

Caractérisation de résistances thermiques locales liées à des assemblages de câbles et connecteurs électriques de forte puissance

Alexandre Marie^{1*}, Jean-Pierre Fradin¹, Yves Fardel², David Thomasse²

¹Icam Toulouse, Toulouse, France

²IRT Saint-Exupéry, Toulouse, France

*(auteur correspondant : alexandre.marie@icam.fr)

Résumé - La présente étude vise à proposer une démarche de caractérisation thermique d'assemblages de câbles de puissance et connecteurs électriques basée sur des mesures expérimentales et leur comparaison à des modèles thermiques 3D. Les résultats présentés dans ce papier permettent ainsi, pour les connecteurs considérés, de montrer que la résistance thermique liée aux sertissages hexagonaux considérés ici est négligeable et, au contraire, d'identifier une résistance thermique significative induite par le bracelet de connexion électrique d'un connecteur démontable.

Nomenclature

S Section de passage du flux, m^2
 D Diamètre, m
 Φ Flux de chaleur, W
 x Position longitudinale, m
 R_{th} Résistance thermique, K/W
 T température, K

Symboles grecs

λ Conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$

Indices et exposants

serti Sertissage

conn Connecteur

1. Introduction

Dans le contexte actuel d'électrification des moyens de transport aériens, la puissance électrique embarquée à bord d'avions est amenée à augmenter significativement. Pour permettre le transport de cette énergie à bord de l'avion, la mise en oeuvre d'assemblages de câbles et connecteurs électriques adaptés à de fortes puissances, généralement appelés harnais électriques, s'avère de plus en plus nécessaire. Considérant ceci, et dans le cas par exemple de la connexion d'un élément chaud à un élément froid ou bien d'une variation brutale d'ambiance thermique le long du harnais, l'apparition de flux de chaleurs longitudinaux peut éventuellement poser des problèmes de gestion thermique qu'il convient de prévoir correctement lors de la conception du système.

Néanmoins, la problématique de la capacité de transport thermique de tels harnais semble actuellement assez peu étudiée dans la littérature. La majorité des études des phénomènes thermiques sur ces assemblages semble en effet se concentrer sur la détection de résistances électriques liées aux connecteurs [1, 2] ou bien sur la génération de chaleur induite par des contacts électriques imparfaits [3]. Par ailleurs, les études récentes concernant la conduction thermique au sein de câbles sont majoritairement axées sur le transfert thermique radial, c'est à dire depuis le centre du câble vers le milieu ambiant [4, 5].

Dans ce cadre, il est ici présenté le développement d'un banc de caractérisation de contacts thermiques liés à des harnais électriques ainsi que son application à deux assemblages câbles/connecteurs. Par la suite, une démarche de comparaison des résultats expérimentaux avec une modélisation numérique 3D des assemblages étudiés est détaillée dans le but d'identifier les

résistances thermiques locales liées aux connecteurs.

2. Dispositif expérimental

2.1. Connecteurs étudiés et instrumentations associées

Dans le cadre de ces travaux, deux connecteurs de nature différentes ont été étudiés et sont représentés en Fig. 1. Le premier connecteur, représenté en partie haute de cette figure et désigné par la suite "câbles sertis" est une pièce en cuivre usinée de manière à pouvoir relier deux câbles par sertissage hexagonal dans celle-ci. Les câbles utilisés sont des câbles multi-brins en cuivre définis à la norme EN2083. L'objectif est de caractériser la conduction thermique le long de tels câbles et d'évaluer la résistance thermique induite par les sertissages. Le second connecteur, désigné par la suite "barreaux clipsés" est constitué de deux barreaux de cuivre pouvant être connectés par une liaison male/femelle, la connexion électrique étant assurée par un "bracelet" en cuivre. Celui-ci assure le contact électrique par sa déformation élastique lors de l'assemblage des barreaux (voir schéma de la Fig. 1).

