

Détermination de l'impédance de transfert des câbles coaxiaux à forte immunité grâce à la modélisation numérique

C. PORNIN¹, T.-P. Vuong-C. G. Angénieux², P. Xavier¹

1 : IMEP-LAHC, Grenoble INP, université Grenoble Alpes; 3, Parvis Louis Néel, 38016 Grenoble

2 : Bâtiment "Le Chablais", Rue du Lac de la Thuile, 73370 Le Bourget-du-Lac

Email auteur : clement.pornin@grenoble-inp.fr

Résumé – L'étude présentée dans ce papier porte sur une approche numérique de la détermination de l'impédance de transfert des câbles coaxiaux. Nous nous penchons particulièrement sur le cas des câbles à forte immunité, pour lesquels la mesure de l'impédance de transfert est entravée par des phénomènes que nous détaillons. Des modèles de câbles coaxiaux sont construits sous le logiciel CST MWs afin de s'affranchir des problèmes rencontrés avec la mesure et du coût de fabrication d'un prototype.

1. Introduction

Si certains signaux ont une importance capitale dans le bon fonctionnement des équipements industriels, la qualité des câbles qui les véhiculent ne doit pas être négligée. Notamment dans les environnements électromagnétiquement dense, où le blindage électromagnétique a une fonction importante. En effet, si les signaux internes se voient perturbés par des parasites externes, leur interprétation peut être fautive et le bon fonctionnement de l'installation n'est plus garanti. Pour éviter cette situation, des câbles à haute immunité sont utilisés. Ces câbles ont une architecture de blindage hétérogène, combinant les avantages de différents matériaux et de différentes structures mécaniques.

La conception nécessaire à l'amélioration de ces câbles est complexe. En effet, les câbles à haute immunité ne possèdent pas de modèles analytiques tels que ceux qui approchent le comportement des blindages tressés. De plus, la réalisation de prototypes est longue et coûteuse. C'est pourquoi la modélisation électromagnétique numérique par éléments finis s'avère être une solution intéressante. En effet, elle permet de simuler les phénomènes physiques qui régissent le comportement du câble, tout en faisant abstraction des limitations des instruments de mesures et du bruit environnant.

1.a. Câbles à haute immunité

La Figure 1 représente un exemple schématique de câble à haute immunité. Sur ce modèle simplifié aux couches actives du blindage (i.e. les couches électromagnétiquement neutres ont été exclues), on distingue les différentes parties de la structure. Le tableau 1 résume leurs caractéristiques.

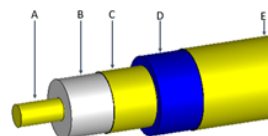


Figure 1. Architecture d'un câble à haute immunité.

A	Âme (cuivre, $\Phi = 2.25$ mm)
B	Diélectrique (polyéthylène, $e = 2.5$ mm)
C, E	Cuivre tressé
D	Matériaux ferromagnétique (bande enroulée, $e = 170$ μm), μ_r de l'ordre de 100 F.m ⁻¹

Tableau 1. Caractéristiques des couches de blindage

Les couches de cuivre tressé ont pour rôle d'assurer une équipotentialité et d'évacuer les courants parasites vers la masse. La couche de matériau ferromagnétique, quant à elle, entraîne des pertes par hystérésis sur les parasites de basses fréquences. De plus, la structure en ruban enroulé de cette couche a pour effet d'assurer un recouvrement optique total. Ainsi le couplage électrique entre l'âme et l'environnement du câble est supprimé. Ce phénomène a été jugé peu influent par [1] dans la plupart des cas mais la réalisation de câbles à hautes immunités ne permet pas d'exclure ce paramètre.

1.b. Impédance de transfert, définition

L'impédance de transfert est la grandeur qui est généralement utilisée pour quantifier l'efficacité du blindage des câbles coaxiaux. Elle est généralement obtenue avec le banc de mesure triaxial schématisé sur la Figure 2 et en appliquant l'équation (1) décrite par [2].

