

Modélisation des disjoncteurs domestiques dans la bande CPL

Richard NIZIGIYIMANA¹, Jean Charles LE BUNETEL¹, Yves RAINGEAUD¹, Anouar ACHOURI¹, Philippe RAVIER², Guy LAMARQUE²

¹Université de Tours-GREMAN UMR 7347, ² Université d'Orléans-PRISME

RESUME –Les études portant sur l'impact des éléments de protection du réseau électrique domestique sur les signaux CPL (courant porteur en ligne) manquent. Ce travail investigate l'effet des disjoncteurs domestiques dans la bande CPL. Avec un analyseur de réseau, les pertes d'insertion (paramètres S_{21}) d'une dizaine de disjoncteurs de différents calibres et fabricants ont été mesurées. D'une part, l'atténuation des disjoncteurs dans la bande bas débit (9kHz-500 kHz) est faible. D'autre part, ils induisent une atténuation importante dans la bande haut débit (1MHz-100MHz). Ces pertes dépendent surtout du courant nominal et du type de disjoncteur (branchement, différentiel, divisionnaire). En tenant compte de leur structure, un circuit électrique équivalent des disjoncteurs est proposé et validé en comparant les simulations aux mesures. Ce circuit pourra être intégré dans un simulateur CPL.

Mots-clés—CPL, disjoncteurs, pertes d'insertion, modélisation.

1. INTRODUCTION

Les communications par courant porteur en ligne utilisent le réseau électrique comme support de communication. Cette technologie offre l'avantage de créer un réseau sans la pose de câbles supplémentaires. Les scénarios indoor communiquent sur le réseau électrique domestique. Le CPL outdoor est utilisé par les opérateurs d'énergie pour le contrôle et la commande des sous stations de service. Les communications bat débit utilisent des bandes de fréquences allant de 9 kHz à 500 kHz tandis que les applications haut débit utilisent la bande [1-100] MHz.

Le CPL bas débit est utilisé depuis des années dans la domotique. Avec le déploiement du réseau électrique intelligent (smart grid), les standards CPL sont des candidats bien placés pour communiquer avec les appareils domestiques. Le CPL haut débit peut être utilisé comme une alternative dans les endroits où la mise en place de l'ADSL n'est pas rentable. Il permet surtout de partager les données (internet, télévision, téléphone) entre les pièces d'un logement sans l'ajout de câbles supplémentaires. Néanmoins, les capacités de canal du réseau diffèrent largement d'une habitation à une autre [2] à cause des disparités des installations électriques et des appareils. Chaque dérivation sur le trajet direct peut introduire un évanouissement de la fonction de transfert. Les charges électriques affectent aussi les performances des communications par leurs impédances [3] et leurs bruits impulsifs.

Cette étude se rapporte au projet CPLDIAG dont l'objectif est de développer un outil logiciel capable de qualifier de façon déterministe n'importe quel réseau électrique domestique vis-à-vis du CPL. Ceci passe par une maîtrise de ces éléments impactant les communications CPL. Ainsi, dans [4] [5], Les impédances et les bruits impulsifs de 100 appareils domestiques ont été mesurés. De par leurs impédances, les appareils ont été classés en 5 classes et un modèle de chaque classé développé. Dans [6], un câble électrique est modélisé par ses paramètres primaires RLGC et leurs variations fréquentielles exprimées par des polynômes. Concernant la modélisation de la fonction de transfert, plusieurs méthodes existent dans la littérature. Les plus courantes sont basées sur la décomposition du réseau en cascade de quadripôles représentés par des matrices chaines [7] [8], des paramètres de répartition [9], des filtres à réponse impulsionnelle infinie [10] ou sur l'approche multi trajets [11]. Afin de faire un choix judicieux, ces méthodes ont été comparées et l'analyse nous a orientés vers l'approche multi trajet.

Les seuls éléments du canal qui restent à appréhender ce sont les équipements de protection tels que les disjoncteurs. L'objectif de ce papier est d'étudier l'influence des disjoncteurs sur les signaux CPL.