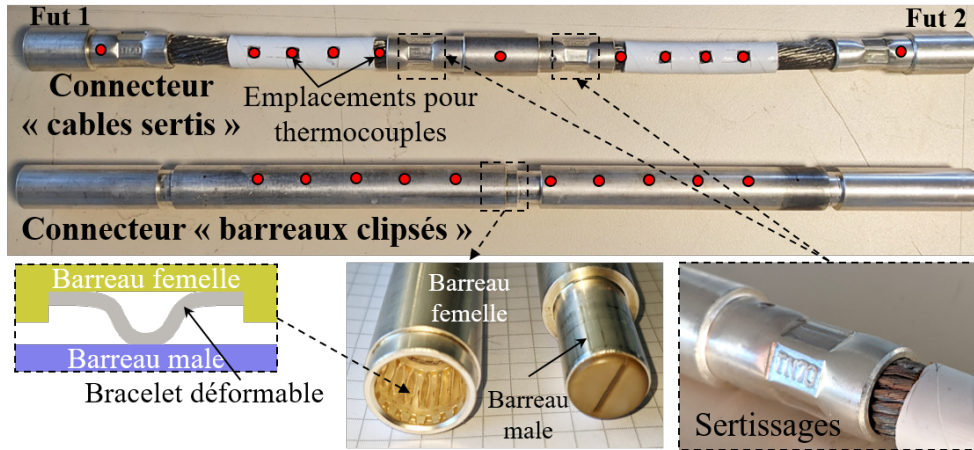


Figure 1 : Connecteurs à câbles sertis et à barreaux clipsables caractérisés dans le cadre de cette étude

Dans le cas des câbles sertis, des thermocouples type T gainés de diamètre 1mm sont insérés à l'intérieur du câble le long de celui-ci avec un espacement $\Delta x_{T_c}^{cable}$. Un perçage effectué au centre de la pièce sertie permet d'évaluer la température entre les deux sertissages. Pour le second connecteur, des perçages (régulièrement espacés de $\Delta x_{T_c}^{barreau}$) permettent similairement de mesurer le profil de température le long du connecteur. Il est alors possible d'évaluer le flux de chaleur longitudinal local le long de chacun des connecteurs en fonction des écarts de températures entre thermocouples successifs ΔT selon :

$$\Phi_{cable}(x) = -\lambda_{cable} S_{cable} \frac{\Delta T_{cable}}{\Delta x_{T_c}^{cable}}(x), \quad \Phi_{barreau}(x) = -\lambda_{Cu} S_{barreau} \frac{\Delta T_{barreau}}{\Delta x_{T_c}^{barreau}}(x) \quad (1)$$

La conductivité thermique du barreau est considérée égale à celle du cuivre pur λ_{Cu} . La conductivité thermique longitudinale du câble est considérée égale à celle du cuivre corrigée du taux de vide dans une section de câble $\alpha_{cable} = 0.625$, c'est à dire $\lambda_{cable} = (1 - \alpha_{cable}) \times \lambda_{Cu}$.

Par la suite, l'évaluation de ces flux de chaleurs à proximité immédiate des connecteurs, schématiquement représentée en Fig. 2, permet d'évaluer les résistances thermiques des connecteurs relatives à la moyenne des flux entrants et sortants du connecteur :

$$R_{th}^{serti} = \frac{\Delta T^{serti}}{\Phi^{serti}}, \quad R_{th}^{conn} = \frac{\Delta T^{conn}}{0.5 \times \Phi_1^{conn} + 0.5 \times \Phi_2^{conn}} \quad (2)$$

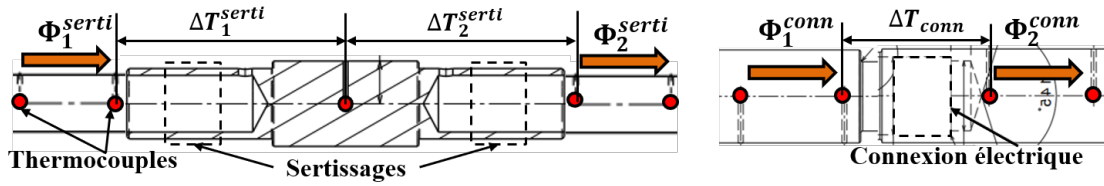


Figure 2 : Vue schématique de la méthode de mesure des résistances thermiques aux connecteurs, connecteurs à câbles sertis (gauche), à barreaux clipsables (droite)

