

Modélisation électro-thermique d'une bande de captage de pantographe pour un train en mouvement

Nicolas DELCEY¹, Philippe BAUCOUR¹, Didier CHAMAGNE¹, Geneviève WIMMER¹
Charles POULAIN², Gérard AUDITEAU², Gérard BLANVILLAIN², Thomas
BAUSSERON³, Odile BOUGER²

¹ FFEMTO-ST Institute, CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comte ENERGIE Department, Parc technologique, 2 avenue Jean Moulin, 90000 BELFORT, France

² SNCF, Département du CIM, 4 allée des Gémeaux, 72100, LE MANS

³ SNCF, Département du I & P, Av François Mitterrand, 93574, ST DENIS

Résumé - Le système d'alimentation électrique d'un train est assuré par le contact glissant pantographe/caténaire. Ce contact implique de nombreux phénomènes thermiques, électriques, mécaniques ainsi que tribologiques. Ces divers phénomènes physiques participent à la dégradation accélérée et prématurée de la bande de captage du pantographe. Cet article décrit un modèle numérique 1D qui permet la détermination de la distribution de chaleur le long de la bande de captage via la résolution de l'équation de la chaleur. Des optimisations mathématiques sont apportées afin de diminuer les temps de calcul du système. Ce modèle permettra l'anticipation des dégradations.

Nomenclature

| | | | |
|-------------|--|-----------------------|---|
| T | Température, K | F | Force de contact, N |
| C_p | Capacité calorifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$ | V | Tension, V |
| k | Conductivité thermique du carbone, $W.m^{-1}.K^{-1}$ | v_{train} | Vitesse du train, $km.h^{-1}$ |
| S | Section du carbone, m^2 | <i>Symboles grecs</i> | |
| h | Coefficient d'échange conductif, $W.m^{-2}.K^{-1}$ | ρ | Masse volumique, $kg.m^{-3}$ |
| P_{ce} | Périmètre, m | μ | Position du centre de gaussienne, m |
| \dot{Q}_s | Production de chaleur surfacique, $W.m^{-2}$ | σ | Ecart type |
| \dot{Q}_v | Production de chaleur volumique, $W.m^{-3}$ | τ | Coefficient de partage de flux thermique, % |
| y_b | largeur de la bande, m | ξ | Variable de dimension dans un nouveau domaine mathématique, m |
| Fo | Nombre de Fourier | ϵ | Effusivité thermique, $J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$ |
| x | Axe x, m | | |

1. Introduction

L'alimentation électrique des trains est assurée par une liaison entre la bande de captage en carbone d'un pantographe et le fil de contact en cuivre d'une caténaire étant installée d'après un plan de piquetage en zig-zag. Cette liaison est soumise à de multiples contraintes thermiques, électriques, mécaniques et tribologiques (Fig 1). Ces contraintes impliquent une usure prématurée de la bande de captage du pantographe ainsi qu'une importante dégradation. La dégradation thermique de la bande est imputable à deux problèmes, la sublimation du carbone la constituant et la combustion de la colle liant la bande de captage à son support.

Les articles [1] et [2] ont démontré par analyse thermo-gravimétrique que les paliers critiques de perte de masse par oxydation du carbone commencent à $360^\circ C$. Par ailleurs, la température de la bande et les flux de chaleur associés sont en partie responsables de l'usure de la bande et nécessitent d'être étudiés et déterminés.

Les productions de chaleur dans la bande de captage sont multiples. Il existe une production surfacique au niveau du contact entre la bande de captage et le fil de contact, et une production volumique interne au carbone, [3]. La production surfacique de chaleur est double : par effet Joule lorsque le courant électrique circule à travers une résistance électrique de contact et par frottement, la production de chaleur par friction est notamment étudiée dans [4]. Cette production surfacique suit un mouvement de balayage imposé par le plan de piquetage de la caténaire. La production volumique est créée par effet Joule via le passage du courant dans la bande de carbone. Néanmoins, la bande de captage est refroidie via un flux convectif dû à l'avancée du train. D'autre part, la conduction thermique interne à la bande caractérise la distribution de température.