La deuxième partie présente la constitution du réseau électrique domestique et matérialise le nombre de disjoncteurs que le signal CPL traverse dans les applications courantes. La troisième partie présente les mesures des pertes d'insertion dans la bande CPL effectuées sur une dizaine de disjoncteurs. La quatrième section établit et valide le circuit équivalent des disjoncteurs et montre qu'il peut être intégré dans la modélisation globale d'un réseau complexe.

2. RESEAU ELECTRIQUE DOMESTIQUE

Dans chaque pays, il existe une norme régissant la composition du réseau électrique domestique. Selon la norme NFC 15-100, une habitation est connectée au réseau de distribution à l'aide d'un disjoncteur de branchement (Fig.1). Celui-ci permet au fournisseur d'énergie de régler la puissance souscrite. Dans la version actuelle, les disjoncteurs différentiels qui protègent les personnes contre une éventuelle électrocution due au courant de fuite sont obligatoires. Leur nombre dépend de la surface du logement. Chaque circuit d'usage (prises de courant, chauffage, cuisinière, frigo, éclairage, etc.) est protégé contre les surcharges par un disjoncteur divisionnaire. La

norme spécifie le courant nominal de chaque disjoncteur. Les prises sont protégées par un disjoncteur divisionnaire de 16 ou 20A.

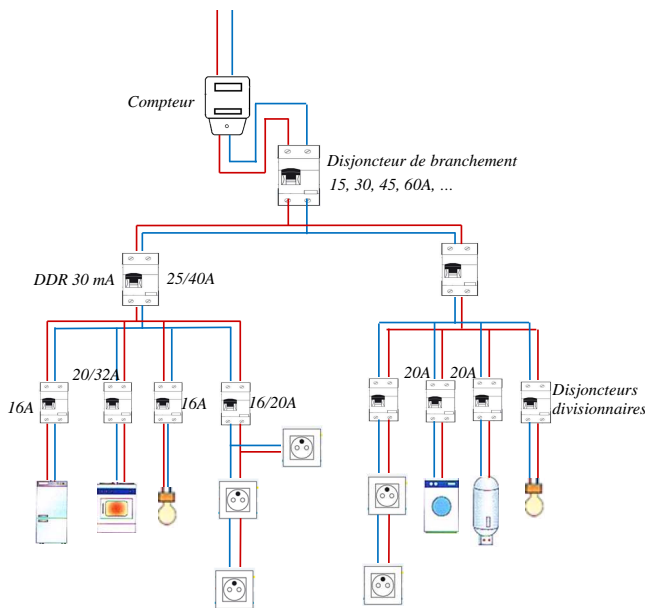


Fig.1 Réseau électrique domestique respectant la norme NFC 15-100 [1]

Dans les applications haut débit [1-100] MHz, le CPL peut être utilisé comme technologie d'accès internet. Dans ce cas, le signal internet direct traversera 3 disjoncteurs (branchement, différentiel, divisionnaire) avant d'atteindre un modem connecté aux prises électriques. L'application la plus aboutie est le partage de données entre toutes les pièces d'une habitation. Le signal peut traverser 0, 2, 4 disjoncteurs (16/20A et ou 25/40A) selon la position relative des équipements communicants.

Concernant les applications bas débit [9-500] kHz, le CPL est utilisé, en plus de la domotique, dans le smart home pour la commande et le contrôle des appareils domestiques. N'importe quel disjoncteur peut être traversé par ce signal car tous les usages sont concernés.

Si l'atténuation d'un disjoncteur n'est pas négligeable, les pertes cumulées de tous les disjoncteurs seront considérables. La partie suivante présente les mesures de pertes d'insertion.

3. PERTES D'INSERTION DES DISJONCTEURS

Une dizaine de disjoncteurs a été caractérisée en mesurant les paramètres S avec un analyseur de réseau (Fig.2).

