

Modélisations et simulations des phénomènes foudre : comparaison des matériaux pour l'aéronautique en modes conduit et rayonné

Ali Jazzar, Edith Clavel, Gérard Meunier

▶ **To cite this version:**

Ali Jazzar, Edith Clavel, Gérard Meunier. Modélisations et simulations des phénomènes foudre : comparaison des matériaux pour l'aéronautique en modes conduit et rayonné. 2EMC : embedded EMC, Nov 2010, Rouen, France. hal-00538486

HAL Id: hal-00538486
https://hal.science/hal-00538486

Submitted on 22 Nov 2010

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.

Modélisations et simulations des phénomènes foudre : comparaison des matériaux pour l'aéronautique en modes conduit et rayonné

JAZZAR Ali, CLAVEL Edith, MEUNIER Gérard

G2Elab, BP 46, F-38402 Saint Martin d'Hères Cedex, France, D009
Email : Ali.Jazzar@g2elab.grenoble-inp.fr

Résumé — Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés lors de la conception d'aéronefs. Leur faible poids et leur excellente robustesse les rendent attractifs devant les matériaux métalliques jusqu'alors utilisés. Cependant, la conductivité électrique de ces matériaux est faible devant celle des métaux. Ainsi, lors du foudroiement d'un avion, les courants circulant sur la peau externe ne seront pas évacués aussi facilement via le composite que via l'aluminium et seront donc à même de se coupler sur les torons internes. L'objectif de ce papier est de comparer deux échantillons représentatifs du cylindre en matériaux composite et aluminium. On cherchera à caractériser les courants circulant dans ces matériaux et dans des câbles à proximité, en modes conduit et rayonné, sur une large gamme de fréquence. La méthode PEEC (Partial Element Equivalent Circuit) sera utilisée à cet effet. Cette étape cruciale permettra de faire un état des lieux des méthodes existantes et de leurs performances en terme :

- d'évaluation des circulations des courants,
- de la prise en compte des matériaux composites,
- du calcul du couplage champ câble, et de la linéarité du problème.

Mots-clés : PEEC method, lightning, eddy currents, conducted and radiated current density

1. INTRODUCTION

Les 40 dernières années ont vu une augmentation progressive du pourcentage de matériaux composites à fibre de carbone (Carbone Fibre Reinforced : CFR) dans les structures aéronautiques. Ces matériaux présentent une rigidité et une résistance spécifique plus élevée que les métaux, ainsi qu'une tenue à la corrosion. Néanmoins, un désavantage notable les caractérise : ils n'évacuent pas le courant aussi bien que le métal du fait de leur plus faible conductivité électrique. Ceci permet de concevoir des structures avec des inspections plus importantes qu'avec des solutions métalliques, ce qui est particulièrement recherché des compagnies aériennes [1-2].

Les systèmes de l'avion plus électrique nécessitent donc l'application d'une nouvelle architecture électrique qui permette une optimisation de la protection contre la foudre.

Cette apparition conjointe du développement du réseau électrique embarqué et de ce nouvel environnement électromagnétique ne va pas sans poser des questions fondamentales quant à la mise en oeuvre de ces réseaux de bord : comportement face à la foudre, équipotentialité [1], sont autant de problèmes ouverts vis-à-vis des fonctionnalités des réseaux électriques. De surcroît un autre paramètre doit également être pris en compte, celui des courants circulant dans le composite lui-même. Ces courants peuvent provoquer des échauffements locaux et des dégradations, et doivent donc être parfaitement maîtrisés. Il est alors capital de pouvoir modéliser le comportement d'un ensemble câble de puissance–peau composite, incluant les éventuelles armatures, pour pouvoir caractériser les courants circulant dans la peau.

