



HAL
open science

Proposition de relaxation des limites d'émissions conduites des standards ED-14G/DO-160G

Pierre-Louis Bourlon, Arnaud Bréard, Christian Vollaire, Marc Meyer

► **To cite this version:**

Pierre-Louis Bourlon, Arnaud Bréard, Christian Vollaire, Marc Meyer. Proposition de relaxation des limites d'émissions conduites des standards ED-14G/DO-160G. CEM France 2023, Jun 2023, Toulouse, France. hal-04515561

HAL Id: hal-04515561

<https://hal.science/hal-04515561>

Submitted on 21 Mar 2024

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.

PROPOSITION DE RELAXATION DES LIMITES D'ÉMISSIONS CONDUITES DES STANDARDS ED-14G/DO-160G

P. Bourlon^{1,2}, A. Breard², C. Vollaire², M. Meyer³

¹Airbus Helicopters, Marignane, France, pierre-louis.bourlon@airbus.com

²Univ Lyon, Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, Ampère, UMR5005, Ecully, arnaud.breard@ec-lyon.fr, christian.vollaire@ec-lyon.fr

³Airbus Helicopters, Donauworth, Allemagne, marc.ma.meyer@airbus.com

Résumé. La propulsion électrique des aéronefs pousse à reconsidérer les marges en compatibilité électromagnétique, les règles d'installation et les standards permettant la qualification de l'avionique. La considération du réel effet physique du mode différentiel dans les standards ED-14G/DO-160G permettrait une relaxation du requis des émissions conduites de 20 dB. Pour cela, une évaluation de la prépondérance du mode différentiel dans le couplage par diaphonie entre un câble de puissance et un câble victime est effectuée. Les paramètres et les conditions permettant une relaxation sont discutés. Ces conditions sont validées théoriquement et expérimentalement sur un cas de câblage réaliste. Enfin, les outils développés permettent aussi d'évaluer rapidement les conséquences sur le filtrage d'un changement de règle de ségrégation.

I. INTRODUCTION

La mobilité aérienne urbaine implique une augmentation de la puissance embarquée sur les aéronefs. Cette augmentation entraîne des défis d'intégration entre des systèmes de fortes puissances et de l'avionique basse puissance [1]. En effet, les systèmes de forte puissance modernes sont basés sur des transistors à carbure de silicium (SiC) qui utilisent une grande fréquence de découpage, des variations de tension et de courant plus élevées. Ainsi, le spectre des perturbations électromagnétiques est plus étendu et le niveau plus important.

Ces perturbations électromagnétiques sont conduites et rayonnées par les câbles de puissances. Elles se couplent aux ports de l'avionique qui peut être sensible. Un de ces couplages est la diaphonie entre une route de puissance et une route sensible. La diaphonie dépend des tensions et courants (en mode différentiel ou commun), des impédances en bout de ligne (inductive ou capacitive) et de la ségrégation des câbles. Les solutions traditionnelles (filtrage, ségrégation) pour réduire la diaphonie vont à l'encontre des contraintes de l'aéronautique (encombrement, poids, volume). Une connaissance sur la prédominance modale dans le couplage permet d'optimiser le filtrage des modules de forte puissance, l'installation des câbles et les performances CEM demandées aux équipementiers.

L'intégration de modules de forte puissance et donc de tension élevée implique de séparer les câbles de puissances

pour limiter les décharges partielles ou garantir l'absence de court-circuit en cas de casse d'un support de câbles. De plus, la section élevée des câbles de puissance rend compliquée le torsadage. Dans ces conditions, l'impact du mode différentiel doit être évalué afin de vérifier s'il est encore négligeable et dans quelles conditions.

Les standards ED-14G/DO-160G spécifient les performances attendues par l'avionique (compatibilité électromagnétique, thermique, vibration...). La Section 21, consacrée aux émissions conduites, n'a pas de requis spécifique pour le mode différentiel. La philosophie est d'attribuer le même effet au mode différentiel et commun dans la diaphonie. La prise en compte du réel effet du mode différentiel permettrait de relâcher le requis des émissions conduites.

Dans un premier temps, nous allons identifier la relaxation potentielle du standard ED-14G/DO-160G ainsi que les conditions permettant cette relaxation en prenant en compte le vrai effet du mode différentiel sur la diaphonie. Dans un second temps, nous allons déterminer de façon théorique et pratique les règles d'installation de câblage permettant de remplir ces conditions.