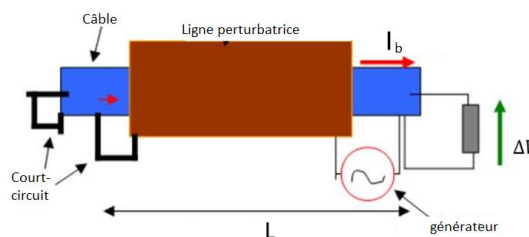


Figure 2 : Représentation schématique du banc de mesure généralement utilisé pour la mesure triaxiale

$$Z_t = \frac{\Delta V}{L \times I_b} \quad (1)$$

L'impédance de transfert Z_t [$\Omega \cdot m^{-1}$] représente le rapport entre la « tension perturbatrice » ΔV [V] que l'on mesure au bout d'une portion de câble de longueur L lorsqu'un courant I_b [A] circule sur son blindage. L'extrémité à laquelle on mesure ΔV est ouverte (impédance d'entrée de l'instrument de mesure). L'autre extrémité est un court-circuit entre les couches du blindage et l'âme. Cette grandeur est intrinsèque, donc utile aux concepteurs d'installations car elle permet de prédire le comportement du câble une fois installé. Cette formulation de l'impédance de transfert montre que si les câbles sont longs, (e.g. dans les installations ferroviaires), Z_t doit rester faible pour empêcher que la tension perturbatrice ΔV soit élevée.

1.c. Impédance de transfert, exemples réels

On trouve dans la littérature [3] des exemples de mesures d'impédance de transfert avec la méthode triaxiale (voir Figure 3). On constate que les différentes structures de blindage mènent à différents comportements fréquentiels de Z_t . Cette méthode est limitée par la sensibilité de l'instrument utilisé pour mesurer ΔV . Ainsi, pour une architecture à deux couches de cuivre tressé et une couche de matériau ferromagnétique (Figure 1), la tension perturbatrice est en dessous de la sensibilité de l'instrument. La mesure n'est donc pas possible entre 200 kHz et 40 MHz.

La possibilité d'injecter un signal plus fort avec le générateur pour obtenir une valeur de ΔV plus importante mène à l'utilisation de hautes tensions. C'est une solution qui est dangereuse pour l'opérateur. Une solution alternative consiste en l'utilisation de pinces de type bulk current injection (BCI) pour injecter un courant élevé sans faire appel à de fortes tensions [5]. Cette technique est néanmoins plus coûteuse car elle nécessite un amplificateur de puissance large bande – 12000€ pour 50W jusqu'à 100 MHz - ainsi qu'une pince d'injection BCI - 4500€ pour pouvoir injecter un courant suffisant (quelques Ampères) - et contraignante à mettre en place. Pour ces raisons, nous proposons une approche de modélisation numérique par éléments finis. Cette méthode consiste en la résolution des équations de Maxwell dans un espace discrétisé. Ainsi, les limitations causées par le bruit ambiant et la sensibilité des instruments sont supprimées et il est possible de valider directement les nouveaux designs. Il n'est pas nécessaire de faire appel à des prototypes coûteux. Cette approche de modélisation numérique est présentée dans la prochaine section.

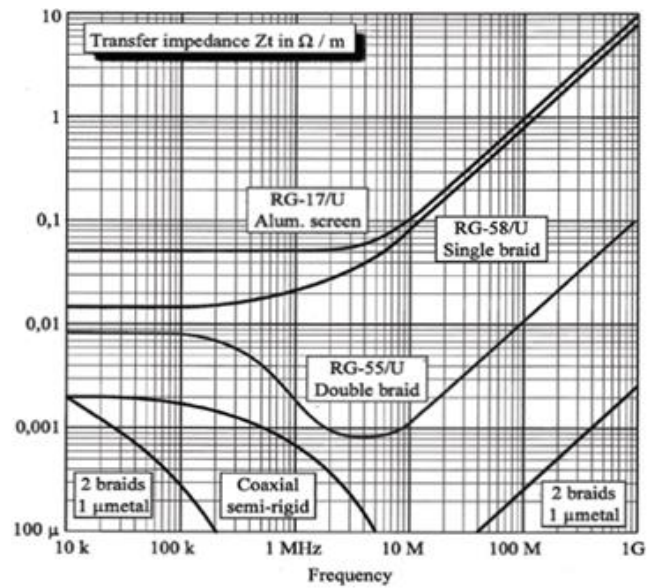


Figure 3 : Exemples d'impédances de transfert mesurées pour différents types de câbles [3]

2. Modélisation numérique

2.a. Introduction

De nombreux auteurs se sont investis dans le développement de modèles analytiques permettant d'obtenir directement l'impédance de transfert (Z_t) d'un câble coaxial à partir de ses paramètres constructifs. C'est Schelkunoff [2] qui a mené une étude sur les lignes de transmissions coaxiales utilisées au XXème siècle dans les stations radio. Il a défini plusieurs phénomènes de couplages qui sont liés à la qualité du blindage.

