

MODELISATION ET SIMULATION PAR ELEMENTS FINIES D'UN CABLE ELECTRIQUE DE PUISSANCE A 4 CONDUCTEURS

Abderrazak Lakrim, PhD Student Member IEEE

Driss Tahri, Prof., PhD

Signal, System and Components Laboratory (SSCL), Sciences and
Technologies Faculty of Fez, USMBA, Morocco

Abstract

The Electromagnetic Compatibility (EMC) has become a major constraint in the design of power electronics systems, specifically on the static converters and their connection with electricity network and with the load (Motor). Connecting cables with the electricity network, and with the load are the main transmitters of very stringent electromagnetic interference (EMI) generated by the semiconductors used (converter) operating at higher frequencies, we are particularly interested in common mode conducted interferences (CM) that are the most penalizing mode in this kind of system.

Keywords: Electromagnetic Compatibility, electronic systems

Résumé

La Compatibilité Electromagnétique (CEM) apparaît aujourd'hui comme l'une des contraintes majeures de la conception des systèmes de l'électronique de puissance et plus précisément sur les convertisseurs statiques et leurs associations au réseau électrique et à la charge (Moteur). Les câbles de liaison avec le réseau, et avec la charge (Moteur), sont les principaux transmetteurs des perturbations électromagnétiques les plus contraignantes, générées par les semiconducteurs utilisés (convertisseur), fonctionnant à des fréquences de plus en plus élevées, nous intéressons particulièrement aux perturbations conduites de mode commun (MC) puisque ce dernier est le mode le plus pénalisant dans ce genre de système.

Mots-clés: Modélisation HF, Électronique de Puissance, Câbles d'énergie, Mode Commun (MC), Simulation

Introduction

Les Interférences Electromagnétiques (IEM) conduites sont générées lors de la commutation, créant des variations rapides de la tension (dV/dt), entraînant la circulation des courants de haute fréquence (HF) se propageant dans le système à travers des liaisons filaires en deux modes : mode commun (MC) et mode différentiel (MD), entre la source et la victime (charge ou réseau électrique).

Afin d'identifier les chemins de propagations de ces courants de haute fréquence (HF) dans un système complet de type variateur de vitesse, et de proposer des solutions permettant de réduire les surtensions aux bornes de la charge, il est nécessaire d'utiliser des modèles précis de chaque élément du système. Il paraît alors important de modéliser finement les câbles d'énergie. Ceci permettra également d'étudier l'influence des caractéristiques du câble dans la propagation de ces perturbations.

Câble dissymétrique blindé à 4 conducteurs

Les câbles d'énergie utilisés pour relier les différents éléments d'un variateur de vitesse entre eux font partie d'une autre catégorie des câbles :

- Par rapport aux câbles de transmission de HF (Angénieux, 2009), ces câbles sont soumis à des courants et à des tensions ayant des amplitudes plus élevées, cependant ses matériaux utilisés sont donc différents et ses paramètres linéiques varient avec la fréquence.

- Par rapport aux câbles de transport et de distribution d'énergie électrique, les distances entre les conducteurs de ces câbles sont plus faibles et sont soumis à des gradients de tension et de courant remarquables.

pour modéliser ces câbles d'énergie tenant compte de la variation des paramètres linéiques avec la fréquence et de la distance réduite entre les conducteurs, il est requis de développer des méthodes spécifiques d'identification de ces paramètres. On utilise généralement 3 méthodes (Angénieux, 2009) :

- La formulation analytique, prenant en compte les caractéristiques physiques et géométriques des composants du câble (Paul, 1994).

- La simulation par les logiciels basés la méthode des Elements Finis, pour notre cas le logiciel FEMM du logiciel FEMM (Finite Element Magnetic Methode) (FEMM software).

- L'expérimentation à travers des essais et des mesures Essais et mesures dans les domaines fréquentiel et/ou temporel.(Weens, 2006) (Moreau, 2008).

Le câble étudié (Fig1) est un câble blindé composé de 4 conducteurs.

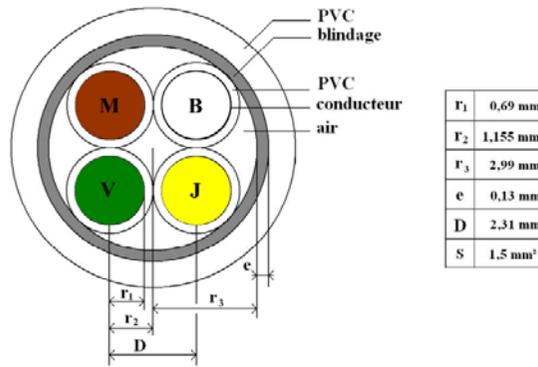


Fig 1. Câble dissymétrique blindé composé de 4 conducteurs.

