

Implémentation de résistances de contact en 2-D dans un circuit équivalent. Thermique d'une encoche statorique d'un moteur électrique

Philippe NGUYEN¹, Philippe BAUCOUR¹, Frédéric DUBAS¹,
Philippe DESEVAUX¹, Christophe CORNELOUP², Rémi FALCAND²

¹Département ENERGIE, FEMTO-ST, CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté, 90000 Belfort, France

²Thermodyn Baker Hughes, 480 allée Gustave Eiffel - 71200 Le Creusot

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

Résumé - Cet article présente l'intégration de résistances de contact en 2-D (r, θ) dans un circuit équivalent d'une encoche statorique de moteur électrique. Ces résistances sont utilisées pour simuler un élément de faible épaisseur ce qui permet de réduire le maillage et donc le temps de calcul. Cette approche est appliquée ici à la simulation d'une fine couche isolante autour de la bobine. Les résultats obtenus via l'analogie des résistances de contact sont comparés à ceux issus d'une modélisation en volume fini prenant en compte cette couche isolante.

Mots-clés : Moteur électrique, simulation thermique, circuits équivalents, résistances de contact

Nomenclature

Symboles

θ angle [*rad*]

e épaisseur fictive de contact [*m*]

k conductivité thermique [$W.m^{-1}.K^{-1}$]

L longueur de la pièce [*m*]

R résistance thermique de contact [$K.W^{-1}$]

r rayon [*m*]

Indices et exposants

θ tangentiel

b bas

d droite

g gauche

h haut

r radial

1 Introduction

Les machines électriques jouent un rôle crucial dans les industries modernes, allant du transport à la production d'énergie. Le fonctionnement efficace et fiable de ces machines dépend notamment de la gestion thermique. La modélisation thermique est un aspect essentiel de la conception des machines électriques. Elle aide à comprendre comment la chaleur est générée et dissipée dans la machine. Une modélisation efficace permet d'identifier les points chauds potentiels au sein de la machine, qui, s'ils ne sont pas traités, peuvent entraîner une réduction des performances et une défaillance prématurée. Dans un souci de conception, ces modèles sont utilisés pour sélectionner des matériaux, dimensionner les systèmes de refroidissement et l'isolation thermique, prolongeant ainsi la durée de vie opérationnelle de la machine étudiée. La résistance thermique de contact (RTC) est un phénomène qui se produit à l'interface entre deux matériaux en contact quand

il y a un gradient de température à travers celle-ci [1]. Il représente la difficulté pour le flux à traverser la frontière des matériaux, empêchant le transfert efficace de l'énergie thermique d'un matériau à l'autre. La principale cause de RTC est la présence d'espaces microscopiques, d'aspérités et d'irrégularités à l'interface des matériaux [2]. Ces imperfections créent des goulots d'étranglement thermiques, empêchant le transfert de la chaleur. La résistance peut être influencée par des facteurs tels que la rugosité de la surface, les propriétés du matériau et la nature du contact (par exemple, les matériaux métalliques, composites ou isolants) [3]. La compréhension et la gestion de ce phénomène est cruciale pour optimiser les performances et la fiabilité des appareils et des systèmes qui reposent sur un transfert de chaleur efficace. L'étude présentée dans cet article décrit un modèle de circuit équivalent thermique 2-D en coordonnées polaires (r, θ) d'une encoche statorique de moteur électrique. L'apport de ce modèle est l'intégration des résistances de contact afin de remplacer un élément réel très fin tel qu'une fine couche d'isolant. L'objectif est d'appliquer ces résistances dans les 2 axes (r, θ) . Les résultats obtenus en fonction du maillage de ce modèle sont comparés à ceux d'un modèle volume fini (VF) réalisé sous Ansys Fluent.

2 Circuit équivalent

2.1 Présentation du circuit équivalent

La géométrie étudiée se concentre sur la partie statorique du moteur électrique notamment au niveau des encoches où sont positionnés les enroulements du bobinage permettant la génération d'un champ magnétique tournant. Elle est découpée en plusieurs régions dont l'ordre est défini par rapport à leurs positions. La numérotation s'échelonne via l'axe r (du haut vers le bas). Pour les régions se situant à un même rayon, la numérotation s'effectue en suivant le sens trigonométrique comme le montre la figure 1.

