

Étude comparative de l'échauffement dans un toron de 12 fils pour 3 dispositions données

Comparative study of heat-up in a 12-wire bundle for 3 given layouts.

Julien PETITGIRARD^{1,2}, Philippe BAUCOUR^{2*}, Didier CHAMAGNE², Eric FOULLIEN¹, Jean-Christophe DELMARE¹, Dominique MOSSER¹

¹FEMTO-ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comté, CNRS
Département Energie, Parc technologique, 2 avenue Jean Moulin, 90000 Belfort, France.

² Groupe PSA, Centre Technique de Vélizy
Route de Gisy - 78140 Vélizy-Villacoublay

*(auteur correspondant : philippe.baucour@univ-fcomte.fr)

Résumé - Les faisceaux électriques utilisés dans les moyens de transport doivent répondre à de plus en plus d'exigences et de contraintes. En vue de dimensionner les faisceaux de manière optimale, il est important de comprendre le comportement thermique interne du toron. Des essais expérimentaux sont présentés afin d'apprécier le comportement thermique d'un toron de 12 fils dont 6 sont alimentés. Les torons ont été peignés afin d'obtenir 3 dispositions maîtrisées qui ont été testées. Le but de cette étude est de montrer l'impact de la position des fils alimentés dans un toron. Cette étude expérimentale est complétée par une comparaison avec un modèle thermique utilisant une méthode nodale en coupe 2D.

Mots-clés : faisceau électrique ; toron de fils ; échauffement ; expérimental ; dispositions aléatoires.

Abstract - The electrical harnesses in automotive vehicles must meet more and more requirements and constraints. To optimize the design of wires in a bundle, it is essential to understand the internal thermal effects in bundles. Experimental tests are presented to assess the thermal behavior of a 12-wires bundle where 6 of which are powered. 3 controlled layouts were tested. The purpose of this study is to show the position impact of powered wires in a bundle. This experimental study is completed by a comparison with a thermal model with a nodal method in 2D slices.

Keywords: Electrical harness; Wires bundle; Heat-up; Experimental; Random layouts.

Nomenclature

D	diamètre toron, m	T	température, K
h	coefficient d'échange, $W.m^{-2}.K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
Nu	nombre de Nusselt, –	α	coefficient de température, K^{-1}
R	résistance électrique, Ω	λ	conductivité thermique de l'air, $W.m^{-1}.K^{-1}$
Ra	nombre de Rayleigh, –		

1. Introduction

Les faisceaux électriques dans les moyens de transport doivent répondre à de plus en plus d'exigences et de contraintes : augmentation du nombre de fils liée à la complexité croissante des systèmes embarqués [1, 2], à la diversité importante des configurations proposées aux clients [3], à la variabilité de l'environnement thermique et à la réduction de l'espace disponible pour le cheminement.

En vue de dimensionner les faisceaux de manière optimale, en termes de qualité, de coût et de sûreté de fonctionnement, nous développons actuellement un modèle de simulation [4] permettant de calculer les échauffements induits par plusieurs fils adjacents en contact (c'est-à-dire placés côte à côte) dans une disposition aléatoire avec plusieurs profils de courant possibles. Au sein de chaque toron, la présence de fils dits de "communication" ou de "signal" très peu alimentés peut servir de dissipateur thermique tandis que la présence de fils dits de "puissance" augmente l'échauffement thermique. Le processus de fabrication des faisceaux, principalement manuel [5], induit une variabilité importante dans la position des fils au sein des torons.

En vue de valider ce modèle, il est indispensable de confronter ses résultats à des données expérimentales. A notre connaissance, il existe très peu de résultats avec ce niveau de connaissance du champ de température interne au toron. Dans ses travaux de thèse, Mahiddini [6] donne des mesures thermiques internes et externes à un toron en précisant seulement que les thermocouples sont placés entre les fils. Pour avoir des données plus précises des champs de températures à l'intérieur du toron, nous avons décidé de positionner plusieurs thermocouples sur une même section au sein de 3 torons. Ceux-ci comporteront les mêmes types et nombre de fils. Chaque fil identifié par section a le même profil de courant. La seule différence entre les 3 essais est la disposition des fils. Le toron est disposé dans une enceinte thermique de $1,2\text{ m}^3$ sans habillage.

