

Etude expérimentale de l'échauffement de câbles électriques en fonction de la configuration d'installation

Philippe Reulet^{1*}, Morgane Veca¹

¹Onera/DMPE, Université de Toulouse, 31055 Toulouse, France

* (auteur correspondant : philippe.reulet@onera.fr)

Résumé – Les travaux présentés concernent l'étude de l'échauffement d'un câble électrique aéronautique. Le modèle numérique couplé CEM-thermique développé nécessite la définition de lois de corrélation pour le coefficient d'échange thermique. Une campagne expérimentale a été mise en œuvre pour caractériser précisément la résistance électrique du câble DR04 en fonction de sa température. Puis un banc d'essais a été développé pour permettre l'estimation du coefficient d'échange thermique en fonction de l'installation du câble dans son environnement (libre ou avec goulotte).

Nomenclature

D_e	diamètre extérieur, m	ε	émissivité
g	accélération de la pesanteur, ms^{-2}	λ_a	conductivité thermique (air), $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
h	coefficient d'échange, $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	ν	viscosité cinématique (air), m^2s^{-1}
I	courant, A	σ	constante de Stefan-Boltzmann, $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$
L	longueur, m	<i>Indices et exposants</i>	
Pr	nombre de Prandtl (air)	0	référence
r	résistance linéique, Ωm^{-1}	cv	convection
T	température, °C	e	environnement
U	tension, V	f	fluide
<i>Symboles grecs</i>		ray	rayonnement
α	coefficient de température, K^{-1}	p	paroi
β	coefficient d'expansion therm. (air), K^{-1}		

1. Introduction

En vue de l'électrification progressive des avions pour des raisons de fiabilité des équipements électriques ainsi qu'environnementales, une augmentation conséquente du nombre de câbles déployés à bord des avions a été identifiée, aussi bien de signaux que de hautes tensions. Les contraintes de compatibilité électromagnétique (CEM) et thermiques liées à l'architecture électrique s'avèrent donc de plus en plus critiques. Le projet PHYCIEL mené au sein de plusieurs départements de l'ONERA a montré l'intérêt de développer un modèle unifiant les deux physiques pour analyser les performances du câblage tant du point de vue fonctionnel que CEM (thèse F. Mahiddini [1]). La modélisation numérique de l'échauffement des câblages nécessite la prise en compte du couplage électromagnétique-thermique, au travers de la dépendance de la résistance électrique des conducteurs avec la température. En se basant sur une description topologique du réseau électrique, le modèle couplé vise à résoudre le modèle électromagnétique permettant de déterminer les paramètres électriques primaires d'une ligne de transmission et de calculer les courants électriques dans les câbles, ainsi que le modèle thermique dédié au calcul de l'échauffement des câbles par effet Joule. Des travaux similaires de modélisation ont été menés par J. Petitgirard [2]. Les modèles thermiques utilisés nécessitent des corrélations expérimentales pour calculer les coefficients d'échanges des câbles avec leur environnement. Les corrélations existantes sont généralement basées sur des configurations de

câbles en espace libre. L'objet de ces travaux est de déterminer l'influence d'un environnement proche des câbles sur leur capacité à se refroidir par convection naturelle. A partir des résultats expérimentaux, il s'agit d'évaluer le coefficient d'échange thermique qui permet de calculer les pertes thermiques autour des câbles dans le cadre des modélisations numériques. Ce coefficient d'échange dépendra notamment de la disposition des câbles et de la présence éventuelle de goulottes.

2. Montage expérimental et protocole de mesure

2.1. Banc d'essais pour étudier l'échauffement des câbles électriques

Le banc d'essais Figure 1 reprend le banc utilisé dans le cadre de la thèse de F. Mahiddini [1]. Il s'agit d'un châssis sur lequel se trouve « l'aquarium » où sont placés les câbles électriques chauffés par effet Joule. Les parois supérieure et inférieure sur lesquelles s'effectuent l'échange avec l'air sont maintenues à température constante à l'aide d'un circuit d'eau relié à un bain thermostaté. Pour plus de détails sur le banc se référer à [1]. Les dimensions internes sont $L \times l \times H = 962 \times 632 \times 634 \text{ mm}^3$. Les modifications ont essentiellement consisté à changer les parois d'extrémités pour y ajouter des disques tournants dans la partie en matériau isolant permettant la traversée des câbles et la fixation des goulottes en faisant varier leur angle par rapport à la verticale. Il est ainsi possible de simuler différentes configurations : câbles en espace libre ou goulotte inclinée à différents angles en fonction de sa position dans un fuselage par exemple.

