



Evolution des modèles de réseaux de lignes de transmission multiconducteurs

Solange Bertuol, Michael Ridel, Isabelle Junqua, Jean-Philippe Parmantier

► To cite this version:

Solange Bertuol, Michael Ridel, Isabelle Junqua, Jean-Philippe Parmantier. Evolution des modèles de réseaux de lignes de transmission multiconducteurs. CEM 2016 : 18^{ème} Colloque international et Exposition sur la Compatibilité Electromagnétique, Jul 2016, RENNES, France. hal-01353609

HAL Id: hal-01353609

<https://hal.science/hal-01353609>

Submitted on 12 Aug 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

EVOLUTION DES MODELES DE RESEAUX DE LIGNES DE TRANSMISSION MULTICONDUCTEURS

S. Bertuol¹, M. Ridel¹, I. Junqua¹, J-P. Parmantier¹

¹DEMIR - UFTMiP - ONERA – The French Aerospace Lab, F-31055, Toulouse, France, solange.bertuol@onera.fr

Résumé. Cet article présente les avancées récentes faites sur la modélisation de réseaux de lignes de transmission multiconducteurs en vue de simuler des architectures électriques de systèmes réalistes, dans un large spectre de fréquences incluant la très basse fréquence. A ce titre, l'article présente plus particulièrement une technique de modélisation basse fréquence faisant intervenir le concept de « jonction de mode commun » ainsi que les évolutions faites sur la volumétrie des données d'entrée et les performances de calcul pour garder un caractère opératoire à ces techniques de réseaux.

I. INTRODUCTION

Les modèles de réseaux de lignes de transmission multiconducteurs (MTLN) sont désormais bien connus dans la communauté CEM pour leur capacité à modéliser des architectures complexes de faisceaux de torons aéronautiques. Ces techniques reposent pourtant sur des approximations telles que les modes TEM (qui empêchent par exemple de pouvoir simuler des phénomènes de rayonnement EM), l'absence de couplage EM entre les branches de réseaux (qui impose que la seule interaction se fait au niveau des lieux de connexion des branches). Néanmoins, ces approximations se justifient largement dans des gammes de fréquences dans lesquelles les phénomènes de conduction ou de premières résonances sur les câbles sont dominants, d'autant plus que ces techniques offrent un caractère opératoire indéniable pour traiter des architectures complexes de faisceaux de câbles.

Qu'elle soit formulée dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel, la modélisation MTLN présente en effet plusieurs avantages par sa capacité de prise en compte des couplages entre fils, des vitesses de propagation multiples, des multiples niveaux de blindages, des conditions d'installation, des sources de tension et courant locales ou distribuées offrant la possibilité de couplage avec les codes 3D (couplage champ-câble).

Dans cette optique, les formulations fréquentielles des réseaux de MTL présentent elles-mêmes des avantages supplémentaires par rapport aux résolutions temporelles comme la formulation sous forme de modèles topologiques, la possibilité d'inclure des éléments provenant de mesures ou calculs avec des outils annexes (paramètres Z ou Y de jonctions), la possibilité de résoudre un système linéaire en tenant compte de la creusité des matrices dictée par la topologie du réseau.

En particulier, l'équation fréquentielle de Baum-Liù-Tesche (BLT) [1], basée sur une formulation en ondes a

montré durant ces quinze dernières années plusieurs qualités. Elle se prête bien à une formulation modale permettant de prendre en compte efficacement les vitesses de propagation multiples. L'utilisation du formalisme des paramètres-S généralisés permet de prendre en compte des jonctions dont les impédances ou admittances présentent des valeurs singulières (court-circuit, circuit ouvert et connexions idéales entre fils) de même que le compactage de parties de réseaux sous forme de jonctions équivalentes. La formulation BLT est robuste, même quand on descend aux fréquences très basses pour lesquelles on peut montrer qu'on retrouve une formulation de circuit électrique classique.

Développé depuis le début des années 1990 à l'ONERA, le code de calcul CRIPTE repose sur l'ensemble de ces principes. Depuis plusieurs années, celui-ci est porté chez des utilisateurs variés et intégré dans plusieurs plateformes commerciales.