La première partie de cette étude consiste à déterminer les paramètres linéiques du câble pour la fréquence de 500kHz utilisant la simulation par FEMM. L'évolution de ces paramètres en fonction de la fréquence sera modélisée à partir des réseaux RL et RC en échelle (Weens, 2005). Cette modélisation de type circuit sera implantée dans le logiciel de simulation SPICE.

Détermination des paramètres linéiques

Le câble étudié est subdivisé en cellules élémentaires et que chaque cellule sera modélisée sous forme d'un réseau RLGC, dont ces paramètres seront extraits de la manière suivante : Les résistances par le calcul de la résistivité du matériau, l'inductance par le calcul des champs magnétiques, les capacités par le calcul des champs électriques, et les conductances par l'énergie dissipée dans l'isolant (Bonnefille, 1978). Le schéma de la cellule élémentaire du câble blindé de 4 conducteurs dissymétrique utilisée est donné à la figure (Fig 2) avec R et L, sont respectivement la résistance et l'inductance linéique des conducteurs, les couplages capacitifs et les pertes diélectriques entre conducteurs adjacents et croisés notés respectivement C_A , G_A et C_C , G_C et entre chaque conducteur et le blindage notés C_B , G_B . K_A et K_C les coefficients de couplage magnétique. Ce modèle tient compte de la dissymétrie en distinguant les effets entre conducteurs adjacents et conducteurs croisés. Le blindage est considéré parfait et il est donc représenté par un conducteur parfait.

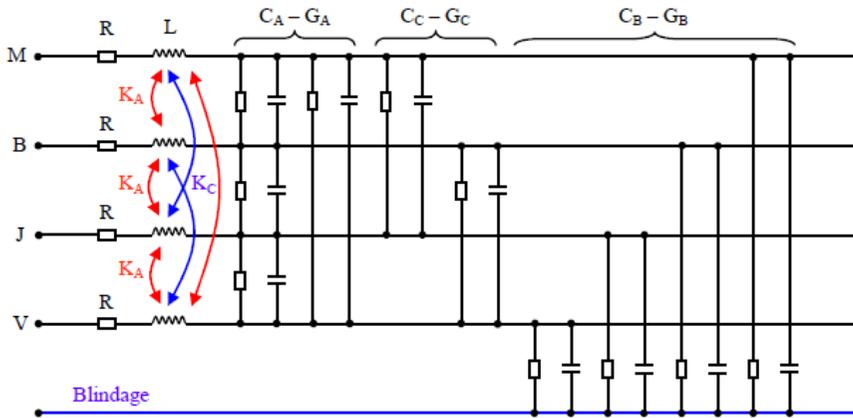


Fig 2. Le schéma de la cellule élémentaire du câble d'étude.

On effectue des simulations avec le logiciel FEMM à la fréquence de 500KHz, pour un câble de 5m. On procède de deux types de simulation simulation en court-circuit (CC) pour déterminer les paramètres linéiques longitudinaux (R et L, K_A , K_C) et simulation en circuit ouvert (CO) pour déterminer les paramètres linéiques transversaux (C_A , C_C , C_B , et G_A , G_C , G_B).

Les trois configurations des testes de mode commun sont les suivantes:

- Deux conducteurs retour blindage en court-circuit et en circuit ouvert (MC2BCC et MC2BCO).
- Trois conducteurs retour blindage en court-circuit et en circuit ouvert (MC3BCC et MC3BCO)
- Quatre conducteurs retour blindage en court-circuit et en circuit ouvert (MC4BCC et MC4BCO)

Simulation du Mode Commun

Deux conducteurs retour blindage en court-circuit MC2BCC

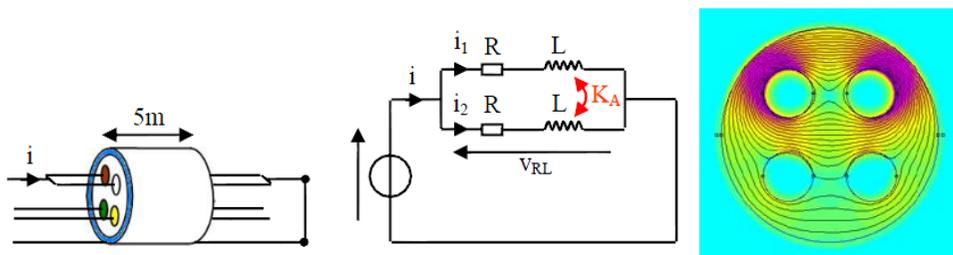


Fig 3. Essai MC2BCC schéma de simulation et la répartition du champ magnétique dans le câble.

