

Etude expérimentale et modélisation de l'échauffement de la caténaire lors du captage à l'arrêt

Thomas BAUSSERON^{1,2}, Philippe BAUCOUR¹, Raynal GLISES¹, Didier CHAMAGNE¹, Sylvain VERSCHELDE²

¹Laboratoire FEMTO-ST département ENERGIE

2 avenue Jean Moulin - 90000 Belfort

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

²SNCF Direction de l'Ingénierie - Traction Electrique IGTE

6 Avenue François Mitterrand - 93574 La Plaine Saint Denis

Résumé - Plusieurs incidents caténaires ont souligné l'importance de la problématique de l'échauffement du fil au contact du pantographe lors de l'alimentation du train à l'arrêt. Les expertises de ces incidents ont conclu à la rupture du fil de contact lors du préconditionnement des rames à cause d'un échauffement important [1, 2, 3, 4]. Pour répondre au besoin d'étudier ce problème, la SNCF et l'Institut FEMTO-ST (Département Energie) ont mené des essais expérimentaux et mis au point une modélisation du phénomène. Un modèle électrothermique transitoire 2D a été réalisé pour le fil de contact.

Nomenclature

d	diamètre m	q	flux de chaleur par conduction, W
	pas angulaire, rad	R_{el}	résistance électrique,
r	pas radial, m	R_{elc}	résistance électrique de contact,
t	pas temporel, s	R_{tc}	résistance thermique de contact, $m^2.K.W^{-1}$
	flux de chaleur à l'interface, W	T	température, K
C_{th}	capacité thermique, $W.K^{-1}$	U	potentiel, V
h	coefficient d'échange convectif $W.m^{-2}.K^{-1}$	n	indice du sens angulaire
E	champ électrique, $V.m^{-1}$	m	indice du sens radial
i	intensité, A	fil	indice relatif au fil
k	conductivité thermique $W.m^{-1}.K^{-1}$	cu	indice relatif au cuivre
Q	production de chaleur interne, W		

1. Introduction

Le modèle électrothermique réalisé sert à calculer la répartition du courant dans le fil pour déduire la densité de flux de chaleur interne, en particulier au contact fil-bande (figure 1). Ensuite il résout les équations de transfert de la chaleur par une méthode nodale implicite. Ce problème d'apparence simple s'avère complexe. En effet, les problèmes couplés sont développés, en particulier mécaniques, thermiques et électrocinétiques notamment à l'interface. Ces aspects rendent délicat le bon choix du modèle numérique développé.

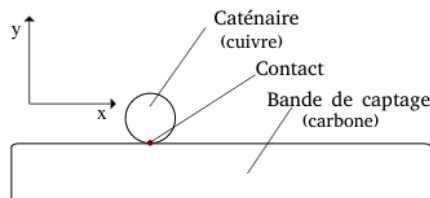


Figure 1 Contact entre la caténaire (fil de contact) et la bande de captage du pantographe.

2. Essais expérimentaux

2.1. Détermination de la surface de contact, essais mécaniques

2.1.1. Description

L'évaluation de la qualité du contact entre la bande de captage et le fil de la caténaire nécessite de déterminer la surface de contact entre les deux solides en fonction de la force, de l'état d'usure du fil et de la bande, et du type de bande. D'après les lois de la tribologie ainsi que la théorie de Hertz, les caractéristiques influant le contact sont la nature physique des matériaux, le diamètre du fil ainsi que l'état de surface des deux solides. Admettre que les différents types de fils composés principalement de cuivre ont le même état de surface et que leurs caractéristiques mécaniques sont similaires permet de n'en tester qu'un seul (cuivre pur). Concernant le fil, il ne nous reste que l'état d'usure à prendre en compte. En revanche, le matériau de la bande est un élément important du contact car il modifie à la fois les caractéristiques mécaniques et l'état de surface.