Dans le cadre actuel d'applications aéronautiques, le souci de représentativité de systèmes réalistes sur toute la gamme fréquentielle d'environnement CEM impose aujourd'hui des évolutions de ces outils de câblages selon trois axes de développement bien précis :

- L'évolution des modèles pour des applications de type champ-câble permettant de traiter les aspects HIRF (High Intensity Radiated Fields).
- L'évolution des modèles pour étendre les domaines d'application à des spectres de fréquences plus bas, en particulier pour les problématiques de retour de courant des systèmes de puissance ou pour les problématiques d'effets indirects de la foudre.
- L'évolution des logiciels d'un point de vue informatique en termes d'automatisation des processus de prétraitement, d'augmentation de volumétries des données d'entrée et de sortie et de rapidité des calculs.

L'objet de ce papier est de montrer les évolutions récentes faites suivant ces axes, en prenant comme exemple l'outil CRIPTE de l'ONERA.

II. MODÉLISATION « CHAMP – CÂBLE »

Dans le cadre du projet FP7 HIRF-SE visant à étudier l'apport de la simulation numérique dans le cadre d'une certification EM de type HIRF, l'intégration de CRIPTE dans la plateforme de simulation coopérative HIRF-SE a constitué sans nul doute un virage dans les orientations applicatives que l'on pouvait attendre de tels outils [2]. Son intégration a permis ainsi de réaliser le lien avec plusieurs outils de calcul 3D (ALICE, UGRFDTD, IDSMMMMP...) permettant ainsi de traiter les couplages de type « champ – câble » nécessaires à toute étude HIRF.

Pour démontrer la pertinence de cette interaction 3D / 2D, les résultats obtenus sur une des configurations traitée dans le cadre de ce projet sont décrits ci-dessous.

Cette configuration est l'illumination d'un avion Piaggio P180, par une antenne log périodique dans la bande fréquentielle [50MHz – 400MHz] en polarisation verticale, qui a été réalisée au centre d'essai d'Alenia Aermacchi' à Turin (voir Fig. 1). Le but de cet essai est d'évaluer les courants en entrée de connecteurs de l'équipement AHC (Attitude Heading Computers de Selex Galileo) qui est positionné dans le nez de l'avion (voir Fig. 2). Pour permettre d'évaluer ces courants, la carte de l'équipement AHC a été instrumentée et une pince de courant a été positionnée sur son harnais



Fig. 1. Configuration d'essai du Piaggio P180 avec l'antenne log périodique (source Alenia-Aermacchi).



Fig. 2. Vue de l'équipement AHC 1 dans le nez du P180 (source Alenia Aermacchi).

L'environnement d'essai, i.e. l'antenne et l'avion, a été modélisé par IDS avec l'outil AEM Mesher à partir des fichiers CAO disponibles (voir Fig. 3 et Fig. 4) pour

obtenir un modèle équivalent utilisable dans leur code de calcul MoM 3D (IDSMMMMP) (voir Fig. 5). A partir de ce modèle, les champs EM incidents le long de la fibre neutre des harnais d'intérêt ont alors été calculés.

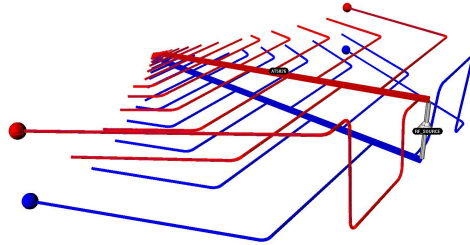


Fig. 3. Exemple de CAO de l'antenne log périodique (source IDS).

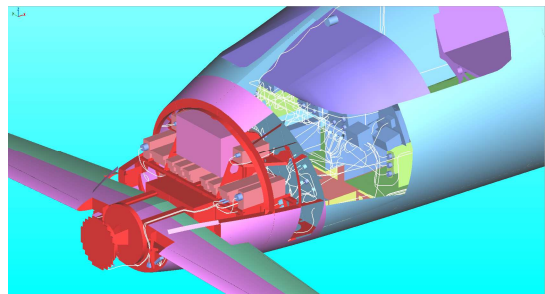


Fig. 4. Exemple de CAO du nez du P180 (source Piaggio / IDS).