On obtient de cette simulation (Fig 3) les trois équations fréquentielles suivantes:

$$\begin{cases} V_{RL} = (Lp + R)I_1 + K_A \cdot Lp \cdot I_2 \\ V_{RL} = K_A \cdot Lp \cdot I_1 + (Lp + R)I_2 \\ I = I_1 + I_2 \text{ avec } I_1 = I_2 \end{cases} \quad (\text{Eq 1})$$

La résolution de ce système nous donne la relation (Eq 2)

$$I_1 = I_2 = \frac{V_{RL}}{Lp(1 + K_A) + R} \quad (\text{Eq 2})$$

$$V_{RL} = R_2 \cdot I + L_2 p \cdot I \quad (\text{Eq 3})$$

Par identification avec l'équation fréquentielle de Laplace (Eq 3) de cet essai, l'inductance et la résistance, équivalentes s'expriment par les équations suivantes (Eq 4) :

$$L_2 = \frac{L \cdot (1 + K_A)}{2} \quad (\text{Eq 4})$$

$$R_2 = \frac{R}{2}$$

Deux conducteurs retour blindage en circuit ouvert MC2BCO

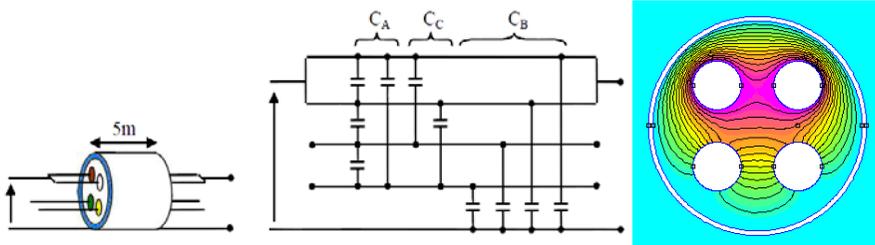


Fig 4. Essai MC2BCC schéma de simulation et la répartition du champ électrique dans le câble.

La capacité et la conductance du système obtenues du test (Fig 4) sont les suivantes :

$$C_2 = \frac{2(C_A + C_C) \cdot C_B}{C_A + C_C + C_B} + 2C_B \quad (\text{Eq 5})$$

$$G_2 = \frac{2(G_A + G_C) \cdot G_B}{G_A + G_C + G_B} + 2G_B \quad (\text{Eq 6})$$

Trois conducteurs retour blindage en court-circuit M3BCC

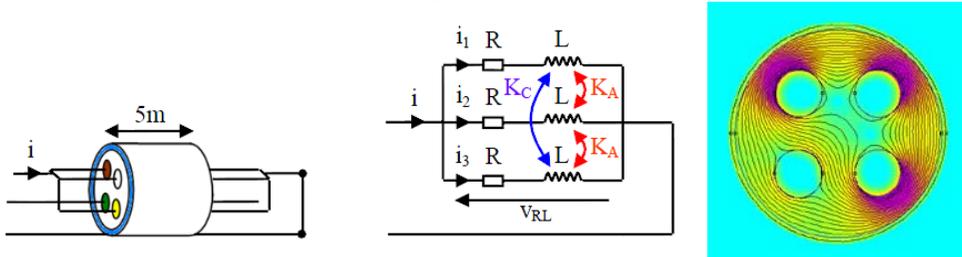


Fig 5. Essai MC3BCC schéma de simulation et la répartition du champ magnétique dans le câble.