2.1.2. Méthode développée

Il est possible de déterminer la surface de contact à partir d'une mesure d'empreinte numérisée. Les empreintes sont obtenues grâce à du papier d'occlusion, feuilles très fine ($40\ \mu\text{m}$) imbibées d'encre, positionnées à l'interface. Le papier d'occlusion est fixé avec de l'adhésif à une feuille de papier blanche de taille A4 sur laquelle est imprimé un cadre composé de carreaux de $5\ \text{mm}$ de côté. Une fois instrumentée la feuille blanche est fixée sur la bande de captage au droit du contact (figure 2). La pression exercée entre les deux solides marque la feuille de papier, cette trace représentant le contact entre les deux solides est numérisée. De façon à obtenir des résultats représentatifs chaque cas est répété trois fois. Les essais sont réalisés sur un banc d'essais spécialement conçu pour simuler le captage à l'arrêt. Ce banc, qui se trouve dans les locaux de l'AEF (Agence d'Essais Ferroviaire), permet d'imposer une valeur de consigne sur la force de contact. Les traces sont analysées par un algorithme de traitement d'image pour les rendre exploitables. Après un algorithme de seuillage qui permet d'éliminer le bruit, on traduit le nombre de pixels en unité de surface.

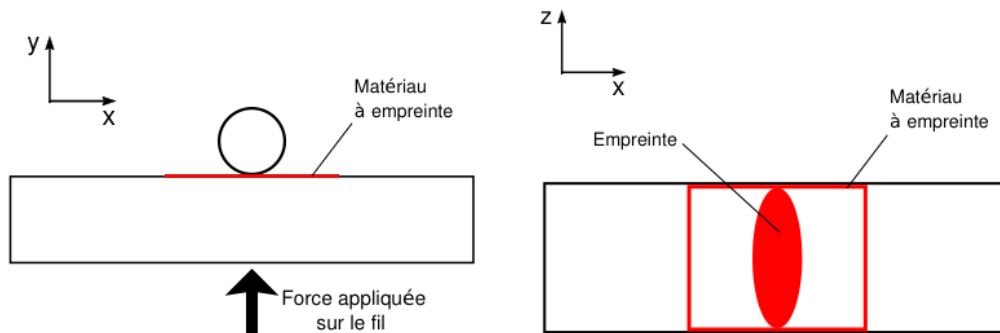


Figure 2 Schéma de principe du système utilisé lors des essais mécaniques sur le banc de captage à l'arrêt

2.1.3. Résultats

Les résultats concernant le fil neuf sur bande carbone imprégnée de cuivre nous montrent que l'usure de la bande n'est pas un élément déterminant dans la surface de contact lorsque le captage s'effectue au centre de la bande (figure 4), toutes fois il est important de souligner que l'imprécision des mesures dans le cas d'une bande neuve est de l'ordre de 10% et monte à près de 20% pour les bandes usées.

La surface de contact est directement dépendante de la force entre la bande et le fil, il est intéressant de voir que cette surface semble tendre vers un maximum à l'approche de 90 N. L'usure de la bande n'a que peu d'impact dans le cas où le contact se fait au centre de la bande.

2.2. Détermination de la résistance thermique de contact, essais thermiques

2.2.1. Description

Après avoir estimé la surface de contact, nous avons développé une instrumentation thermique (mesure de températures) afin d'évaluer la résistance thermique de contact (R_{tc}) en fonction de la force de contact, de l'état d'usure et de la nature du fil. Pour des raisons pratiques il n'a pas été possible de tester plusieurs bandes car elles doivent être usinées et instrumentées. La littérature sur le sujet nous montre que les éléments les plus importants de ces essais thermiques sont la qualité du contact, notamment la surface réelle et la répartition des points de contact et des aspérités, ainsi que les caractéristiques des matériaux composant les solides [5, 6].