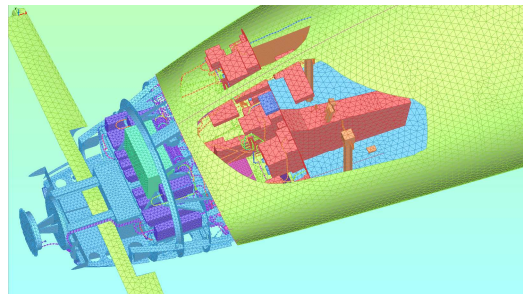


Fig. 5. Modèle équivalent maillé (source IDS).

A partir des données d'architectures électriques (fonctionnelles et d'installation), un modèle de réseau topologique de l'architecture du système étudié a été construit et caractérisé en termes de matrices [RLGC] ainsi que de jonctions terminales prenant en compte les impédances réelles de charges (voir Fig. 6). Les champs EM déterminés lors du calcul 3D sont alors appliqués sur le réseau topologique 2D.

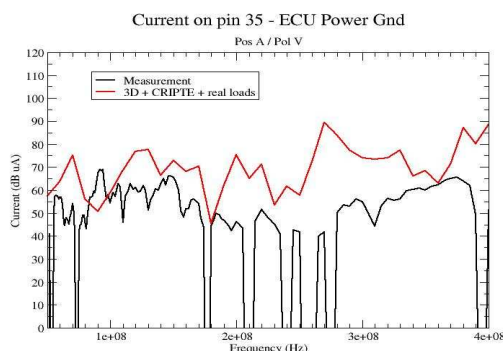
La Fig. 7 compare le courant total de harnais mesuré et calculé numériquement à 20 cm de l'équipement AHC 1 (voir Fig. 2). On remarque une relativement bonne concordance entre la mesure et la simulation. Une analyse sur la compréhension de l'écart de niveau a montré qu'à chaque étape de modélisation (antenne / avion / harnais) des petits écarts étaient présents, dus à la difficulté de

The figure displays four network diagrams arranged in a 2x2 grid, illustrating the evolution of the P180 cab network. Each diagram consists of nodes represented by circles containing numbers and edges represented by lines with associated weights and directions.

- Top-left: Network: P180_cab_left** - Shows a complex network with numerous nodes and edges. Key features include a central cluster of nodes (e.g., 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12) and several peripheral nodes connected by weighted edges. Weights are given in dm or n.
- Top-right: Network: P180_cab_right** - Similar to the left version, but with different edge weights and node connections, reflecting a modified network state.
- Bottom-left: Network: P180_NC_Left** - Shows a more simplified network structure compared to the top-left, with fewer nodes and edges, indicating a reduction in complexity.
- Bottom-right: Network: P180_NC_Right** - Similar to the bottom-left, but with different edge weights and node connections, representing another modified network state.

La Fig. 8, quant à elle, compare le courant mesuré et calculé au niveau de la broche 35 du connecteur de l'équipement AHC 1. Une concordance satisfaisante est observée entre la mesure et la simulation au niveau de cette broche (basse impédance). Il est à noter que lors de la mesure, le détecteur mis en œuvre a décroché dû à sa sensibilité de mesure, ce qui se traduit par les sauts de la Fig. 8.

L'ensemble de ces résultats a contribué à démontrer que la simulation numérique était en mesure d'aider à la certification HIRF des aéronefs.



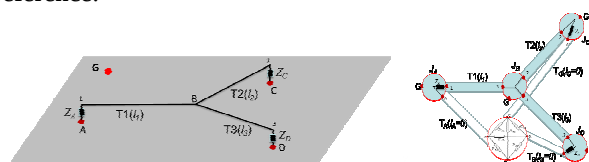
III. MODELISATION BASSE FREOUENCE

III.1. Principe d'une jonction de mode commun

III.1. Principe d'une jonction de mode commun

Le formalisme des lignes de transmission, vu classiquement comme un support de propagation d'onde progressive ne se prête pas immédiatement à des modèles basses fréquences. En effet, dans une géométrie de structure 3D non parfaitement conductrice, le retour de courant se fait par des chemins qui ne suivent pas le conducteur de signal de la ligne de transmission. C'est le problème typique des retours de courant et de la redistribution des courants de foudre sur des structures composites. D'un point de vue modélisation, cela se traduit par des modèles différents de ceux des modèles conventionnels (qui supposent des retours de courant localement sous le conducteur de signal) et par la nécessité de trouver un formalisme englobant ces retours de courant entre les différents points de connexion du réseau de câblage à la structure.

