

## AVION COMPOSITE: NOUVEL ENVIRONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE DANS LA DISTRIBUTION ELECTRIQUE

A.GOLEANU\*, JM.GUICHON\*, JL.SCHANEN\*,  
M.DUNAND\*\*, M.LIONET\*\*\*

(\*) G2ELab, CNRS UMR 5269 INPG/UJF, ENSIEG, B.P. 46 38402 St Martin d'Hères Cedex

(\*\*) Labinal, Groupe Safran, Avenue du Président Roosevelt, 31340 Villemur-sur-tarn,

(\*\*\*) Cedrat, 5 Chemin de Malacher, Inovalée, 38246 Meylan Cedex; FRANCE

**Résumé.** Les avions du futur verront l'apparition de matériaux composite en remplacement des châssis métalliques actuels. Cette nouvelle donne électromagnétique impose une mutation profonde dans la conception des réseaux de retour de courant, puisque la carlingue ne peut plus être utilisée à cet effet, les densités de courant admissibles dans le carbone étant limitées. L'objectif de ce papier est d'analyser un ensemble harnais de puissance – carlingue composite connectés en parallèle, représentatif d'un réseau de retour de courant. On cherchera à caractériser les courants circulants dans la peau carbone, sur une large gamme de fréquence. La méthode PEEC (Partial Element Equivalent Circuit) est utilisée à cet effet, et les résultats sont comparés à des mesures effectuées sur maquette.

### I. INTRODUCTION

L'avion plus électrique commence maintenant à sortir du concept pour entrer dans la réalité: les grands programmes de recherche récents [1] ont montré les gains envisageables en passant à la distribution de puissance via un vecteur plus souple et plus économe que l'hydraulique (concept "Power by Wire"). L'ensemble de la communauté est maintenant en phase de consolidation et de développements technologiques [2-4].

Parallèlement à cette profonde mutation, comparable à celle de l'automobile dans les années 90, une nouvelle donne voit le jour avec l'apparition du composite pour réaliser les "peaux" des aéronefs, en lieu et place des classiques carlingues en aluminium [5]. Des exemples très actuels concernent les avions B787 et A350. Plus que les éventuels gains de masse et de rigidité de la structure, c'est surtout en terme d'entretien que les avionneurs privilégient cette solution.

Cette apparition conjointe du développement du réseau électrique embarqué (Fig.1) et de ce nouvel environnement électromagnétique ne va pas sans poser des questions fondamentales quant à la mise en œuvre de ces réseaux de bord: comportement face à la foudre, équipotentialité, ... 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 circulants 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'objectif de ce papier est de montrer 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.

La méthode de modélisation utilisée (méthode PEEC, dont les principes seront rappelés au paragraphe III) sera appliquée sur un exemple représentatif (présenté section II). Les résultats de la modélisation seront comparés à la mesure (paragraphe IV).

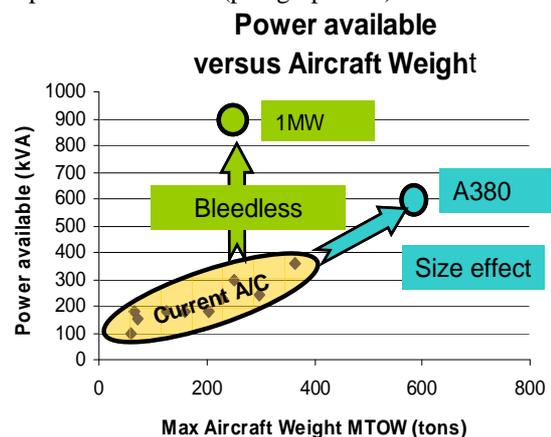


Fig. 1. Evolution de la puissance électrique embarquée dans les avions (document Airbus)

### II. CAS D'ETUDE

L'objet d'étude est un échantillon représentatif de la carlingue d'un avion carbone, composé d'un harnais et d'une partie de peau carbone, incluant des armatures métalliques ou en carbone (Fig. 2). Pour simplifier la modélisation, nous ne prendrons pas en compte la courbure du dispositif, qui sera modélisé comme un

système plan. Par ailleurs, le harnais sera approximé par des fils rectilignes, malgré la flèche présente, que l'on peut facilement noter sur la Fig. 2.