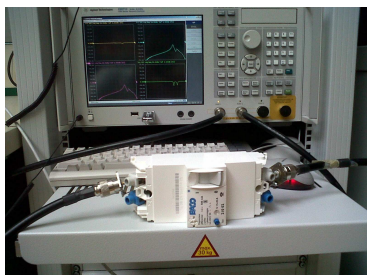


Fig. 2 Mesure des pertes d'insertion d'un disjoncteur avec un analyseur de réseau. La connectique est prise en compte lors de l'étape de calibration

Ils sont de 4 fabricants : Legrand, Schneider, Merlin Guerin et Hager. Pour Legrand, il s'agit d'un disjoncteur de branchement avec un courant nominal réglable à 15, 30, et 45A, un disjoncteur différentiel 25A, 4 disjoncteurs divisionnaires de 20, 16, 10 et 2A. Les autres sont des disjoncteurs divisionnaires Schneider 10A, Merlin Guerin 16A et Hager 32A.

3.1. Dans la bande bas-débit (9kHz-500kHz)

Le signal direct bas-débit peut traverser n'importe quel disjoncteur (voir section 2). L'atténuation des disjoncteurs dans cette bande est négligeable (Fig.3). L'atténuation maximale est de 3dB pour le disjoncteur de 2A. Pour les autres, elle ne dépasse pas 0.05dB.

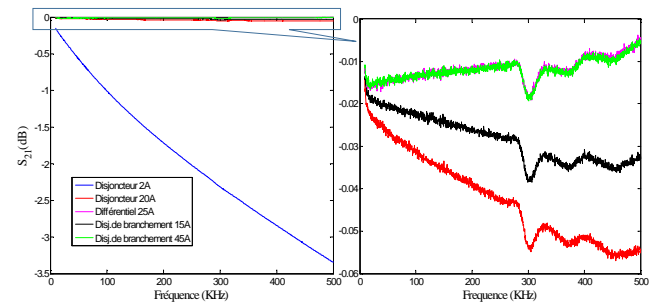


Fig. 3 Pertes d'insertion des disjoncteurs dans la bande [9-500] kHz

3.2. Dans la bande haut débit (1MHz-100MHz)

Nous avons vu dans la section 2 que le signal direct haut débit ne traverse que les disjoncteurs divisionnaires 16/20A protégeant les prises, les différentiels et le disjoncteur de branchement.

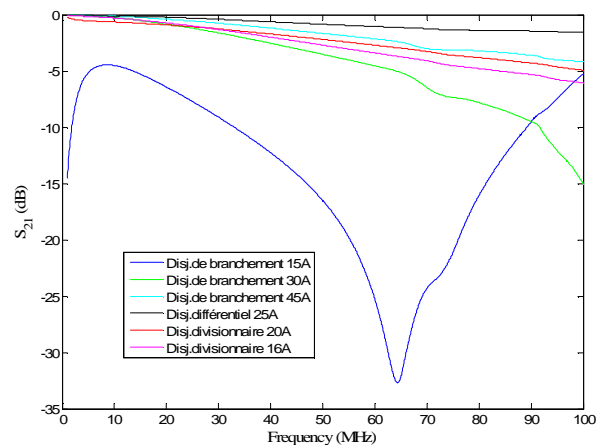


Fig.4 Pertes d'insertion des disjoncteurs dans la bande [1-100] MHz

La Fig.4 présente les mesures dans la bande [1-100] MHz. Les pertes des disjoncteurs sont cette fois-ci importantes. D'une part, les pertes dépendent du type de disjoncteur (branchement, différentiel, divisionnaire). Le disjoncteur de branchement présente la plus grande atténuation avec un pic de 30 dB à 65 MHz. D'autre part, les pertes dépendent du courant nominal du disjoncteur. Ceux présentant un courant nominal faible induisent une plus grande atténuation.

L'influence du fabricant est minime car deux disjoncteurs de même courant nominal mais de fabricants différents induisent des atténuations très proches (Fig.5). La section suivante déduit le circuit équivalent d'un disjoncteur de par sa composition interne.

