pas modifiées, mais à mesure que le nombre de branches augmente les atténuations du point encoché tendent à augmenter.

Nous avons observé le même résultat, en utilisant le modèle de matrices cascables [14], pour un réseau électrique (Fig. 10 avec  $d_{11}=5$ m) avec plusieurs branches connectées dans une jonction (noeud) (Fig. 14). En fait, les positions des encoches ne sont pas modifiées et l'augmentation du nombre de branches permet d'augmenter l'amplitude de la réponse aux points d'encoches.

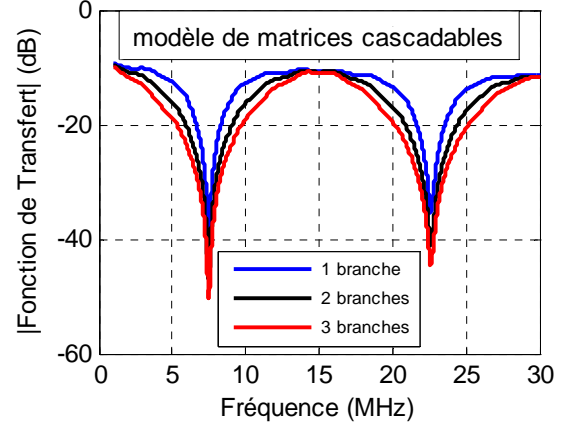


Fig. 14 Résultats de Simulation avec les Branches Distribuée, 1 Branche, 2 Branches et 3 Branches dans une Jonction.

### C. Cas de Prises non Utilisées

Il est possible que les charges à la terminaison des branches ne soient pas seulement en circuit ouvert. Pour ce qui va suivre nous considérons la configuration en Fig. 10. La longueur de la ligne principale a été maintenue constante à 30 m ( $l_1 = l_2 = 15$ m) tandis que la branche, a une longueur de 10m, est connectée au milieu de la ligne principale. La terminaison  $Z_{br11}$  est variable en fonction de l'impédance de charge donnée dans le cadre de notre étude.

Nous étudions la fonction de transfert relevée entre l'émetteur et le récepteur pour plusieurs

configurations de la terminaison  $Z_{br_{11}}$  (Prise 11).

1) *Configuration CO* : dans un premier temps, nous considérons une prise électrique sur laquelle aucun dispositif n'est connecté. Elle se comporte alors en circuit ouvert.

2) *Configuration CC* : si maintenant il existe un défaut sur la ligne, un court circuit peut être provoqué, engendrant des perturbations de la fonction de transfert du canal.

3) *Configuration 200  $\Omega$*  : imaginons adapter le mode différentiel de propagation de la ligne et voyons l'impact sur la fonction de transfert.

4) *Configuration  $Z_c$*  : nous adaptons ici complètement la ligne ( $Z_c = 69.9 \Omega$ ).

Pour l'impédance de charge en court-circuit et en circuit ouvert les sommets (les pics) et les encoches sont décalés en positions de fréquence avec la même atténuation. Cependant, pour la l'impédance caractéristique les pics et les encoches sont disparues (voir Fig. 15).

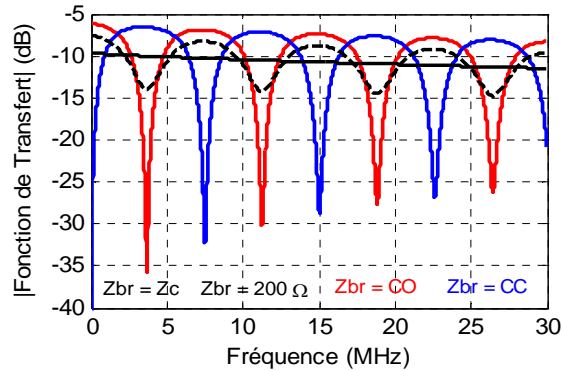


Fig. 15 Résultats de Simulation d'un Réseau d'une seule Branche se Terminant en Circuit Ouvert, en Court-Circuit, 200  $\Omega$  et l'Impédance Caractéristique

Nous constatons aussi (Fig. 15) que la fonction de transfert de la ligne terminée sur des prises en circuit ouvert (CO) subit des évanouissements conséquents pouvant descendre jusqu'à -36 dB.