On obtient de cette simulation (Fig 5) les quatre équations de la relation (Eq 7) exprimées directement dans le domaine de Laplace.

$$\begin{cases} V_{RL} = (L.p + R)I_1 + K_A.Lp.I_2 + K_C.Lp.I_3 \\ V_{RL} = K_A.Lp.I_1 + (L.p + R)I_2 + K_A.Lp.I_3 \\ V_{RL} = K_A.Lp.I_1 + K_A.Lp.I_2 + (L.p + R)I_3 \\ I = I_1 + I_2 + I_3 \end{cases} \quad (\text{Eq 7})$$

$$V_{RL} = R_3.I + L_3p.I \quad (\text{Eq 8})$$

La résolution de ce système (Eq 7) et par identification avec l'équation (Eq 8), et tenant compte de la dissymétrie de cette structure MC3BCC ($I_1=I_2 \neq I_3$), on obtient :

$$L_3 = \frac{2K_A^2 - K_C - 1}{4K_A - K_C - 3} \times L \quad (\text{Eq 9})$$

$$R_3 = \frac{R}{3}$$

Trois conducteurs retour blindage en circuit ouvert MC3BCO

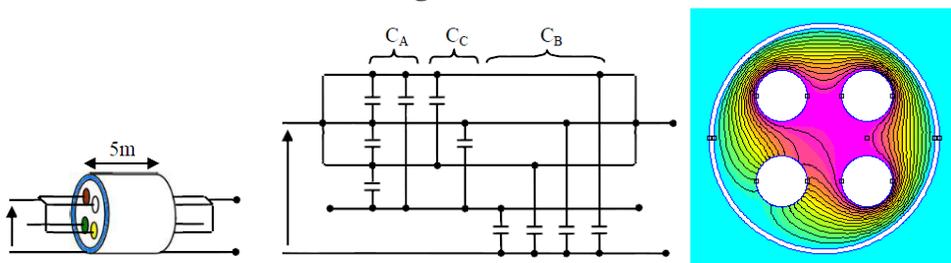


Fig 6. Essai MC3BCC schéma de simulation et la répartition du champ électrique dans le câble.

Les grandeurs équivalentes du câble, C3 et G3 de cet essai (Fig 6) s'expriment comme suit :

$$C_3 = \frac{(2.C_A + C_C).C_B}{2C_A + C_C + C_B} + 3C_B \quad (\text{Eq 10})$$

$$G_3 = \frac{(2.G_A + G_C).G_B}{2G_A + G_C + G_B} + 3G_B \quad (\text{Eq 11})$$

Quatre conducteurs retour blindage en court-circuit M4BCC

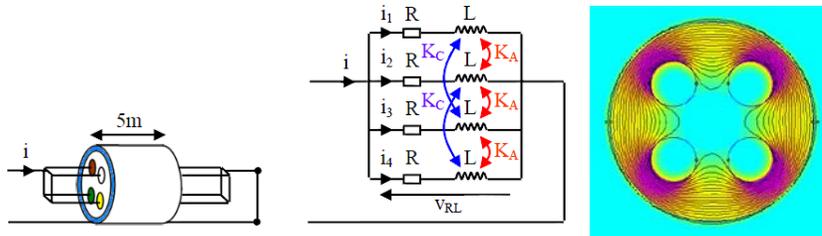


Fig 7. Essai MC4BCC schéma de simulation et la répartition du champ magnétique dans le câble.

On obtient de cette simulation (Fig 7) cinq équations de la relation (Eq 12) exprimées directement dans le domaine de Laplace.

$$\begin{cases} V_{RL} = (Lp + R)I_1 + K_A.Lp.I_2 + K_C.Lp.I_3 + K_A.Lp.I_4 \\ V_{RL} = K_A.Lp.I_1 + (Lp + R)I_2 + K_A.Lp.I_3 + K_C.Lp.I_4 \\ V_{RL} = K_C.Lp.I_1 + K_A.Lp.I_2 + (Lp + R)I_3 + K_A.Lp.I_4 \\ V_{RL} = K_A.Lp.I_1 + K_C.Lp.I_2 + K_A.Lp.I_3 + (Lp + R).I_4 \\ I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \text{ avec } I_1 = I_2 = I_3 = I_4 \end{cases} \quad (\text{Eq 12})$$

$$V_{RL} = R_4.I + L_4p.I \quad (\text{Eq 13})$$

La résolution de ce système (Eq 12) et par identification avec l'équation (Eq 13) on trouve.

$$\begin{aligned} L_4 &= \frac{L}{4}(2K_A + K_C + 1) \\ R_4 &= \frac{R}{4} \end{aligned} \quad (\text{Eq 14})$$