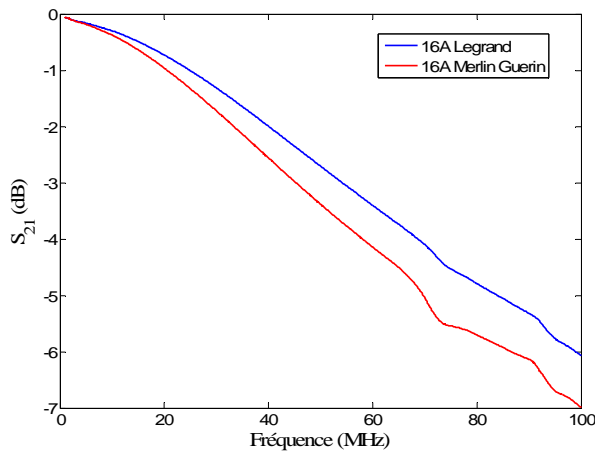


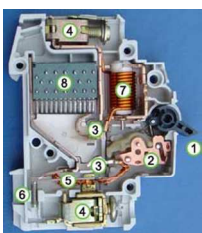
Fig. 5 Influence du fabricant. Deux disjoncteurs de même courant nominal et de fabricants différents présentent des atténuations proches.

4. MODELISATION D'UN DISJONCTEUR

Cette section déduit le circuit équivalent d'un disjoncteur de par sa composition interne. Le modèle est validé en comparant les simulations aux mesures. Un exemple de modélisation de la fonction de transfert d'un réseau électrique comportant des disjoncteurs est donné.

4.1. Circuit équivalent

La Fig.6 présente les composants internes d'un disjoncteur magnéto thermique. Le circuit conducteur est composé d'un solénoïde, d'un contacteur métallique et d'un bilame. Le solénoïde protège contre un courant de court-circuit et le bilame contre un courant de surcharge. Le fil de neutre est parallèle au fil de phase et n'est pas composé de ces éléments pour un disjoncteur unipolaire.



1. Manette d'armement
2. Mécanisme lié à la manette
3. Contacts qui se séparent en cas de coupure
4. Connecteurs
5. Bilame (protection contre la surcharge)
6. Vis de calibration servant à régler le courant nominal
7. Solénoïde (protection contre court-circuit)
8. Chambre de coupure de l'arc électrique

Fig. 6 Eclaté d'un disjoncteur magnéto thermique [12]

La Fig.7 donne le circuit équivalent du disjoncteur. Les paramètres R et L représentent respectivement la résistance et l'inductance du circuit conducteur. C représente la capacité du condensateur formé par la phase et le neutre. G représente les pertes dans le diélectrique servant comme isolant.

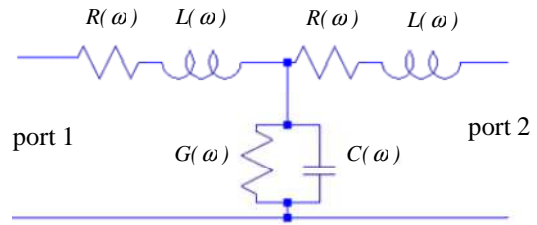


Fig.7 Circuit équivalent d'un disjoncteur. R et L représentent la résistance et l'inductance du conducteur, C la capacité entre phase et neutre et G les pertes dans le diélectrique.