II. PRISE EN COMPTE DE L'EFFET REEL DU MODE DIFFERENTIEL

II.1. Définitions

Une situation de co-routage entre une route de puissance (P) et une route sensible (S) est représentée sur les Figures 1 & 2. La route P contient les câbles entre la batterie et un onduleur. La route S contient un câble entre un capteur et son module d'acquisition.

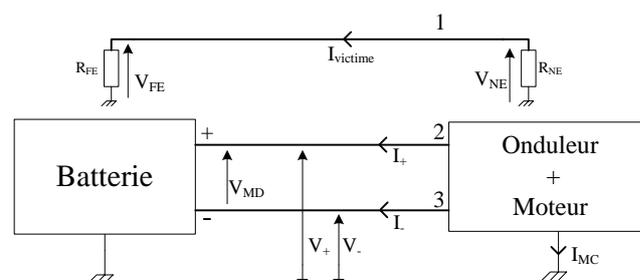


Figure 1 Représentation simplifiée d'une chaîne de propulsion électrique

Les courants et tensions peuvent être décomposés en deux modes : le mode différentiel et le mode commun. Ces modes sont définis par (1)(2)(3)(4) et la Figure 1.

$$V_{MD} = V_+ - V_- \quad (1)$$

$$V_{MC} = \frac{V_+ + V_-}{2} \quad (2)$$

$$I_{MD} = \frac{I_+ - I_-}{2} \quad (3)$$

$$I_{MC} = I_+ + I_- \quad (4)$$

A cause d'un couplage par diaphonie, un courant circule dans la ligne victime. On calcule la prédominance d'un mode dans le **couplage** à l'aide du ratio α :

$$\alpha = \frac{FT_{MC}}{FT_{MD}} \quad (5)$$

$$FT_{MC} = \frac{I_{victime-MC}}{I_{MC}} \quad (6)$$

$$FT_{MD} = \frac{I_{victime-MD}}{I_{MD}} \quad (7)$$

Où FT_{MC} et FT_{MD} sont les fonctions de transfert entre le courant induit dans la ligne victime dû à la circulation d'un courant, respectivement, de mode différentiel ou commun.

Au niveau de l'onduleur, on évalue la prédominance d'un mode dans les **émissions** à l'aide du ratio θ :

$$\theta = \frac{I_{MC}}{I_{MD}} \quad (8)$$

II.2. Gain potentiel dû à l'effet réducteur

Le standard ED-14G/DO-160G Section 21 requière les trois mesures suivantes :

$$|I_+| = \left| \frac{1}{2} I_{MC} + I_{MD} \right|$$

$$|I_-| = \left| \frac{1}{2} I_{MC} - I_{MD} \right|$$

Pour ces trois mesures, la même limite s'applique. Il existe donc des cas où le MD peut pénaliser les mesures $\left| \frac{1}{2} I_{MC} \pm I_{MD} \right|$ sans pour autant être prépondérant dans le couplage. De plus, θ est égal à 6 dB par construction.

On peut réécrire $\left| \frac{1}{2} I_{MC} \pm I_{MD} \right|$ en fonction de (8) :

$$\left| \frac{1}{2} I_{MC} \pm I_{MD} \right| = \left| \left(\frac{1}{2} I_{MC} \pm \frac{I_{MD}}{I_{MC}} \cdot \frac{I_{MC}}{I_{MD}} \cdot I_{MD} \right) \right|$$

$$= \left| I_{MC} \left(\frac{1}{2} \pm \frac{1}{\theta} \right) \right| \quad (9)$$

Afin de prendre en compte l'effet réel du courant de mode différentiel sur $I_{victime}$, on le pondère à l'aide du ratio α :

$$\left| \frac{1}{2} I_{MC} \pm \alpha I_{MD} \right| = \left| I_{MC} \left(\frac{1}{2} \pm \frac{\alpha}{\theta} \right) \right| \quad (10)$$

Enfin le potentiel de relaxation du standard est évalué à l'aide de la fonction $r(\alpha, \theta)$:

$$r(\alpha, \theta) = 20 \times \log_{10} \left(\frac{\frac{1}{2} + \frac{\alpha}{\theta}}{\frac{1}{2} + \frac{1}{\theta}} \right) \quad (11)$$

On remarque que le potentiel de relaxation dépend du ratio de mode différentiel et commun à la source.