2.2. Banc de caractérisation thermique de connecteurs

Étant donnés ces deux connecteurs, un banc de caractérisation des contacts thermiques associés a été conçu et est représenté schématiquement en Fig. 3 avec une photographie du banc de test assemblé dans le cas d'un connecteur à barreaux clipsés. En partie gauche de celui-ci, un bloc chaud usiné en cuivre dans lequel sont insérées des cartouches chauffantes permet d'appliquer un flux de chaleur à une des extrémités du connecteur. Un bloc froid de géométrie similaire permet d'extraire le flux de chaleur à l'autre extrémité du connecteur. Ce bloc froid est refroidi par une plaque froide dans laquelle un écoulement d'eau à 20°C est imposé par un bain thermostaté.

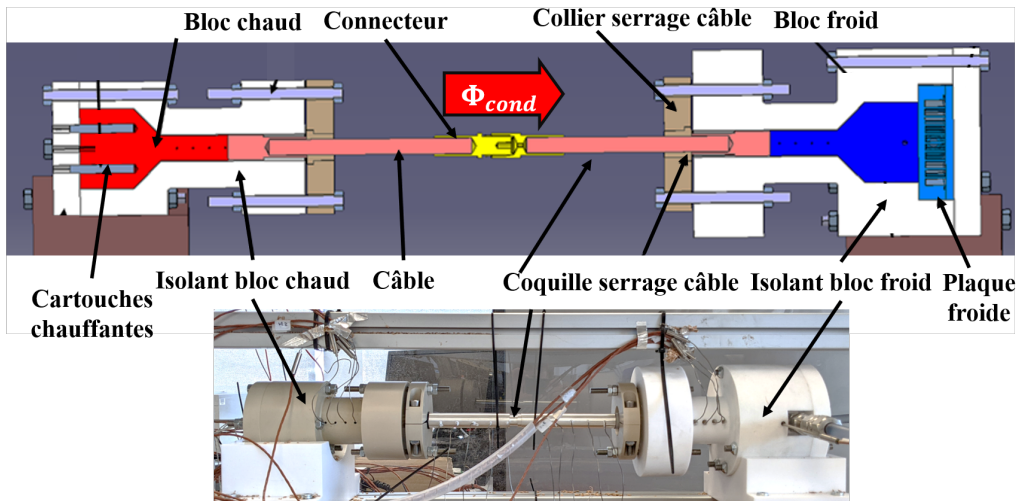


Figure 3 : Vue en coupe du banc utilisé pour la caractérisation thermique d'assemblages câbles/connecteurs

Sur chacun de ces blocs usinés, 4 emplacements pour thermocouples espacés de $\Delta x_{T_c}^{bloc}$ permettent d'évaluer les flux entrants Φ_{chaud} et sortants Φ_{froid} du connecteur selon :

$$\Phi_{chaud} = -\lambda_{Cu} S_{bloc} \frac{\Delta T_{bloc}^{chaud}}{3\Delta x_{T_c}^{bloc}}, \quad \Phi_{froid} = -\lambda_{Cu} S_{bloc} \frac{\Delta T_{bloc}^{froid}}{3\Delta x_{T_c}^{bloc}} \quad (3)$$

Dans ce cas, le gradient de température $\Delta T_{bloc}^{froid} / (3\Delta x_{T_c}^{bloc})$ est évalué comme étant la meilleure approximation linéaire du gradient mesuré par les 4 thermocouples placés le long de chacun des blocs chaud et froid. Les principales grandeurs thermophysiques et géométriques correspondant à ce dispositif expérimental sont détaillées avec leurs incertitudes de mesure associées en Table 1. A noter que la faible incertitude de mesure liée aux thermocouples a été permise par leur étalonnage préalable dans un bain d'huile thermostaté de l'ensemble des thermocouples et de la chaîne de mesure par rapport à une sonde PT100 elle-même étalonnée dans un laboratoire accrédité COFRAC. L'assemblage est attaché à une structure mécanique en profilés fermée par

des plaques de plexiglas qui est par la suite remplie de copeaux de liège afin de minimiser la déperdition du flux de chaleur traversant le câble vers le milieu ambiant.