L'enjeu de ce papier est de montrer comment une représentation par un circuit électrique équivalent global du dispositif 3D étudié et de son environnement peut être utile pour évaluer l'impact

d'un foudroiement. Dans la section 2, les cas d'étude seront présentés. La méthode de modélisation utilisée est la méthode PEEC, dont les principes seront rappelés au paragraphe 3. La section 4 sera consacrée à l'analyse des résultats obtenus. On montrera qu'il est possible d'effectuer cette modélisation d'une manière assez précise pour proposer de véritables outils d'aide à la conception des futurs réseaux de bord dans un environnement électromagnétique aussi complexe. Une résolution de type circuit présente alors les avantages suivants :

- Un temps de calcul bien moins important qu'une résolution de type éléments finis,
- Une analyse paramétrique plus aisée, propre aux modèles de circuit.

2. CAS D'ETUDE

2.1 Géométries des cas d'étude

L'objectif du premier cas d'étude est d'identifier les phénomènes physiques de redistribution du courant en mode conduit dans le cas de matériau composite ou aluminium pour évaluer l'impact de leurs propriétés électriques différentes sur la répartition des courants.

Pour cela, nous avons décrit un cylindre, en matériau composite ou en aluminium (Figure 1). Un courant d'amplitude 200 kA est injecté dans le cylindre et un câble en aluminium est connecté aux extrémités du cylindre. Ainsi on pourra évaluer la proportion de courant dans chaque partie du dispositif selon le matériau du cylindre.

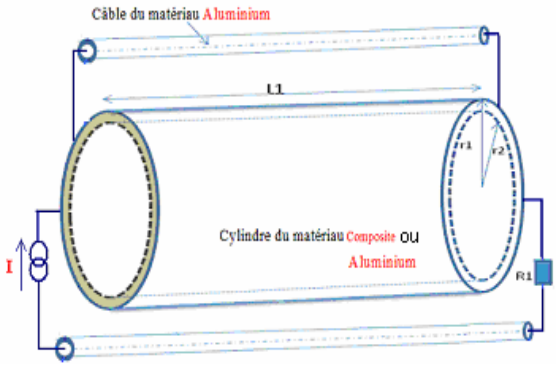


Figure 1: dispositif décrit pour l'étude en mode conduit

L'objectif du deuxième cas d'étude est d'étudier le mode rayonné. Nous avons repris le même cylindre, avec la même injection de courant. Mais cette fois-ci, deux câbles en aluminium, l'un à l'intérieur et l'autre à l'extérieur du cylindre sont connectés entre eux pour étudier les courants induits sur ces derniers (Figure 2).

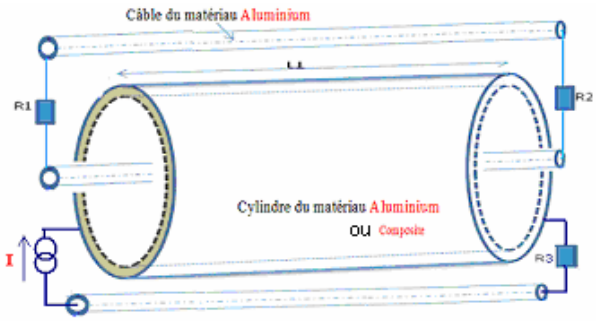


Figure 2 : dispositif décrit pour l'étude en mode rayonné

Les différents paramètres physiques de ces cas d'étude sont :

- la longueur du cylindre et des câbles de 1 mètre,
- le diamètre du cylindre de 1 mètre,
- l'épaisseur du cylindre de 2 mm,
- la section des câbles est de 25 mm²,
- la conductivité du composite est 500 S/m,
- la conductivité de l'aluminium est 4E7 S/m,
- la fréquence d'étude varie entre 100 Hz et 100 MHz.

La présente étude se focalise sur la mise en évidence des différences entre l'utilisation de l'aluminium et du composite.
De ce fait, on ne rentre pas dans le détail de la fabrication du matériau composite, mais on considérera une conductivité homogène de ce matériau.

