

Transport d'énergie électrique pour les systèmes de propulsion électrique et hybride dans le domaine aéronautique

Depuis une quinzaine d'années, de plus en plus de fonctions sont électrifiées à bord des avions (commandes de vol, freinage, climatisation, ...) permettant de réduire la consommation de kérosène, de faciliter la maintenance et d'augmenter le confort en cabine. Ainsi, les puissances électriques installées au sein des aéronefs n'ont cessé d'augmenter passant de quelques dizaines de kVA dans les années 60 jusqu'au MVA dans les années 2010 ; cette tendance se poursuit toujours. La distribution de cette puissance s'effectue grâce à des câblages (harnais) dont il faut optimiser le placement et la masse. Une des conséquences importante de cette évolution est l'accroissement des contraintes de compatibilité électromagnétique (CEM) due au nombre et à la diversité des harnais, à leur proximité et à l'accroissement des grandeurs électriques les parcourant. Cet article présente les problématiques CEM auxquelles sont confrontés les concepteurs de harnais face à ces évolutions majeures de la distribution électrique dans un avion.

Charles Jullien,
Anca Dieudonne,
Jérôme Genoulaz

Safran Electrical & Power, ISE, DTI, 31702
BLAGNAC, France,

Introduction

Dans les années à venir, pour l'ambition de l'aviation décarbonée, la commande et la livraison de puissance auront pris une grande importance dans le développement de nouveaux systèmes. En effet, le remplacement des fonctions pneumatiques et hydrauliques par des fonctions électriques et l'augmentation des systèmes électroniques embarqués (wifi, divertissement, centrale informatique, dégivrage...) nécessite déjà une importante production d'énergie comme le montre la figure 1. La propulsion électrique ou hybride prend maintenant une ampleur encore plus importante face au défi des changements climatiques. La meilleure conception en termes de position, de

nombre des sources et consommateurs à bord est essentielle. L'optimisation des harnais sera aussi importante que l'optimisation des systèmes connectés à leurs extrémités.

L'augmentation des courants et des tensions des systèmes électriques a un impact direct sur le dimensionnement des

câblages, de leurs systèmes d'isolation et de connectique, ayant par conséquent un impact non-négligeable sur la masse totale des systèmes. Ces mêmes changements dans le fonctionnement des systèmes engendrent une augmentation des niveaux des champs rayonnés, menaçant la compatibilité électromagnétique avec des systèmes plus sensibles.

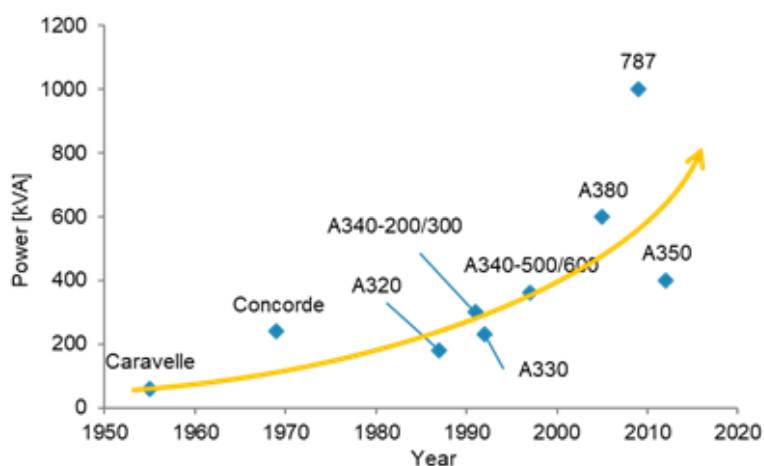


Figure 1 : Puissance embarquée des programmes en fonction du temps.



Figure 2 : Principe d'une chaîne de puissance HV.

Les harnais transportent deux types d'énergie : les données et la puissance. La distribution de masse montre que la majeure partie du poids du harnais sur les avions est liée à la distribution de puissance. Les nouvelles technologies devront prendre en compte l'augmentation des contraintes électriques DC et AC. La diversification et l'augmentation des niveaux de tension a une forte influence sur l'augmentation des risques électriques (décharges partielles, charges d'espace, arcs...), sur l'installation des harnais dans un environnement déjà contraint, sur la qualification des composants, etc. Ces contraintes se traduiront par différents phénomènes physiques, amplifiés par l'augmentation des niveaux des tensions d'alimentation jusqu'au kV dans un premier temps.

Un exemple de chaîne de puissance électrique dans le domaine aéronautique se décompose comme suit (voir figure 2) :

- Une alimentation CC ;
- Connectée à un convertisseur statique triphasé ;
- Lui-même relié au moteur via un faisceau électrique.

Un RSIL pourrait être ajouté car il est imposé par le besoin de standardisation des tests normatifs.

L'alimentation en courant continu symétrique et l'électronique de redressement sont reliées au convertisseur par une ligne bifilaire qui peut être blindée. Le faisceau d'alimentation MLI (Modulation à Largeur d'Impulsion) du moteur est constitué d'un câble blindé à trois fils. Selon l'architecture envisagée, la longueur de ces câbles peut être conséquente.