Une équation de la chaleur adaptée à l'interface pantographe/caténaire en mouvement a été établie. De nombreux articles présentent des solutions analytiques à des sujets similaires comme [5],[6] et [7]. Néanmoins, à notre connaissance aucune des méthodes étudiées ne donne de solutions analytiques à un système tel que celui présenté dans cet article.

Pour pallier cela et afin de déterminer les flux de chaleur ainsi que les températures critiques dans la bande, un modèle numérique 1D a été développé. Il intègre de nombreux paramètres d'entrée et permet la résolution de l'équation de la chaleur établie pour l'interface pantographe/caténaire. D'autre part, ce modèle intègre une optimisation mathématique permettant de diminuer les temps de calcul.

2. Le système étudié

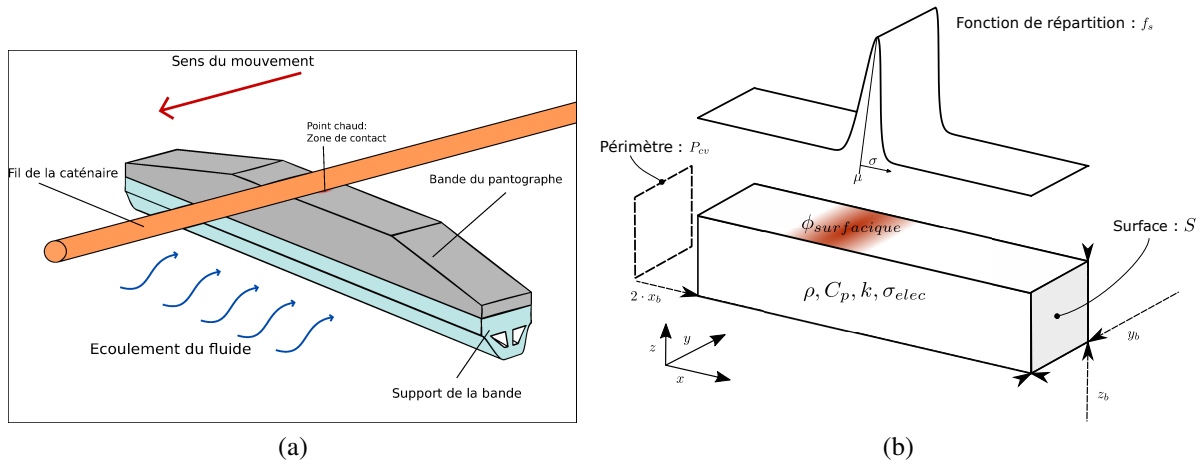


Figure 1 (a) Représentation de l'interface pantographe/caténaire, (b) Caractéristiques internes à la bande et fonction de répartition

Le contact des deux matériaux (carbone imprégné de cuivre pour la bande de captage, cuivre pur pour le fil de contact), crée une zone de contact dont la surface est cylindrique ainsi qu'une résistance (R_{ec}) de contact électrique, [8]. L'effet Joule induit par le passage du courant dans la R_{ec} couplé à la génération de chaleur par friction, donne lieu à une production de chaleur surfacique s'exprimant comme suit :

$$\dot{Q}_s = \tau \cdot f_s(x) \cdot (R_{elec}I^2 + F \cdot v_{train} \cdot \mu_f) \quad (1)$$

La production de chaleur surfacique est appliquée à une surface $y_b \cdot dx$. La R_{ec} n'est pas

homogène sur toute la surface de contact, en effet elle dépend de la surface de contact, elle-même définie via les champs de pression appliqués au contact, les caractéristiques mécaniques et la forme des corps en contact. Une fonction de répartition (f_s) de la résistance électrique de contact est donc nécessaire au calcul de la production de chaleur par effet Joule. Une courbe gaussienne est choisie pour faire office de fonction de répartition.