Le premier à s'être intéressé aux câbles coaxiaux à blindages tressés est Vance [4], [5]. Il s'est basé sur les travaux de Kaden [6] et Marcuvitz [7] qui ont étudiés les phénomènes de couplage à travers des blindages de type tubes métalliques perforés. Ainsi, Vance a créé un modèle analytique permettant d'approximer l'impédance de transfert des câbles coaxiaux à blindages tressés à partir de leurs paramètres de construction. L'élément clé qu'il apportait était la modélisation du couplage magnétique à travers les ouvertures de la tresse par un terme inductif qui justifie l'augmentation de Z_t avec la fréquence. Ce modèle analytique conserve des différences avec les mesures, malgré les diverses améliorations apportées par d'autres auteurs (e.g. [8], [9]). De plus, il ne traite pas le cas des blindages hétérogènes qui nous intéressent ici.

Il existe tout de même dans la littérature quelques exemples qui traitent des sujets plus proches de notre cas. Merewether [10] a développé un modèle simplifié des couches de blindage en matériaux ferromagnétiques saturables. Colak [11] s'est intéressé aux câbles possédant un blindage formé de deux couches de tresses métalliques en contact. Dans tous les cas, il ne s'agit que de modèles approchés du comportement exact des câbles. Nous ne détaillons pas ces modèles ici pour des raisons de brièveté.

La modélisation numérique, bien qu'elle se base sur des modèles plus ou moins simplifiés, permet de prendre en compte des phénomènes parasites qui ne peuvent pas tous être considérés par les modèles analytiques existants. Il est cependant nécessaire d'utiliser des modèles simplifiés en raison de la complexité géométrique de la structure des tresses métalliques.

2.b. Construction des modèles

Les modèles présentés sur les Figure 4 et Figure 5 sont respectivement des portions simplifiées d'un câble commercial RG58/U à blindage monocouche et d'un câble à blindage amélioré par un feuillard ferromagnétique [12] basé sur le premier modèle. Les principales caractéristiques de ces modèles sont rassemblées dans le tableau 2. Ces modèles correspondent à des implémentations numériques de la méthode triaxiale (Figure 2) pour calculer l'impédance de transfert des modèles de câbles.

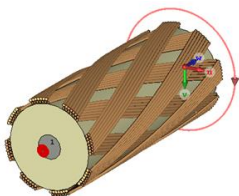


Figure 4 : Modèle simplifié de RG58/U

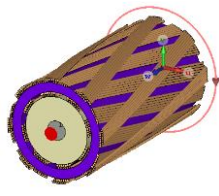


Figure 5 : modèle simplifié de câble à haute immunité

Modèle	RG58/U	Câble haute immunité
Diamètre du diélectrique [mm]	3.5	3.5
Nombre de fuseaux Couche 1	16	16
Nombre de fuseaux couche 2	-	20
Nombre de brins par fuseau couche 1	7	7
Nombre de brins par fuseau couche 2	-	10
Angle de tresse couche 1 [deg]	32.32	38.9
Angle de tresse couche 2 [deg]	-	34
Conductivité du métal tressé [$S.m^{-1}$]	$5.96 e+7$	$5.96 e+7$
Conductivité du matériau ferromagnétique [$S.m^{-1}$]	-	$1.67 e+6$
Perméabilité magnétique du matériau ferromagnétique [$F.m^{-1}$]	-	100

Tableau 2 : récapitulatif des principaux paramètres de construction des modèles de câbles.

2.c. Impédance de transfert simulée et interprétation

Les résultats obtenus par la simulation des deux modèles des Figure 4 et Figure 5 en utilisant le solveur temporel du logiciel CST sont représentés sur la Figure 6. Les tracés issus des mesures correspondant aux mêmes types de câbles (d'après [3]) sont donnés à titre de comparaison. Les courbes montrent l'intérêt de l'ajout de couches supplémentaires pour réduire l'impédance de transfert.