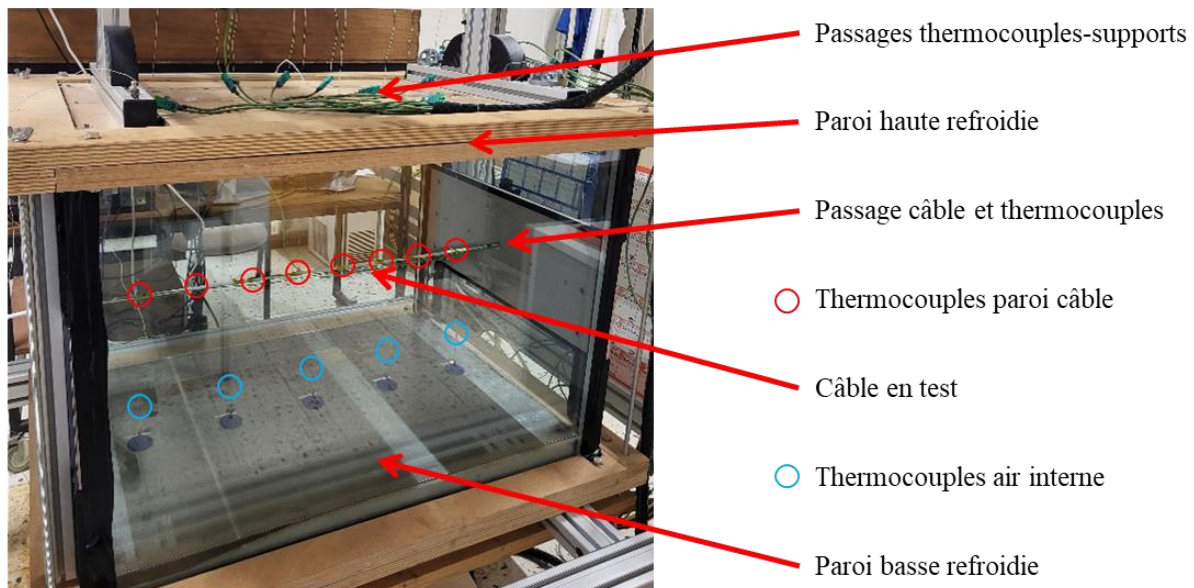


Figure 1 : Banc expérimental pour étudier l'échauffement des câbles électriques (configuration 1)

2.2. Description du câble utilisé dans le cadre du projet

Dans le cadre du projet PHYCIEL, il a été choisi de réaliser l'ensemble des essais à partir de la référence de câble « EN 2267-010A 220 » de gauge AWG 4, abrégée en « DR04 ». Il s'agit d'un câble multibrin en cuivre plaqué nickel. Il est constitué de 37 torons de 12 brins de diamètre 0.25 mm.

Un paramètre important pour la modélisation de l'échauffement des câbles est la résistance électrique, qui dépend de la température. Un banc de caractérisation de cette résistance en

fonction de la température a été conçu et fabriqué. Trois essais de caractérisation sur un long câble enroulé ont été effectués afin de mesurer très précisément la variation de la résistance électrique en fonction de la température. A partir des points expérimentaux, les paramètres sont identifiés pour la loi de variation linéaire exprimée sous la forme :

$$r(T) = r_0(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (1)$$

Les grandeurs caractéristiques du câble DR04 testé sont regroupées dans le Tableau 1.

$\alpha [K^{-1}]$	$r_0 [m\Omega/m]$	$T_0 [^{\circ}C]$	$D_e [mm]$
$0,00394 \pm 0,00002$	$0,8182 \pm 0,0009$	20	$7,2 \pm 0,1$

Tableau 1 : Caractéristiques du câble DR04

Le diamètre extérieur du câble D_e a été mesuré en différentes positions. La valeur typique est donnée dans le tableau ci-dessus.