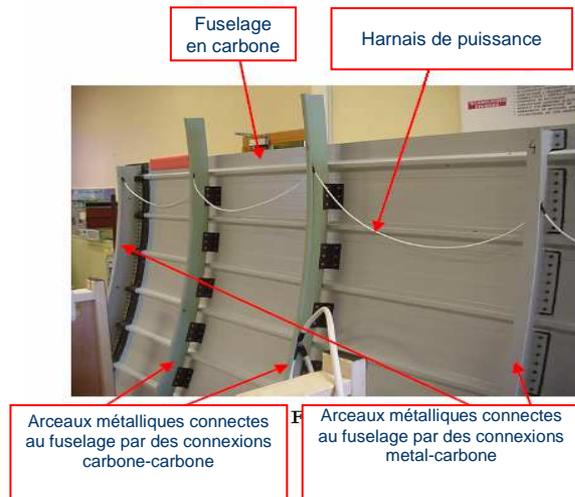


Fig.2. Echantillon utilisé (peau carbone, armatures et harnais).

Les armatures sont rivetées à la peau composite. Le premier problème avant de traiter la modélisation consiste à simplifier cette géométrie. En effet, la description complète de l'assemblage, incluant les rivets serait très lourde. Des études précédentes menées chez Airbus ont permis la quantification de l'impédance d'une liaison par rivets, ainsi que des impédances de contact. En comparaison avec l'impédance de la plaque (peau carbone complète), celle-ci est bien supérieure, comme l'indique la Fig. 3. Dans le cas le plus défavorable (en basse fréquence), la plaque reste 9 fois supérieure à l'impédance de l'ensemble des rivets utilisés pour effectuer une liaison armature – peau. Les armatures seront donc considérées comme liées directement à la peau composite, via une connexion point par point au niveau du maillage PEEC (voir section III).

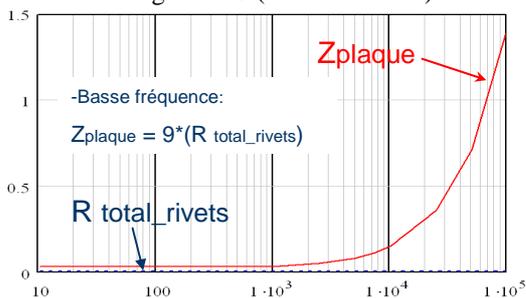


Fig.3. Impédance d'une liaison à base de rivets en comparaison avec l'impédance de la peau carbone.

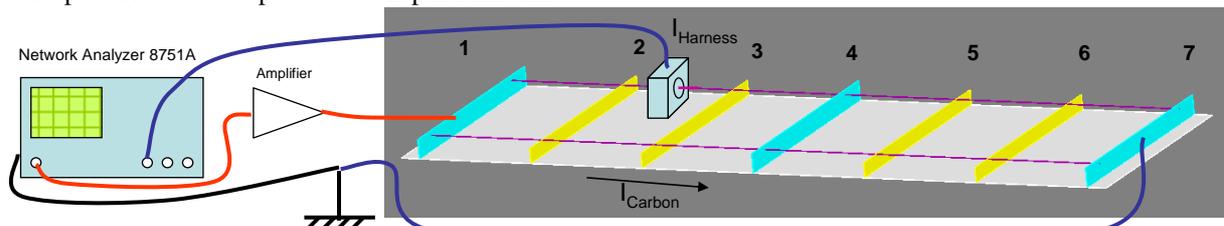


Fig. 4. Essai d'injection de courant sur la structure et mesure du courant dans le harnais.

Pour analyser la répartition du courant entre le harnais et la peau carbone, on impose un courant total sur l'ensemble du dispositif, via un amplificateur de puissance. Le courant circulant sur le harnais est mesuré via une sonde de courant (sonde de Pierson). Un analyseur de réseau permet l'interprétation de la fonction de transfert ainsi obtenue.