On peut montrer qu'en basse fréquence, le retour des courants d'un réseau de câblage peut se décrire par une jonction, dite de « mode commun » [3], dont les ports sont les points de connexion du réseau à la structure (Fig. 9). Cette jonction contient la matrice impédance entre tous les points de connexion du câblage au plan de référence.



Cette jonction de « mode commun », qui peut être évaluée par un code 3D comme présenté dans le paragraphe suivant, est ensuite incluse dans le réseau CRIPTE multiconducteur comme toute autre jonction du

réseau. La connexion de cette jonction de mode commun au reste du réseau de câbles multiconducteurs est simplement réalisée par des tubes de longueur nulle.

D'autre part, le formalisme de la théorie des lignes de transmission implémenté dans CRIPTE impose un point dit « de référence » pour le calcul des impédances. Ce point de référence peut être choisi arbitrairement sur le plan de sol.

III.2. Évaluation de la jonction de mode commun

La jonction de « mode commun » entre les points de connexion (ou ports) du câblage au plan de référence contient la matrice qui relie les tensions à ces ports aux courants entrants dans ces ports. Ainsi pour une configuration à 4 points de connexion (Fi-j) sur un plan de sol et un point de référence, O, tel que illustré sur la Fig. 10, la matrice de mode commun est définie par :

$$[Z_{CM, 4 \times 4}] = \begin{bmatrix} Z_{CM,11} & Z_{CM,12} & Z_{CM,13} & Z_{CM,14} \\ Z_{CM,21} & Z_{CM,22} & Z_{CM,23} & Z_{CM,24} \\ Z_{CM,31} & Z_{CM,32} & Z_{CM,33} & Z_{CM,34} \\ Z_{CM,41} & Z_{CM,42} & Z_{CM,43} & Z_{CM,44} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Où les tensions V1 à V4 sont définies par :

$$\begin{bmatrix} V_1 = V_{F2-1} - V_0 \\ V_2 = V_{F2-2} - V_0 \\ V_3 = V_{F1-3} - V_0 \\ V_4 = V_{F1-4} - V_0 \end{bmatrix} = [Z_{CM, 4 \times 4}] \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

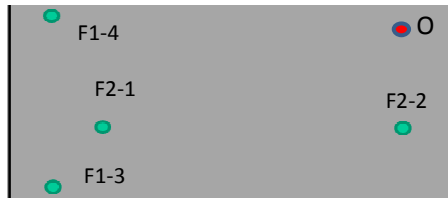


Fig. 10. 4 points de connexion sur un plan de sol

La matrice impédance peut être calculée par un code 3D (en privilégiant les codes capables d'approcher les très basses fréquences) en simulant le principe de mesure classique d'une impédance en appliquant des conditions d'extrémités particulières sur les ports à l'aide de fils dédiés. Ainsi, un des termes de la matrice $[Z_{CM, 4 \times 4}]$ est-il donné par :

$$Z_{CM,ij} = \left. \frac{V_i}{I_j} \right|_{I_{k \neq j} = 0} \quad (3)$$

Il suffit donc de mettre en place ces fils dédiés entre le port O (extrémité de référence en court-circuit) et tous les autres ports puis de fixer les conditions de charge sur les ports actifs en fonction de la colonne de la matrice à

déterminer. Pour la détermination de la première colonne de la matrice relative à la Fig. 10, cela revient à créer 4 fils à partir du point O, connecter le fil sur le port O sur court-circuit, connecter les fils sur les ports F2-2, F1-3 et F1-4 sur un circuit ouvert (ou plutôt de manière pratique une forte impédance, typiquement $R_{co}=1 \text{ M}\Omega$). On applique ensuite un générateur de tension au niveau de l'accès F2-1 sur le fil entre le point O et le port F2-1 pour fixer le potentiel sur ce port. Il est bien entendu impératif que les fils dédiés introduits artificiellement pour déduire les termes de la matrice impédance de mode commun du plan de référence soient sans pertes de façon à discriminer uniquement les pertes résistives du plan de sol.