Enfin, la production de chaleur au contact est répartie à l'interface entre la bande de captage et le fil de contact de la caténaire. Le coefficient de partage de flux thermique τ a été décrit sans mouvement dans l'article [9]. Néanmoins, E. Guillot dans [10] montre qu'en transitoire ce coefficient de partage dépend des effusivités thermiques des matériaux. Finalement, τ peut s'écrire tel que :

$$\tau = \frac{\epsilon_{carbone}}{\epsilon_{carbone} + \epsilon_{cuivre}} \quad (2)$$

La bande de captage est sujette à une autre génération de chaleur, en effet le courant circulant au sein du matériau engendre une production de chaleur volumique par effet Joule s'exprimant de la manière suivante :

$$\dot{Q}_v = \sigma_{elec} \cdot E^2 \quad (3)$$

avec :

$$E = -\overrightarrow{grad}(V) = \frac{\delta \rho_{charges}}{\delta t} \quad (4)$$

Le champ électrostatique E est déterminé par un modèle numérique secondaire traduisant les équations de Maxwell-Ampère à l'intérieur de la bande de carbone.

Les flux de chaleur produits circulent au sein de la bande de captage par conduction. De plus, un échange thermique s'effectue par convection avec l'extérieur de la bande, celle-ci étant soumise à des vitesses d'air importantes. Le stockage de chaleur interne à la bande au cours du temps dépend de son inertie thermique, inertie caractérisée par la capacité calorifique et la densité du carbone imprégné.

Finalement, l'expression de l'équation de la chaleur appliquée à notre système en 1D peut s'exprimer par l'équation 5.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{h P_{cv}}{S} (T - T_\infty) + \frac{\dot{Q}_s \cdot y_b}{S} + \dot{Q}_v \quad (5)$$

Avec les conditions limites suivantes :

$$\begin{cases} t = 0, T_{initial} = T_{amb} \\ t > 0, k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\frac{L}{2}, -\frac{L}{2}} = h \cdot (T - T_{inf}) \end{cases} \quad (6)$$

Avec $\frac{L}{2}$, $-\frac{L}{2}$ les deux extrémités de la bande de captage.

La zone de contact et, par association, la production de chaleur surfacique, changent de position selon un mouvement de balayage imposé par le plan de piquetage de la caténaire. La vitesse du mouvement de balayage est directement proportionnelle à la vitesse d'avancée du train.

3. Modélisation

La vitesse du train détermine la vitesse de balayage de la zone de contact ainsi que le refroidissement par convection à travers le coefficient d'échange h . Ce coefficient a été déterminé via une simulation CFD (Computational Fluid Dynamic), elle-même validée par des corrélations établies dans l'article [11].

Le matériau supposé orthotrope, qui constitue la bande de captage est du carbone imprégné avec un pourcentage de cuivre pouvant changer. La conductivité thermique le long de l'axe x est considérée constante. Cette dernière a été mesurée expérimentalement, de même que la capacité calorifique, la densité et la conductivité électrique du matériau carbone.

La résistance électrique de contact a été mesurée lors d'essais expérimentaux à l'arrêt, [3]. Dans son article [12], M.Braunovic a étudié la relation entre la résistance électrique de contact et la surface de contact. Il démontre notamment que la surface de contact augmente lorsque le contact est glissant et que la résistance électrique de contact diminue avec le mouvement. En prenant la valeur de résistance électrique de contact à l'arrêt nous nous plaçons donc dans la configuration la plus défavorable.

La production de chaleur par friction est dépendante de la vitesse du train, de la force de contact qui est moyennée, et du coefficient de friction, mesuré lors d'essais expérimentaux dans le cadre du projet et largement étudié, [8].

La production de chaleur volumique est établie à partir du modèle électrique 2D qui permet d'obtenir les champs de potentiel et par association le champ électrique E . L'effet Joule est ensuite obtenu, puis moyenné sur les positions correspondantes au maillage du modèle 1D.