2.3. Principe de la caractérisation du coefficient d'échange thermique

Le câble est alimenté à courant constant par une alimentation stabilisée ITECH IT6015C-80-450. Lorsque plusieurs câbles sont présents dans la cavité, ils sont alimentés par le même courant, avec des boucles extérieures. D'après la documentation technique, l'incertitude sur le courant injecté est $\pm 0,225$ A. La tension aux bornes de chaque câble, est mesurée pendant toute la durée de l'essai avec un voltmètre de précision YOKOGAWA 7552. Le constat de vérification pour le calibre 200 mV indique une Erreur Maximale Tolérée (EMT) de 0,019 mV avec une incertitude de 0,009 mV.

Des thermocouples type K, isolés PFA, monobrin de diamètre 0.2 mm, à soudure exposée, ont été installés à la surface des câbles et répartis sur la longueur (Figure 1). Une vérification des thermocouples et de la chaîne d'acquisition montre que l'incertitude de mesure est de $\pm 0,5^{\circ}C$. La soudure est maintenue en contact avec la surface du câble par un ruban en kapton et une pâte thermo-conductrice dopée à la poudre de cuivre assure un bon contact thermique. Certains thermocouples passent le long du câble et sortent de la cavité par les extrémités. D'autres font un coude au niveau d'un collier de serrage puis remontent verticalement pour traverser la paroi supérieure. Dans les configurations en espace libre, ces thermocouples sont également utilisés pour maintenir les câbles horizontaux au centre de la cavité et évitent une légère flèche de par leur poids. Dans le cas de la configuration avec la plaque, celle-ci est également instrumentée par des thermocouples.

Afin de calculer le coefficient d'échange thermique, il est nécessaire de prendre en compte la température de l'air qui vient lécher le câble par convection naturelle. Pour cela, cinq thermocouples ont été placés sur les supports verticaux, dans le plan médian, en-dessous du câble. Ils sont visibles sur la Figure 1 (cercles bleus).

L'acquisition des données de températures est réalisée en continu pendant toute la durée des essais, avec un point toutes les 15 s. Les essais sont conduits pour différents paliers de courant stabilisé. Les valeurs de ces courants ont été déterminées par un modèle simplifié du câble en espace libre et sont les mêmes pour toutes les configurations. Elles ont été choisies afin de couvrir au mieux toute la gamme de température du câble ($\sim 20^{\circ}C$ - $100^{\circ}C$). Les parois haute et basse de la cavité sont maintenues à une température stable proche de $25^{\circ}C$ par la circulation d'un fluide régulé par un bain thermostaté. Cette température a été choisie proche de la température ambiante dans le laboratoire pour minimiser les pertes thermiques par les faces latérales.

Les premiers essais ont permis de définir la durée nécessaire pour atteindre un état stabilisé au niveau des températures du câble : pour chaque palier de courant, les conditions sont maintenues pendant 24 h. Toutes les grandeurs acquises sont moyennées sur la période des deux dernières heures.

Les différentes grandeurs nécessaires au calcul du coefficient d'échange thermique sont extraites des mesures : T_p moyenne des températures de paroi le long du câble, T_e moyenne des températures de l'air de convection, U tension aux bornes du câble, I courant imposé dans le câble. A partir de ces grandeurs, il est possible de déterminer le coefficient d'échange thermique en considérant que la puissance générée par effet Joule est dissipée par convection et rayonnement vers l'air ambiant dans la cavité. Le coefficient d'échange global convectivo-radiatif est calculé par l'équation suivante :

$$h = \frac{UI}{\pi D_e L (T_p - T_e)} \quad (2)$$

Compte-tenu des incertitudes des mesures intervenant dans cette équation, le coefficient d'échange global est estimé avec une incertitude de $\pm 8\%$, valeur maximale aux faibles courants pour lesquels l'écart de température entre le câble et l'air est le plus faible.

Pour déterminer le coefficient d'échange convectif h_{cv} , il convient de soustraire le terme de rayonnement thermique :

$$h_{cv} = h - h_{ray} \text{ avec } h_{ray} = \frac{\varepsilon \sigma (T_p^4 - T_e^4)}{T_p - T_e} \quad (3)$$

où $\varepsilon = 0,92$ l'émissivité du revêtement du câble en PTFE.