Table 1 Potentiel de relaxation $r(\alpha, \theta)$ (dB)

θ (dB)	-20	-10	0	6	20
α (dB)					
-5	-4,7	-4,1	-3,0	-2,1	-0,7
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	4,8	4,5	3,6	2,9	1,1
10	9,7	9,1	7,8	6,4	2,7
15	14,7	14,0	12,2	10,4	5,0
20	19,6	18,9	16,9	14,8	8,0
25	24,6	23,8	21,7	19,5	11,6

Le potentiel de relaxation tend vers la valeur α quand le mode différentiel est prépondérant au niveau de la source de perturbation (onduleur). Dans ces conditions, la limite pourrait être adaptive en fonction de l'installation des câbles et de la répartition modale des émissions.

L'objectif est de trouver les conditions de ségrégation permettant d'obtenir une relaxation supérieure à 6 dB (en vert dans la Table 1). L'étude va être menée sur une installation électrique représentative.

III. EVALUATION DU RATIO α SUR UN CAS PRATIQUE

La situation reprend celle de la partie II.1. L'agencement des câbles est représenté sur la Figure 2. Entre les routes P et S, on définit des distances de ségrégation x_{12} . Les câbles de la route P sont espacés d'une distance x_{23} . Les câbles sont à une hauteur z du plan de référence. La route S joue le rôle de victime et est modélisée par un conducteur simple. Néanmoins, il sera possible d'émuler une paire bifilaire blindée en appliquant les bons facteurs de correction (réjection de mode commun et efficacité de blindage).

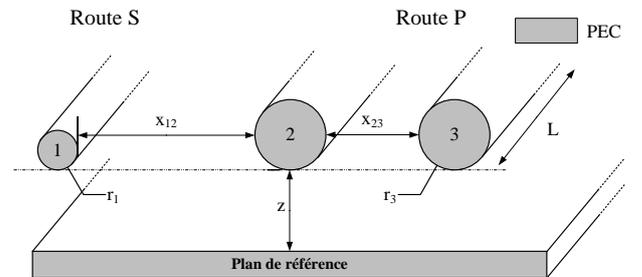


Figure 2 Représentation géométrique du câblage

III.1. Calcul analytique du ratio α

L'objectif est d'avoir une formule analytique du ratio α afin d'avoir un sens physique à ce coefficient. Les outils de simulation numérique pourraient être utilisés pour traiter des agencements de câbles et phénomènes plus complexes. Dans un souci de simplicité, les câbles sont considérés comme court électriquement, sans perte et sans isolant. Ainsi, la situation des Figure 1 et Figure 2 peut être schématisée avec des éléments localisés (Figure 3). Dans ces conditions, le courant circulant dans la ligne victime peut être calculé pour chaque mode :

$$I_{victime-MC} = \frac{j\omega(l_{12}+l_{13})\frac{I_{MC}}{2}}{R_{NE}+R_{FE}+j\omega l_{11}} \quad (12)$$

$$I_{victime-MD} = \frac{j\omega(l_{13}-l_{12})}{(R_{NE}+R_{FE}+j\omega l_{11})} I_{MD} \quad (13)$$

En injectant (12) et (13) dans (14), on obtient :

$$\alpha = \frac{1}{2} \cdot \frac{l_{12}+l_{13}}{l_{13}-l_{12}} \quad (14)$$

Avec R_{NE} et R_{FE} les résistances terminales sur la ligne victime (Figure 3).

Le calcul des inductances mutuelles utilise les formules développées dans [2]. Pour des configurations plus complexes, le recours aux approches numériques est requis. On peut noter que le ratio α dépend de paramètres géométriques x_{12} , x_{23} , z et ne dépend ni de la fréquence, ni de la longueur des câbles.

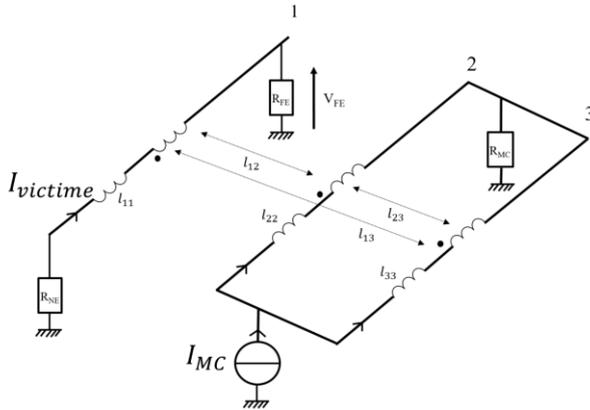


Figure 3 Schéma électrique représentant le couplage par diaphonie en mode commun

III.2. Validation expérimentale

Le ratio α est mesuré pour différents agencements géométriques choisis comme réalistes (Table 2)