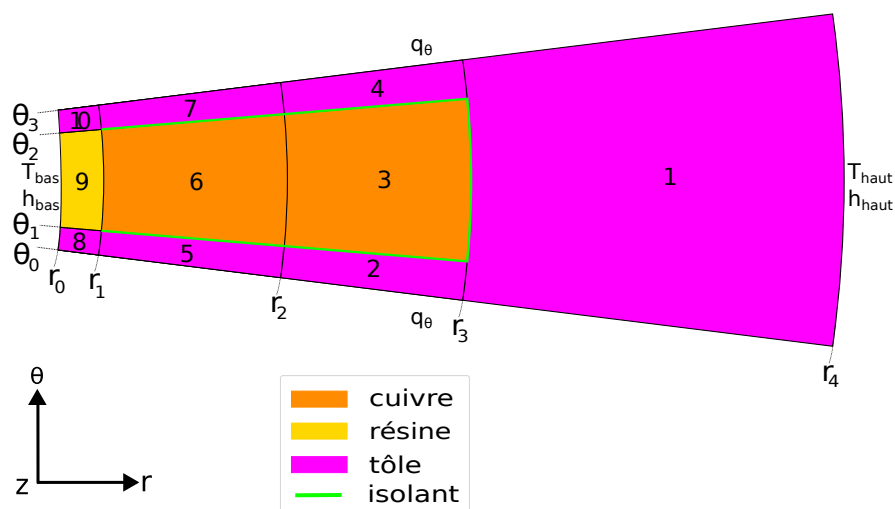


Figure 1: Géométrie de l'encoche statorique.

Chaque région est définie par quatre entrées correspondant à ses frontières géométriques (deux valeurs de r et deux valeurs de θ) et représente un unique matériau auquel peut être associé une source de chaleur. Chaque région est maillée automatiquement via la plus petite région. En effet le maillage des autres régions sera proportionnel à la géométrie de cette dernière.

Il est possible de paramétrer le nombre de nœuds pour chaque axe. Cependant il ne peut pas être inférieur à trois, une région contenant ainsi au minimum neuf nœuds. Ces nœuds sont associés à des volumes de contrôle.

Enfin les conditions aux limites imposées sur les frontières de la géométrie globale peuvent être de trois types:

- Température imposée
- Convection imposée avec un coefficient d'échange h et une température ambiante
- Densité de flux

Il est important d'imposer une condition de température ou de convection sur l'une des frontières de la géométrie afin de pouvoir calculer le champ de température. Les flux de chaleur qui se situent entre les nœuds sont des termes algébriques et peuvent être négatifs ou positifs car l'orientation de ces derniers est imposée arbitrairement. Les nœuds sont répertoriés en commençant par les nœuds internes, puis les nœuds de frontière. Pour trouver les températures, nous faisons un bilan énergétique sur tous les nœuds. Nous obtenons ainsi un système linéaire composé d'autant d'équations qu'il y a de nœuds.

Pour simplifier l'écriture, le système utilise une matrice issue de la théorie des graphes [4],[5] via la bibliothèque Networkx de Python [6]. Cette bibliothèque permet d'extraire la matrice d'incidence qui relie les arêtes et les nœuds avec une convention de signe, positif si le flux sort du nœud et négatif s'il entre. La bibliothèque Networkx permet d'associer des valeurs aux différentes arêtes. Dans notre cas, on décide d'y associer les conductances thermiques. On obtient donc une matrice $[G]$ qui contient la conductance entre deux nœuds connectés.

Cette matrice $[G]$ est séparée en deux matrices distinctes, G^I et G^L qui correspondent respectivement aux conductances entre les différents nœuds du réseau et, entre les nœuds limites (où sont imposées les températures des conditions aux limites) et les autres nœuds. On définit également T^L qui est le vecteur contenant les températures imposées, T^I le vecteur des températures inconnues de chaque nœud tandis que $[Q]$ est le vecteur qui contient les différentes sources de chaleur pour chaque nœud. Ces différentes matrices nous permettent de poser l'eq.1 qui va permettre la résolution du champ de température [4].

$$G^I \times T^I = [Q] - G^L \times T^L \quad (1)$$

2.2 Analogie des résistances de contact

Il faut obligatoirement avoir deux nœuds pour créer une résistance thermique entre ces derniers dans un circuit équivalent. Comme le montre la figure 2, la particularité de la modélisation des résistances de contact est de créer des nœuds "fantômes" qui vont permettre la simulation de la résistance apportée par l'isolant. Les nœuds "fantômes" et leurs connexions présentés dans la vue "concept" sont obtenus en respectant les volumes de contrôle qui leur sont attribués dans la vue "géométrie". Si dans la vue "concept", les nœuds "résistance de contact" sont dissociés entre eux et semblent avoir des positions différentes, en réalité ils sont confondus dans le circuit équivalent.