2.2.2. Méthode développée

Comme indiqué sur la figure 3 la température de la bande est mesurée en deux points au droit du contact (T_1 et T_2) et la température en haut du fil (T_3) est prise sur le même axe que les mesures réalisées dans la bande. Chaque essai commence par le lancement de l'acquisition des températures du système (fil et bande) et de la température ambiante. La résistance chauffante est ensuite alimentée et on laisse le système s'échauffer jusqu'au régime permanent. Connaissant les caractéristiques physiques il est possible de calculer les résistances thermiques dans la bande et dans le fil. Les températures mesurées servent à calculer le flux traversant le système au droit du contact, mais aussi la résistance globale du système. Le flux est considéré constant. Le traitement monodimensionnel du flux est cohérent car nous avons localement un nombre de Biot très faible pour la vitesse de vent minimale imposée par la SNCF égale à 1 m.s^{-1} .

$$Bi_{fil} = \frac{h_{fil} \times d_{fil}}{k_{cu}} = \frac{25 \times 0,01}{401} = 6,2 \cdot 10^{-4} \quad (1)$$

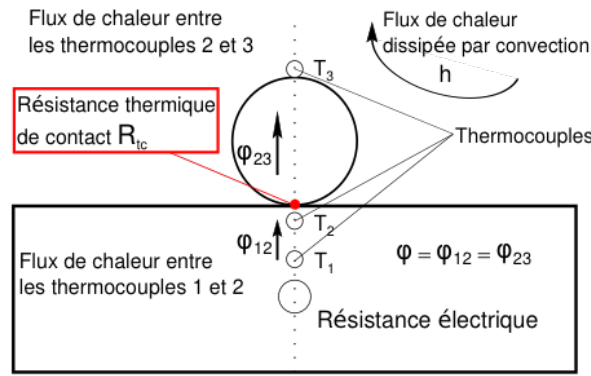


Figure 3 Schéma de principe du système utilisé lors des essais thermiques sur le banc de captage à l'arrêt de l'AEF

2.2.3. Résultats

La résistance thermique du contact entre la bande carbone imprégnée de cuivre et le fil cuivre pur neuf est représentée figure 5 en fonction de la force de contact imposée.

Il est logique que la résistance thermique de contact décroisse en fonction de la force de la bande appliquée sur le fil. En effet, le contact est de meilleure qualité puisque, comme vu précédemment, la surface de contact augmente en fonction de la force.

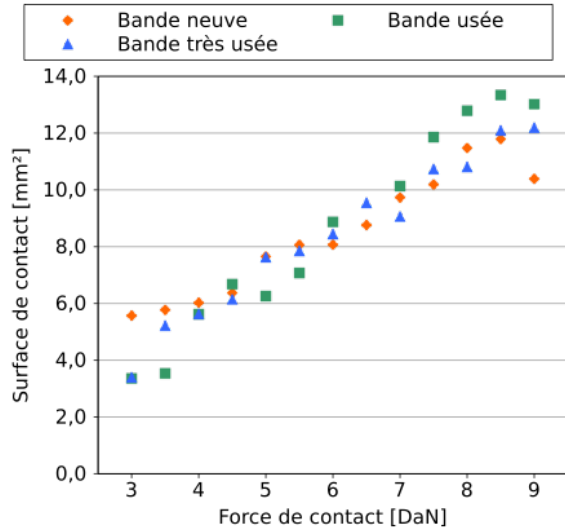


Figure 4 Surface de contact obtenue pour des bandes en carbone imprégnées de cuivre et un fil neuf en fonction de l'usure de la bande et de la force appliquée, contact au centre de la bande.