Pour éviter les interactions entre le circuit d'excitation et le dispositif, l'interconnexion des câbles d'alimentation est réalisée avec soin: connexions perpendiculaire et retours de courant aussi éloignés que possible (fils bleus et rouges sur la figure 4). Ceci est d'autant plus important que la modélisation ne tient compte que du dispositif harnais+peau seul, sans alimentation extérieure.

### III. METHODE DE MODELISATION

Les méthodologies de modélisation conventionnelles à base de modèles de propagation [6-7] si elles sont très performantes dans le cas où on dispose d'une référence de potentiel "parfaite", ne permettent pas de prendre en compte l'impact de la répartition du courant dans les structures sur les paramètres électriques. Nous proposons d'utiliser la méthode PEEC [8-9], méthode intégrale permettant une approche fine des phénomènes, par le maillage des conducteurs, sans présenter la lourdeur des éléments finis, nécessitant le maillage de l'air. Chaque élément du maillage est représenté par une inductance partielle, une résistance et des mutuelles partielles avec le reste du circuit. Le maillage du dispositif modélisé autorise une circulation quelconque du courant dans la peau carbone et les armatures (maillage dit "2D"), et impose une direction longitudinale pour les câbles (Fig.5).

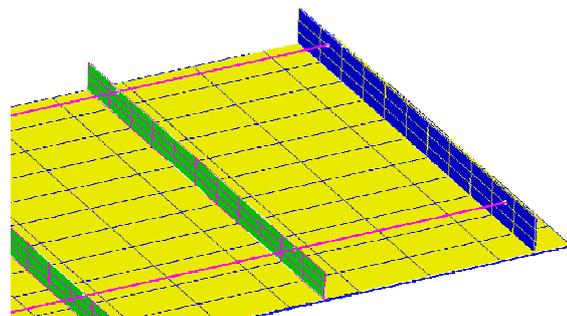


Fig.5. Maillage 2D de la plaque et des longerons. Liaison point à point des maillages des longerons et de la plaque. Les 2 conducteurs du harnais ne sont pas maillés.

Le maillage "2D" modélisant la circulation du courant selon deux directions en quadrature est constitué par 4 résistances, 4 inductances partielles et des couplages avec les autres mailles du circuit (Fig. 6.).

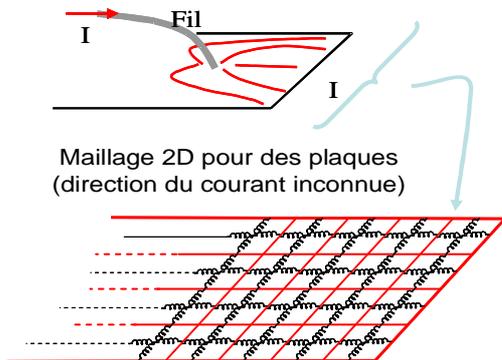


Fig. 6. Maillage 2D pour prise en compte de l'épanouissement du courant dans une direction inconnue.

Dans la mesure où seuls les conducteurs sont maillés, le nombre d'inconnu à résoudre est relativement faible (quelques milliers). En revanche, compte tenu de la méthode des éléments partiels, la prise en compte des mutuelles est indispensable, ce qui rend le problème numérique ardu, puisque les matrices à traiter sont pleines. Un solveur circuit dédié a été mis en place au sein de l'environnement informatique utilisé [8], qui permet de traiter à l'heure actuelle des problèmes à environ 3000 subdivisions. Il est important de citer cette limitation, car cela permet d'affirmer qu'il est illusoire de vouloir traiter en l'état un avion complet avec ce type de méthodes, et que de nombreux travaux de recherche restent à mener pour arriver à cet objectif. Signalons enfin à ce stade, l'importance des couplages entre tous les conducteurs pour prendre en compte la globalité du problème: de ce fait, le dimensionnement d'un réseau de retour de courant doit a priori prendre en compte l'ensemble des conducteurs et châssis, y compris les conducteurs "aller", ce qui augmente encore la taille des problèmes.