Grandeur	Valeur	Incertitude
Température T	20 – 200	$\delta T = 0.2K$
Diamètre câble D_{cable}	–	$\delta D_{cable} = 0.2mm$
Diamètre barreau $D_{barreau}$	–	$\delta D_{barreau} = 0.1mm$
Diamètre barreau D_{bloc}	–	$\delta D_{bloc} = 0.1mm$
Distance thermocouples (câbles) $\Delta x_{T_c}^{cable}$	16 – 20 mm	$\delta x_{cable} = 1mm$
Distance thermocouples (barreau) $\Delta x_{T_c}^{barreau}$	21 mm	$\delta x_{barreau} = 0.2mm$
Distance thermocouples (bloc) $\Delta x_{T_c}^{bloc}$	36 mm	$\delta x_{bloc} = 0.2mm$
Conductivité du câble λ_{cable}	243.8 $W.m^{-1}.K^{-1}$	$\delta \lambda_{cable} = 0.1 \times \lambda_{cable}$

Tableau 1 : Principales grandeurs liées au dispositif expérimental et incertitudes associées

2.3. Protocole expérimental

Dans l'ensemble des résultats présentés par la suite, le protocole expérimental suivi est identique. Le banc d'essai, initialement à température ambiante, est mis en fonctionnement par l'allumage de la dissipation et la mise en circulation de l'écoulement de la plaque froide à $T_{eau} = 20^\circ C$. La variation des températures le long de l'assemblage est enregistrée en continu durant l'essai par une centrale d'acquisition dédiée (Rigol M300 avec bornier thermocouple à compensation de soudure froide). A la fin de l'essai, les données obtenues sont enregistrées puis traitées à l'aide d'un script Matlab. Un exemple de variation temporelle de température obtenue dans le cas d'un connecteur à câbles sertis est représenté en Fig. 4. Bien que le gradient de température le long de l'assemblage soit nettement observable, il apparaît que, malgré une durée de chauffe supérieure à 6 heures, le régime permanent n'est pas atteint. Néanmoins, la variation temporelle des résistances thermiques mesurées au niveau des sertissages, représentée en Fig. 5, montre une stabilisation bien plus rapide de la mesure de R_{th}^{serti} .

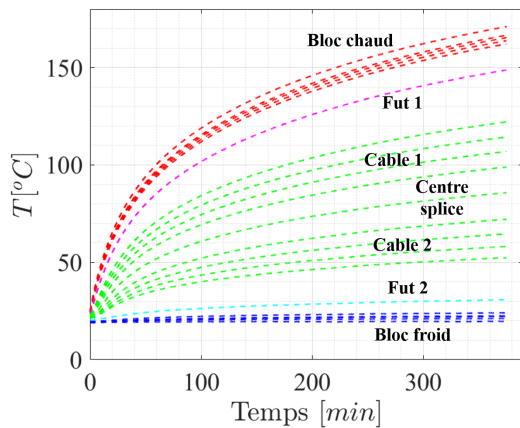


Figure 4 : Evolution des températures mesurées sur le connecteur à câbles sertis, dissipation à la source chaude $\Phi_{dissip} = 30W$

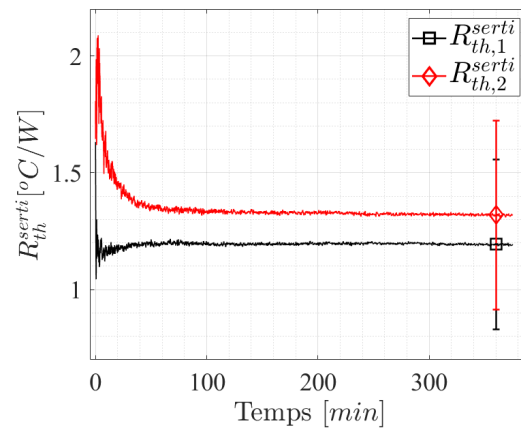


Figure 5 : Evolution des résistances thermiques mesurées sur le connecteur à câbles sertis, dissipation à la source chaude $\Phi_{dissip} = 30W$

Il apparaît donc que les effets thermiques transitoires (principalement liés ici à la lente montée en température de l'isolant autour de l'assemblage) ont un impact négligeable sur la mesure de résistance thermique. On notera que l'incertitude importante sur la mesure de R_{th}^{serti} est notamment induite par l'incertitude considérée sur la conductivité effective du câble $\delta \lambda_{cable}$.