Lorsque le port 2 du quadripôle de la Fig.7 est en court-circuit, G et C deviennent négligeables. L'impédance en court-circuit Z_{cc} est ainsi exprimée par (1). En circuit ouvert, le courant de sortie est négligeable et l'impédance en circuit ouvert Z_{co} est équivalente à G/C (2). Les paramètres R , L , C et G sont déduits des impédances du disjoncteur en court-circuit et en circuit ouvert (eq.3-7).

$$\bar{Z}_{cc}(\omega) = 2R + j2L\omega \quad (1)$$

$$\bar{Z}_{co}(\omega) = (G + jC\omega)^{-1} \quad (2)$$

$$R(\omega) = \frac{1}{2} \text{réel}\{\bar{Z}_{cc}\} \quad (3)$$

$$L(\omega) = \frac{1}{2\omega} \text{imag}\{\bar{Z}_{cc}\} \quad (4)$$

$$G(\omega) = \text{réel}\{\bar{Z}_{co}^{-1}\} \quad (6)$$

$$C(\omega) = \frac{1}{\omega} \text{imag}\{\bar{Z}_{co}^{-1}\} \quad (7)$$

Les impédances en court-circuit et en circuit ouvert peuvent être mesurées avec un analyseur d'impédance ou un analyseur de réseau. Les Figures 8, 9, 10 et 11 affichent les paramètres RLCG pour le disjoncteur Legrand 16A. Ils peuvent être exprimés en fonction de la fréquence par un polynôme.