La simulation d'un court circuit (CC) engendre de fortes perturbations sur la fonction de transfert qui connaît des évanouissements de -32 dB.

L'utilisation d'une résistance de 200  $\Omega$  pour adapter la ligne permet de limiter ces fluctuations et de conserver un niveau plus stable, compris entre -14 et -8 dB.

L'utilisation l'impédance caractéristique ( $Z_c$ ) permet d'adapter complètement la ligne et de remonter le niveau de la fonction de transfert de -12 à -10 dB, par rapport à l'utilisation d'une résistance de 200  $\Omega$ . Cette dernière n'est donc pas suffisante pour adapter correctement la ligne.

Adapter les prises non utilisées permet ainsi de conserver un niveau de la fonction de transfert constant et d'éviter les évanouissements intervenant à certaines fréquences lorsqu'elles sont laissées en circuit ouvert, garantissant par conséquent une stabilité du canal de transmission.

#### D. Cas où Toutes les Prises sont Utilisées

Dans les applications précédentes nous avons considérés que les prises sont ouvertes (sans charges). Afin de traiter des cas réels, nous étudions maintenant l'influence des appareils électroménagers, connectés aux prises, sur les performances de la fonction de transfert du réseau électrique domestique. Nous proposons les deux appareils suivant : TV-LCD et micro-onde (*Micro-wave*).

La Fig. 16 illustre l'impédance mesurée de TV-LCD et de micro-onde, dans la bande fréquentielle [1-30] MHz. Ces appareils sont utilisés dans le réseau représenté en Fig. 10 avec  $d_{11}=10m$ .

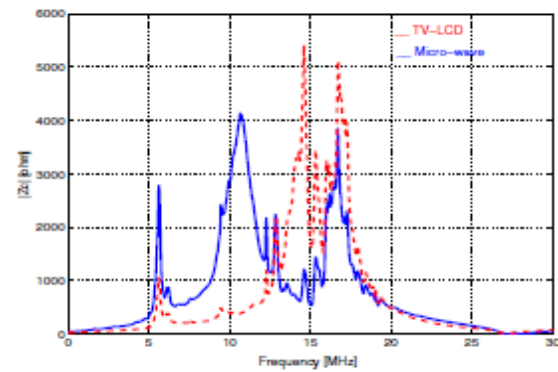


Fig. 16 Impédances des Charges TV-LCD et Micro-onde Publiées en [14]

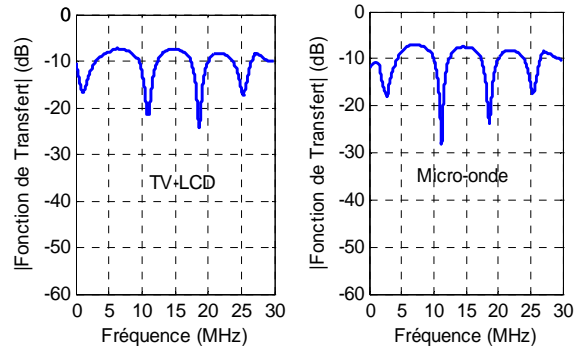


Fig. 17 Fonction de Transfert d'un Réseau avec une Branche se Terminant par les Charges de TV-LCD et Micro-onde Respectivement

Nous notons que l'introduction d'appareillages électriques (Fig. 17) provoque une forte variation de l'amplitude de la fonction de transfert en fonction de la fréquence, nous notons une réduction du canal de transmission (disparition de certaines fréquences de transmission).