Table 2 Paramètres géométriques utilisés

Paramètre	Min	Max
x_{12}	a	10a
x_{23}	b	4b
z	c	4c

L'extrémité des câbles est connectée directement au plan de masse en cuivre. Le support des câbles est fait en plexiglas. L'injection de courant est faite à l'aide de deux pinces de courant. Suivant la configuration des câbles dans les pinces, un courant de mode différentiel ou commun est injecté puis mesuré. Une troisième pince de courant mesure le courant $I_{victime}$ (la Figure 4 propose le schéma de l'expérience). A l'aide d'un analyseur de réseau, on mesure successivement la fonction de transfert FT_{MC} ou FT_{MD} . La mesure est faite à une fréquence de 300 kHz (arbitraire). Néanmoins, l'invariance fréquentielle du ratio α a été vérifiée dans la gamme [1 kHz-30 MHz] pour une configuration géométrique donnée (Figure 6).

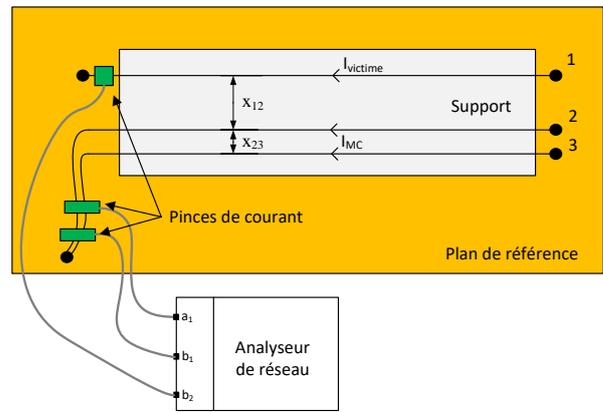


Figure 4 Schéma de l'expérience

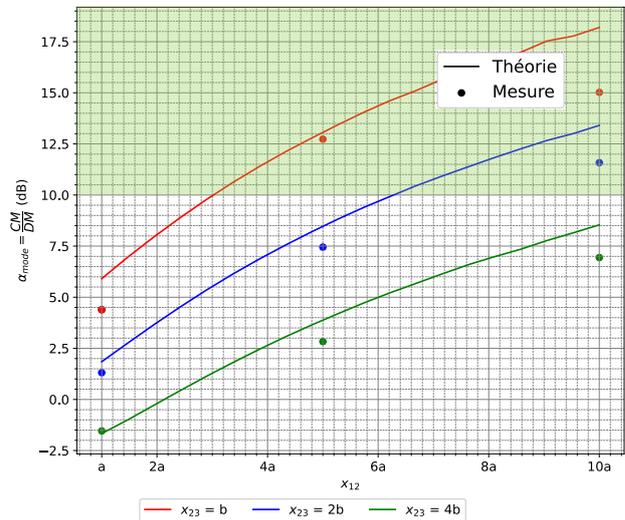


Figure 5 Ratio α pour différentes configurations géométriques, hauteur $z = c$, fréquence 300 kHz

III.3. Résultats

Sur la Figure 5, le ratio α prend des valeurs comprises entre 0 et 20 dB avec les paramètres géométriques considérés dans la Table 2. En vert, on peut identifier tous les agencements géométriques pour lesquels l'objectif de 6 dB peut être atteint. Ainsi, on peut en déduire de

nouvelles règles de ségrégation. La théorie et la mesure sont cohérentes avec un écart maximum de 3 dB. Il existe une sous-évaluation constante du ratio α qui est due principalement à une sous-évaluation de la fonction de transfert FT_{MC} . Sur la Figure 6, le ratio α reste constant jusqu'à 10 MHz. Ensuite, les effets de propagation commencent à apparaître et dès lors les modèles analytiques ne sont plus valables.