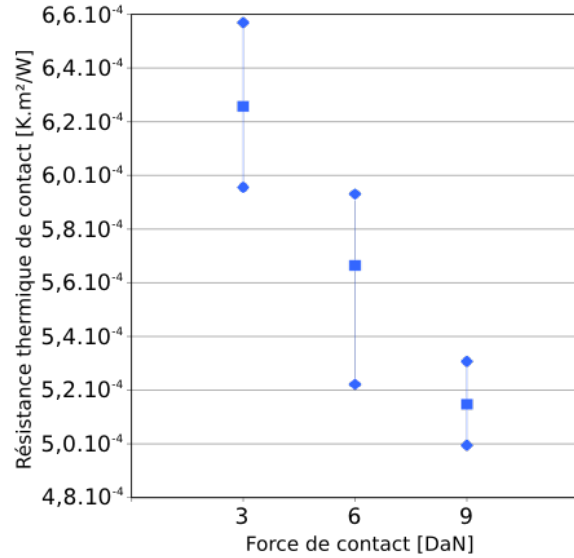


Figure 5 R_{tc} entre la bande et le fil en fonction de la force de contact, valeurs minimales et maximales mesurées.

3. Modèle électrothermique du fil¹

3.1. Modèle électrique

3.1.1. Champ de potentiels

Lors du conditionnement les rames sont alimentées par un échelon de courant durant 20 minutes (figure 6). L'AEF se sert de et échelon de courant lors des essais de captage à l'arrêt pour tester le nouveau matériel. C'est ce profil de courant que nous utilisons dans notre modélisation pour calculer le champ de potentiels (figure 7).

Le contact entre le fil et la bande crée une répartition non homogène du courant dans les deux solides. Pour calculer précisément la production de chaleur interne il est nécessaire de connaître la répartition réelle du courant dans les éléments conducteurs du système. La modélisation électrique du fil de contact est réalisée par différences finies en deux dimensions. La loi d'Ohm permet d'écrire la différence de potentiels U en fonction du courant i et de la résistance électrique R_{el} , tel que $U = R_{el}i$. De plus la loi des nœuds impose que la somme des courants entrants et sortants soit nulle au nœud.

Ces lois physiques posent un problème au centre du fil. En effet dans le repère polaire les résistances électriques liant les points sont de la forme $\ln \frac{r}{r_0}$ avec r_0 tendant vers 0 au centre. Pour résoudre le centre nous nous appuyons sur les lois de Maxwell qui nous permettent d'écrire $\nabla \cdot (\nabla U) = -J$. Au centre dans un repère polaire l'équation différentielle devient :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} = -J \quad (2)$$

Après application de la règle de l'Hôpital l'équation différentielle au centre peut être simplifiée, telle que :

$$U_0 - \bar{U} = \frac{j \cdot r^2}{4 L} \quad (3)$$

1. Cette première version du modèle ne tient pas compte de l'évolution des caractéristiques physiques en fonction de la température car certaines, notamment pour la bande carbone, sont inconnues. Des essais de caractérisation sont en cours pour les différents alliages des fils de contact et les différents taux d'imprégnation de cuivre dans les bandes de captage.

Par ailleurs, on utilise le théorème de Millman qui énonce que dans un réseau électrique de branches en parallèle comprenant chacune une génération de courant on peut écrire :

$$U = \frac{\sum i_n}{\frac{1}{R_{el\ n}}} = \frac{\sum \frac{U_n}{R_{el\ n}}}{\frac{1}{R_{el\ n}}} \quad (4)$$

On applique la loi des nœuds et la loi des mailles pour un système à N nœuds adjacents au centre et en admettant que les résistances électriques R_{el} entre le centre et ces points sont égales. Finalement on peut écrire :

$$U_0 - \bar{U} = \frac{R_{el}}{N} j \cdot S_0 \quad (5)$$

On peut maintenant lier les deux méthodes de façon à exprimer la résistance électrique R_{el} entre le centre et n'importe quel nœud de la première couronne.

$$R_{el} = \frac{N \cdot r^2}{4L \cdot S_0} \quad (6)$$

Connaissant toutes les résistances il est possible de résoudre le système en appliquant les conditions limites suivantes :

- Pour les nœuds en contact avec l'air, on a $\frac{U}{r} = 0$ car le courant électrique ne sort pas du système
- Pour les nœuds en contact avec la bande, on a $U = 0$