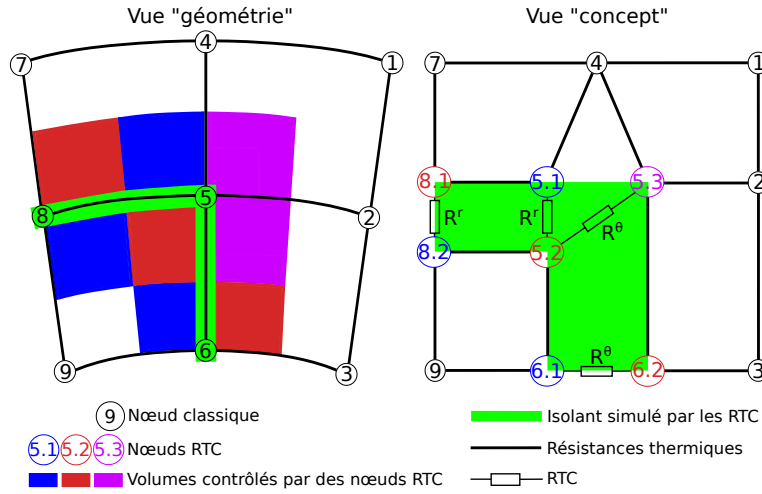


Figure 2: Représentation des résistances de contact.

Les nœuds "résistance de contact" peuvent être utilisés dans deux situations :

- simuler, dans le cas d'un contact non-parfait entre deux régions, une résistance de contact non nulle mais avec une épaisseur nulle.
- simuler un élément réel dont l'épaisseur est très faible et connue [7] et qu'aucune source de chaleur n'y est associée (un isolant par exemple).

Selon l'axe, les résistances de contact s'écrivent comme suit [8] :

$$R^r = \frac{\ln\left(\frac{r+e}{r}\right)}{k_r \cdot (\theta_g - \theta_d) \cdot L} \cong \frac{e}{r \cdot k_r \cdot (\theta_g - \theta_d) \cdot L} \text{ avec } e \ll r \quad (2)$$

$$R^\theta = \frac{e}{k_\theta \cdot (r_h - r_b) \cdot L} \quad (3)$$

Il est important de préciser que l'éq.(2) considère que $e \ll l$ où l correspond à la longueur d'arc $[m]$ de la frontière radiale sur laquelle est imposée l'emploi des RTC. Cette condition permet de supposer que le transfert thermique est purement radial dans cette situation. La même démarche est appliquée pour l'éq.(3) avec $e \ll \Delta R$ où ΔR est la longueur $[m]$ de la frontière tangentielle. Dans ce cas, le transfert thermique est purement tangentiel.

Dans la figure 2, on remarque par exemple que le nœud 6 est situé au niveau de l'isolant qui doit être simulé. Afin de réaliser cette simulation, le nœud est remplacé par deux autres nœuds qui sont 6.1 et 6.2 pour insérer une résistance de contact dont la valeur est calculée via l'éq.(3). Le nœud 8 suit la même démarche mais utilise l'éq.(2) afin de simuler une résistance purement radiale entre les nœuds 8.1 et 8.2. Le nœud 5 est la partie la plus sensible de la modélisation car comme le montre la figure 2, il est situé sur un "coin" de l'isolant et est donc remplacé par trois nœuds au lieu de deux comme il l'a été présenté dans les cas précédents.

Pour simuler le "coin", c'est la connexion entre les nœuds 5.1 et 5.2 qui simule la partie radiale tandis que la connexion entre 5.2 et 5.3 simule la partie tangentielle. En effet, le nœud 5.2, en plus de son volume de contrôle associé intègre également celui du "coin" de l'isolant. C'est pourquoi il n'y a pas de connexion entre 5.1 et 5.3 car il n'y a pas d'isolant à simuler entre ces nœuds et étant à la même position, il ne peut pas y avoir de résistance. La connexion des nœuds dépend des volumes de contrôle affectés à ces derniers. Prenons comme exemple, le nœud 6.2 dont le volume de contrôle est représenté par la forme rouge dans la figure 2.