Les paramètres d'entrée tel que la vitesse, le courant électrique et la force de contact entre autres, du modèle ont été mesurés en situation de trajet réel.

3.1. Optimisation mathématique

Le mouvement de balayage entraîne des problèmes de stabilité numérique, mais requiert aussi une mémoire informatique considérable ainsi qu'un temps de calcul important. Pour pallier ce problème, nous introduisons deux changements de variable : un changement de référentiel mathématique et un adimensionnement, nous permettant ainsi de traiter l'échauffement plutôt que la température du système.

$$\theta = T - T_{\infty} \quad (7)$$

$$\xi = x - \mu(t)$$

L'équation de la chaleur établie en 5 devient :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial \mu}{\partial t} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right) = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right) - \frac{h P_{cv}}{S} \theta + \frac{\dot{Q}_s \cdot y_b}{S} + \dot{Q}_v \quad (8)$$

3.2. Modèle numérique

Le modèle utilisé est unidirectionnel. La méthode de discrétisation est une méthode d'Euler implicite pour des soucis de stabilité. Le pas de temps de simulation est particulier, étant donné que la vitesse de balayage est changeante. La zone de contact qui se déplace de façon

pseudo-périodique le long de la bande de carbone se verra franchir certaines mailles sans que celles-ci n'aient été impactées thermiquement. Les pas de temps de simulation ne sont donc pas uniformes.

Le nombre de mailles nécessaire à la résolution du modèle est très important pour plusieurs raisons :

- La largeur de contact en 1D est de l'ordre du millimètre
- La production de chaleur est définie via une fonction de répartition qui nécessite un raffinement suffisant pour pouvoir simuler une forme de gaussienne.

L'optimisation mathématique consistant à changer de référentiel permet d'adapter le modèle à un cadre industriel en diminuant la mémoire nécessaire à l'obtention de résultats précis. En effet, le changement de référentiel permet d'avoir une zone de contact constamment centrée en 0. Ceci simplifie le traitement de nombreuses techniques numériques, notamment la méthode de thomas utilisé dans notre cas, qui est couteuse en mémoire et en temps de calcul si la matrice change à chaque pas de temps, chose qui ne se produit plus grâce au changement de référentiel.

| | Temps de calcul | Mémoire nécessaire |
|-------------------|-----------------|--------------------|
| Sans optimisation | 10.86s | 1.25Mo |
| Avec optimisation | 4.64s | 1.12Mo |

Tableau 1 Temps de calcul et mémoire nécessaire pour un temps de simulation de 100s et une largeur de maille de $7 \times 10^{-5} m$

4. Interprétation

4.1. Paramètres d'entrée

Sur la figure 2a, on visualise le lien entre la vitesse du train et la période de balayage de la zone de contact. La figure 2b montre l'influence du courant sur la production de chaleur par effet Joule. Il est possible d'observer le rapport d'importance considérable entre la production de chaleur par effet Joule et la production de chaleur par frottement qui est à la limite d'être négligeable.