#### IV RESULTATS

Les essais sont réalisés dans les conditions indiquées Fig.4.

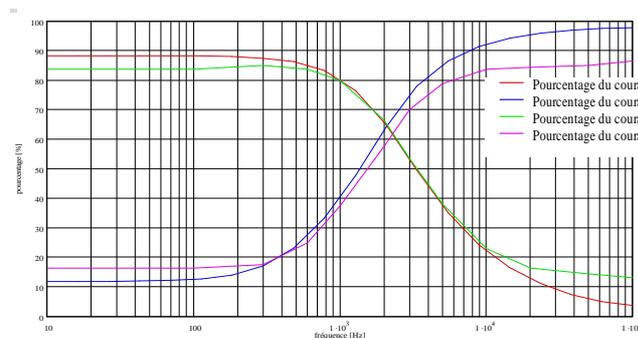


Fig.7. Résultats de simulation en comparaison avec la mesure: Fonction de transfert  $I_{c\grave{a}ble}/I_{total}$  et  $I_{plaque}/I_{total}$ . Gauche Module, droite phase.

On alimente le dispositif via les armatures extrêmes (1 et 7), et on mesure le courant dans les câbles. Le courant dans la peau carbone peut se déduire par différence entre le courant total et les courants dans les câbles. La comparaison entre simulation et mesure est plutôt bonne (Fig. 7.). Ces résultats confirment la confiance que l'on peut accorder à la méthode PEEC, qui a déjà largement fait ses preuves pour des dispositifs de géométries plus complexes, mais de taille plus réduite. A noter toutefois quelques améliorations qui ont du être apportées aux formulations, compte tenu des distances mises en jeu (ratio longueur sur section des harnais notamment). La distance entre harnais et peau carbone est le paramètre le plus influent sur le résultat, comme l'indique la Fig. 8.

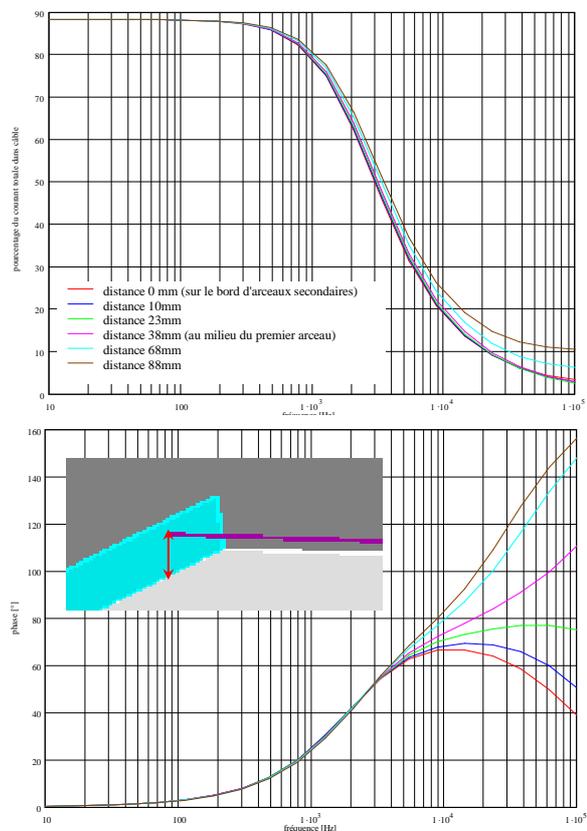
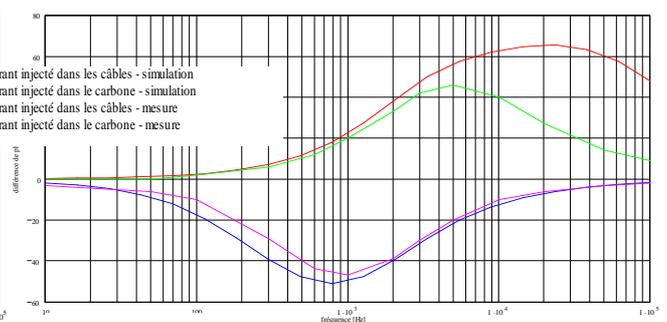


Fig.8. Etude de sensibilité en fonction de la hauteur du harnais par rapport à la carlingue. Haut: module – Bas phase.