Ce volume de contrôle est en contact avec ceux des nœuds 6.1, 5.3, et 3 (volume de contrôle non représenté sur la figure 2 de gauche) ce qui amène aux connexions présentées dans la vue "concept".

3 Résultats

3.1 Comparaison entre les modèles de circuit équivalent et d'Ansys Fluent

Afin d'évaluer les performances du circuit équivalent, un modèle VF a été réalisé sous le logiciel Ansys Fluent. Le modèle simule l'encoche statorique et son maillage comporte 611399 nœuds et 534600 éléments pour offrir une grande précision dans les résultats. Le modèle de circuit équivalent quant à lui est composé de 499 nœuds quand il comprend les résistances de contact. Le but de la comparaison étant de vérifier la pertinence de l'emploi des résistances du circuit équivalent par rapport à la modélisation VF.

Pour cette simulation, la géométrie de l'encoche statorique ainsi que les conditions aux limites imposées sont celles présentées dans la figure 1 avec $T_{haut} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_{haut} = 2000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, $T_{bas} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ et $h_{bas} = 1000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Ces valeurs sont issues d'une modélisation CFD en 3-D réalisée sous Ansys Fluent qui simule le refroidissement d'un moteur électrique via un circuit de refroidissement en eau autour de la machine (représenté par T_{haut} et h_{haut}) et un circuit de refroidissement par gaz passant par l'entrefer (représenté par T_{bas} et h_{bas}). La figure 3, présente les résultats pour le cas où l'isolant n'est pas présent autour de la bobine (cas A) et le cas où l'isolant est présent (cas B) et modélisé dans le modèle VF tandis que le modèle de circuit équivalent lui, le simule via l'emploi des résistances de contact vues dans la figure 2. Le Tableau 1 donne les caractéristiques des matériaux utilisés dans les deux modélisations (ces derniers sont tous isotropes mais il est important de préciser que la modélisation permet de prendre en compte des matériaux anisotropes).

Unité	Conductivités thermiques		Sources de chaleur
	$k_r [W.m^{-1}.K^{-1}]$	$k_\theta [W.m^{-1}.K^{-1}]$	$[W.m^{-3}]$
Tôle	21,9	21,9	344591
Cuivre	1,21	1,21	105968
Résine	0,9	0,9	0
Isolant	0,123	0,123	0

Table 1: *Caractéristiques des matériaux utilisés et sources de chaleur*

Pour le cas A, il apparaît que les deux modèles donnent des champs de température quasiment identiques (erreur relative comprise entre -2,5% et 2%). Dans le cas B, l'impact de l'isolant est mis en évidence par les deux modèles qui donnent également un champ de température similaire. Il est à noter que les erreurs relatives les plus importantes (-4% et 3%) sont logiquement situées au niveau de l'espace occupé par l'isolant. Cela s'explique par le fait que les RTC laisse passer le flux de chaleur dans un seul axe uniquement tandis que le modèle VF, en simulant réellement l'isolant, laisse passer le flux selon les deux axes. Le circuit équivalent donnera donc toujours un point chaud plus élevé que le modèle VF. Les figures 4 et 5 présentent des tracés de la température pour le cas B avec des valeurs fixes de r et θ . Ces tracés confirment que la différence de température est négligeable, les écarts restant de l'ordre de 1°C entre les modèles par circuit équivalent et VF. L'impact des résistances de contact peut être visualisé via ces tracés pour $r = 0.115 \text{ m}$ sur la figure 4. On remarque sur la courbe rouge

le saut de température à ce rayon qui correspond à la position où se situe l'isolant dans le modèle VF. On peut encore visualiser ces sauts de température pour $\theta = 1.48 \text{ rad}$ et $\theta = 1.66 \text{ rad}$ dans la figure 5. En effet, pour ces valeurs, on remarque ces sauts de température sur les courbes rouge et violette où l'isolant est présent.