Quatre conducteurs retour blindage en circuit ouvert M4BCO

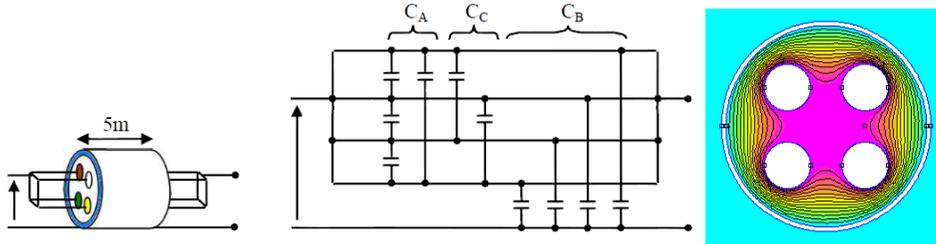


Fig 8. Essai MC4BCC schéma de simulation et la répartition du champ électrique dans le câble.

Les grandeurs équivalentes C_4 et G_4 du câble dans cette simulation (Fig 8) s'expriment comme suit :

$$\begin{aligned} C_4 &= 4C_B & (\text{Eq 15}) \\ G_4 &= 4G_B \end{aligned}$$

Détermination des paramètres linéiques

Détermination des paramètres L , K_A et K_C

Le système à résoudre est donné par la relation (Eq 16).

$$\begin{cases} L_2 = \frac{L \cdot (1 + K_A)}{2} \\ L_3 = \frac{2K_A^2 - K_C - 1}{4K_A - K_C - 3} \cdot L \\ L_4 = \frac{L}{4} (2K_A + K_C + 1) \end{cases} \quad (\text{Eq 16})$$

La résolution de ce système donne pour les valeurs simulées de L_2 , L_3 et L_4 à 500kHz pour un câble de 5 mètre:

$$\begin{cases} L_2 = 656.28 \text{ nH} \\ L_3 = 485.78 \text{ nH} \\ L_4 = 411.66 \text{ nH} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} L = 217.8 \text{ nH/m} \\ K_A = 0.205 \\ K_C = 0.101 \end{cases} \quad (\text{Eq 17})$$

Détermination du paramètre R

Les trois équations dont on dispose devraient permettre de vérifier la valeur de R dans les différentes configurations (MC2BCC, MC3BCC et MC4BCC).

$$\begin{cases} R_2 = R/2 = 338.82 \text{ m}\Omega \\ R_3 = R/3 = 290.12 \text{ m}\Omega \\ R_4 = R/4 = 246.36 \text{ m}\Omega \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R = 135.54 \text{ m}\Omega/m \\ R = 174.07 \text{ m}\Omega/m \\ R = 197.08 \text{ m}\Omega/m \end{cases} \quad (\text{Eq 18})$$

Cette différence peut être due au phénomène de proximité, qu'on la remarque bien sur les figures précédents.

Cependant, les conditions expérimentales dans lesquelles le câble sera utilisé se rapprochent plus de l'essai MC3B. En effet dans l'application de l'onduleur triphasé, trois conducteurs alimentent directement la machine, et le quatrième servant de conducteur de terre est relié au blindage. Nous retiendrons donc la valeur de la résistance correspondante:

$$R = 174.07 \text{ m}\Omega/m \quad (\text{Eq 19})$$

Détermination des paramètres C_A , C_C et C_B

Le système à résoudre est donné par la relation (Eq 20).

$$\begin{cases} C_2 = \frac{2(C_A + C_C) \cdot C_B}{C_A + C_C + C_B} + 2C_B \\ C_3 = \frac{(2C_A + C_C) \cdot C_B}{2C_A + C_C + C_B} + 3C_B \\ C_4 = 4C_B \end{cases} \quad (\text{Eq 20})$$

La résolution de ce système donne pour les valeurs simulées de C_2 , C_3 et C_4 à 500kHz :

$$\begin{cases} C_2 = 1.83 \text{ nF} \\ C_3 = 2.22 \text{ nF} \\ C_4 = 2.56 \text{ nF} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} C_A = 16.5 \text{ pF/m} \\ C_C = 79.93 \text{ pF/m} \\ C_B = 128 \text{ pF/m} \end{cases} \quad (\text{Eq 21})$$

Détermination des paramètres G_A , G_C et G_B

Le système à résoudre est donné par la relation (Eq 22).

$$\begin{cases} G_2 = \frac{2(G_A + G_C).G_B}{G_A + G_C + G_B} + 2G_B \\ G_3 = \frac{(2.G_A + G_C).G_B}{2G_A + G_C + G_B} + 3G_B \\ G_4 = 4G_B \end{cases} \quad (\text{Eq 22})$$