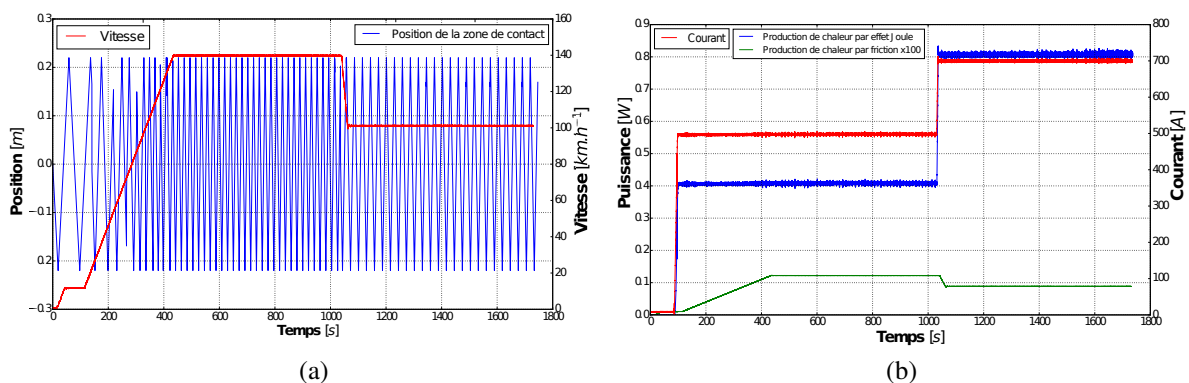


Figure 2 Représentation des paramètres d'entrée variables (a) Le balayage de la zone de contact en fonction de la vitesse du train (b) Représentation des différentes production de chaleur au contact

Sur la figure 2b, la production de chaleur générée par frottement est multipliée par 100 pour

qu'elle soit visible sur la même échelle de puissance. Le modèle électrique fournit la production de chaleur volumique. La figure 3 montre le champ de potentiel réparti dans la bande de captage. Dans un premier temps, on observe la faible valeur de ce potentiel électrique induisant une production de chaleur interne à la bande peu importante. De plus, le champ de potentiel est concentré au niveau du contact, donc celui-ci participera à l'évolution de la température locale au contact.

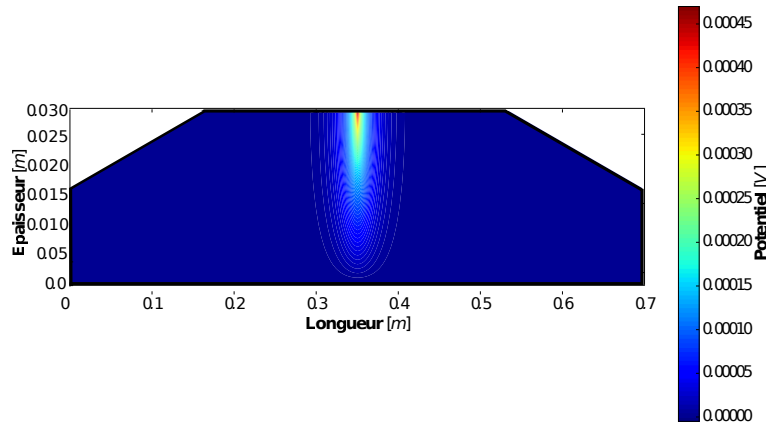


Figure 3 Répartition du champ de potentiel électrique pour un courant de 500A et une zone de contact centrée

4.2. Distribution de température

La température maximale est située au contact entre la caténaire et la bande carbone, et, dépend directement du courant comme le montre la figure 4a. Il est possible de constater la réponse thermique pour une vitesse variable, paramètre responsable de la modification non seulement de la vitesse du mouvement de balayage mais aussi de la valeur du coefficient d'échange. Cette réponse, observée entre 0 et 600s sur la figure 4a montre un "dépassement", phénomène souvent considéré comme une instabilité du système considéré, instabilité provoqué par le changement du coefficient d'échange convectif.

Le balayage de la zone de contact est très visible sur les figures 4a et 4b. L'amplitude de celui-ci est plus importante lorsque le courant augmente à l'instar de la température maximale. De plus l'amplitude de l'effet thermique du balayage change en fonction de la position observée. En effet, les périodes de balayage sont plus importantes aux extrémités de la bande de captage. La zone de captage est donc moins présente sur ces extrémités, leur permettant de refroidir en conséquence.

Dans cette étude, le front de température de la zone de contact en mouvement n'est pas symétrique, ceci est une conséquence du nombre de Peclet solide important. Il y a une diffusion très faible en amont du front de température et une diffusion élevée en aval. Cette dissymétrie est directement responsable de la différence de largeur des pics de chaleur évoquée en rouge sur la figure 4 b.