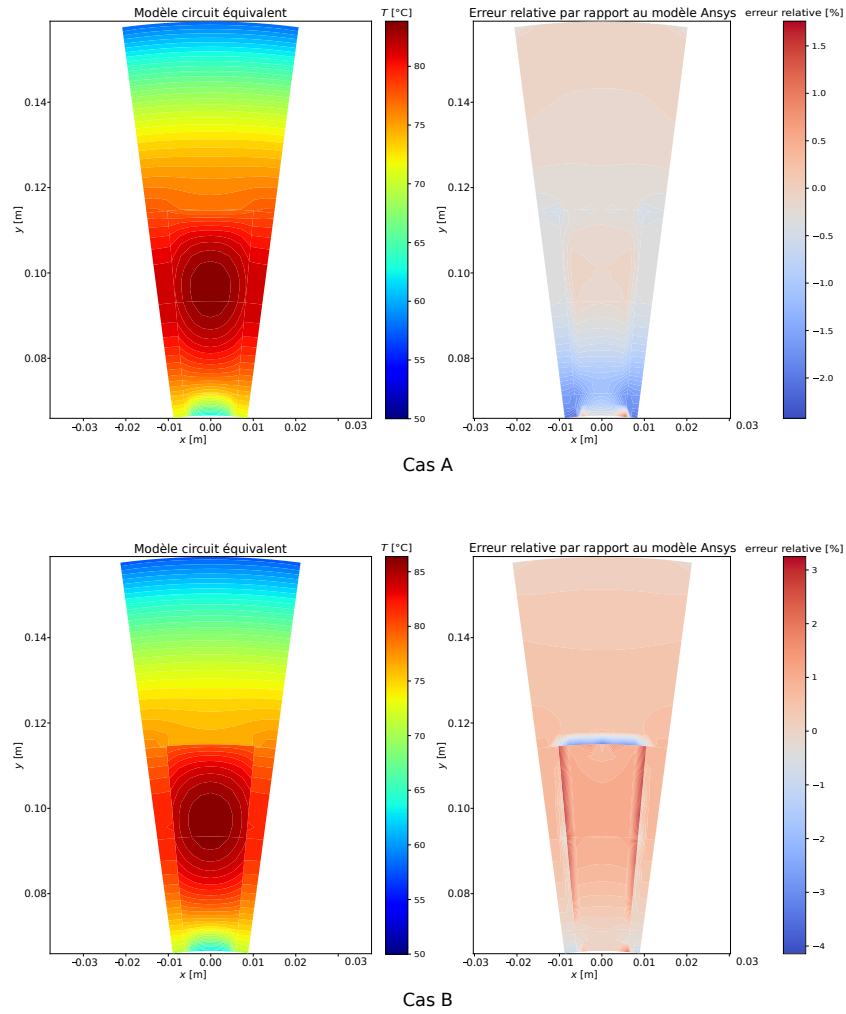


Figure 3: *Comparaison entre le modèle de circuit équivalent et le modèle VF. Cas A : Sans isolant (sans RTC), Cas B : Avec isolant (avec RTC) .*

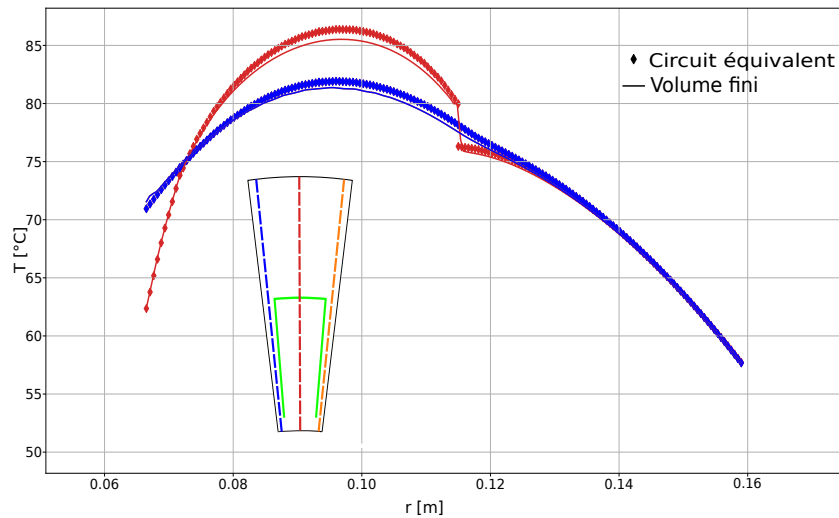


Figure 4: Comparaison des températures du cas B entre le modèle de circuit équivalent et le modèle VF pour un angle θ fixe (les courbes bleu et orange sont confondues par symétrie).