Néanmoins, l'approche décrite plus haut oblige à créer un nombre de fils fictifs égal au nombre de ports. On peut donc envisager de réduire le nombre de fils en utilisant les fils maillés ou les routes de câbles utilisées pour le couplage champ-câble (voir Fig. 11).

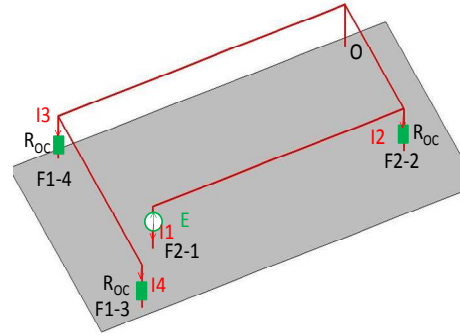


Fig. 11. Procédure d'évaluation de la 1^{ère} colonne de la matrice $[Z_{CM}]$

III.3. Application – Influence d'un retour de courant sur les courants induits

Ce principe d'évaluation de la jonction de mode commun par un code 3D et intégration de celle-ci dans un réseau CRIPTE a été appliqué afin d'évaluer l'influence de la présence d'un réseau de retour de courant sur les courants induits sur des câbles par une injection de courant type foudre onde H sur le plan de référence comme illustré sur la Fig. 12. Le retour de courant est connecté au plan de référence composite par quatre fils aux quatre coins.

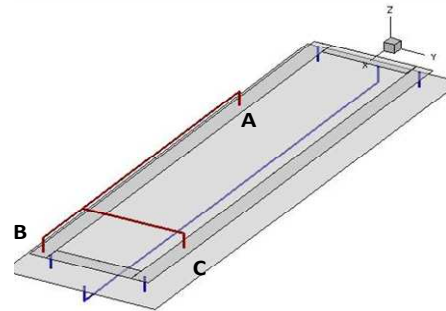


Fig. 12. Cas-test d'application

Dans cette application, la matrice de jonction de mode commun a été évaluée suivant la procédure décrite dans le paragraphe précédent avec le code LIRIC de l'ONERA basé sur une représentation filaire PEEC quasi-statique. Les champs électriques incidents générés par l'injection de courant foudre sous le plan sur la route des câbles ont été calculés par le code FDTD ALICE de l'ONERA. Finalement, le réseau CRIPTE représentant le câblage seul incluant comme termes sources les champs électriques d'ALICE et la matrice de mode commun déduite des calculs LIRIC a permis de déterminer les courants induits résultants sur le câblage sous test. Comme illustré sur la Fig. 13, les résultats obtenus par cette méthode de couplage champ-câble ont été comparés aux courants obtenus par le code FDTD ALICE lorsque les fils sont maillés dans le modèle 3D.

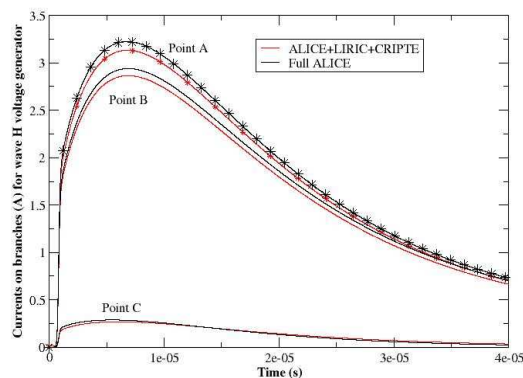


Fig. 13. Comparaison méthode couplage champ-câble – méthode directe – conductivité=20000S/m et présence du retour de courant

IV. EVOLUTIONS DES PERFORMANCES

Lors du projet HIRF-SE, il a été démontré que l'automatisation des processus de saisie des données d'entrée était devenue absolument nécessaire pour répondre à ce souci de représentativité permettant de décrire correctement l'architecture de câblage d'un système réel tel qu'un avion. Ainsi, depuis quelques années, les industriels se dotent-ils de moyens pour regrouper dans un même environnement l'ensemble des données 3D et de câblages requis pour construire une simulation MTLN pour des applications CEM précises. C'est le cas des environnements « eCENTRIC-EMC » de Labinal-Power-Systems [4] ou « ARCHIMAT » de Dassault Aviation.