3. Résultats expérimentaux

Dans cette section, les principaux résultats expérimentaux obtenus sur les deux configurations de connecteur considérées sont détaillés. Étant données les observations détaillées en section 2.3, l'ensemble des valeurs expérimentales présentées par la suite correspondent à des points de mesures associés à des températures non stabilisées mais pour lesquels un régime stationnaire des mesures de résistances thermiques est atteint.

3.1. Connecteur serti

Tout d'abord, la variation longitudinale du flux de chaleur traversant l'assemblage, obtenue 6 heures après la mise en marche du banc, est représentée en Fig. 6. Malgré l'isolation de l'assemblage, environ 1/3 du flux de chaleur imposé du côté chaud de l'assemblage apparaît être perdu vers le milieu ambiant durant la traversée du connecteur, la déperdition de flux de chaleur au niveau du connecteur semble toutefois très limitée. Par ailleurs, il est à noter que malgré les fortes incertitudes de mesures du flux traversant le câble, les valeurs de celui-ci mesurées le long du câble semblent tout à fait cohérentes avec les mesures Φ_{chaud} et Φ_{froid} des flux apporté et extrait des harnais. Enfin, la variation longitudinale de température le long de l'assemblage, représentée en Fig. 7, semble montrer que l'impact des deux sertissages sur le profil de température global de l'assemblage est très limité. Autrement dit, les résistances thermiques locales induites par les sertissages apparaissent assez faibles devant les résistances thermiques de conduction longitudinale liées aux câbles eux-mêmes. Par la suite, on considèrera

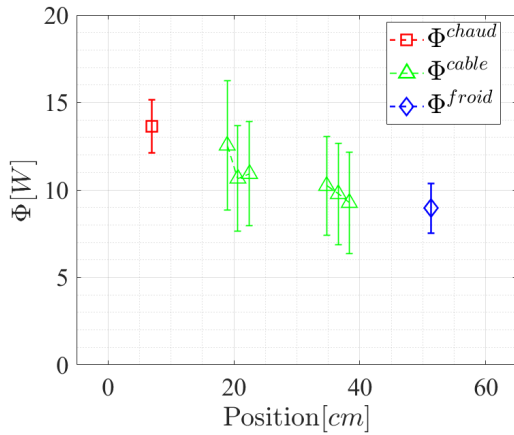


Figure 6 : Variation longitudinale des flux de chaleur mesurés sur le connecteur à câbles sertis

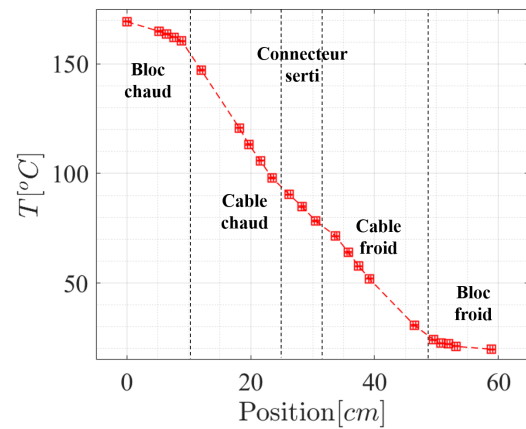


Figure 7 : Variation longitudinale des températures mesurées le long du connecteur à câbles sertis

une valeur moyenne de résistance thermique liée au sertissage correspondant à la moyenne des deux valeurs représentées en Fig. 5 :

$$R_{th}^{serti} = 1.26 \pm 0.38 \text{ K/W} \quad (4)$$

A noter que de nombreux essais réalisés dans cette configuration ainsi que sur un second assemblage connecteur/câble identique pour différentes valeurs de flux dissipés à la source chaude ainsi que des mesures en régime permanent (permises par l'absence d'isolation thermique) ont été réalisés. Les résultats obtenus ont montré une très bonne reproductibilité de la mesure de R_{th}^{serti} , les variations observées restant dans tous les cas inférieures à l'incertitude de mesure.