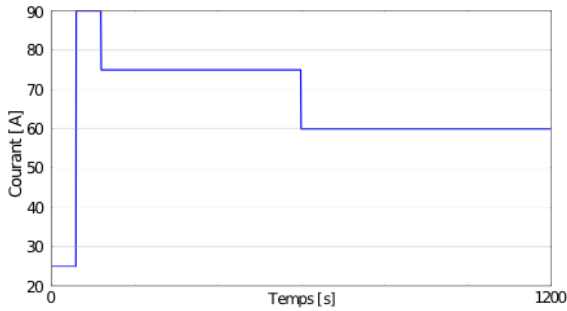


Figure 6 Échelon de courant utilisé par la SNCF lors du conditionnement des rames

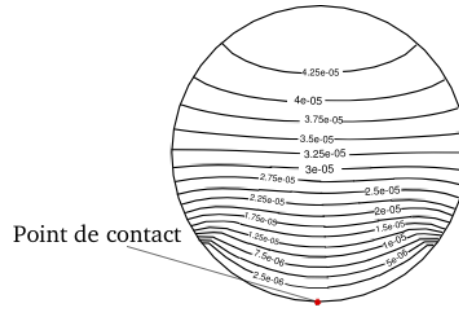


Figure 7 Champ de potentiels électriques [V] dans le fil après application des conditions limites lors du contact avec la bande de captage

3.1.2. Production de chaleur interne

Le calcul du champ électrique $E = -\nabla U$ permet de déduire la production de chaleur interne [7, 8, 9]. En effet le flux volumique de chaleur produit par effet Joule $Q \text{ W.m}^{-3}$ peut s'écrire $Q = E^2$.

3.2. Modèle thermique

3.2.1. Méthode

Ce modèle permet la résolution implicite 2D par une méthode nodale en coordonnées polaires en faisant un bilan énergétique au nœud approprié [10, 11, 12]. Le modèle thermique s'appuie sur la production de chaleur interne issue du modèle électrique Q ainsi que sur la répartition du flux de chaleur créé à l'interface.

Le flux de chaleur produit à l'interface dépend des résistances électriques et thermiques de contact, les essais expérimentaux décrits plus haut (2) ainsi que des essais réalisés par l'AEF sur la résistance électrique de contact ont permis d'établir une bibliothèque qui nous donne pour des cas définis² la surface réelle et les résistances de contact. L'objectif étant de caractériser la température de chaque point, la notation courante est $T_{m,n}$ avec m la situation radiale et n la situation angulaire du point concerné. Les notations de position

2. déterminer par l'usure, les matériaux et la configuration

pour les nœuds intérieurs quelconques , le nœud central et les nœuds de surface sont respectivement (m, n) , $(m = 0)$ et (M, n) . La méthode des différences finies consiste en un bilan thermique effectué sur chaque élément de maillage.

$$\square \quad q + Q = C_{th} \frac{T}{t} \quad (7)$$

Ces bilans sont ensuite écrits sous forme matricielle avec G les éléments de conduction thermique, Q les éléments de production de chaleur et C les éléments de capacité thermique.

$$[G] \cdot [T] + [Q] = [C] \cdot \frac{T}{t} \quad (8)$$

Le système matriciel est résolu grâce à la méthode implicite d'Euler. En regroupant les matrices telles que $[A] = [C]^{-1} \cdot [G]$ et $[B] = [C]^{-1} \cdot [Q]$, on peut écrire le système à résoudre :

$$([I] - t[A]) T^{i+1} = T^i + t[B] \quad (9)$$

3.2.2. Cas particuliers

Nœud central

Comme dans le modèle électrique, le cas de la maille centrale pose le problème du rayon tendant vers 0 lorsqu'il s'approche du centre. Plusieurs méthodes ont été trouvées dans la littérature [13, 14]. L'une de ces méthodes consiste à partager la maille de façon à ne pas avoir de point au centre. Une autre serait d'utiliser l'équation de la chaleur et le théorème de l'Hôpital comme pour le modèle électrique. La dernière méthode est de considérer la maille à une température homogène et d'effectuer un bilan thermique à partir des parois extérieures de la maille centrale, c'est cette méthode qui a été retenue.