A partir de cette constatation, l'outil CABLESIM, développé par la société AxesSim, a été défini et développé. Cet outil permet, à partir d'un format de description commun, de créer l'ensemble des données d'entrée à une simulation CRIPTE, i.e. de définir le réseau topologique, les sections droites de harnais, les calculs des matrices [RLGC] et la carte de lancement CRIPTE (voir Fig. 14). L'outil permet aussi de distribuer les différentes phases de calcul en fonction de la machine

utilisée (multiprocesseurs, carte GPU) pour permettre une optimisation du temps de calcul, et enfin de post-traiter les résultats. Notons que CABLESIM est compatible avec les environnements « Archimat » et « eCENTRIC-EMC ».

Il n'en demeure pas moins que les modèles générés restent très gros: d'une taille maximale de problèmes à une cinquantaine de tubes et une cinquantaine de fils en 2012 [5], ces processus orientés vers des applications industrielles amènent aujourd'hui à être capables de traiter des problèmes à plusieurs centaines de tubes, de fils par tubes et de ports par jonction. Néanmoins, l'enjeu est que cette capacité à digérer ces données ne doit pas se faire au détriment de la vitesse du calcul qui a toujours été une des spécificités des calculs sur câbles comparée aux calculs 3D.

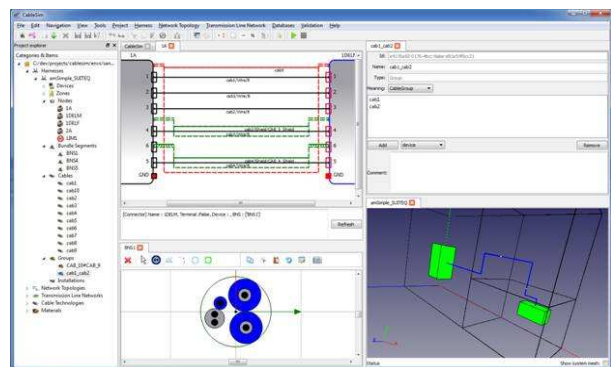


Fig. 14 – Vue de l'interface utilisateur du logiciel CableSim.

Pour permettre de répondre à cette problématique, deux axes d'étude ont été développés :

- Tout d'abord, le premier axe a été de réduire le nombre de fils par tube en appliquant des techniques de réduction de modèle soit par approche mathématique [5] ou par approche géométrique [6]. notons que celles-ci sont généralement applicables lorsque l'on cherche à déterminer des courants globaux de harnais pour des excitations de mode commun comme dans le cas d'étude HIRF. Par contre, avec de telles techniques, il est relativement difficile de remonter à l'information au niveau du conducteur unitaire.
- Le second axe d'étude est purement au niveau du logiciel. En effet à ce jour, l'objectif de performance de calcul est assuré par des moyens purement informatiques par l'utilisation combinée de bibliothèques de calcul numérique matriciel optimisées, de la mise à profit des capacités de compilation et de performance des architectures modernes des processeurs multi-cœurs. Dans le cadre du projet de démonstrateur GENOME (GESTioN OptiMisée de l'Energie) du

CORAC, et plus particulièrement dans le projet eCENTRIC-EMC [4] réalisé avec LPS, l'outil CRIPTE a ainsi été remanié informatiquement par une refonte optimisée des algorithmes pour optimiser les ressources mémoires et ainsi augmenter la volumétrie traitée. Cette refonte a permis aussi d'obtenir des gains de temps de calcul significatifs. Par exemple, la configuration décrite dans [5] qui nécessitait 4h 22min en 2014 prend maintenant seulement 18min avec la nouvelle version de CRIPTE (voir Fig. 15).