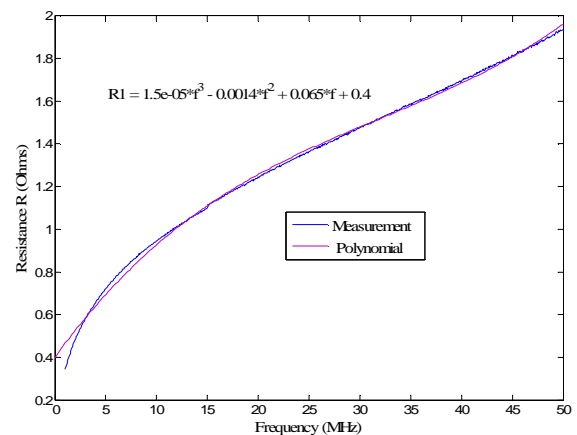


Fig.8 Résistance R du disjoncteur divisionnaire Legrand 16A

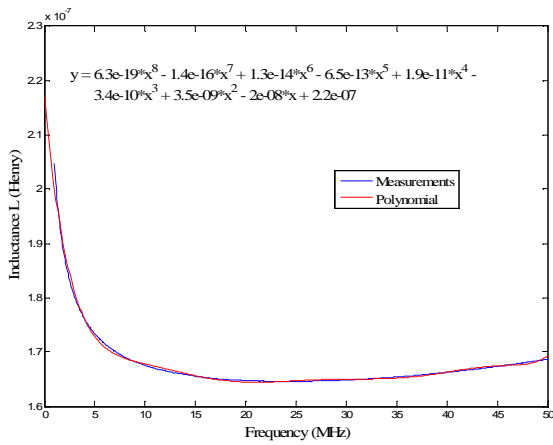


Fig.9 Inductance L disjoncteur divisionnaire Legrand 16A

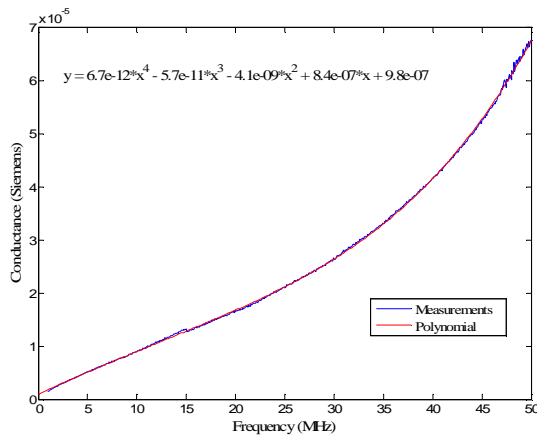


Fig.10 Composante G du disjoncteur divisionnaire Legrand 16A

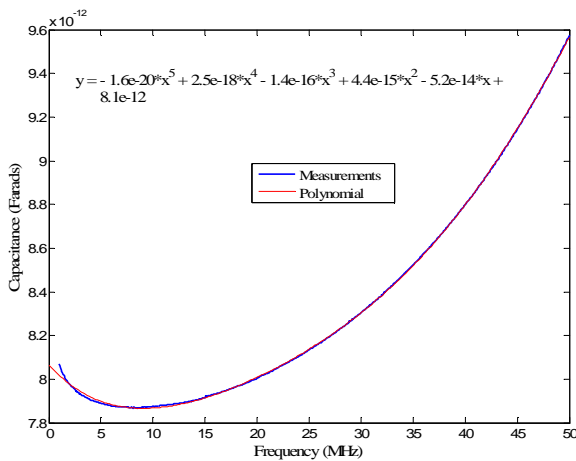


Fig.11 Composante C du disjoncteur divisionnaire Legrand 16A

4.2. Validation du circuit équivalent

Le circuit équivalent d'un disjoncteur (Fig.7) est représenté sous LTSpice et la matrice de répartition (paramètres S) simulée. La variation fréquentielle des éléments RLCG est représentée par les polynômes de la Fig.8. Les simulations sont alors comparées aux mesures. Il y a une bonne concordance

entre les simulations et les mesures pour tous les disjoncteurs. Ce qui valide le circuit équivalent proposé. La Fig.12 donne un exemple pour le disjoncteur 16A.

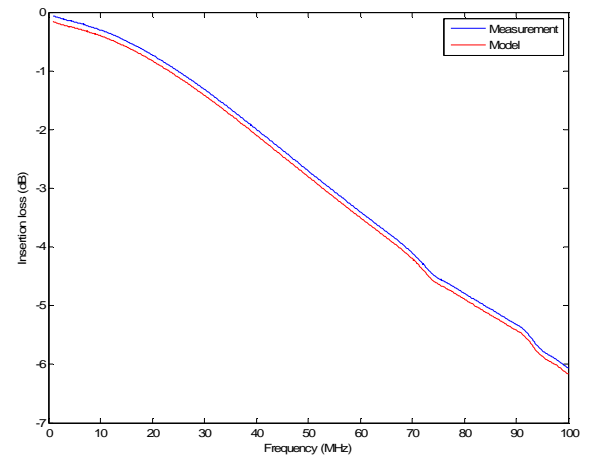


Fig.12: Pertes d'insertion simulées dans LTSpice avec le circuit équivalent du disjoncteur divisionnaire Legrand 16A comparées aux mesures

4.3. Intégration dans la simulation d'un réseau électrique

Nous cherchons à modéliser le réseau simple de la Fig.13 comprenant 3 disjoncteurs. Il correspond au trajet direct d'un signal venant de l'extérieur jusqu'à une prise de courant. Les disjoncteurs sont ainsi remplacés par leurs circuits équivalents (Fig.14). Par la suite, n'importe quelle méthode de modélisation peut être utilisée pour calculer la fonction de transfert ou les pertes d'insertion entre l'émetteur et le récepteur. La méthode de la matrice chaîne [7] est utilisée ici pour calculer le paramètre S_{21} du réseau. D'après cette méthode, le réseau de la Fig.13 est constitué d'une cascade de 7 quadripôles : la ligne de 1m, le disjoncteur de branchement 15A, la ligne de 25cm, le disjoncteur différentiel 25A, etc.

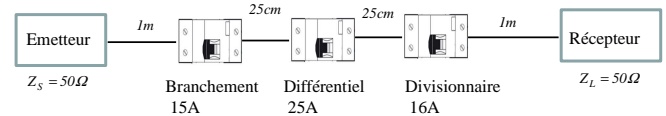


Fig.13 Réseau électrique sans dérivations comportant 3 disjoncteurs (branchement, différentiel, divisionnaire)

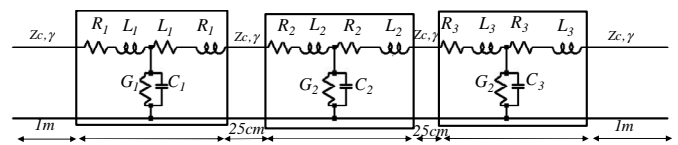


Fig.14 Modélisation du réseau de la Fig.10. Chaque disjoncteur est remplacé par son circuit équivalent et chaque quadripôle représenté par sa matrice chaîne