A la fin de cette étude, nous présentons une comparaison de ces résultats avec une évolution du modèle nodal décrit dans nos précédents travaux [4]. Cette comparaison nous permet de vérifier au cours du développement les hypothèses choisies pour le modèle. Elle met en avant les points à faire évoluer afin d'avoir un modèle plus représentatif.

2. Description des essais expérimentaux

2.1. Banc expérimental

Le banc expérimental permet la mesure de l'échauffement d'un toron dans une ambiance constante et dans une convection naturelle. Pour ce faire, nous avons utilisé une chambre climatique BIA de $1,2\text{ m}^3$. Le toron a été suspendu à une grille à mi-hauteur (fig. 1). Pour imiter les pires conditions de températures rencontrées sur véhicule, l'ambiance est définie à $85\text{ }^\circ\text{C}$ dans une atmosphère sèche. L'enceinte thermique utilisée ne permet qu'une régulation de la température en convection forcée, c'est pourquoi les essais sont réalisés dans une enceinte éteinte. Lorsque l'enceinte est maintenue à la consigne en convection forcée pendant 5 h, l'ambiance chute rapidement après son arrêt : $20\text{ }^\circ\text{C h}^{-1}$. L'énergie dissipée par le toron lors de son échauffement pourrait combler en partie cette chute de température. Cependant pour réduire significativement la perte de température ambiante nous avons ajouté un bloc métallique qui permet d'augmenter l'inertie du système et de réduire la vitesse de chute à $2,4\text{ }^\circ\text{C h}^{-1}$.

Dans le but de négliger les flux de chaleur axiaux dans les torons, ceux-ci ont été peignés pour forcer une disposition constante sur toute leur longueur. Les dispositions issues d'un moteur physique sont construites aléatoirement [4]. Les peignes adaptés à chaque disposition ont été imprimés en 3D. Le toron est de grande longueur (3m) pour négliger les échauffements de contact créés aux extrémités du toron et ne garder que les effets thermiques radiaux. La disposition des torons a été déterminée suivant 3 cas de génération aléatoire contrôlée [4] : dans un premier cas les fils alimentés sont concentrés vers le centre, dans un deuxième cas les fils alimentés sont sur la partie extérieure du toron et, finalement, les fils de faibles sections alimentés ou non sont concentrés au centre (cf. fig. 3.1,2 et 3).

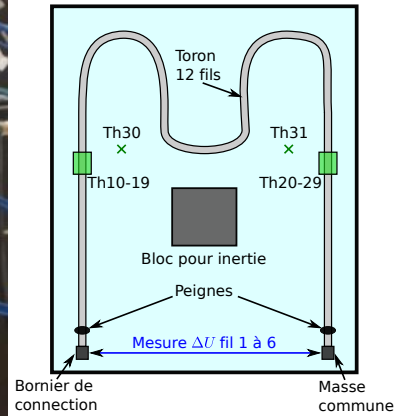


Figure 1: Photo qui met en évidence une disposition type de toron en chambre climatique