Réseau HV et CEM

La distribution de masse présentée sur la figure 3 montre que la majeure partie du poids du harnais sur les avions est liée à la distribution de puissance. Néanmoins, l'arrivée des commandes électriques et des régulations de système de communication

ou de système assisté par ordinateur de dernière génération sur les derniers programmes prennent une part plus importante dans cette diffusion. De plus, on constate que plus l'avion est gros, plus la masse de câblage augmente, sauf pour l'A350 qui bénéficie de systèmes intégrés signifiant des longueurs de faisceaux réduites du fait de la moindre distance entre les équipements des différents systèmes.

Les puissances actuelles à bord sont de l'ordre de plusieurs centaines de kilowatts. Les générateurs des avions fournissent cette énergie à bord, la plupart du temps en puisant directement sur les moteurs. Pour la propulsion électrique ou hybride, l'énergie peut être soit prélevée sur le moteur thermique, soit fournie par une source auxiliaire : batterie, générateur auxiliaire de puissance, etc. A court terme, la propulsion tout électrique est réservée aux faibles besoins en énergie et donc destinée à de l'aviation légère ou des VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*). Pour l'hybridation, les principaux systèmes consistent soit à supporter les moteurs thermiques par des moteurs électriques afin de leur donner la puissance nécessaire durant les phases de vol contraignantes, soit à remplacer les moteurs traditionnels par des moteurs électriques alimentés par un générateur associé ou non à des batteries. Ces modifications feront passer la puissance embarquée de quelques centaines de kilowatts à plusieurs

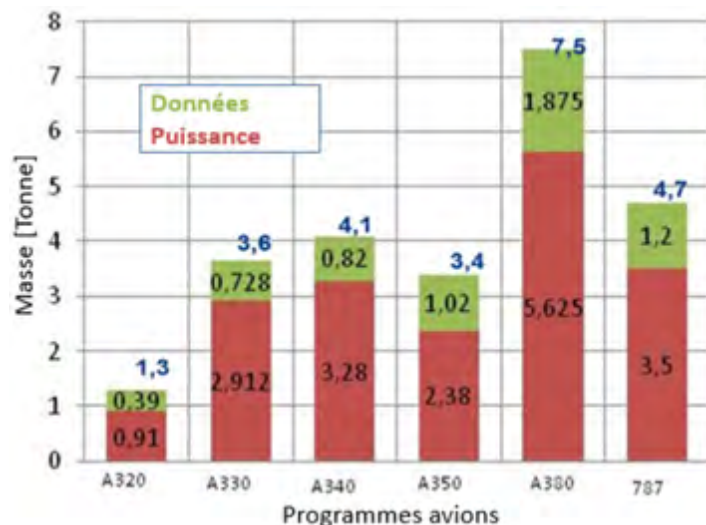


Figure 3 : Evaluation Masse harnais par rapport aux programmes avions.

dizaines de mégawatts pour alimenter ces moteurs électriques particuliers.

L'exemple considéré ici concerne une liaison de puissance acheminant 2MW sur 30m de longueur avec les technologies et savoir-faire actuels. On estime que le poids supplémentaire de cette liaison est de 2 tonnes rien que pour les faisceaux électriques sur un total d'à peine plus d'une tonne pour un A320 en version standard.

Une des solutions pour réduire la masse de la chaîne de propulsion électrique est d'augmenter la fréquence du réseau électrique. En effet, plus la fréquence est élevée, plus le noyau magnétique d'un transformateur peut être petit à puissance égale et plus le nombre de tours par volt est faible. La même règle s'applique également aux moteurs, générateurs et plus généralement à tous les composants électromagnétiques. De plus, le filtrage des électroniques de conversion de puissance nécessite des condensateurs beaucoup plus petits à une fréquence plus élevée. En revanche, le poids du harnais transportant 2MW en AC augmente de 67 % si on double la fréquence comme le montre la figure 4.

En effet, pour le même courant à transporter, pour la même puissance par effet Joule perdue, la masse de conducteur nécessaire augmente avec la fréquence à cause de l'effet de peau ou pelliculaire. Afin de limiter l'augmentation de masse due à une fréquence de réseau plus élevée, on peut considérer l'augmentation de tension permettant la réduction du courant et ainsi réduire le diamètre des conducteurs véhiculant la puissance. Néanmoins, l'augmentation de la tension nécessite d'augmenter l'épaisseur du système d'isolation électrique afin de limiter les phénomènes apparaissant en haute tension. La solution sera alors de trouver le juste équilibre entre les niveaux de tension et de courant afin de limiter la masse globale de la chaîne de propulsion ou de trouver de nouveaux composants qui répondront aux besoins de transport d'énergie dans l'avion hybride tout en ayant une masse acceptable et maîtrisée. On parle alors de HVDC et HVAC voire MLI.