2.2 Modèle de la foudre

La foudre est un phénomène naturel dangereux pouvant avoir un impact important sur les systèmes électriques : destruction ou dysfonctionnement des équipements. La foudre, ce n'est pas seulement des éclairs entre deux nuages ou encore à l'intérieur même d'un nuage. Ces derniers se produisent à plusieurs kilomètres d'altitude et rendent vulnérable tout avion naviguant dans une telle zone.

Une réglementation permet de définir que l'onde de courant de foudre sera assimilée à une onde de courant d'arc électrique dont les caractéristiques (intensité, temps, di/dt) sont précisées. Plusieurs formes d'ondes en fonction du type de phénomène que l'on souhaite caractériser sont associées [3-4-5].

Les allures temporelles du courant foudre sont présentées en Figure 3.

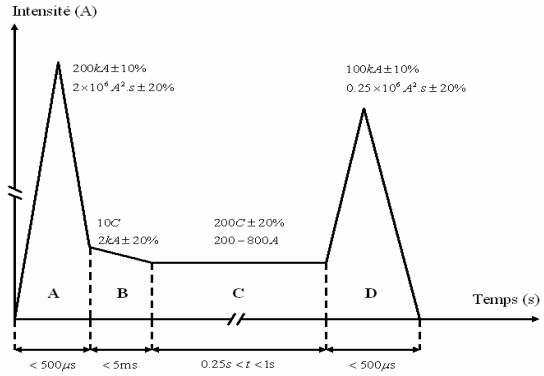


Figure 3: modèle de l'onde de courant associée à la foudre

3. METHODE DE MODELIATION

Nous proposons d'utiliser la méthode PEEC [6-7], méthode intégrale permettant une approche finie des phénomènes, sans présenter la lourdeur des éléments finis car l'air environnant n'est pas maillé. Dans sa utilisation la plus courante, la méthode PEEC consiste à modéliser les caractéristiques résistives et inductives des conducteurs. Dans un première temps et à basses fréquences, ce modèle est largement suffisant. Pour appliquer la méthode PEEC, la densité de courant à l'intérieur des conducteurs doit être uniforme. Mais concernant l'application étudiée, la gamme de fréquences étendue nécessite la prise en compte des effets de proximité et peau car la densité de courant n'est pas uniforme dans les conducteurs. Aussi un maillage des conducteurs doit être appliqué et est judicieusement mis en œuvre selon la géométrie du conducteur. Nous appelons conducteur unidirectionnel un conducteur dans lequel la direction du courant est connue (Figure 4) et conducteur bidirectionnel un conducteur dans lequel le courant se développe dans un plan comme représenté (Figure 5). Chaque élément du maillage est représenté par une inductance partielle, une résistance partielle et des mutuelles partielles avec le reste du circuit. Le maillage du dispositif d'étude autorise une circulation quelconque du courant dans la peau du cylindre, et impose une direction longitudinale pour les câbles.

Pour obtenir un modèle fiable pour des fréquences plus élevées, il est nécessaire de prendre en compte les effets capacitifs. Ce qui a été fait dans [8].

Dans notre cas, la fréquence n'est pas suffisamment élevée pour que cet effet intervienne.

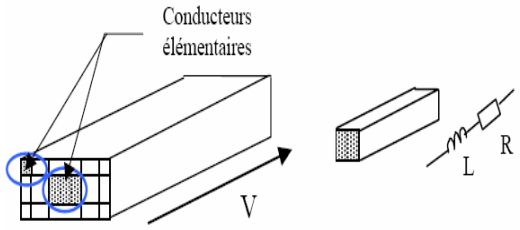


Figure 4: maillage unidirectionnel des câbles

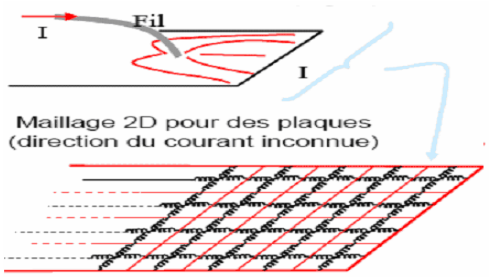


Figure 5: maillage bidirectionnel du cylindre

L'objectif de cette méthode est de reproduire le plus fidèlement possible la distribution de courant qui surviendrait sur aéronefs lors d'un foudroiement en vol et ce dans le but de dimensionner les contraintes auxquelles pourraient êtres soumis les équipements lors d'un foudroiement de l'aéronef.