Figure 2: Schéma d'un toron dans la chambre climatique

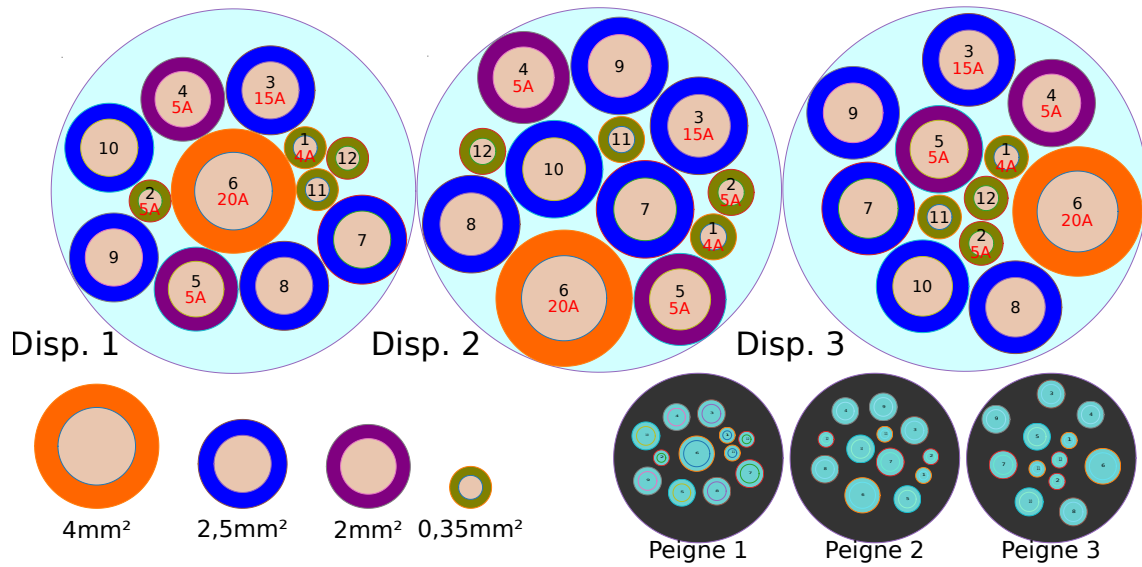


Figure 3: Dispositions des 3 géométries voulues avec les courants et sections - Géométries permettant la création de peignes

Un panneau de contrôle permet à la fois l'alimentation, la répartition du courant et les mesures électriques de courant et tension de chaque fil. Pour éviter au maximum les bruits liés à l'alimentation, il est décidé d'utiliser des batteries gel 12V 135Ah comme source de tension et des résistances passives comme charges. Lors des phases transitoires, une source de tension électronique (Agilent 6682A) en parallèle de la batterie évite sa décharge. La désactivation de cette source et l'activation des différents charges dans les fils sont pilotées depuis LabVIEW via la carte de sortie de tension PXI-6513 et des relais.

2.2. Instrumentation et protocole de mesures

Dans le but d'avoir le plus d'informations possibles sur les températures au sein d'un toron, nous avons mis en œuvre 2 méthodes pour remonter à la température. La première par une mesure directe à l'aide de thermocouples type K. Les mesures par thermocouple concernent l'ambiance et la température des isolants de 10 fils internes au toron. Nous utilisons des fils de thermocouples de faible section 130 μm de diamètre afin de ne pas être intrusif. L'impact de la présence des thermocouples dans le système n'a pas été dimensionné. Cependant cet