Lors du post-traitement des mesures, il a été envisagé de calculer la température interne de l'âme du câble à partir de sa résistance électrique :

$$T_{cu} = T_0 + \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right) \text{ avec } R = \frac{U}{I} \quad (4)$$

L'incertitude sur cette température calculée est estimée à $\pm 4^\circ\text{C}$. Les résultats obtenus par cette méthode n'ont pas été concluants car ils présentaient des incohérences par rapport à la température de surface. C'est pourquoi ces données ne sont pas présentées.

2.4. Configurations testées

Trois configurations ont été mises en œuvre et caractérisées.

Pour la configuration 1 (Figure 2), le câble DR04 est mis en œuvre en espace libre, c'est-à-dire sans support. Il est connecté aux deux bornes de l'alimentation électrique, placée à une extrémité de la cavité. Le câble retour passe hors de la cavité depuis l'autre extrémité. L'emplacement des thermocouples est indiqué par les cercles rouges. L'objectif est de vérifier que l'on retrouve les critères de dimensionnement des abaques actuels qui permettent de choisir le diamètre des câbles électriques en fonction du courant et de la température maximale admissible, en espace libre.



Figure 2 : Configuration 1 câble en espace libre

Pour la configuration 2 (Figure 3), le même câble est torsadé et testé toujours en espace libre. On peut alors identifier l'influence de cette disposition sur l'échange thermique. A une

extrémité de la cavité, il fait une boucle à l'extérieur. A l'autre extrémité, il est connecté aux deux bornes de l'alimentation électrique. Les thermocouples sont placés tout le long du câble, alternativement sur la partie externe des câbles ou entre les deux câbles pour prendre en compte les différences de température locale.



Figure 3 : Configuration 2 câble torsadé en espace libre

Enfin, pour la configuration 3, le câble de la Figure 1 est remplacé par une plaque aluminium horizontale tenue aux deux extrémités, sur laquelle sont fixés deux types de supports de câbles : brackets réf. NSA93550403 et ABS1339D04L. On peut ainsi positionner deux câbles parallèles et deux câbles torsadés (Figure 4). Ces quatre tronçons (identifiés par les codes 3_1, 3_2, 3_3, 3_4) sont un unique câble dans lequel passe le courant fourni par l'alimentation électrique. Pour cette configuration, quatre thermocouples sont installés le long de chaque câble. Des thermocouples ont également été ajoutés sur la plaque pour connaître sa température. Les grandeurs mesurées sont post-traitées pour chacun des quatre tronçons de câble afin de calculer le coefficient d'échange thermique associé.

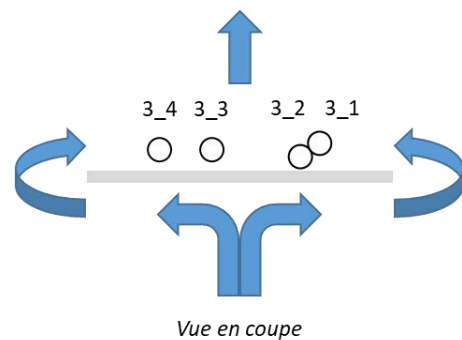
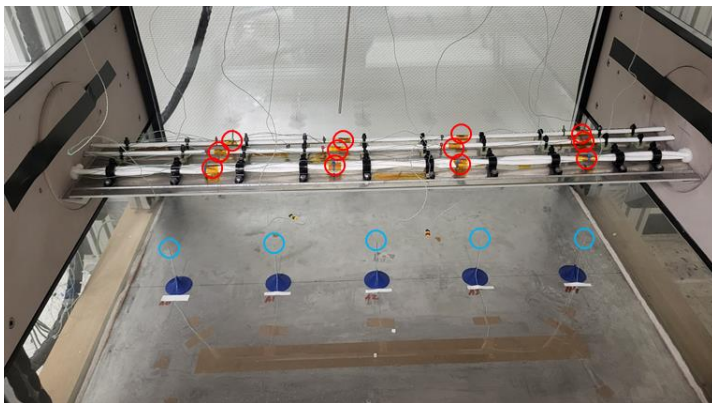