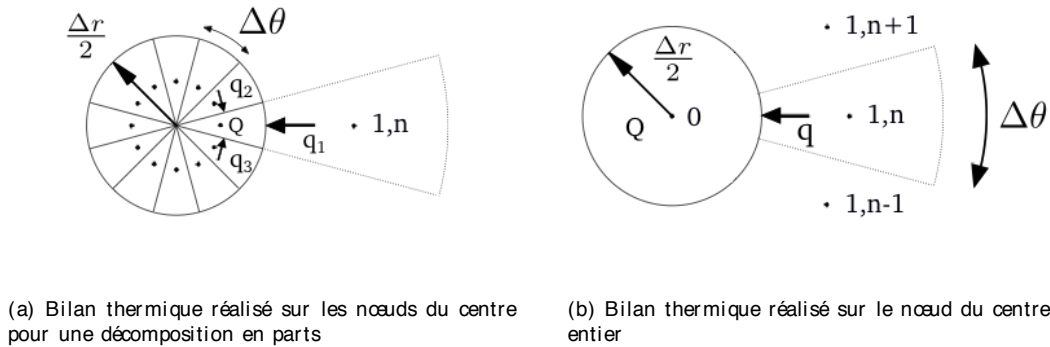


Figure 8 Méthodes de discrétisation du centre

Nœuds de surface

Dans le cas des nœuds de surface, c'est l'application de conditions limites qui rend le bilan particulier. Deux cas se distinguent, les points en contact avec l'air et les points en contact avec la bande de captage. Dans les deux cas il s'agit de conditions aux limites de type Neumann non homogènes, ces limites sont respectivement soumises à de la convection et à une densité de flux de chaleur issue de ce qui se passe au contact. En effet, le contact crée des résistances électriques et thermiques de contact (R_{elc} et R_{tc}). Le passage du courant d'un solide à l'autre produit de la chaleur () qui se répartit de chaque côté du contact en fonction des matériaux. [15].

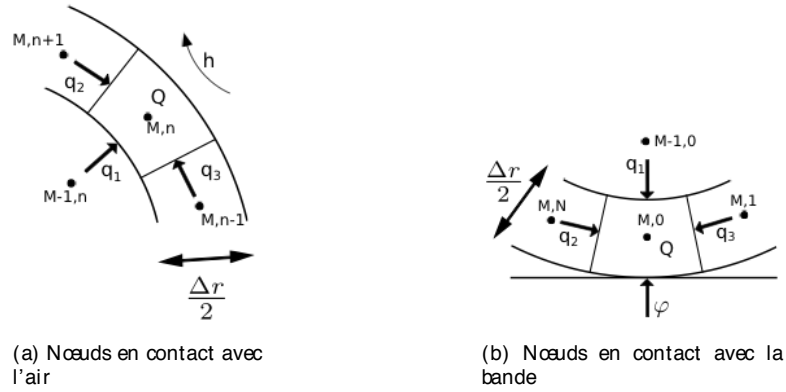


Figure 9 Bilans thermiques réalisés sur les nœuds de surface

3.2.3. Résultats

Le modèle électrique nous permet, entre autre, d'obtenir l'évolution de la température en tout points en fonction du temps, de la chaleur produite à l'interface et de la répartition du courant dans le fil.

Le premier constat que nous pouvons faire c'est qu'il n'y a pas d'influence du maillage sur la température moyenne obtenue. Des essais Les résultats de la figure 10 sont obtenus pour une vitesse du vent imposée par la SNCF de $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ soit un coefficient de convection moyen autour du fil de $25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, et pour un contact entre un fil neuf et une bande en carbone imprégnée neuve de 9 daN soit une surface de 10 mm^2 , une résistance électrique R_{elc} de 100 m et une résistance thermique de contact R_{tc} de $5 \cdot 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$. De plus nous utilisons l'échelon de courant SNCF (figure 6).