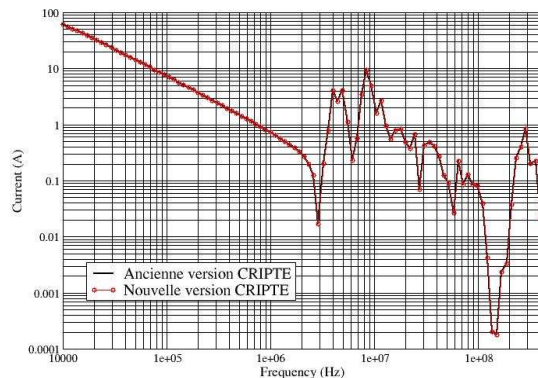


Fig. 15 – Vérification de la non régression de la nouvelle version CRIPTE sur un cas test de [5].

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce papier, nous avons présenté les avancées récentes faites sur la modélisation de réseaux de lignes de transmission multiconducteurs, et plus particulièrement au niveau du logiciel CRIPTE, en vue de simuler des architectures électriques de véritables systèmes, dans un large spectre de fréquences.

A ce jour, malgré les progrès faits dans le domaine, on peut seulement traiter des parties de câblages correspondant par exemple à des fonctions électriques précises d'un système aéronautique. La capacité à pouvoir traiter l'ensemble d'un câblage avion devra passer tout d'abord par l'établissement de règles de simplifications afin de diminuer la taille du problème et s'accompagnera aussi de problématiques scientifiques qu'il faudra résoudre conjointement.

Les perspectives identifiées par l'ONERA autour de la problématique des câblages sont :

- Le développement et l'intégration des modèles très basses fréquences pour prendre en compte les problématiques de retour de courant en incluant les aspects très basses fréquences, voire DC.
- Le développement de modèles pour prendre en compte les aspects des câbles de transport des fortes puissances que l'on recense autour des

problématiques de l'avion plus ou tout électrique.

- La prise en compte de l'interaction des phénomènes physiques non liés à l'électromagnétisme, comme par exemple la thermique [7].
- L'optimisation des codes de calcul pour les rendre opérationnels tant en termes de volumétrie que de temps de calcul.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été financés par l'ONERA, le projet CleanSky ARROW (grant agreement CS-GA-2013-33-7397), le projet FP7 HIRF-SE (grant agreement 205294) et le projet eCENTRIC-EMC avec LPS dans le cadre du projet de démonstrateur GENOME (GEstioN OptiMisée de l'Energie) du CORAC.

REFERENCES

- [1] C. E. Baum, T. K. Liù, F. M. Tesche, "On the Analysis of General Multiconductor Transmission-Line Networks", Interaction Notes, Note 350, novembre 1978
- [2] J-P. Parmantier, M. Ridel, S. Bertuol, I. Junqua, C. Giraudon, C. Girard, F. Terrade, J-P. Moreau, "Modelling of HIRF coupling on Complex Cable Architectures", ICEAA - IEEE APWC, Torino, 12 – 17 septembre, 2011
- [3] I. Junqua, J-P. Parmantier, D. Prost, "Modelling common mode impedances for lightning indirect effects on multiconductor cables into composite aircraft equipped with current return networks", ICOLSE 2015 – Toulouse, septembre 2015
- [4] C. Jullien, M. Ridel, C. Giraudon, J. Genoulaz, A. Dieudonné, J-P. Parmantier, S. Bertuol, C. Girard : « Détermination de la diaphonie entre plusieurs harnais complexe au sein d'un avion », CEM 2016, Rennes, juillet 2016
- [5] M. Ridel, J.P. Parmantier, "Equivalent cable-bundle model for large cable response in complex vehicle environment". ESA Workshop on aerospace EMC, Venise, Italy, May 21-23, 2012.
- [6] M. Ridel, J.P. Parmantier, "Determination of EM coupling on an Electrical Wiring Interconnection System - Application of condensation approaches on cable model". Asia EMC'14, Tokyo, 13-16 mai, 2014.
- [7] F. Mahiddini, M. Ridel, P. Reulet, D. Donjat, P. Millan, « Simulations multi-physiques CEM-Thermique de torons de câbles », CEM 2016, Rennes, juillet 2016.