3.2. Connecteur à barreaux clipsés

De même que pour le connecteur à câbles sertis, la variation longitudinale du flux de chaleur traversant l'assemblage est représentée en Fig. 8. Le flux dissipé à la source chaude est fixé à $\Phi_{dissip} = 55W$. Ici encore, des pertes de l'ordre du tiers du flux imposé par le bloc chaud sont observées le long de l'assemblage mais le flux de chaleur reste approximativement constant autour du connecteur. Au contraire, le tracé de la variation longitudinale de température le long de l'assemblage, représentée en Fig. 9, montre une chute de température significative au niveau du connecteur, de l'ordre de $45^{\circ}C$. On considèrera par la suite une valeur de résistance

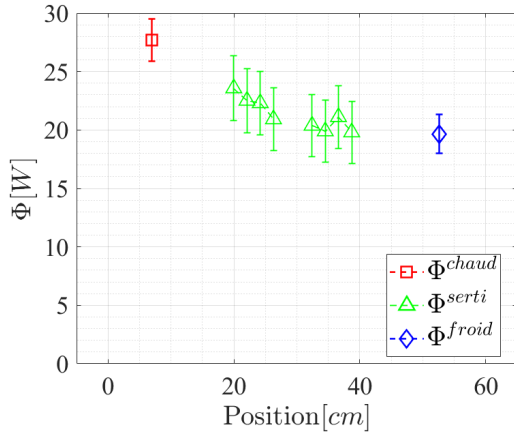


Figure 8 : Variation longitudinale des flux de chaleur mesurés sur le connecteur à barreaux clipsables

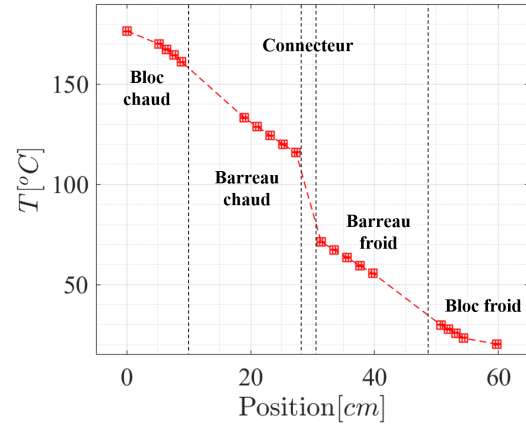


Figure 9 : Variation longitudinale des températures obtenues sur le connecteur à barreaux clipsables

thermique liée à ce saut de température à travers le connecteur égale à :

$$R_{th}^{conn} = 2.17 \pm 0.3 K/W \quad (5)$$

Ici aussi, de nombreux essais complémentaires pour différents flux de chaleur dissipés, avec et sans isolation, ont permis de montrer une bonne reproductibilité des résultats, les variations de résistance thermique mesurées d'un essai à l'autre ne dépassant pas 5%. Il est toutefois à noter que des essais de reproductibilité menés sur d'autres connecteurs à barreaux clipsables de même géométrie ont mis en évidence des résistances thermiques légèrement différentes, de l'ordre de $1.9K/W$ pour le deuxième connecteur et d'environ $2.4K/W$ pour le troisième connecteur. Le connecteur présenté ici correspond ainsi à une valeur médiane de ces trois harnais.

4. Identification des résistances thermiques locales

A ce stade, les valeurs de résistance thermiques mesurées incluent aussi bien les résistances thermiques liées aux sertissages et connexions mécaniques que celles induites par la conduction volumique entre les points de mesure de température. Dans cette section, l'objectif est alors d'identifier les résistances thermiques locales induites par ces connexions en comparant les résistances thermiques mesurées à celle prédites par un modèle thermique 3D de l'assemblage. Dans ce but, les modèles mis en place sont présentés dans un premier temps. Par la suite l'identification des résistances thermiques locales par comparaison à l'expérience sera détaillée.

4.1. Présentation des modèles

Dans chacune des deux configurations, les portions de géométrie 3D des assemblages directement à proximité des connecteurs mis en œuvre sur le banc expérimental sont importés dans le logiciel de simulation thermique 6SigmaET v15. Les modèles thermiques 3D ainsi considérés sont représentés en Fig.10.