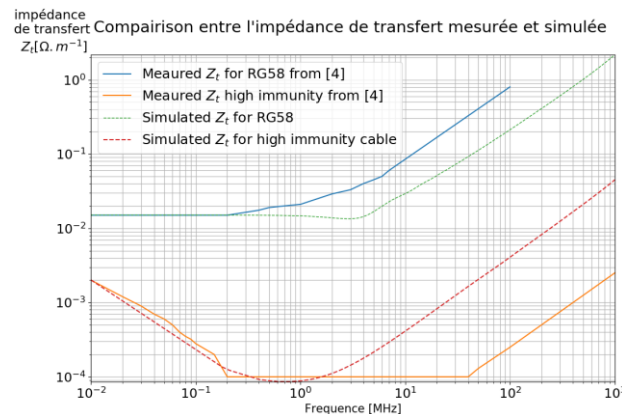


Figure 6 : impédances de transfert simulées pour les modèles des figures 4 et 5, comparées aux mesures de la figure 3

On remarque que dans le cas du modèle de RG58/U, le début de la partie croissante de la courbe est légèrement décalé vers les plus hautes fréquences. Ce phénomène semble émerger de la simplification de la construction du modèle. En effet, la tresse construite est constituée de brin croisés mais qui ne sont pas tissés. Or le tissage du métal mène à un comportement inductif, comme l'avait montré [8]. Ce comportement inductif vient s'ajouter au terme inductif qu'avait proposé Vance [5] pour modéliser le couplage magnétique à travers les ouvertures de la tresse.

Pour le cas du câble à haute immunité constitué de deux couches de tresse et une de mumetal, on constate que la pente de la courbe s'inverse rapidement, ne permettant pas d'atteindre le minimum de la courbe réelle. Ce minimum est représenté par un plateau à $100 \mu\Omega.m^{-1}$, car la sensibilité de l'instrument de mesure de la tension perturbatrice ΔV ne permettait pas de relever des valeurs plus basses. Nous pouvons déduire de cette différence que le terme inductif de l'inductance de transfert est trop élevé dans le cas de notre modèle numérique. Nous devons donc mener des investigations afin d'identifier la source de cette différence et ainsi de la corriger.

3. Conclusion

Ce document introduit un concept de modélisation numérique pour faire face aux limitations physiques et opérationnelles de la mesure de l'impédance de transfert. Les modèles de câbles utilisés restent à améliorer mais la méthode présentée apporte des possibilités intéressantes en matière de validation des designs des câbles coaxiaux. De plus, une fois le modèle initial créé, l'étude de la variation des paramètres est une tâche aisée. Cela permet de valider certaines théories prédisant l'influence des paramètres de construction du blindage.

Références

- [1] F. Broyde, E. Clavelier, D. Givord, et P. Vallett, « Discussion of the relevance of transfer admittance and some through elastance measurement results », *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 35, n° 4, p. 417-422, nov. 1993.
- [2] S. A. Schelkunoff, « The Electromagnetic Theory of Coaxial Transmission Lines and Cylindrical Shields », *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 13, n° 4, p. 532-579, oct. 1934.
- [3] M. MARDIGUIAN, « Simple Method for Predicting a Cable Shielding Factor, Based on Transfer Impedance », vol. emc Directory & design guide, p. 5, 2012.
- [4] E. F. Vance, « Shielding effectiveness of braided wire shields, interaction note », Stanford research institutes, Menlo Park, California, avr-1974.
- [5] E. F. Vance, « Shielding Effectiveness of Braided-Wire Shields », *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-17, n° 2, p. 71-77, mai 1975.
- [6] H. Kaden, *Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik*. Springer-Verlag, 1959.
- [7] N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*. IET, 1951.
- [8] M. Tyni, « The Transfer Impedance of Coaxial Cables with Braided Outer Conductor », présenté à FV. Nauk, Inst. Telekomum Akust. Politech, Wroclaw, Poland, 1975, p. 410-419.
- [9] T. Kley, « Optimized single-braided cable shields », *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 35, n° 1, p. 1-9, févr. 1993.
- [10] D. E. Merewether, « Design of Shielded Cables Using Saturable Ferromagnetic Materials », *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-12, n° 3, p. 138-141, août 1970.
- [11] B. Colak, O. Cerezci, N. Ari, et S. Helhel, « Optimization of shielding effectiveness of coaxial double braided screens in contact », in *2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)*, 2016, p. 1-3.
- [12] R. R. Ferber et F. J. Young, « Enhancement of EMP Shielding by Ferromagnetic Saturation », *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 17, n° 6, p. 354-359, déc. 1970.