## VI. CONCLUSION

Pour l'analyse de la propagation des CPL en domestique nous avons opté pour un type de modélisation (Approximation du modèle multi-trajet). Nous avons utilisé ce modèle qui nous a permis d'effectuer une étude des principaux paramètres

engendrant des perturbations sur la fonction de transfert. La position des encoches dans la réponse fréquentielle dépend de la longueur des branches. L'augmentation de la longueur des branches tend à limiter la bande passante disponible dans le réseau électrique domestique, mais la position des encoches profondes ne change pas avec le nombre de branches distribuées. Comme le nombre des branches distribuées augmente, l'amplitude de la réponse aux points d'encoches tend à augmenter. L'impédance des charges électroménagers sont également mesurées et leur influence sur la fonction de transfert du réseau électrique domestique sont analysées.

## 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] H. Philipps, "Development of a Statistical Modem for Powerline Communications Channels", *In Proc. IEEE International Symposium on Power-Line Communications and Its Applications (ISPLC)*, vol. 5, pages 2049–2053, avril 2000.
- [2] Manfred Zimmermann et Klaus Dostert, "A Multipath Model for the Powerline Channel", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, n 4, pages 553–559, avril 2002.
- [3] T.C. Banwell et S. Galli, "A New Approach to the Modelling of the Transfer Function of the Power Line Channel", *Proc. IEEE International Symposium on Power-Line Communications and Its Applications (ISPLC)*, pages 319–324, avril 2001.
- [4] T. Sartenar, F. Horlin et L. Vandendorpe, "Multiple Access Techniques for Wideband Upstream Powerline Communications: CAP-CDMA and DMT-FDMA", *In Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC)*, vol. 2, pages 1064–1068, Décembre 2000.
- [5] T. Sartenar et P. Delogne, "Powerline Cables Modelling for Broadband Communications", *In Proc. IEEE International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC)*, pages 331–338, avril 2001.
- [6] S. Galli et T.C. Banwell, "Modeling the Indoor Powerline Channel: New Results and Modem Design Considerations", *In Proc. IEEE Consumer communications and networking conference (CCNC)*, janvier 2004.
- [7] M. Crussiere, "Etude et optimisation de communications à haut-débit sur lignes d'énergie : exploitation de la combinaison OFDM/CDMA", Institut national des sciences appliquées de Rennes, 28 novembre 2005.
- [8] Ioannis C. Papaleonidopoulos, Constantinos G. Karagiannopoulos and Nickolas J. Theodorou, "Transmission Systems Travelling-wave multipath simulation of two-conductor HF signalling over indoor power-line networks and RMS-delay-spread dependence", Wiley InterScience, September 2006.
- [9] Ioannis C. Papaleonidopoulos, Christos N. Capsalis, Constantinos G. Karagiannopoulos, and Nickolas J. Theodorou, "Statistical Analysis and Simulation of Indoor Single-phase Low Voltage Power-Line Communication Channels on the basis of Multipath Propagation", *IEEE Trans. on consumer electronics*, vol.49, No. 1, pp.89-99, 2003.
- [10] H. Meng, S. Chen, Y. L. Guan, C. L. Law, P. L. So, E. Gunawan, T. T. Lie, "A Transmission Line Model for High-Frequency Power Line Communication Channel", *IEEE/PES-CSEE International Conference on Power System technology - PowerCon 2002*, Kunming, China, 13-17 October 2002.
- [11] H. Meng, S. Chen, Y. L. Guan, C. L. Law, P. L. So, E. Gunawan, T. T. Lie, "Modeling of Transfer Characteristics for the Broadband Power Line Communication Channel", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 3, July 2004.
- [12] Haibo He, Shijie Cheng, Youbing Zhang, and J. Nguimbis, "Analysis of Reflection of Signal Transmitted in Low-Voltage Powerline with Complex Wavelet", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, n° 1, January 2004.
- [13] D. Anastasiadou and Th. Antonakopoulos, "Multipath Characterization of Indoor Power Line Networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, VOL. 20, NO. 1, JANUARY 2005, pp. 90 – 99.
- [14] A. Rennane, C. Konaté, M. Machmoum, "A Simplified Deterministic Approach for accurate Modeling of the Indoor Power Line Channel", *The Third International Conference on Systems and Networks Communications*, Pages 121-126, ISBN:978-0-7695-3371-1, Oct.2008.