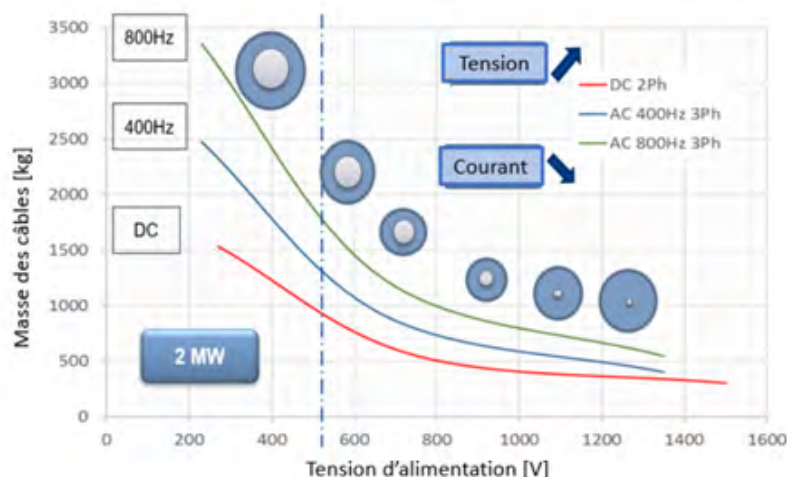


Figure 4 : Une solution possible : augmenter la fréquence du réseau.

“Une des solutions pour réduire la masse de la chaîne de propulsion électrique est d'augmenter la fréquence du réseau électrique. En effet, plus la fréquence est élevée, plus le noyau magnétique d'un transformateur peut être petit à puissance égale et plus le nombre de tours par volt est faible.”

En plus de ces problématiques, l'impact de l'augmentation de puissance embarquée va être important sur les champs électromagnétiques rayonnés par les harnais. Avec des courants et des tensions plus importantes ainsi que des fréquences plus élevées, notamment pour le MLI, les signaux vont avoir une richesse spectrale étendue, passant de quelques kHz à plusieurs centaines de MHz. Afin de répondre à ces défis ainsi qu'aux standards aéronautiques [1], deux solutions existent d'un point de vue compatibilité électromagnétique CEM : augmenter les distances séparant les harnais de puissance et les harnais sensibles [2] et améliorer les blindages [3] afin de les rendre performant sur toutes la bande de fréquences étendue aux hautes fréquences. Le premier point se traite par des études de diaphonie entre les systèmes afin de déterminer les distances de séparation. Le deuxième, quant à lui, est plus complexe car les standards existants s'appliquent, en haute fréquence, sur le sys-

tème complet (source, charge et harnais) et pas sur le harnais seulement. Ainsi il n'existe pas de paramètre décrivant simplement les performances intrinsèques d'un blindage au-delà des fréquences de résonance comme il existe en basses fréquences. Pour cela, des études de CEM sont menées pour valider ces solutions, aussi bien en HVDC qu'en HVAC.

Impact de la topologie HV

Le meilleur observable, directement lié aux distances de ségrégation entre harnais ou routes « perturbateurs » et harnais ou routes « sensibles », est la diaphonie et plus précisément la diaphonie inter-harnais. La diaphonie est un phénomène de couplage qui se caractérise par le transfert d'un signal d'une liaison porteuse sur une autre liaison plus ou moins éloignée que l'on caractérisera de victime. Une route représente le regroupement des signaux ●●●

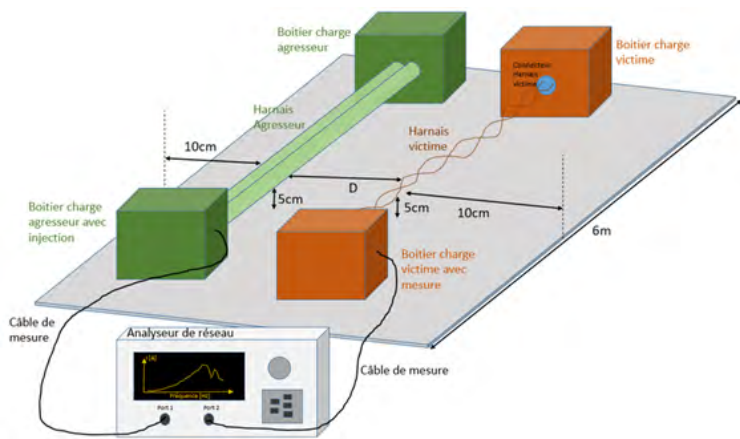


Figure 5 : Banc expérimental de mesure de diaphonie.

“ Pour vérifier l’impact de l’installation impliquant le choix de la topologie (proche, écarté, ...) et de l’absence de protection impliquant le choix de la technologie (blindage, surblindage, ...) sur un harnais de puissance et sur la distance de ségrégation, une approche de quantification de diaphonie en fonction des topologies et comparaison de ces niveaux a été menée en simulation et d’un point de vue expérimental. ”

- compatibles ensemble et définit la possibilité de cheminement commun entre harnais appartenant à une même route. Le domaine de validité doit être défini pour couvrir également les phénomènes de variabilité (incertitudes sur les positions) ainsi que la robustesse nécessaire pour limiter la diaphonie entre une liaison HV et un harnais victime (la valeur limite d’acceptation).