La résolution de ce système donne pour les valeurs simulées de G_2 , G_3 et G_4 à 500kHz :

$$\begin{cases} G_2 = 156.99 \mu S \\ G_3 = 176.2 \mu S \\ G_4 = 117.87 \mu S \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} G_A = 5.89 \mu S/m \\ G_C = -2.07 \mu S/m \\ G_B = 5.89 \mu S/m \end{cases} \quad (\text{Eq 23})$$

On constate ici la valeur négative prise par la conductance G_C , ce résultat n'a bien entendu aucune réalité physique, alors on applique la relation suivante (Eq 24) (Metzger, 1966).

$$G = C.\omega.\tan \delta \text{ avec } \tan \delta = 0.03 \text{ pour le PVC} \quad (\text{Eq 24})$$

$$\text{Alors } \begin{cases} G_A = C_A.\omega.\tan \delta \\ G_B = C_B.\omega.\tan \delta \\ G_C = C_C.\omega.\tan \delta \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} G_A = 1.55 \mu S/m \\ G_B = 12.1 \mu S/m \\ G_C = 7.53 \mu S/m \end{cases} \quad (\text{Eq 25})$$

Modélisation de l'évolution des paramètres linéiques avec la fréquence
Modélisation de l'évolution de la résistance R et de l'inductance L

L'évolution de l'impédance longitudinale (R et L) d'un conducteur en fonction de la fréquence est modélisée à l'aide du réseau RL en échelle (Fig 9). Les valeurs de ce réseau ont été déterminées par le logiciel APLAC (APLAC software) à partir des points de mesure de l'évolution de R et L en fonction de la fréquence pour un mètre du câble. Les comparaisons entre les grandeurs mesurées et modélisées sont données par la figure (Fig.10).

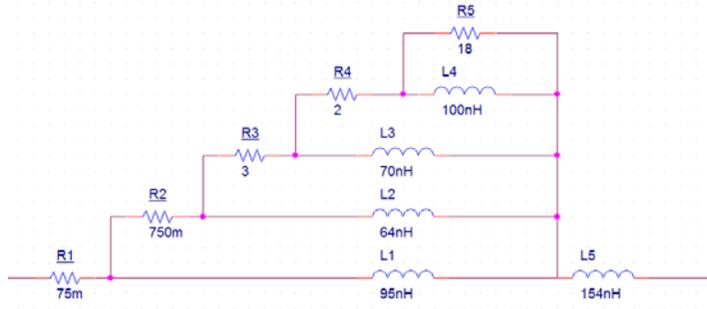


Fig 9. Réseau RL en échelle

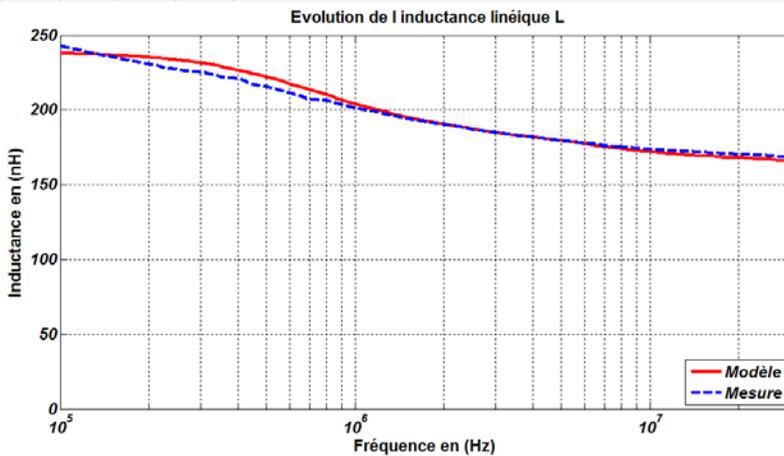
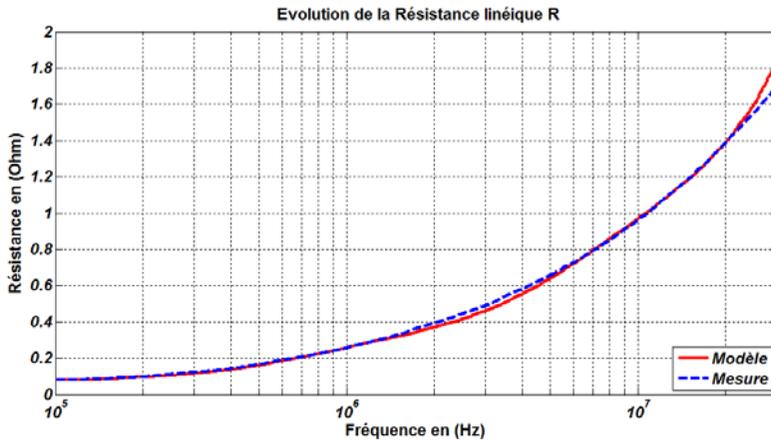