- Premier passage (Fig 4b P1) : Evolution de la température lente jusqu'à ce que la zone de contact arrive sur la maille observée, puis faible augmentation due à la diffusion aval élevée du front de température.
- Second passage, retour (Fig 4b P2) : Diminution de température due à la convection et

à la diffusion amont très faible du front de température , puis second pic de température lorsque la zone de contact est de retour sur la maille observée.

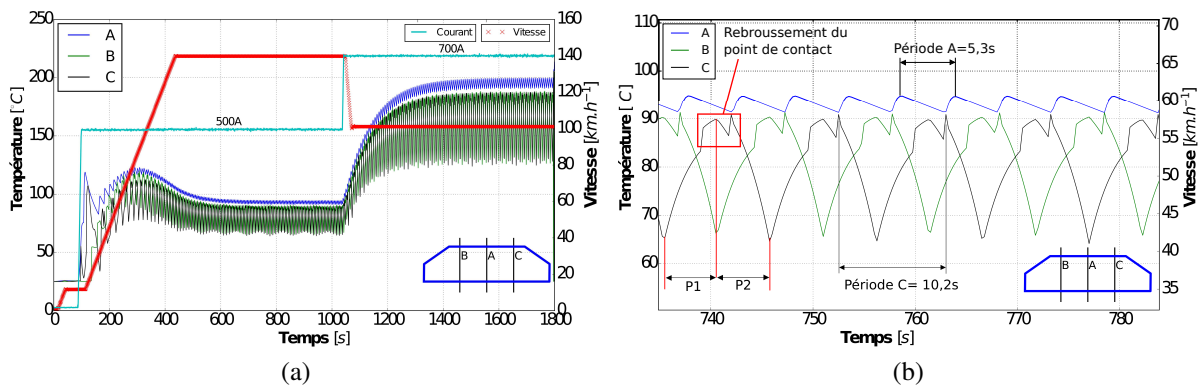


Figure 4 Représentation de la température pour une vitesse et un courant variable, une force de 60N (a) Evolution de la température moyenne à plusieurs position de la bande de captage et visualisation du balayage , (b) Zoom sur l'effet thermique du balayage

La production de chaleur étant particulièrement centrée sur la zone de contact, les extrémités de la bande de captage non concernées par le balayage ne subissent quasiment aucune élévation de température. La figure 5a représente très bien ce phénomène. Sur cette figure le dépassement dû au régime convectif qui s'établit est d'autant plus visible. La propagation le long de la bande est largement dépendante de la convection mais aussi des caractéristiques internes de la bande de captage. La figure 5b montre l'évolution du coefficient de partage en fonction de la conductivité thermique de la bande. Le coefficient de partage augmente avec la conductivité thermique du carbone. Cependant, l'effet inverse se produit pour le nombre de Peclet solide. Lorsque la conductivité thermique du matériau choisi augmente il y aura une forte production de chaleur au contact mais aussi une diffusion plus élevée dans le matériaux. Ceci est dû à une diffusivité thermique proportionnelle à la conductivité mais aussi au front de température moins important lorsque le nombre de Peclet solide diminue. La limite de considération représentée figure 5b indique la valeur sous laquelle l'équation 2 du coefficient de partage au contact n'est plus valable.