Pour vérifier l’impact de l’installation impliquant le choix de la topologie (proche, écarté, ...) et de l’absence de protection impliquant le choix de la technologie (blindage, surblindage, ...) sur un harnais de puissance et sur la distance de ségrégation, une approche de quantification de diaphonie en fonction des topologies et comparaison de ces niveaux a été menée

en simulation et d’un point de vue expérimental.

L’essai consiste à alimenter un harnais HV et à mesurer sur un câble de signal générique (harnais victime) positionné à côté, le courant résultant du couplage électromagnétique du harnais agresseur sur le harnais victime. Les harnais doivent être placés à 5cm au-dessus d’un plan de masse conducteur d’au moins 6m de long ayant une résistance la plus faible possible (inférieure à 1 mΩ) et de telle façon à ce qu’ils soient à au moins 10cm de chaque bord. Les harnais doivent être raccordés dans des boîtiers de charges à chaque extrémité qui serviront aussi à l’injection et à la mesure. Ces distances sont issues des conditions d’essais de la DO160 Section 20-21. L’injection et la mesure se font via un analyseur de réseau à l’aide d’une sonde de courant. La caractérisation de la fonction de transfert de la pince est aussi à réaliser afin de supprimer son influence. La figure 5 illustre le montage des deux configurations pour les deux boîtiers.

Un exemple de résultat de simulation est présenté sur la figure 6 qui montre le paramètre S21 (le courant de diaphonie) sur le harnais victime soumis à une agression d’un harnais HVDC en configuration deux

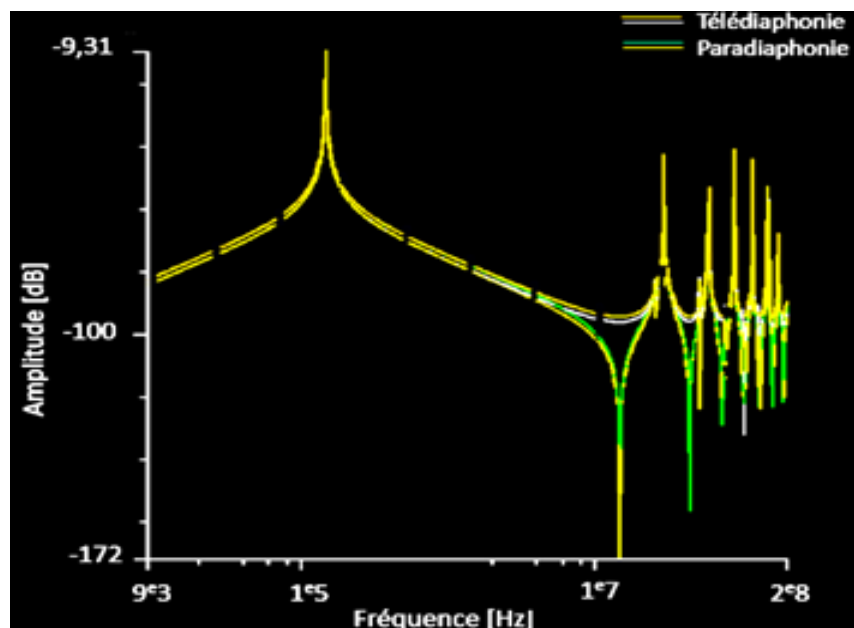


Figure 6 : Résultats préliminaires du courant sur la liaison victime en télé et para diaphonies.

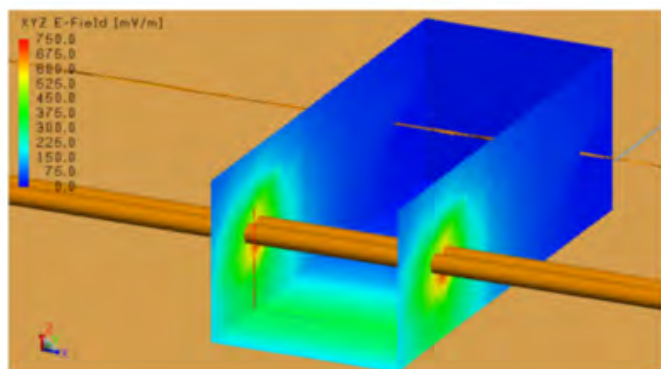
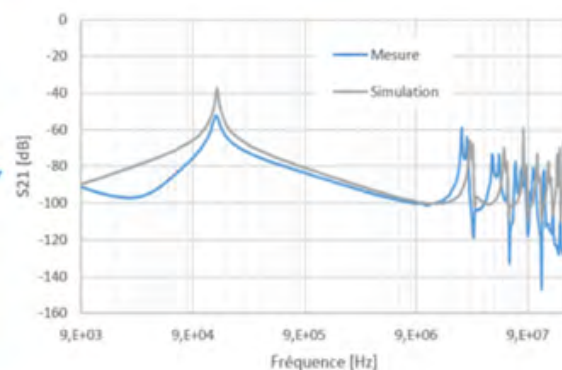


Figure 7 : Résultat diaphonie simulée avec FEKO.



conducteurs proches à plat avec une injection en mode commun et une mesure en mode commun (MC-MC). La diaphonie peut être mesurée soit en paradiaphonie où la mesure et l'injection se font du même côté, soit en télédiaphonie où la mesure et l'injection sont opposées dans le montage.