Cette méthode a été implantée dans le logiciel InCa3D [6], développé par Cedrat et G2Elab en collaboration et commercialisé par Cedrat.

4. RESULTATS

La méthode PEEC a donc été utilisée pour modéliser la structure présentée au paragraphe 2. Le maillage adopté tient compte de la gamme de fréquences ainsi que de la taille de la matrice générée. Ainsi, le nombre de mailles créées est égal à 7105 et permet d'obtenir des résultats convergents pour la gamme de fréquences considérée.

Ainsi, même si la topologie du circuit équivalent est fixe, l'impédance qu'il présente évolue donc avec la fréquence ce qui permet de prendre en compte ce paramètre dans le calcul du courant.

4.1 Premier cas d'étude

Une des conséquences les plus importantes de l'utilisation de matériaux composites est le

phénomène de redistribution : la circulation du courant foudre sur un avion composite est très différente de celle obtenue sur un avion métallique traditionnel. D'une manière générale, le courant foudre circule sur les parties les moins impédantes de l'aéronef, c'est-à-dire les parties les moins inductives en haute fréquence et les parties les moins résistives en basse fréquence

- Les hautes fréquences de la foudre circulent donc préférentiellement sur les structures de plus fort rayon (moins inductives), c'est-à-dire principalement le fuselage, qu'il soit métallique ou composite.
- Les basses fréquences de la foudre circulent sur les parties les moins résistives. Il se répartit sur le fuselage, les câbles, les rails,… au prorata de leur résistance.

Dans le cas d'un avion composite, la résistance électrique plus élevée du fuselage (de l'ordre de 10 à 100 fois plus importante que celle d'un fuselage métallique) entraîne qu'une plus grande partie du courant foudre basse fréquence circule dans les éléments internes métalliques, meilleurs conducteurs ; c'est le phénomène de redistribution des courants. Ces courants internes présentent une intensité très élevée, une durée très longue, qui peut excéder celle du phénomène foudre (contenu spectral en basse fréquence), une énergie très importante.

Sur les figures 7 et 8, nous pouvons comparer les deux cas d'études. Ainsi, pour le cas comportant le matériau composite, on retrouve le quart du courant dans les câbles (aluminium) pour les basses fréquences. Au fur et à mesure que la fréquence augmente, ce courant diminue jusqu'à s'annuler. Aussi, on obtient pour le cylindre, les trois quarts du courant en basses fréquences et la totalité du courant en hautes fréquences. D'où lors de l'utilisation d'un matériau composite, la problématique se pose essentiellement en basses fréquences. Dans le cas d'un avion entièrement métallique, la résistance du fuselage étant très faible, la très grande majorité des basses fréquences de la foudre circule également sur la surface métallique de l'avion. Une très faible quantité de courant circule dans les éléments internes (câblage…). Le courant dans la structure de cylindre est le même sur toute la plage de fréquence et est égal au courant injecté.

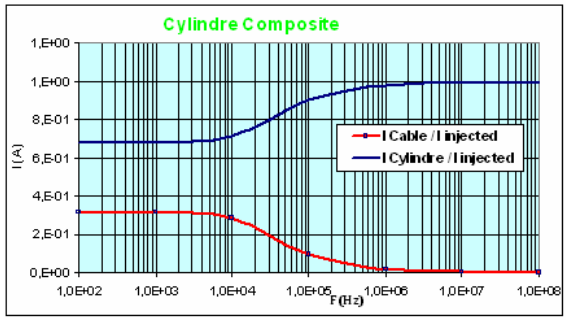


Figure 6: Redistribution du courant dans le câble en aluminium et le cylindre en matériau composite