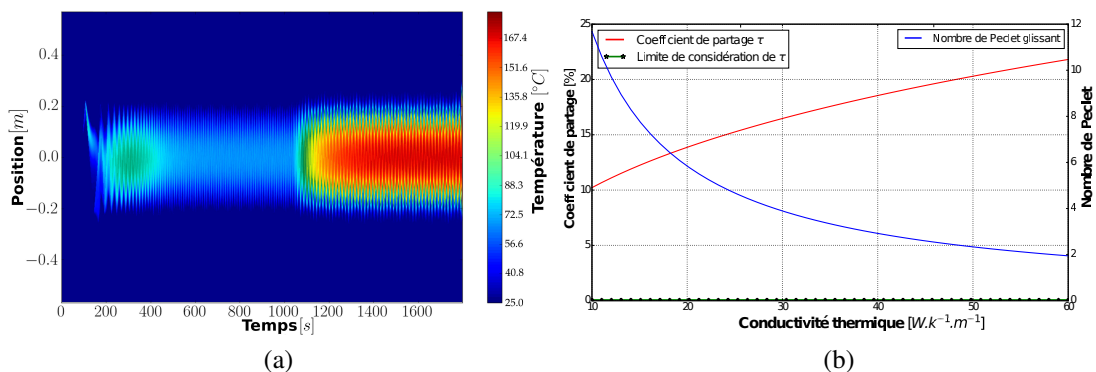


Figure 5 (a) Représentation du champ de température le long de la bande de captage en fonction du temps pour un courant et une vitesse variable et une force de 60N (b) Evolution du nombre de Peclet solide et du coefficient de partage de chaleur au contact pour une vitesse de 100km.h⁻¹

4.3. Conclusion

Le modèle 1D permet de représenter les phénomènes thermiques agissant sur la bande de contact en fonction de nombreux paramètres d'entrée. Les effets caractérisant la température de la bande tels que celui de la vitesse sur l'échange convectif ou du courant sur la production de chaleur sont démontrés.

L'optimisation mathématique permet de gagner du temps et de la mémoire tout en gardant la même précision de calcul.

La production de chaleur par effet Joule au contact est largement prépondérante sur la génération de chaleur par friction ou par effet Joule dans le matériau.

Le modèle permet non seulement une visualisation thermique globale mais aussi certaines manifestations thermiques plus fines telles que l'effet de balayage, de rebroussement.

Les perspectives d'évolution sont importantes, notamment en associant les températures déterminées par le modèle avec la dégradation réelle de la bande de captage.

Références

- [1] T.Ding, G.X.Chen , J. Bu, W.H. Zhang, Effect of temperature and arc discharge on friction and wear behaviours of carbon strip/copper contact wire in pantograph/catenary systems, *Wear* Volume 271, 29 July 2011, pp. 1629-1636.
- [2] S.Kubo, H.Tsuchiya, Wear properties of metal-impregnated carbon fiber-reinforced carbon composite sliding against a copper plate under an electrical current, *World Tribology Congress III* Washington D.C. USA, September 12-6, (2005) pp. 85-86.
- [3] T.Bausseron, Etude de l'échauffement de la catenaire lors du captage a l'arrêt, PhdThesis, *Université de Franche comte*, (2014).
- [4] N.Aderghal , A.Bouchoucha , A.Beghidja, Modélisation des phénomènes thermiques associés aux frottements de glissement parfait du couple Cuivre-Acier avec et sans passage du courant électrique, *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering* (2003) pp. 177-184.
- [5] N.Laraqi, Thermal impedance and transient temperature due to a spot of heat on a half-space, *International Journal of Thermal Sciences* (2010).
- [6] J.C.Jeager, Moving source of heat and temperature at sliding contact, *Journal and proceedings of the Royal Society of New South Wales* (1942).
- [7] H.S.Carlsaw, J.C.Jeager, Conduction of heat in solids *Oxford University* (1959).
- [8] G.Bucca, A.Collina, A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph-catenary system, *Elsevier : Wear* (2009), pp. 46-59.
- [9] S.A.Shaaf, The superposition of a heat source and contact resistance, *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 5, No. 1 (1947), pp. 107-111.
- [10] E.Guillot, Etude expérimentale des transferts de chaleur à une interface pièce, PhdThesis, *École Polytechnique de l'Université de Nantes*, (2009).
- [11] T.Igarashi, Y.Mayumi, Fluid flow and heat transfer around a rectangular cylinder with small inclined angle (the case of a width/height ratio of a section of 5) *Elsevier : Heat and fluid flow* (2001), pp. 279-286.
- [12] M.Braunovic, V.Konchits, N.K.Myshkin, Fundamentals of Electrical Contacts *Applications and Technology*, Taylor & Francis Group (2006).