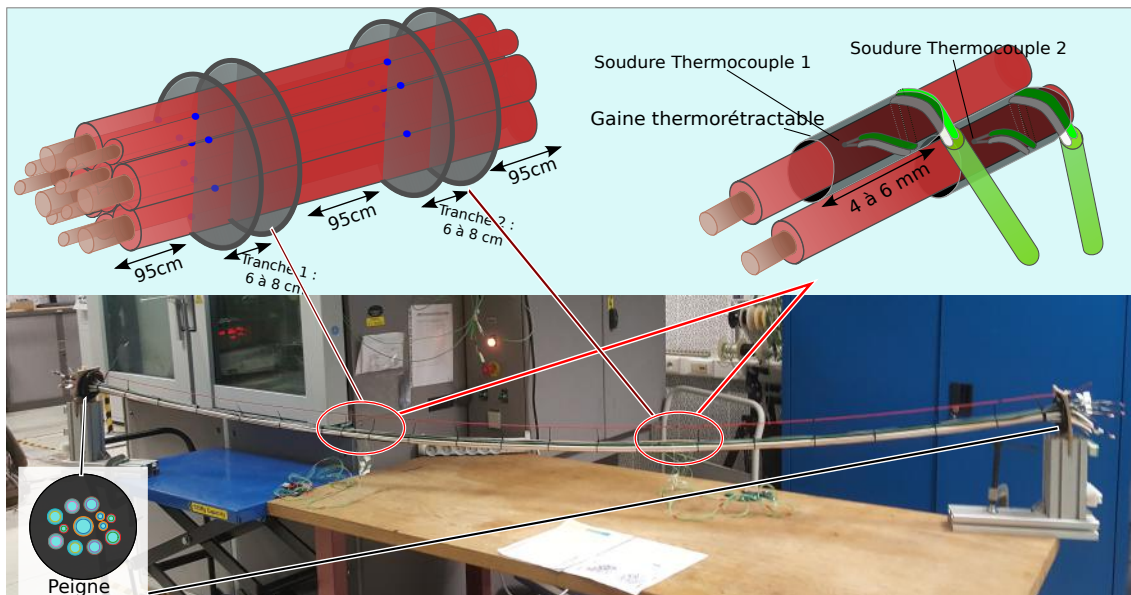


Figure 4: Banc de fabrication d'un toron

impact sur la thermique du banc est jugé très faible et est compris dans l'incertitude de mesure. L'implantation des thermocouples sur les isolants est réalisée lors du peignage des torons (cf. fig. 4). Ils sont fixés à l'aide de gaines thermorétractables. La température des isolants des 10 premiers fils est mesurée sur deux tranches radiales différentes comme décrit sur le schéma fig. 4. Ceci doit permettre de valider un champ de températures radial constant tout au long du toron. Cette façon d'intégrer les thermocouples dans le toron empêche un démontage simple du côté de la soudure chaude. C'est pourquoi, ces thermocouples sont fabriqués au laboratoire, d'une longueur suffisante (2 m à 2,5 m) pour atteindre un bornier de connections à l'extérieur de l'enceinte thermique. Ceci permet l'échange simplifié des torons. Tous les thermocouples ont été étalonnés et corrigés par comparaison à une sonde PT100 dans un bain thermostaté et agité de 0 à 100 °C et dans un four d'étalonnage de 110 à 140 °C suivant les indications préconisées par Charki et al. [7]. Les incertitudes élargies (facteur d'élargissement à $k=2$) des thermocouples sont estimées à 0,6 °C de par leur processus d'étalonnage [7]. Elles sont étendues arbitrairement à 1 °C pour intégrer l'influence des thermocouples dans le système.

Le deuxième type de mesures est indirect, il permet de connaître la température de l'âme des 6 premiers fils qui lie la variation de la résistance des fils cibles à la température [6]. Le principe est de déterminer la résistance des fils à une température de référence ainsi que le coefficient de variation avec la température (α) (Eq. 1).

$$R = R_{20^{\circ}\text{C}} \times (1 + \alpha \cdot (T - T_{20^{\circ}\text{C}})) \quad (1)$$

Avec la lecture de la résistance, la détermination de la température est aisée. Cependant, les fils de cuivre ont une très faible impédance (quelques $\text{m}\Omega$) et le coefficient de température α est aussi très faible. Cela implique une variation des résistances faible en rapport à la température. Pour que la détermination de la température soit fiable et précise il faut alors des grandes longueurs de fil, de faible section ainsi que des instruments de mesure de précision. Pour ce faire, la mesure «4 fils» [6] permet une lecture plus précise de la résistance. La mesure du courant est établie à travers des shunts spécifiques à chaque fil et adaptés au courant nominal voulu. La tension résultante de ces shunts est acquise par un multimètre intégré dans une carte PXI de NATIONAL INSTRUMENTS : PXI-4065. La tension aux bornes de chaque fil est mesurée par un sourcemètre KEITHLEY 2450 qui offre une grande précision de lecture. Ne disposant que de

deux appareils de précision, les mesures sont faites successivement dans chaque fil à l'aide de relais (exemple du montage électrique pour 3 fils - cf. fig. 6). La séquence est de 15 mesures de résistance de 11 secondes par fil. Cette méthode permet directement de récupérer la température de l'âme du fil. Cependant, cette température représente une température moyenne tout au long du fil contrairement à la mesure de températures par thermocouple qui est très localisée. Des étalonnages de chaque type de fil permettent de déterminer la constante α (cf. tableau 1). Ces résultats concordent avec la valeurs de $3,93 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ indiquée dans la norme CEI-60287 [8].