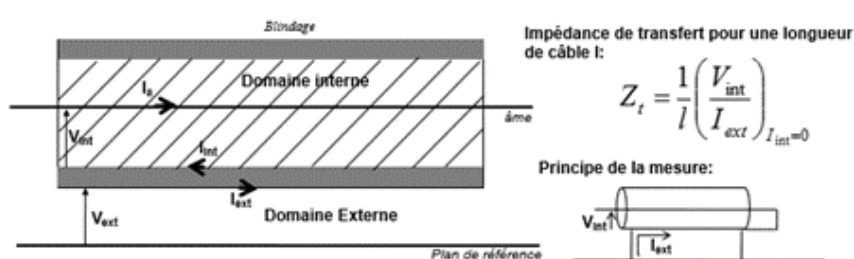


Figure 8 : Principe de l'impédance de transfert.

Ces simulations ont été réalisées avec CRIPTE (Calcul sur Réseaux des Interactions Perturbatrices en Topologie Electromagnétique), un logiciel développé par l'ONERA qui résout l'équation de Baum, Liu et Tesche pour des réseaux de lignes de transmission multiconducteurs basés sur la topologie électromagnétique [4]. D'autres ont été réalisés avec le logiciel FEKO en méthode des moments comme illustré sur la figure 7.

La simulation montre notamment l'effet des circuits mis aux extrémités du harnais victime. Les résultats montrent un comportement très proche que ce soit en télédiaphonie ou en paradiaphonie à ce que l'on peut obtenir en mesure.

Caractérisation des blindages hautes fréquences

Pour traiter le deuxième point, la protection des systèmes à l'aide des blindages, on peut considérer que l'influence de l'environnement électromagnétique perturbateur sur un câble blindé (ou son influence

ce même environnement) peut être exprimée par une fonction de transfert appelée impédance de transfert (Z_t) [5] (l'admittance de transfert étant souvent négligée) comme présenté sur la figure 8.

Si l'on compare les différentes méthodes les plus utilisées permettant de mesurer l'impédance de transfert comme dans la figure 9, on peut identifier des limitations pour chacune d'entre elles. En effet, que ce soit au niveau de l'application ou de la fréquence, aucune ne permet de couvrir

une bande de fréquence répondant au standard aéronautique comme la DO160 qui monte jusqu'à 18GHz. Ceci est notamment lié au fait qu'elles ne permettent que de mesurer l'impédance de transfert.

Ce paramètre relie néanmoins parfaitement la conception d'un blindage à ses performances, mais se limite aux fréquences en dessous des fréquences de résonance du câble. Une autre façon de caractériser la performance d'un blindage électromagnétique consiste à utiliser l'ef- ●●●

Méthode de caractérisation	Banc triaxial	Banc triaxial à discontinuité de blindage	Ligne d'injection
Montage			
Plage de fréquence	$f_{max} = 100$ MHz	$f_{max} = 2$ GHz	$f_{max} = 50$ MHz
Application	Câbles	✓	✓
	Torons	✓	✓
	Harnais	X	X
Montée en fréquence	Limitée à cause des fréquence de résonance de la cellule	Appliquée juste aux câbles coaxiaux jusqu'à une fréquence de 2 GHz	Limitée à cause de l'inadaptation des charges

Figure 9 : Identification des limites des méthodes de caractérisation de l'impédance de transfert.

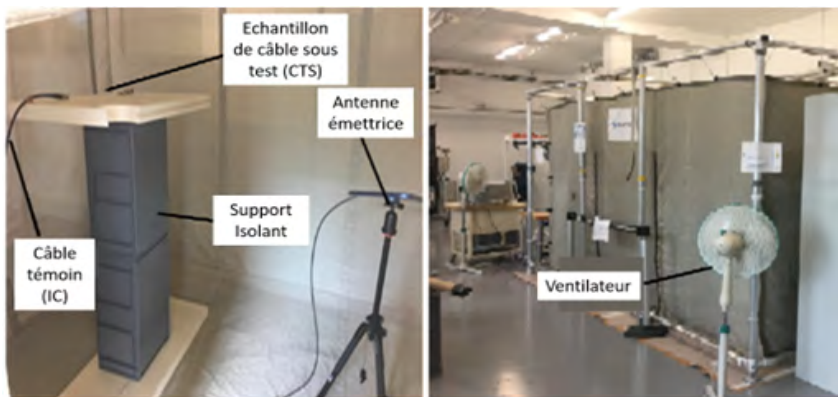


Figure 10 : Configuration de l'efficacité du blindage dans VIRC.