La matrice chaîne d'une ligne de transmission d'impédance caractéristique Z_c et de constante de propagation γ est exprimée par (8). L'impédance Z_c des câbles utilisés est de 100Ω et leur coefficient de propagation γ est affiché à la Fig.15. Le circuit équivalent du disjoncteur est formé de 3 impédances $Z_1 + (Z_2 // Z_3)$ exprimées par (9). La matrice chaîne d'un disjoncteur est ainsi exprimée par (10). La matrice chaîne

du réseau est le produit des matrices chaines des 7 quadripôles (11). Par la suite, les pertes d'insertion entre l'émetteur et le récepteur sont calculées selon (12).

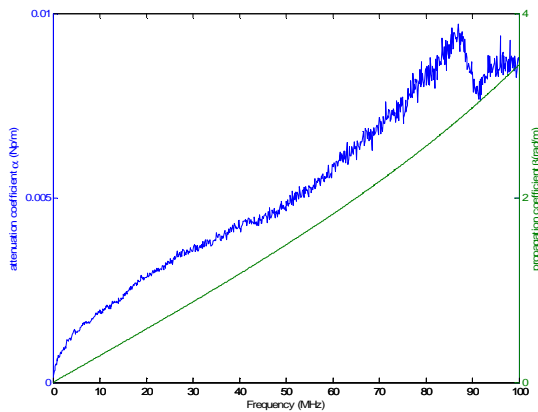


Fig.15 Coefficient de propagation $\gamma=\alpha+j\beta$ des cables utilisés

$$ABCD(\bar{Z}_c, \bar{\gamma}, l) = \begin{pmatrix} \text{Cosh}(\bar{\gamma}l) & Z_c \sinh(\bar{\gamma}l) \\ Z_c^{-1} \sinh(\bar{\gamma}l) & \text{Cosh}(\bar{\gamma}l) \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{Z}_1(\omega) &= \bar{Z}_3(\omega) = R + jL\omega \\ \bar{Z}_2(\omega) &= (G + jC\omega)^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$ABCD(\bar{Z}_1, \bar{Z}_2, \bar{Z}_3) = \begin{pmatrix} 1 + \frac{\bar{Z}_3}{\bar{Z}_2} & \bar{Z}_3 \\ \frac{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_3}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2} & 1 + \frac{\bar{Z}_3}{\bar{Z}_1} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$ABCD = \prod_{i=1}^7 (ABCD)_i \quad (11)$$

$$S_{21} = \frac{2}{A + \frac{B}{Z_L} + CZ_S + D} \quad (12)$$

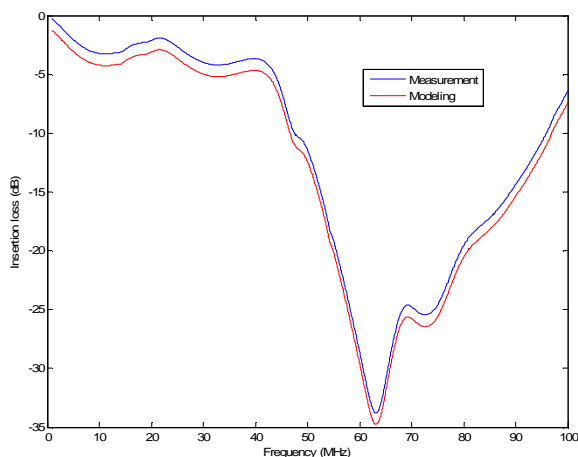


Fig.16: Pertes d'insertion calculées avec la méthode des matrices chaines comparées aux mesures

La modélisation (12) est comparée aux mesures effectuées avec un analyseur de réseau à la Fig.16 et il y a une bonne concordance. Les disjoncteurs pourront être intégrés dans la modélisation globale d'un réseau domestique entier en tenant compte de la topologie et des différents appareils domestiques connectés.