Figure 4 : Configuration 3 et schéma des câbles sur la plaque aluminium

3. Analyse des résultats de la campagne d'essais

La comparaison entre les trois configurations ne peut pas se faire simplement en comparant les valeurs du coefficient d'échange convectif calculé selon l'équation (3) pour chaque palier de courant car l'intensité de la convection naturelle dépend directement de l'écart de température entre l'élément chauffant et l'air ambiant. Pour réaliser cette comparaison, il faut donc tracer la variation du coefficient d'échange convectif en fonction de cet écart de température. La Figure 5 présente les six configurations de câble testées (courbes en symboles) : les deux premières configurations (« conf 1 », « conf 2 ») et les quatre câbles de la configuration 3 (« conf 3_1 », « conf 3_2 », « conf 3_3 », « conf 3_4 »).

Ces résultats montrent que le coefficient d'échange thermique augmente avec l'écart de température : en effet la vitesse de convection naturelle est d'autant plus grande que la différence de température entre le câble et l'air augmente.

Malgré la régulation en température des parois haute et basse de la cavité, la température de l'air dans la cavité, en-dessous du câble, augmente légèrement en fonction de la puissance générée par le câble. Il était donc important de faire cette mesure dans l'air et de ne pas prendre

simplement la température des parois refroidies pour le calcul du coefficient d'échange thermique.

Pour la configuration 2, l'interaction entre les deux câbles réduit les effets du refroidissement par convection ce qui se traduit par une augmentation de la température, à condition d'alimentation identique. En conséquence, le coefficient d'échange thermique calculé est globalement moins élevé que pour la configuration 1 car une partie de la surface externe est protégée de la convection par la présence du deuxième câble.

Pour la configuration 3, les résultats obtenus pour les deux câbles torsadés en termes de coefficient d'échange sont très proches : la température de surface est la valeur moyenne des températures des câbles, seule la tension diffère. Les échanges thermiques sur les deux câbles parallèles sont ici encore supérieurs à ceux des câbles torsadés. Le câble 3_4 le plus proche du bord de la plaque est mieux refroidi que le câble 3_3 vers le centre car l'écoulement de convection arrive par en-dessous de la plaque et la contourne. L'air frais s'échauffe au contact du câble 3_4 avant d'atteindre le câble 3_3 (voir schéma Figure 4).

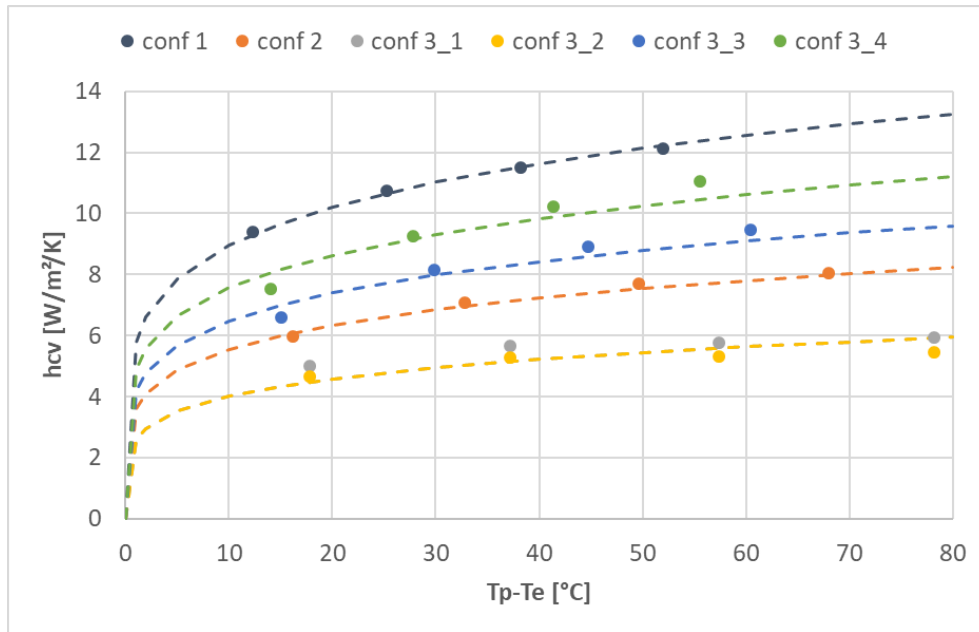


Figure 5 : Comparaison des coefficients d'échange thermique pour les différentes configurations expérimentales