●●● efficacité de blindage (SE) [6]. Cette mesure est requise et effectuée sur des systèmes électriques complets (sources, charges, installation, y compris les faisceaux de câbles blindés) mais n'est pas directement applicable à un seul faisceau de câbles blindés. De plus, la caractérisation des écrans obtenus par cette méthode est dépendante des moyens de test, des conditions d'installation et de l'échantillon, ce qui en fait une mesure qualitative et non quantitative. Cette méthode couvre en revanche les « hautes fréquences », à partir de 100 MHz jusqu'à des dizaines de GHz.

Afin d'associer les mondes « basses » et « hautes fréquences », différentes études

ont été menées et ont abouti à quelques règles empiriques. Cependant, cela ne permet pas de caractériser le blindage à proprement parler. B. Demoulin et L. Kone ont proposé dans [6] une procédure de caractérisation de l'efficacité de blindage d'un câble utilisant une chambre réverbérante à brassage de mode, illustré sur la figure 10, ainsi que le lien entre cette efficacité de blindage et l'impédance de transfert [5].

Une nouvelle méthode de mesure de l'impédance de transfert a été développée pour les hautes fréquences : la méthode d'injection localisée. Cette méthode utilise des sondes de courant magnétiques FCC, c'est-à-dire que la mesure est limitée à

la plage de fréquence comprise entre la fréquence minimale de la sonde et la fréquence de résonance des câbles sous test ou la fréquence maximale d'utilisation de la sonde. Son principe est similaire à la caractérisation standard de la susceptibilité d'un appareil (BCI - Bulk Current Injection test set-up). Pour cela, le montage consiste à placer le câble sous test (CTS) au-dessus d'un plan de masse, l'échantillon étant maintenu en place à l'aide de supports métalliques reliés électriquement au plan de masse. Une extrémité de l'éprouvette est reliée à un analyseur de réseau afin de mesurer la tension entre l'âme et le blindage, tandis qu'à l'autre extrémité l'âme et le blindage sont court-circuités. Deux sondes de courants, toutes deux connectées à un analyseur de réseau, sont placées sur le CTS : une sonde est utilisée pour l'injection de courant et l'autre pour la mesure du courant circulant sur le blindage comme illustré à la figure 11 et présentés dans [7].

Si l'on compare une mesure d'impédance de transfert réalisée à l'aide d'un banc triaxial, le modèle de Kley et la mesure en injection localisée comme présenté sur la figure 12, on remarque que les résultats se superposent. Ce type d'essais permet de valider en basse fréquence la méthode.

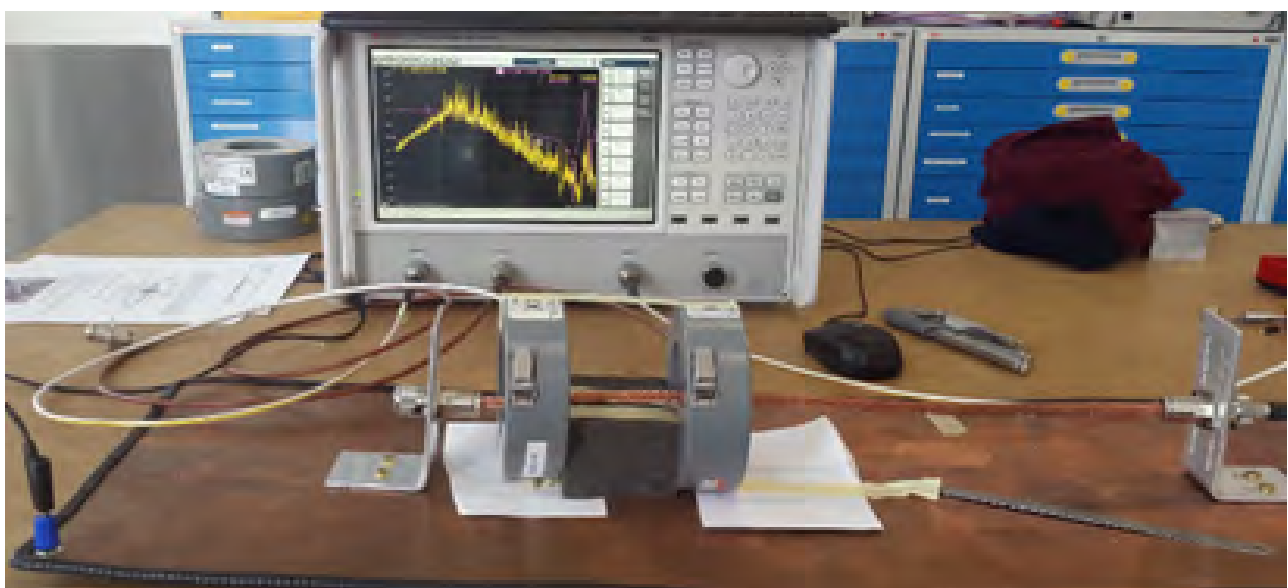


Figure 11 : Configuration du test d'injection localisée.