Les incertitudes calculées pour les températures d'âmes sont issues de tous les étalonnages préalables pour la résistance des shunts, la résistance des fils à 20°C et le coefficient α . A ceci sont ajoutées les incertitudes des mesures de tension des multimètres provenant des spécifications des fabricants dans la situation d'utilisation lors de l'essai. La propagation mathématique de ces incertitudes est effectuée suivant la méthode de calcul classique des différentielles totales exactes.

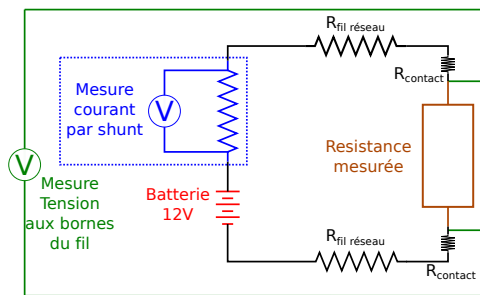


Figure 5: Circuit de mesure d'une résistance en 4 points.

Section	Rép.1	Rép.2	Rép.3	Moy.
mm ²	10^{-3} K^{-1}			
0,35	3,89	3,90	3,84	$3,88 \pm 0,04$
2,5	3,92	3,93	3,92	$3,92 \pm 0,06$
2,0	3,94	3,86	3,90	$3,90 \pm 0,05$
4,0	3,91	3,91	3,86	$3,89 \pm 0,09$

Tableau 1: Détermination expérimentale de la constante α par section.

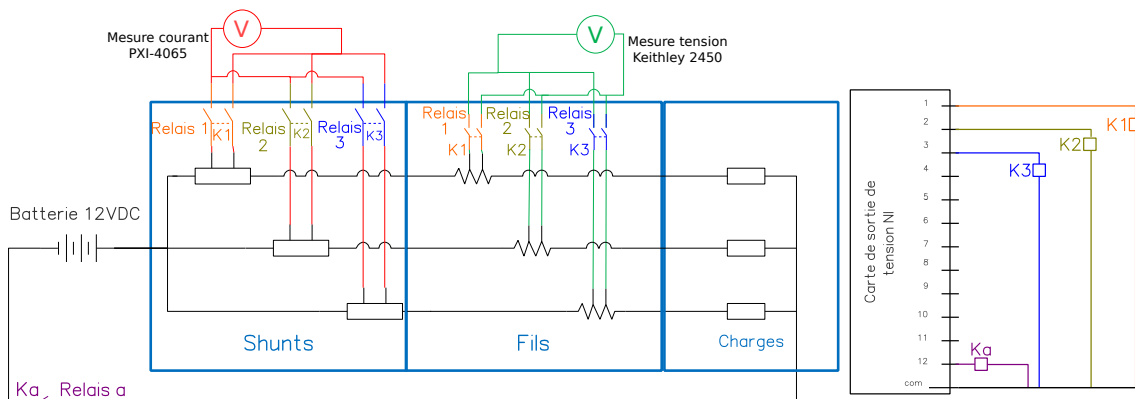


Figure 6: Schéma électrique de la mesure de résistance à l'aide de 2 voltmètres pour 3 fils.

3. Résultats et exploitation

Les mesures ont été effectuées après avoir atteint un régime stabilisé, soit environ après 25 minutes d'essai. Les mesures directes ont été effectuées par lecture parallèle de thermocouples sur les isolants des 10 premiers fils (pendant 90 secondes) sur les 2 tranches notées Iso 1 et 2 sur le tableau 2. La mesure de la résistance des 6 fils alimentés s'effectue séquentiellement par période de 11 secondes par fil et avec une latence de 4 secondes entre chaque fil. Ces mesures ont permis de remonter à la température de l'âme (cf Eq. 1).