Dans la configuration 1 du câble en espace libre, les résultats obtenus peuvent être comparés à une corrélation empirique classiquement utilisée pour calculer l'échauffement des câbles en espace libre. Cette corrélation est tirée de la thèse de F.P. Loos [3]. Le premier terme est la contribution de la conduction et le deuxième terme la contribution de la convection :

$$h_{cv} = \left[0,752 \sqrt{\frac{2\lambda_a}{\pi D_e}} + 0,387 \sqrt{\lambda_a} \left(\frac{g\beta Pr |T_p - T_e|}{v^2 \left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{1}{9}}} \right)^{\frac{1}{6}} \right]^2 \quad (5)$$

Dans cette équation, les propriétés de l'air doivent être calculées à la température dite de fluide, c'est-à-dire la moyenne entre la température de paroi et la température de l'air ambiant :

$$T_f = (T_p + T_e)/2 \quad (6)$$

Le coefficient d'échange global convecto-radiatif est calculé en ajoutant le terme de rayonnement (h_{ray} équation (3)) au coefficient d'échange convectif calculé par cette corrélation. Ces résultats sont comparés aux expérimentaux de la configuration 1 sur la Figure 6. Les valeurs obtenues par l'expérience sont globalement supérieures, même si l'évolution en fonction d'écart de température entre le câble et l'ambiante semble en bon accord. L'écart est pratiquement constant, proche de 9%. Cet écart est tout à fait acceptable pour ce type de corrélation empirique. A noter que F. Mahiddini [1] avait également trouvé que cette corrélation conduisait à des coefficients d'échange thermique plus faibles que les valeurs expérimentales mesurées lors de ses expériences.

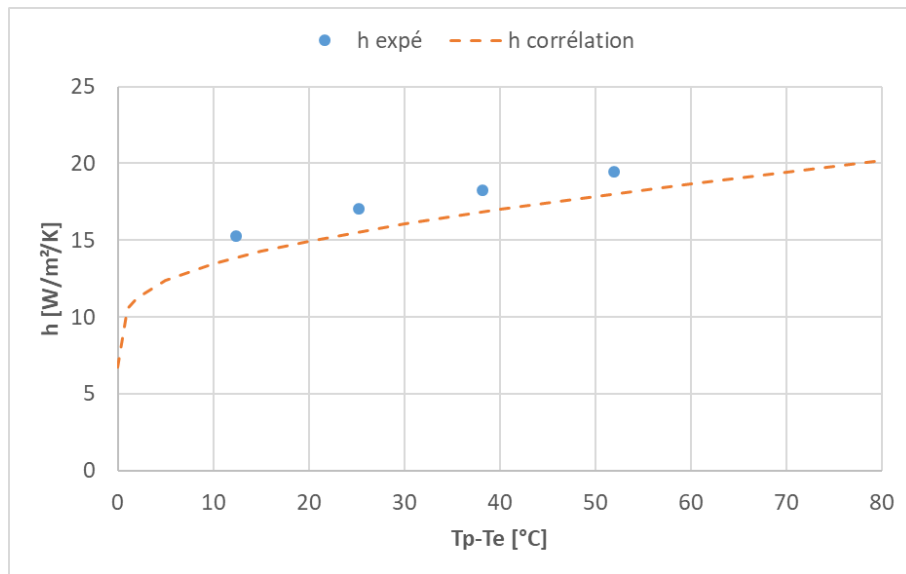


Figure 6 : Coefficient d'échange thermique configuration 1 – Comparaison à la corrélation [3]

En vue de l'intégration de ces résultats expérimentaux dans le modèle thermique numérique de simulation de l'échauffement des câbles avec couplage à la simulation CEM, des lois d'échange sont identifiées pour chaque configuration d'installation (c), sous la forme :

$$h_{cv}^{(c)} = h_{cv0}^{(c)} \cdot (T_p - T_e)^{1/m} \quad (7)$$

Une minimisation aux moindres carrés de cette loi par rapport aux données expérimentales donne les coefficients du Tableau 2, avec $m = 5.3$:

Configuration	conf 1	conf 2	conf 3_1 & 3_2	conf 3_3	conf 3_4
h_{cv0}	5,8	3,6	2,6	4,2	4,9
écart à la conf 1	-	-38%	-54%	-27%	-15%

Tableau 2 : Lois de corrélation du coefficient d'échange thermique

Ces lois sont tracées sur la Figure 5 en pointillés. Elles sont en très bon accord avec les mesures, l'écart maximal est de 4% du coefficient d'échange thermique global convecto-radiatif, ce qui est très satisfaisant.