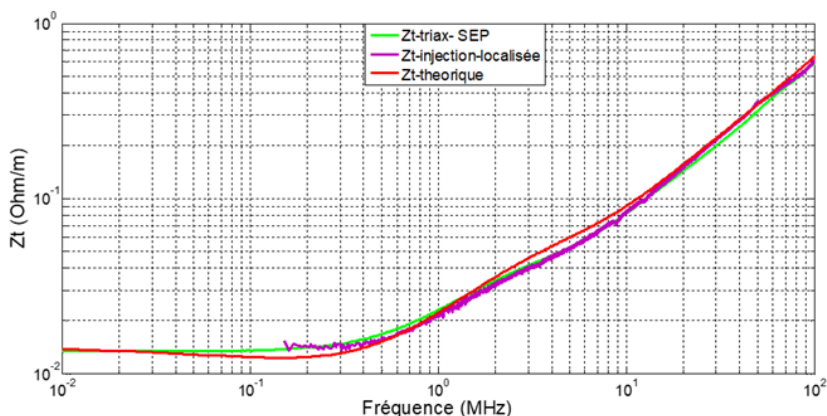


Figure 12 : Comparaison Zt banc triaxial, injection localisée et modèle de Kley.

Comme la méthode d'injection localisée va au-delà de la première fréquence de résonance, elle pourrait conduire à un recouvrement de la bande de fréquence entre les mesures Zt classiques et les me-

sures d'efficacité de blindage permettant le passage de l'une à l'autre et la caractérisation de l'efficacité de blindage de différentes technologies. Pour cela, il faut pouvoir dépasser les limitations techno-

logiques des sondes de courant à base de ferrite. Les sondes stripline introduites dans [8] permettent déjà de réaliser avec succès des essais de type BCI au moins jusqu'à 3GHz. L'idée ici consiste donc à utiliser ces sondes pour réaliser une mesure en injection localisée et dépasser les limites des sondes actuelles. Une mesure illustrée sur les figures 13 et 14 a alors été réalisée avec les sondes stripline de 400MHz à 3GHz et comparée au résultat de Zt obtenu en chambre réverbérante vibrante (VIRC) selon la méthode de [6] prise ici pour référence.

Les résultats montrent un niveau moyen- né constant autour de $0,1\Omega/m$ pour les deux résultats et des résonances globalement comparables notamment en termes d'amplitude moyenne. La tendance montre par ailleurs que ce niveau

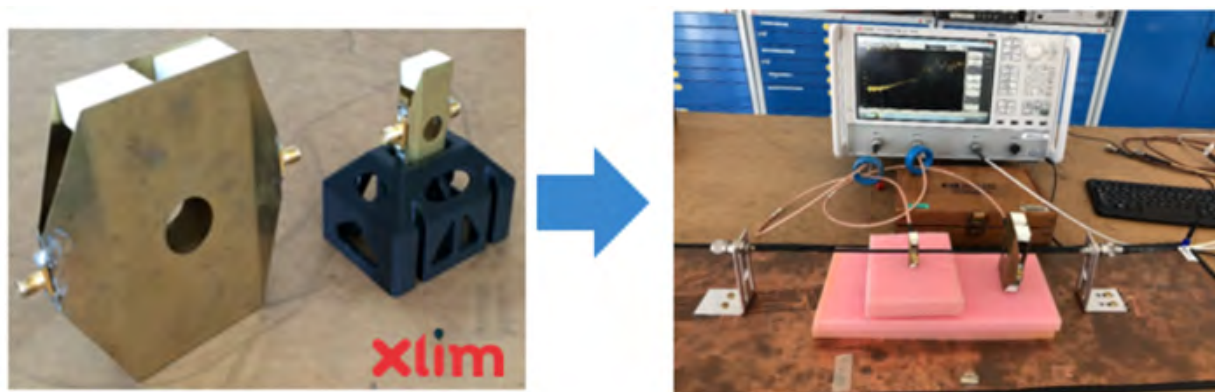


Figure 13 : Sondes stripline du laboratoire XLIM et leur utilisation sur le banc injection localisée.

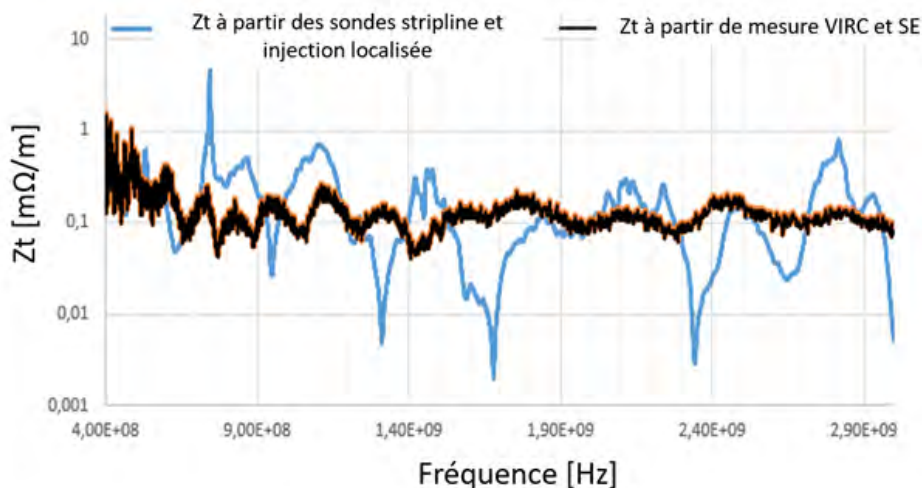


Figure 14 : Comparaison du Zt obtenu par le SE en VIRC et la valeur obtenue avec les sondes stripline en méthode d'injection localisée.