Les résultats présentés dans le tableau 2 montrent que les fils ont une température comprise entre $90,5$ et $101,3^\circ\text{C}$. Au degré près, ces extrema sont les mêmes dans les 3 cas. Cependant, les points de température les plus élevés et les plus faibles sont localisés sur différents fils. Par

exemple sur la géométrie 1 le fil le plus chaud (101,3 °C) est le fil 6 tandis que sur la géométrie 2 c'est le fil 2 (100,3 °C) et pour la dernière géométrie c'est le fil 1 (100,4 °C). Ces différences sont visibles sur la figure 7B.

	Geom 1			Geom 2			Geom 3		
	Température [° C]			Température [° C]			Température [° C]		
	<i>Iso 1</i>	<i>Iso 2</i>	<i>Ame</i>	<i>Iso 1</i>	<i>Iso 2</i>	<i>Ame</i>	<i>Iso 1</i>	<i>Iso 2</i>	<i>Ame</i>
Fil 1	97,7	97,8	97,2±7,3	98,4	96,5	98,2±7,4	99,3	100,0	100,4±7,5
Fil 2	97,0	98,4	98,7±7,7	100,0	99,4	100,3±7,7	98,5	99,5	98,6±7,7
Fil 3	96,6	93,4	98,4±12,1	x	96,4	96,9±12,0	98,0	99,1	98,5±12,1
Fil 4	96,1	95,7	95,6±8,6	91,1	92,2	92,8±8,5	97,2	90,5	95,3±8,5
Fil 5	92,6	93,8	93,5±8,5	94,9	95,4	95,4±8,6	97,2	96,9	97,8±8,6
Fil 6	97,6	97,1	101,3±15,1	95,0	96,5	97,3±14,9	99,1	86,0	98,0±15,0
Fil 7	92,9	94,3	x	95,4	97,1	x	91,5	95,2	x
Fil 8	91,8	94,1	x	90,6	92,0	x	95,8	x	x
Fil 9	95,0	93,0	x	91,3	92,8	x	96,7	96,3	x
Fil 10	94,3	98,3	x	91,6	94,0	x	92,7	x	x
Fil 11	Non instrumenté			Non instrumenté			Non instrumenté		
Fil 12	Non instrumenté			Non instrumenté			Non instrumenté		
Amb 1	85,4			85,8			85,3		
Amb 2	85,3			85,8			85,2		

Tableau 2: Mesures expérimentales de températures sur les 3 géométries

Ces informations sont bien-entendu à prendre avec précaution car certaines températures sont manquantes et des incertitudes de mesures existent. En effet nous ne connaissons pas toutes les températures d'âme (6 sur 12 sont connues) et d'isolant (10 sur 12 sont connues). Cependant cela est peu préjudiciable car les fils non mesurés ne sont pas alimentés. Nous pourrions certainement estimer que la température dans les fils 11 et 12 de la géométrie 3 seraient parmi les plus chauds. Les incertitudes liées à la température d'âme sont élevées (entre 7 et 12 °C selon les sections de fils et l'intensité du courant); ceci est dû au fait de la précision demandée pour la mesure des résistances. L'incertitude de position des thermocouples quant à elle pose certains problèmes pour l'interprétation des résultats. En effet, la position angulaire du thermocouple sur un fil cible ne peut être imposée, car malgré la gaine thermorétractable qui serre le thermocouple, celui-ci peut se déplacer lors de la manipulation du toron. C'est pourquoi les différences de température entre les colonnes Iso 1 et Iso 2 du même fil peuvent être importantes. Elles ne relèvent pas d'un problème de justesse ou fidélité de la mesure mais ne correspondent à pas la même partie de l'isolant du fil.

Les 3 contours de température sur la figure 7B sont donc générés en imposant la température d'âme mesurée des 6 premiers fils sur toutes leurs surfaces représentatives. Pour les âmes des fils 7 à 10, la température imposée est celle de l'isolant la plus élevée. Pour chaque fil, la moyenne des deux températures de l'isolant a été imposée sur tout la partie extérieure des fils. Ceci ne représente donc pas le phénomène thermique réel mais permet de quantifier en partie la température avoisinante des fils.