5. CONCLUSION

Une dizaine de disjoncteurs a été caractérisée en mesurant leurs pertes d'insertion dans la bande CPL. D'un côté, les disjoncteurs n'induisent pas d'atténuation dans la bande bas débit (9kHz-500kHz). De l'autre, elles induisent une atténuation importante dans la bande haut débit (1MHz-100MHz). D'une part, cette atténuation dépend du type de disjoncteur (branchement, différentiel, divisionnaire). De l'autre part, elle dépend du courant nominal du disjoncteur. Plus le courant nominal est faible, plus le disjoncteur présente des pertes importantes. L'influence du fabricant est négligeable car deux disjoncteurs de fabricants différents mais de même courant nominal présentent des atténuations très proches. Etant donné que le signal CPL peut traverser jusqu'à 4 disjoncteurs, ces derniers doivent être pris en compte lors de l'évaluation de la fonction de transfert entre deux points du réseau. De par leur composition interne, un circuit électrique équivalent des disjoncteurs a été proposé et validé en comparant les pertes d'insertion simulées à celles mesurées. La possibilité d'intégrer les disjoncteurs dans la modélisation globale d'un réseau électrique a été montrée.

6. REFERENCES

- [1] Norme NFC 15-100, <http://www.boutique.afnor.org>
- [2] M. Tlich, A. Zeddou, F. Moulin and F. Gauthier, "Indoor Power-line Communications Channel Characterization up to 100MHz-Part I: One-Parameter Deterministic Model", *Power Delivery, IEEE Transactions on* 23, no. 3, pp 1392-1401, Jul. 2008
- [3] Anatory, J.; Theethayi, N.; Kissaka, M.M.; Mvungi, N.H.; Thottappillil, R., "The Effects of Load Impedance, Line Length, and Branches in the BPLC—Transmission-Lines Analysis for Medium-Voltage Channel", *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.22, no.4, pp.2156,2162, Oct. 2007
- [4] D. Chariag, D. Guezgouz, Y. Raingeaud, J-C. Le Bunetel, "Channel modeling and periodic impulsive noise analysis in indoor power line", *IEEE ISPL 2011, International Symposium on Power Line Communications*, Udine Italy, April 3-6 2011.
- [5] D.Chariag, J.C.Lebunetel, Y. Raingeaud, "Modelling and simulation of temporal variation of channel and noise in indoor power line network", *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.27, issue 4, pp.1800-1808, October 2012
- [6] D. Guezgouz, Y. Raingeaud, J-C. Leunetel, "SPICE model for the PLC propagation channel in the high frequency range", *IEEE ISPLC 2010, Rio de Janeiro*, March. 2010
- [7] Galli S.; Banwell, T.; , "A novel approach to the modeling of the indoor power line channel-Part II: transfer function and its properties," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.20, no.3, pp. 1869- 1878, July 2005
- [8] Gianaroli, F.; Barbieri, A.; Pancaldi, F.; Mazzanti, A.; Vitetta, G.M.; "A novel approach to power line channel modeling," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.25, no.1, pp.132-140, Jan. 2010
- [9] Aquilue, R.; Ribo, M.; Regue, J.R.; Pijoan, J.L.; Sanchez, G.; , "Scattering parameters-based channel characterization and modeling for underground medium-voltage power-line communications," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.24, no.3, pp.1122-1131, July 2009

- [10] L. T. Berger, Gabriel Moreno-Rodriguez, "Power line communication channel modeling through concatenated IIR-filters elements", Journal of Communication, Vol.4, N°1, February 2009
- [11] M. Zimmermann and K. Dostert, "A multi-path signal propagation model for the power line channel in the high frequency range," in International Symposium on Power line Communications and its Applications, Lancaster, UK, April 1999, pp. 45-51
- [12] Disjoncteur, <http://fr.wikipedia.org/wiki/Disjoncteur>