●●● constant traduit un effet au-delà de l'impédance de transfert et prend en compte d'autres effets, notamment celui de l'admittance de transfert via la capacité de transfert. Cette capacité s'opposant à l'inductance de transfert pourrait expliquer ce comportement. On pourrait donc en conclure qu'une approche globale de ces deux paramètres (impédance de transfert et admittance de transfert) sur une large bande de fréquence offrirait une caractéristique du blindage indépendant du moyen d'essais. Néanmoins la méthode d'injection localisée avec Stripline semble offrir de bons résultats pour définir les performances des blindages en hautes fréquences.

Conclusion

En conclusion, nous avons présenté un des aspects de la propulsion électrique des avions dans l'augmentation de masse de l'électronique de puissance et de la transmission d'énergie. Cette masse peut être contrôlée en augmentant la fréquence du réseau mais cela implique également d'augmenter la tension et de diminuer le courant pour réduire la masse des faisceaux. Cependant, la haute tension influe fortement l'épaisseur du système d'isolation électrique. Les travaux futurs porteront sur les matériaux, les câbles et les connecteurs qui assureront le transport de plusieurs MW et leurs impacts CEM. Deux pistes pour évaluer l'effet de la haute tension

sur les câblages d'un point de vue CEM ont été présentées notamment sur la diaphonie pour identifier l'impact sur les distances de ségrégation mais aussi sur les blindages afin de les caractériser en plus haute fréquence et tenir compte des harmoniques.

Les perspectives de ces travaux permettront à la fois de dimensionner les blindages au juste besoin sur une large bande de fréquence et de pouvoir les caractériser et ainsi identifier la topologie de harnais HV qui génèrera le moins de perturbations possibles, deux éléments clés dans le dimensionnement du transport de l'énergie électrique forte puissance pour les avions du futur. ■

Références

- [1] RTCA DO160, «Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment».
- [2] C. Jullien, I. Junqua, J. Morio, G. Antonini, N. Muot, M. Bandinelli, A. Bonsignore, A. Mori, M.D. Astorino, S. Bertuol, C. Girard, J-P. Parmantier, P. Di Bartolomeo, G. Prin, «Optimization of segregation distances between harnesses for aeronautical applications», URSI GASS 2020, Rome, Italy.
- [3] C. Jullien, M. Dunand, J. Genoulaz, « Développement de harnais de câble en vue de l'optimisation CEM d'une chaîne de conversion de puissance pour l'aéronautique », Colloque International et Exposition sur la Compatibilité ÉlectroMagnétique 2014, Clermont-Ferrand, France.
- [4] C.E Baum, "Electromagnetic Topology for the Analysis and Design of Complex Electromagnetic System", Fast Electrical and Optical Measurements, Vol. 1, pp. 467-547, Martinus Nijhoff, Dordrecht, 1986
- [5] S. A. Schelkunoff, "The Electromagnetic Theory of Coaxial Transmission Lines and Cylindrical Shields," Bell System Technical Journal, Vol. 13, No. 4, 1934, pp. 532-579
- [6] B. Demoulin, L. Kone, "Shielded cable transfer impedance measurements in the microwave range of 1 GHz to 10 GHz", IEEE Electromagnetic Compatibility Society Newsletter, 2011, 229, pp.52-61
- [7] Z.E.Mohamed-Chérif, G.Andrieu, G.Alberto, N.Ticaud, C.Jullien, J.Genoulaz and A.Dieudonne, "Transfer Impedance Measurement of Shielded Cables through Localized Injection", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Oct. 2017.
- [8] G. Andrieu and A. Reineix, "High-frequency BCI-like tests with a stripline injection probe," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 58, no. 2, pp. 393-400, Apr. 2016

Résumé

Cet article présente la vision aéronautique du transport d'énergie électrique avec une vision à court terme. Une analyse globale de l'énergie électrique à bord est exposée lors de la discussion sur les problématiques introduites par la propulsion électrique et hybride dans le domaine aéronautique. Un focus dédié sur les problèmes CEM est présenté. Il met en évidence l'importance et la prise en compte de la CEM au niveau des harnais dans le système électrique global pour assurer la réalisation d'avions hybrides, voire tout électriques. ■

Abstract

This article presents the aeronautical vision of electrical energy transport with a short-term vision. A global analysis of the electric energy on board will be made during the discussion on the issues introduced by electric and hybrid propulsion in the aeronautical field. A dedicated focus on EMC issues will be presented. This will highlight the importance and consideration of EMC at harness level in the overall electrical system to ensure the realization of hybrid or even all-electric aircraft. ■