4. Comparaison à un modèle nodal en développement

L'objectif principal de ces essais est de corréliser les résultats obtenus par mesure de température à ceux obtenus par un modèle de calcul actuellement en cours de développement. Ce modèle

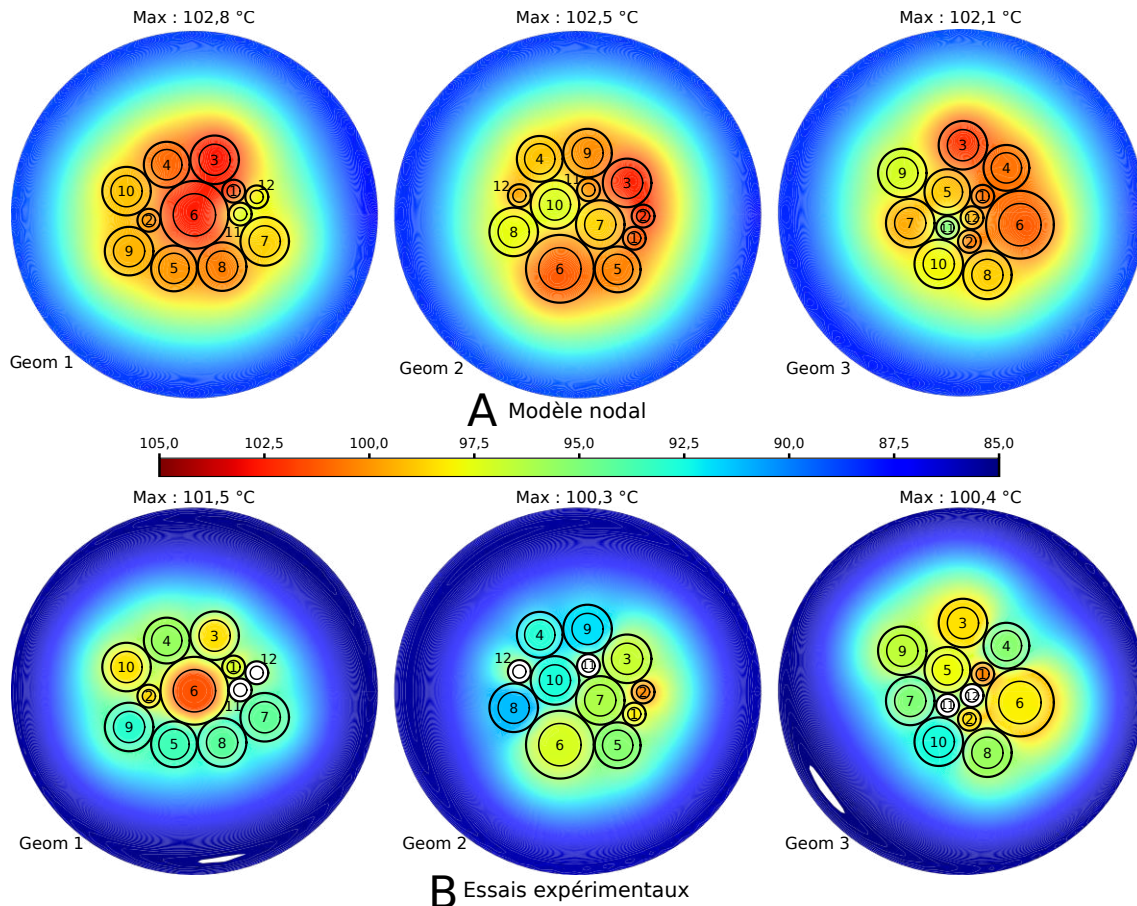


Figure 7: Contour représentant les résultats des 3 essais expérimentaux (B) et les résultats obtenus par un modèle nodal (A).

basé sur une résolution nodale permet une résolution très rapide de multiple cas de figure.

Pour cette comparaison, le réseau nodal est créé à l'aide du modèle réduit [9]. Une convection libre est estimée et ajoutée par le biais des conductances thermiques convectives comme décrit par Saulnier [10]. La corrélation utilisée est citée par Incropera [11] pour un cylindre horizontal :

$$Nu = \frac{h \times D}{\lambda} = 0,850 \times Ra^{0,188} \text{ avec } 400 < Ra < 500 \quad (2)$$

L'échange convectif obtenu pour un cylindre parfait est ensuite corrigé au niveau des surfaces de mouillabilité du toron. Les premiers résultats sont présentés pour 3 contours sur la figure 7A. Les échanges par rayonnement sont négligés pour cette comparaison dans le modèle nodal actuel.