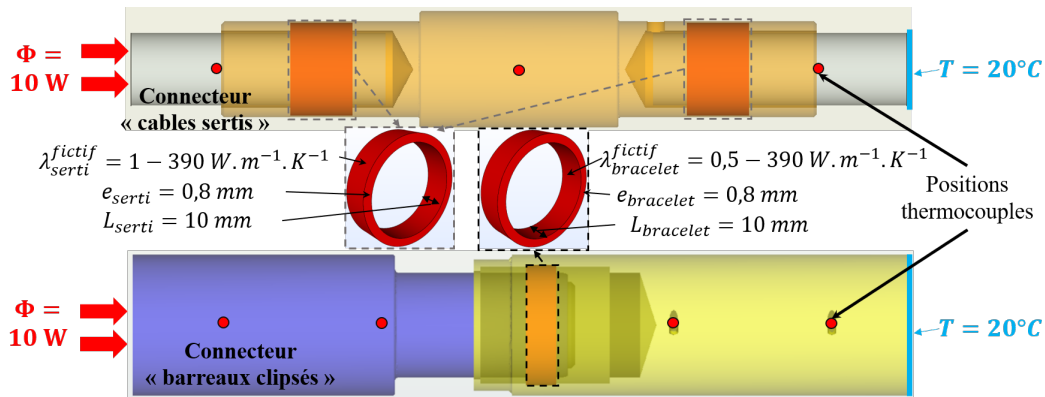


Figure 10 : Approche de modélisation 3D utilisée pour identifier les résistances thermiques locales de sertissage et de connecteur en fonction des résultats expérimentaux macroscopiques

Dans chaque cas, un flux de chaleur $\Phi = 10W$ est imposé de manière homogène sur le coté "chaud" de l'assemblage et une température constante $T = 20^{\circ}C$ est imposée à l'autre extrémité. Des capteurs numériques de température sont placés aux emplacements des thermocouples insérés dans le dispositif expérimental. Dans le cas des sertissages, une géométrie de connecteur non déformée par le sertissage est considérée. L'effet thermique du sertissage est alors pris en compte par l'ajout d'un anneau de conductivité λ_{serti}^{fictif} arbitraire assurant un contact thermique entre le câble et la pièce de connexion. Similairement, pour le connecteur clipsable, la géométrie complexe du bracelet est remplacée par un anneau de conductivité $\lambda_{bracelet}^{fictif}$ assurant le contact entre les deux pièces de cuivre.

4.2. Application aux résultats expérimentaux

Les modèles présentés dans la section précédente sont évalués pour différentes valeurs de conductivités thermiques de bracelet et les valeurs de résistance thermique numériques obtenues sont comparées aux valeurs expérimentales en Figs.11 et 12. Pour chacun des modèles considérés, l'indépendance de la solution au maillage du modèle a été assurée. Dans le cas du sertissage, la comparaison des valeurs numériques à la valeur mesurée fait clairement apparaître qu'il est nécessaire d'atteindre la zone d'insensibilité de la résistance thermique du connecteur à la conductivité thermique fictive du sertissage pour obtenir un bon accord modèle/mesure. Autrement dit, la comparaison au modèle permet de conclure que la résistance thermique de contact liée au sertissage est négligeable devant la résistance liée à la conduction volumique à travers le connecteur. Au contraire, dans le cas du connecteur clipsé, il est nécessaire de prendre en compte une résistance thermique non négligeable au niveau du bracelet pour prédire correctement la mesure expérimentale. Dans ce cas, une conductivité fictive $\lambda_{bracelet}^{fictif} \approx 1.2 W.m^{-1}.K^{-1}$ semble correspondre le mieux à la configuration expérimentale. On notera que pour une conductivité du bracelet égale à celle du cuivre (i.e. une résistance thermique induite par le bracelet négligeable), la résistance thermique prédite par le modèle est $R_{th}^{cond} = 0.8 K/W$. En soustrayant cette valeur à la valeur mesurée sur le connecteur dans la section précédente, il est alors

possible d'identifier la résistance thermique induite par le bracelet seul selon :

$$R_{th}^{bracelet} = R_{th}^{conn} - R_{th}^{cond} = 1.37 \pm 0.3 \text{ K/W} \quad (6)$$