Dans le Tableau 2 sont calculés les coefficients de réduction du coefficient d'échange convectif : ratio du h_{cv0} de la configuration i par rapport à la configuration de référence du câble seul en espace libre (configuration 1). Pour les deux câbles torsadés en espace libre, la réduction atteint -38% et cette réduction augmente encore par l'effet de la présence de la plaque

plane. Cet effet est également non négligeable pour les deux câbles parallèles, et d'autant plus fort que le câble est placé vers le centre de la plaque. Si l'on compare les deux câbles torsadés avec et sans la plaque, la réduction due à la présence de la plaque est de -27%, valeur identique à la réduction obtenue pour le câble parallèle au centre de la plaque.

La norme [4]-Figure 4 permet de définir quel est le coefficient de « derating » qu'il faut appliquer au courant admissible dans un toron de plusieurs câbles par rapport au courant admissible d'un câble seul. Ce coefficient prend en compte la réduction des échanges thermiques due à la présence de plusieurs câbles. Dans le cas de deux câbles, ce coefficient est de 0,80. Cette valeur correspond à une puissance admissible de 0,64 par rapport au câble seul. Cette réduction de -36% est en très bon accord avec la réduction de -38% obtenue par l'expérience.

4. Conclusions et perspectives

Ces travaux ont conduit à la réalisation de deux bancs d'essais. Dans un premier temps, le banc de caractérisation de la loi de variation de la résistance électrique du câble DR04 sélectionné a été mis en œuvre. Plusieurs essais ont été réalisés et ont démontré une très bonne répétabilité des résultats. Ensuite, le banc d'essais pour étudier l'échauffement des câbles dans un environnement contrôlé a été conçu et fabriqué. Ce banc a pu être exploité pour tester trois configurations d'installation : la configuration de référence du câble seul en espace libre, deux câbles torsadés en espace libre et enfin quatre câbles fixés sur une plaque plane représentant un plan de masse. Ces essais ont conduit à identifier des lois de corrélation pour le calcul du coefficient d'échange thermique pour chaque configuration d'installation.

Afin d'obtenir des informations sur la température interne du câble, une température moyenne de l'âme a été calculée à partir de la résistance électrique. Mais ces valeurs se sont avérées trop peu précises pour être exploitables dans la validation du modèle numérique.

Les moyens expérimentaux mis en œuvre ont démontré tout leur intérêt pour identifier les échanges thermiques autour de câbles dans différentes configurations d'installation. D'autres configurations peuvent être intéressantes à tester par la suite. Par exemple, sur la plaque plane utilisée dans la configuration 3, il est possible de rajouter des parois entre les câbles pour simuler une goulotte en E. Cela va fortement modifier les conditions de convection par un fort effet de confinement. Le montage permet en outre l'inclinaison de l'ensemble des câbles et de la goulotte, paramètre qui aura un impact direct sur les transferts thermiques.

Références

- [1] F. Mahiddini, « Modélisation couplée CEM-Thermique d'architectures de câblages électriques embarquées », Thèse de l'Université de Toulouse, 2018, <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01899051>
- [2] J. Petitgirard, « Modélisation du dimensionnement électrothermique d'un faisceau électrique dans son environnement véhicule », Thèse Université Bourgogne Franche-Comté, 2022.
- [3] F.P. Loos, « Joule Heating in Connecting Structures of Automotive Electric Devices. Modelling, Simulation and Optimization », PhD Dissertation. Universität des Bundeswehr, München, 2014, <https://athene-forschung.unibw.de/doc/92056/92056.pdf>.
- [4] SAE International, « Wiring Aerospace Vehicle », Aerospace Standard AS50881 rev. G, 2019.

Remerciements

Les travaux ont été réalisés dans le cadre du projet PHYCIEL qui a été cofinancé par la DGAC dans le cadre du Plan de Relance qui fait l'objet d'un refinancement par Nextgeneration EU.