La comparaison avec les contours obtenue par les essais expérimentaux présente globalement un décalage de température de 1 à 2 °C. Cela peut s'expliquer par l'hypothèse prise dans le modèle : l'air contenu dans le toron est considéré conductif alors que dans les essais, nous avons remarqué les espacements lors du cintrage du faisceau qui permettrait une légère convection interne. La répartition de température n'est pas non plus tout à fait respectée. Cependant, les zones chaudes et froides sont identifiées aux mêmes endroits : le fil 6 de la géométrie 1 ou encore le fil 2 de la géométrie 2.

5. Conclusion

Cette étude montre que la température d'un fil dans un toron ne dépend pas que de son auto-échauffement mais aussi de son environnement, et plus précisément de la présence ou non d'un fil voisin qui s'échauffe. Sur un toron de 5 fils de petite taille, l'influence est déjà visible. Il est prévu de visualiser des résultats pour un toron avec plus de fils. Cette étude expérimentale confirme l'utilité de la prise en compte du phénomène d'échauffement en toron et de notre travail relatif au développement d'un modèle thermique nodal. La comparaison présentée ici est prometteuse et nous donne les informations nécessaires à l'amélioration de ce modèle.

Références

- [1] P. Parsania et K. Saradava, Drive-by-wire systems in automobiles, in *Journal of systematic computing :VVP Engineering*, vol. 6, déc. 2012.
- [2] G. Leen et D. Heffernan, Expanding automotive electronic systems, *Computer*, vol. 35, no. 1, p. 88–93, 2002.
- [3] B. Agard, *Contribution to a product design methodology in a context of wide diversity*. Theses, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, juil. 2002.
- [4] J. Petitgirard, P. Baucour, D. Chamagne et E. Fouillien, Étude 2D de l'échauffement d'un faisceau électrique pour une multitude de dispositions aléatoires de fils, in *27ème Congrès Français de Thermique (2019)*, (Nantes), p. 5–12, juil. 2019.
- [5] E. Aguirre et B. Raucourt, Economic comparison of wire harness assembly systems, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 13, no. 4, p. 276 – 288, 1994.
- [6] F. Mahiddini, *Modélisation couplée Compatibilité Électromagnétique - Thermique d'architectures de câblages électriques embarquées*. Thèse doctorat, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, 2018. Thèse de doctorat dirigée par Millan, Pierre et Ridet, Michael Physique et Énergétique et transferts Toulouse, ISAE 2018.
- [7] A. Charki, D. Louvel, E. Renaot, A. Michel et T. Tiplica, *Incertitudes de mesure - Application concrètes pour les étalonnages - Tome1*, chap. Étalonnage par comparaison de capteurs de température entre -80°C et 1600°C, p. 1–32. PROFIL, EDP Sciences, 2012.
- [8] Norme IEC60287-1-1, Electric cables - calculation of the current rating - part 1-1 :current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses - general, 2006.
- [9] J. Petitgirard, P. Baucour, D. Chamagne et E. Fouillien, Multi-source thermal model for electrical harness design, vol. ASME 2019 Heat Transfer Summer Conference in *Summer Heat Transfer Conference*, 07 2019.
- [10] J. Saulnier et A. Alexandre, La modélisation thermique par la méthode nodale, *Revue Générale de Thermique*, no. 280, p. 363–371, 1985.
- [11] F. Incropera, T. Bergman, D. DeWitt et A. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, chap. 9 - Free Convection, p. 613–616. Wiley, 2013.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude au groupe PSA, à l'École Universitaire de Recherche EIPHI (contrat "ANR-17-EURE-0002") et à l'Association Nationale de Recherche et de Technologie (convention CIFRE "2017/1091") pour leur soutien dans le déroulement de ces travaux.