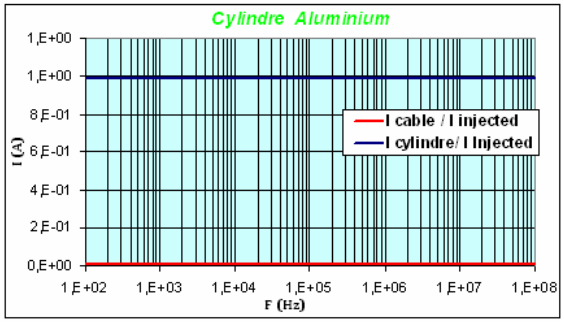


Figure 7: Redistribution du courant dans le câble et le cylindre en aluminium

4.2 Second cas d'étude

La circulation du courant sur la structure du cylindre génère un champ magnétique intense autour de cette structure. Ce champ magnétique varie dans le temps. Une partie de ce champ magnétique peut pénétrer par phénomène de diffraction et diffusion. Ce champ magnétique se couple aux câbles, provoquant des surtensions à leurs extrémités.

Dans le cas étudié pour notre application, les résultats obtenus sont présentés sur la figure 8. Une première analyse nous permet de montrer que le courant est presque la même dans les deux cas.

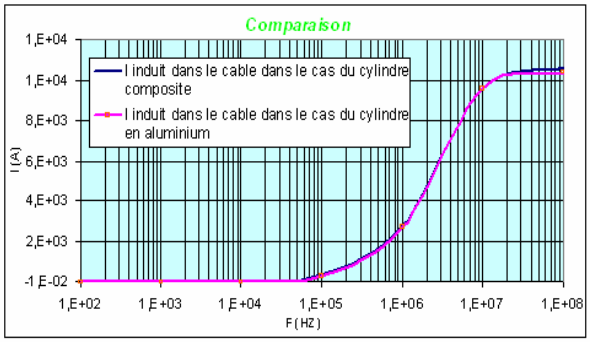


Figure 8: Courant induit sur le câble dans les cas du cylindre composite ou aluminium

4.3 Prise en compte de la foudre

La foudre est un phénomène temporal dont la forme d'onde a été présentée figure 3. Or en utilisant le logiciel InCa3D, on a accès à un schéma électrique utilisé en post processing pour faire des analyses harmoniques principalement.

Aussi pour accéder à une information pertinente pour les industriels de l'aéronautique, on extrait un schéma équivalent du dispositif étudié à une fréquence donnée. Ce circuit est ensuite implanté dans un logiciel de type circuit pour alors obtenir la réponse temporelle en l'alimentant avec une source qui permettra de décrire fidèlement la foudre. Ceci a été effectué en utilisant le logiciel Portunus [9] connecté automatiquement à InCa3D.

Les premiers résultats obtenus sur une structure cylindrique avec plusieurs câbles à l'intérieur (Figure 9) sont présentés figure 10. On remarque effectivement que selon le câble, sa position par rapport à l'injection du courant foudre, le courant sera différent.

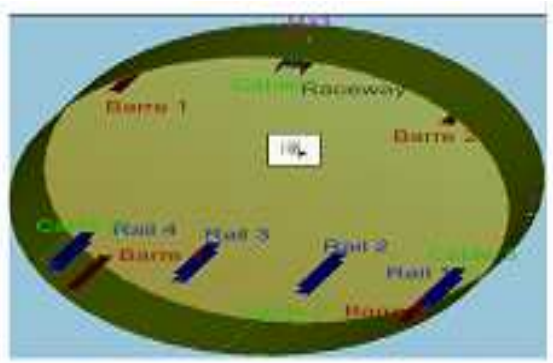


Figure 9: Structure cylindrique avec plusieurs câbles à l'intérieur

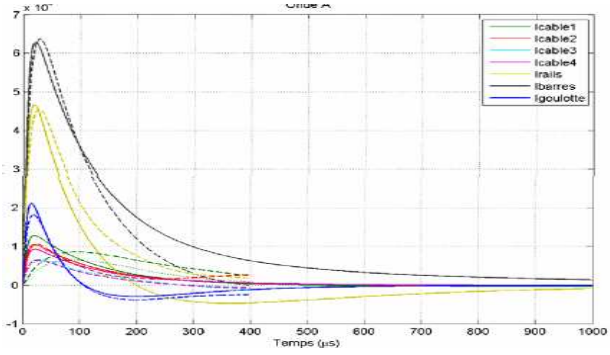


Figure 10 Réponse temporelle des courants dans chacun des câbles suite à une injection foudre