Fig 10. Evolution de R et L en fonction de la fréquence

Modélisation de l'évolution des capacités et des conductances

Un réseau RC est utilisé pour la modélisation de chaque couple (C_A, G_A), (C_C, G_C) et (C_B, G_B). Les valeurs numériques correspondant au réseau du

couple (C_A , G_A) sont représentées sur la figure (Fig 11). Les comparaisons entre les grandeurs modélisées et mesurées du couple (C_A , G_A) sont données par la figure (Fig12). Ainsi les valeurs numériques correspondant aux réseaux des couples (C_B , G_B) et (C_C , G_C) sont représentées sur les figures (Fig 13) et (Fig 14) respectivement.

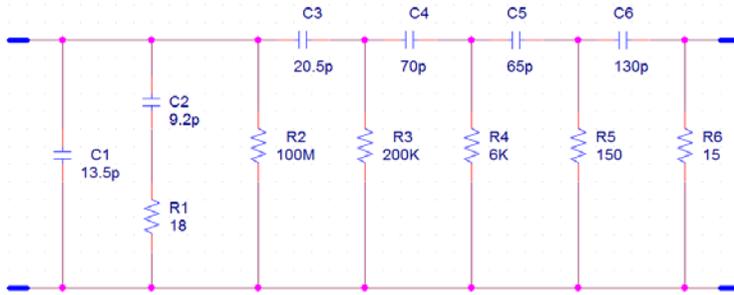


Fig 11. Réseau RC en échelle pour la modélisation d C_A et G_A

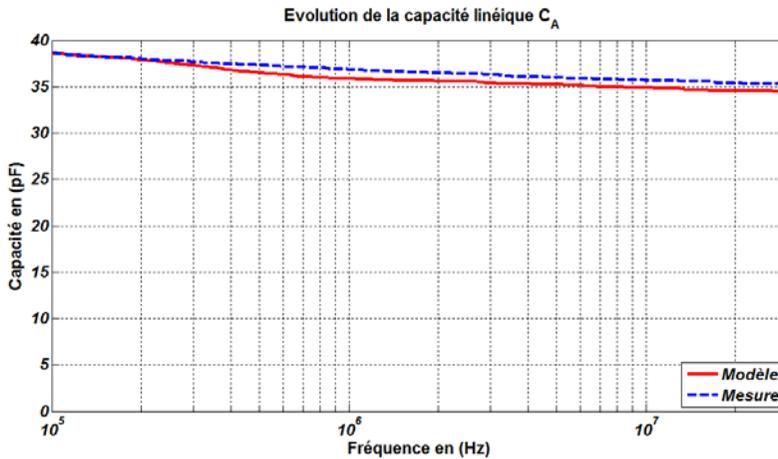
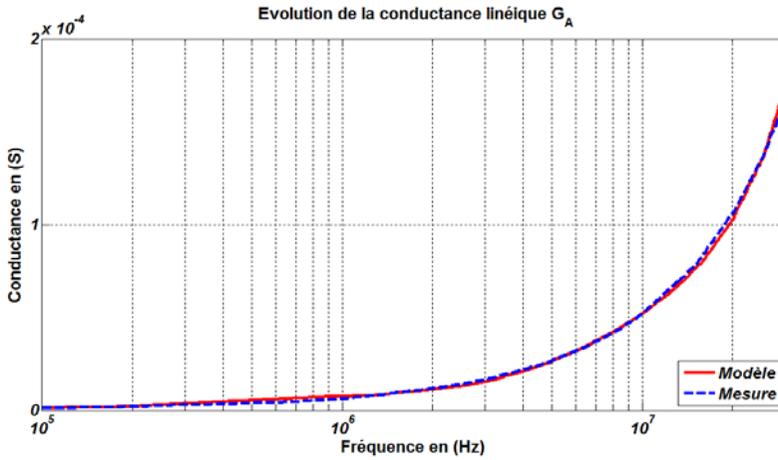