## V CONCLUSION ET PERSPECTIVES

En conclusion, il est montré que la méthode PEEC est tout à fait apte à analyser l'impact d'un harnais de puissance au voisinage d'une peau carbone. On peut ainsi envisager :

- la répartition du courant en cas de mise en parallèle entre un câble et la structure armature/carbone,
- la caractérisation de courants induits dans la peau au voisinage d'un harnais de puissance véhiculant un courant. En effet, la prise ne compte de l'ensemble des couplages permet naturellement la prise en compte des courants induits. La Fig. 9 montre un exemple pour illustrer cette prise en compte. Cette analyse peut être effectuée à plusieurs fréquences, pour prendre en compte la complexité du spectre du courant véhiculé dans les réseaux de puissance.

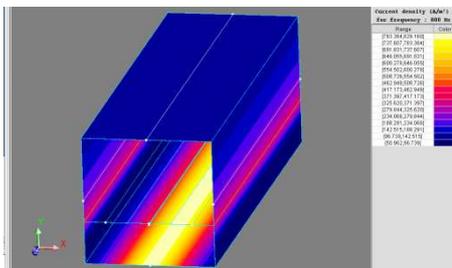
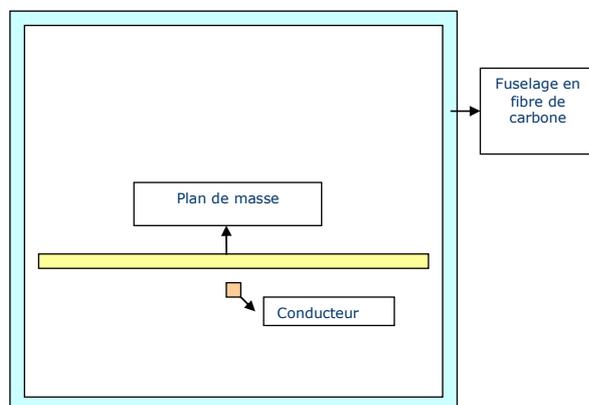


Fig.9. Etude d'un circuit plus complexe, incluant les courants induits par la proximité du conducteur "aller": le retour de courant s'effectue par le plan de masse et le châssis carbone en parallèle.

En revanche, cette analyse détaillée ne peut dépasser le cadre d'une maquette d'investigation (quelques mètres): le traitement de structures d'avion complète est trop lourd, et des méthodes de simplification devront être envisagées. Cependant, les résultats obtenus peuvent être utiles pour tirer des règles d'installation de câblage dans ce nouvel environnement électromagnétique.

## VI REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la société Airbus pour avoir permis d'exploiter les résultats expérimentaux sur une maquette de fuselage.

## REFERENCES

- [1] "Power Optimized Aircraft", POA, programme européen [www.poa-project.com/](http://www.poa-project.com/)
- [2] "More Open Electrical Technologies", MOET, programme européen, [www.moetproject.eu](http://www.moetproject.eu)
- [3] MODERNE (MODular ElectRical NEtwork), projet de recherche Airbus
- [4] Dupont, L.; Khatir, Z.; Lefebvre, S.; Meuret, R.; Parmentier, B.; Bontemps, S.; "Electrical characterizations and evaluation of thermo-mechanical stresses of a power module dedicated to high temperature applications", European Conference on Power Electronics and Applications, 2005 11-14 Sept. 2005.
- [5] "Advanced Low-Cost Aircraft Structures" ALCAS, [http://ec.europa.eu/research/transport/projects/article\\_3675\\_en.html](http://ec.europa.eu/research/transport/projects/article_3675_en.html)
- [6] Logiciel CRIPTE – [www.onera.fr](http://www.onera.fr)
- [7] Paul, C. R., Analysis of Multiconductor Transmission Lines, ISBN: 0470131543
- [8] Logiciel InCa3D – [www.cedrat.com](http://www.cedrat.com)
- [9] 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.