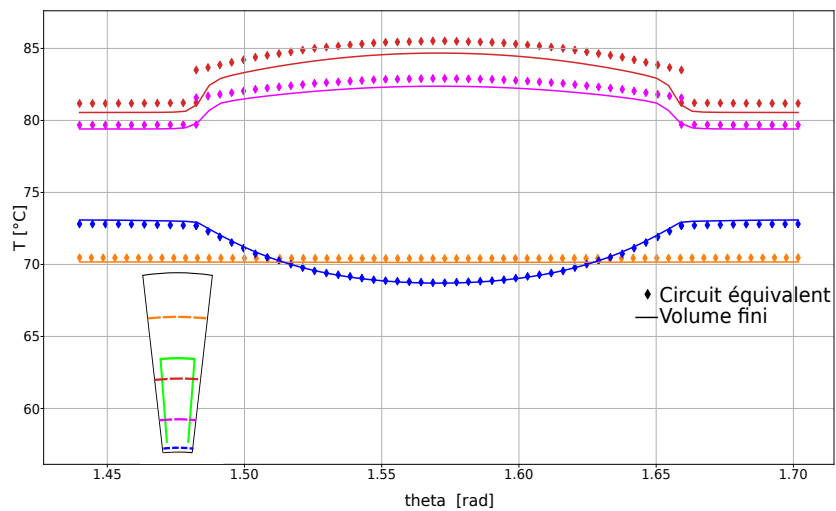


Figure 5: Comparaison des températures du cas B entre le modèle de circuit équivalent et le modèle VF pour un rayon r fixe.

3.2 Conclusion

Cette étude a permis de démontrer que l'emploi des résistances de contact dans un modèle de circuit équivalent permet de simuler la présence d'un élément de faible épaisseur sans pour autant en modéliser sa géométrie. L'apport de cette méthode permet un allègement du maillage pour le circuit équivalent. Il offre également une plus grande flexibilité par rapport à une modélisation VF qui requiert une puissance et un temps supplémentaires de calculs pour la prise en compte d'un élément fin tel qu'un isolant. L'ajout des résistances de contact dans le modèle de circuit équivalent est rapide et simple à mettre en place. Le temps de calcul est de l'ordre de la seconde pour le circuit équivalent alors qu'il peut s'élever à plusieurs minutes pour le modèle VF. Ce travail a pour but d'être étendu à toute la géométrie du moteur électrique.

Il doit également permettre d'ajuster le modèle par rapport à de l'expérimental. En effet, il est facilement envisageable d'utiliser cette approche afin par exemple d'ajouter des lames d'airs à certains endroits de la machine où l'hypothèse de contact parfait serait remise en question.

Références

- [1] Yaoqi Xian, Ping Zhang, Siping Zhai, Peng Yuan, and Daoguo Yang. Experimental characterization methods for thermal contact resistance: A review. *Applied Thermal Engineering*, 130:1530–1548, February 2018.
- [2] M.M. Yovanovich. Four decades of research on thermal contact, gap, and joint resistance in microelectronics. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 28(2):182–206, June 2005.
- [3] Majid Bahrami, M. Michael Yovanovich, and J. Richard Culham. Thermal contact resistance at low contact pressure: Effect of elastic deformation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(16):3284–3293, July 2005.
- [4] Julien Petitgirard, Tony Piguet, Philippe Baucour, Didier Chamagne, Eric Fouillien, and Jean-Christophe Delmare. Steady state and 2d thermal equivalence circuit for winding heads—a new modelling approach. *Mathematical and Computational Applications*, 25(4):70, oct 2020.
- [5] Julien Petitgirard. *Modélisation du dimensionnement électrothermique d'un faisceau électrique dans son environnement véhicule*. PhD thesis, Université Bourgogne Franche-Comte, 2022.
- [6] Aric A. Hagberg, Daniel A. Schult, and Pieter J. Swart. Exploring network structure, dynamics, and function using networkx. In Gaël Varoquaux, Travis Vaught, and Jarrod Millman, editors, *Proceedings of the 7th Python in Science Conference*, pages 11 – 15, Pasadena, CA USA, 2008.
- [7] Mehmet C. Kulan ; Nick J. Baker. Development of a thermal equivalent circuit to quantify the effect of thermal paste on heat flow through a permanent magnet alternator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018.
- [8] B. Vermeersch and G. De Mey. Influence of thermal contact resistance on thermal impedance of microelectronic structures. *Microelectronics Reliability*, 47(8):1233–1238, August 2007.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à Thermodyn Baker Hughes, à l'École Universitaire de Recherche EIPHI (contrat "ANR-17-EURE-0002") et à la région Bourgogne Franche-Comté pour leur soutien dans le déroulement de ces travaux.