Fig 12. Evolution de C_A et G_A en fonction de la fréquence

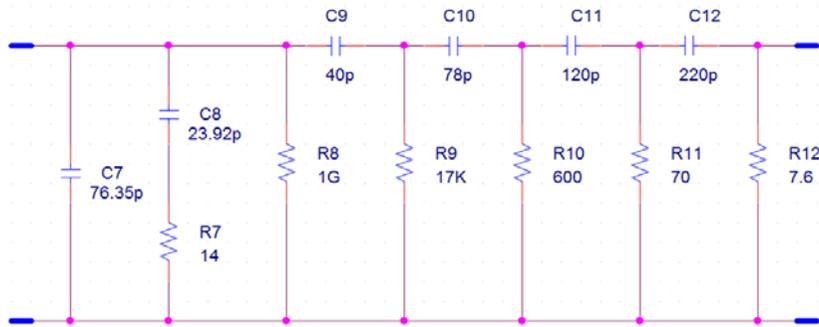


Fig 13. Réseau RC en échelle pour la modélisation de C_B et G_B

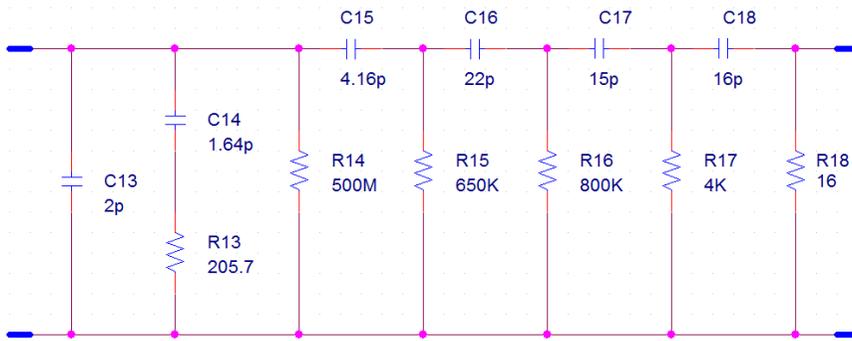


Fig 14. Réseau RC en échelle pour la modélisation de C_C et G_C

Conclusion et perspective

Après avoir déterminé le modèle du câble sous forme d'un réseau en échelle $R, L, C_A, C_B, C_C, G_A, G_B$ et C_C , il nous reste qu'à le faire valider dans les domaines temporel et fréquentiel par la simulation sous OrCAD-Spice de la commutation d'un bras d'onduleur ainsi par la commutation d'un hacheur afin d'étudier la contribution de ce câble pour la transmission des perturbations du MC, et comment le faire exploiter pour le filtrage.

Une autre étude similaire sur un autre câble blindé de 4 conducteurs mais symétrique sera notre objectif afin de comparer la contribution des deux câbles pour la transmission des perturbations du MC.

References :

- Angénieux. G « Lignes de transmission en régime harmonique et transitoire », 01 juillet 2009»
- Paul. C.R. « Analysis of multiconductor transmission lines », Wiley-Interscience . Publication, Edition John Wiley and Sons, 1994.
- FEMM software <http://www.femm.info/wiki/HomePage>

Weens.Y « Modélisation des Câbles d’Energie Soumis aux Contraintes Générées par les Convertisseurs Electroniques de Puissance », Thèse de Doctorat de l’UST de Lille (L2EP), 2006.

Moreau. M, Videt. A, Idir. N, Franchaud. J, Le Moigne .P « Equivalent Noise Source Modelling in Power Converters » Power Electronics Intelligent Motion, Nuremberg, Germany, 2008.

Y. Weens, N. Idir, J.J. Franchaud, R. Bausière « High Frequency Model of a Shielded 4-Wire Energy Cable » European Power Electronics, Dresen, Germany, Sept. 7 – 9, 2005.

Bonnefille. R, « Réseaux électriques linéaires à constantes réparties », Techniques de l’ingénieur, article D-69, Date de publication : 10 juin 1978.

Metzger. G, Vabre. J. P, « Electronique des Impulsions, Circuit à Constantes réparties » Edition MASSON & Cie, 1966.

APLAC Language & User Interface. Aviable in website <http://www.rfglobalnet.com/doc/aplac-simulator-0002>