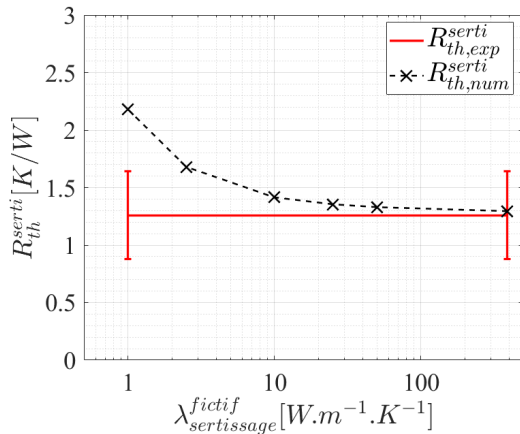


Figure 11 : Comparaison des résistances thermiques liées au sertissage prédites par le modèle aux valeurs expérimentales

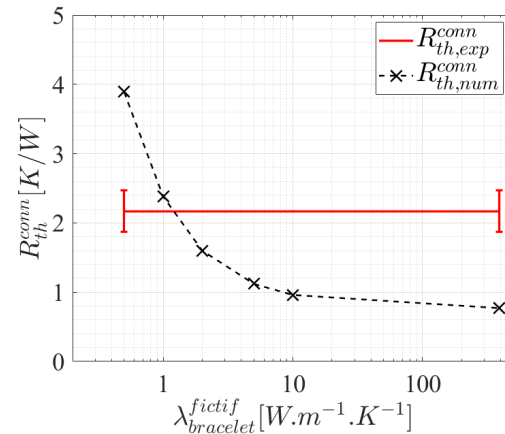


Figure 12 : Comparaison des résistances thermiques liées au connecteur démontable prédites par le modèle aux valeurs expérimentales

5. Conclusion

Dans cette étude, il a été possible d'évaluer expérimentalement les résistances thermiques locales liées à deux types de connecteurs de câbles électriques de fortes puissances. Dans le cas d'un sertissage hexagonal de câbles dans une pièce en cuivre, l'impact de ces sertissages sur le profil de température le long de l'assemblage est apparu négligeable. Au contraire, dans le cas de connecteurs démontables usinés dans des barreaux en cuivre, il a été montré que la connexion induisait un fort saut de température local. Ces conclusions ont pu être confirmées par comparaison à des modèles de conduction 3D dans ces assemblages, avec notamment la nécessité d'ajouter une résistance thermique locale significative au niveau de la connexion des barreaux pour retrouver les résultats expérimentaux.

Dans le futur, le banc développé dans le cadre de cette étude pourrait être facilement réutilisé pour caractériser d'autres types de connecteurs électriques. Cela permettrait de compléter cette étude pour l'instant très spécifique aux connecteurs choisis. A plus long terme, le dispositif expérimental pourrait également être légèrement modifié pour permettre des mesures simultanées des résistances électrique et thermique induites par un connecteur. Un tel banc d'essais permettrait ainsi d'observer un éventuel couplage entre ces deux phénomènes physiques.

Références

- [1] C.Farges, M.Chevrié, J. Sabatier, L.Pradere, F.Guillemard, Detection of Electric Contact Resistance Variations in Automotive Connectors, *IEEE transactions on industrial electronics*, 64-12 (2017) 9469-9476.
- [2] F.Yang, P.Cheng, H.Luo, Y.Yang, H.Liu, K.Kang, 3-D thermal analysis and contact resistance evaluation of power cable joint, *Applied thermal engineering*, 93 (2016) 1183-1192
- [3] F. P. Loos, *Joule Heating in Connecting Structures of Automotive Electric Devices – Modelling, Simulation and Optimization*, thèse de doctorat, Universität der Bundeswehr München (2014)
- [4] F. Mahiddini, *Modélisation couplée Compatibilité Électromagnétique - Thermique d'architectures de câblages électriques embarquées*, thèse de doctorat, Université de Toulouse (2018)
- [5] C.Holyk, H.-D Liess, S.Grondele, H.Kanbach, F.Loos, Simulation and measurement of the steady-state temperature in multi-core cables, *Electric Power Systems Research*, 116 (2014) 54-66