5. CONCLUSIONS

En conclusion, il est montré que la méthode PEEC est tout à fait adaptée pour l'analyse de l'impact de la foudre sur les matériaux composites. On peut ainsi envisager d'évaluer :

- la répartition du courant dans le cylindre ou la répartition des courants induits dans les câbles.
- la caractérisation de courants induits dans la peau au voisinage d'un cylindre véhiculant un courant. En effet, la prise compte de l'ensemble des couplages permet naturellement la prise en compte des courants induits. Cette analyse peut être effectuée à plusieurs fréquences, pour prendre en compte le spectre de la foudre.

Nous avons montré que la problématique pour le cas avec le matériau composite se situe essentiellement en basses fréquences puisqu'à haute fréquence, la quasi-totalité du courant circule dans le cylindre et les perturbations sont donc négligeables. Cette conclusion s'allie parfaitement avec l'utilisation de la méthode PEEC sans prise en compte de l'effet capacitif qui est adaptée pour modéliser des problèmes basses fréquences.

Par ailleurs, les premiers résultats de réponses temporelles sont prometteurs et ont permis de montrer que l'enchaînement judicieux de différentes méthodes de modélisations et outils est une solution industriellement viable.

Il est néanmoins évident que la bonne connaissance des propriétés des matériaux utilisés est nécessaire surtout concernant le composite. Une étude sur l'influence des différentes manières de fabriquer ce matériau (tissage) pourrait amener des compléments sur les paramètres à introduire dans la méthode PEEC.

6. REMERCIEMENTS

Ces travaux de recherche ont été effectués dans le cadre du projet PREFACE (Projet d'Etude Foudre sur Avion Composite plus Electrique). Les auteurs souhaitent remercier les porteurs de ce projet ASTECH : Hispano-Suiza, AESE : Safran Engineering Service, PEGASE : Eurocopter.

7. REFERENCES

[1] S. Baldacim, N. Cristofani,C. do Nascimento Santos, J. Lautenschlager, *"Study of lightning Effects in Aircraft"*, SAE Tecnical Paper, 2001.

[2] D. Heidlebaugh, W. Avery, S. Ulrich, *"Effects of lightning Currents on Structural Perfomance of composite Material"*, SAE Tecnical Paper, 2001.

[3] Plumer, Perala, Fisher, "*Lightning protection of aircraft*", Lightning, 2°edition 1999

[4] MADERE, "*Définition de méthodes d'essais avion applicables aux menaces HIRF et foudre*", project report 2002-71935/4-DCR/B

[5] Krietenstein, B.; Schuhmann, R.; Thoma, P.; Weiland, T, *"The Perfect Boundary Approximation technique facing the challenge of high precision field computation*", Proc. Of the XIX International Linear Accelerator Conferaence (LINAC'98), Chicago ,USA, pp.860-862, 1998

[6] Logiciel InCa3D-www.cedrat.com

[7] A.E.Ruehli, *"Equivalent Circuits Models for three Dimensional Multiconductor Systems"*, IEEE Transactions on Microwave theory and Techniques, Vol MTT 22, N°3, March 1974.

[8] V. Ardon *"Méthodes numériques et outils logiciels pour la prise en compte des effets capacitifs dans la modélisation CEM de dispositifs d'électronique de puissance"*, Thèse de doctorat, Grenoble, Juin 2010

[9] Logiciel Portunus-www.cedrat.com