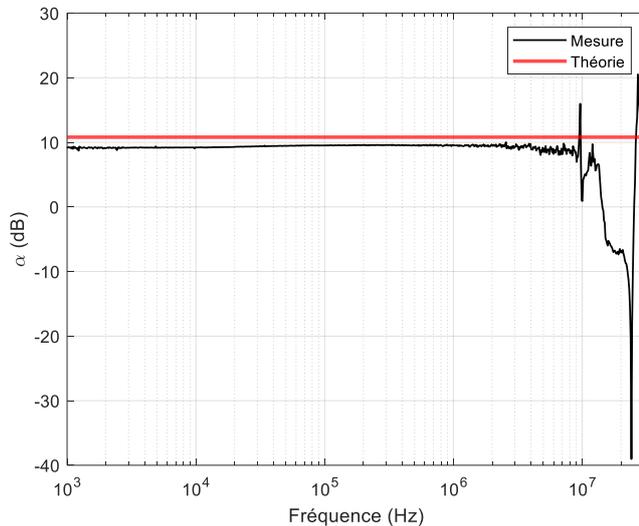


Figure 6 Ratio α en fonction de la fréquence - $x_{12} = 10a - x_{23} = 4b - z = 4c$

III.4. Discussion

La Figure 5 permet d'évaluer la relaxation maximale du standard. Avec des hypothèses d'intégration réaliste, le potentiel de relaxation est compris entre 0 et 20 dB. Comme expliqué dans II.2, elle doit être pondérée suivant les caractéristiques des émissions conduites. Le potentiel de relaxation le plus important se situe dans les basses fréquences, là où les émissions conduites de mode différentiel sont prépondérantes [3][4]. Il s'agit aussi de la gamme de fréquences où le filtrage est le plus volumineux. Ainsi, une relaxation de 6 dB permet de diviser par 2 la valeur de capacité de filtrage de mode différentiel en sortie de l'onduleur.

La pondération du ratio α nécessite une connaissance précise des émissions de mode différentiel. Actuellement, une mesure de mode différentiel n'est pas requise par le standard ED-14G/DO-160G Section 21. L'évaluation du ratio θ à partir des mesures actuelles introduit une trop grande incertitude quand le mode différentiel et commun sont du même ordre de grandeur ($\theta = [-20 \text{ dB}; 20 \text{ dB}]$). La valeur prise par θ n'étant pas connue a priori, il est préférable d'effectuer une mesure de MD sur les équipements de fortes puissances afin d'avoir les critères d'intégration les plus précis l'intégration possible.

La Figure 5 permet aussi d'évaluer rapidement les conséquences sur le filtrage lors d'un changement d'installation des câbles. Par exemple, l'augmentation de la ségrégation des câbles de puissance de b à 4b est

équivalente à pratiquement tripler (+10 dB) le filtrage de mode différentiel en sortie de l'onduleur.

IV. CONCLUSION

Dans le cas d'applications de fortes de puissances, les configurations de câblage ne permettent plus de négliger le mode différentiel. A partir d'une prise en compte de l'effet réel du mode différentiel, il est tout même possible de relâcher de 20 dB le requis sur les émissions conduites du standard ED-14G/DO-160G. Il est ainsi nécessaire d'avoir les caractéristiques modales des émissions conduites. L'ajout d'une mesure de mode différentiel dans les standards ED-14G/DO-160G Section 21 permettrait de l'obtenir. L'utilisation d'un modèle boîte noire [5] permettrait aussi d'obtenir les caractéristiques modales (notamment le coefficient θ) des émissions conduites tout en étant compatible avec une logique d'intégration industrielle (rapidité, confidentialité ...).

REFERENCES

- [1] Rotgerink, Jesper Lansink, Harmen Schippers, Jaco Verpoorte, et Kees Nuyten. « EMC aspects of compact wiring for future aircraft ». In *2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC)*, 165-70, 2018. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2018.8393760>.
- [2] C. R. Paul and A. E. Feather, 'Computation of the Transmission Line Inductance and Capacitance Matrices from the Generalized Capacitance Matrix', *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-18, no. 4, pp. 175–183, Nov. 1976, doi: [10.1109/TEMC.1976.303498](https://doi.org/10.1109/TEMC.1976.303498).
- [3] Seddighi, M., F. Costa, et M. Petit. « Influence of Modifying Standard Emission Levels on the sizing of EMC Filters ». In *2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe)*, P.1-P.9, 2021.
- [4] Negri, Simone, Giordano Spadacini, Flavia Grassi, et Sergio A. Pignari. « Prediction of EMI Filter Attenuation in Power-Electronic Converters via Circuit Simulation ». *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, 1-11. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2022.3165377>.
- [5] M. Amara, 'Maîtrise des émissions conduites des électroniques de puissance.', Université de Lyon, 2019. [En ligne]. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02500008>