Ces résultats se rapprochent de valeurs d'essais expérimentaux existants. Pour confirmer cette tendance une campagne d'essais spécifiques sera réalisée prochainement pour valider le code dans des conditions connues et maîtrisées.

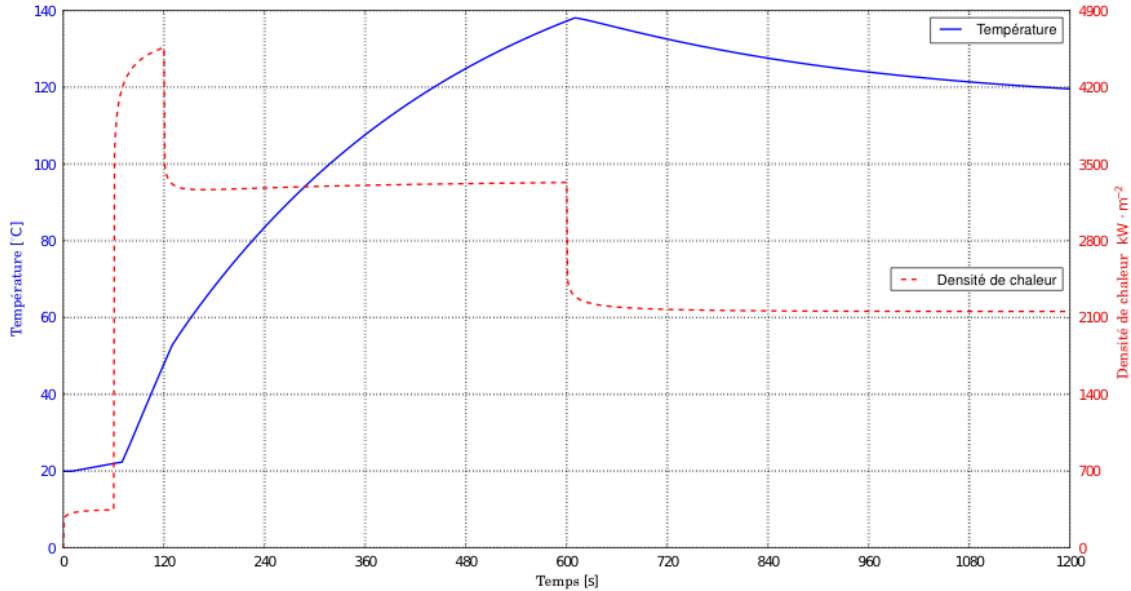


Figure 10 Température moyenne du fil obtenue par le modèle [axe de gauche] et flux de chaleur côté fil [axe de droite] issu de la production de chaleur interne au cours du temps. A l'interface $R_{elc} = 100 \text{ m}$ et $R_{tc} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$.

4. Conclusion

Les essais expérimentaux et les résultats obtenus grâce au modèle thermoélectrique du fil nous permettent d'affirmer aujourd'hui que le contact est le point influent sur l'échauffement du système lors du captage à l'arrêt. En effet, les paramètres les plus importants sont la surface de contact et les résistances thermiques et électriques de l'interface. Alors que même avec une répartition du courant non homogène l'échauffement est faible, lorsque l'on modifie les caractéristiques du contact, et donc la production de chaleur à l'interface, la température du fil est impactée. Nous travaillons aujourd'hui sur des solutions techniques qui permettront de limiter l'échauffement sans modifier fondamentalement le système, des pistes intéressantes ayant déjà été testées numériquement.

L'objectif suivant sera d'améliorer les performances du modèle thermoélectrique du fil en utilisant la méthode **ADI** (**A**lternating **D**irection **I**mplicit) [16] et un maillage du système affiné au contact [17]. Ces deux ajouts nous permettront de rendre l'utilisation du programme plus aisée en diminuant les temps de calcul de façon à en faire un outil informatique efficace et exploitable par l'industriel.

Références

- [1] Office de Recherche et d'Essais de l'Union Internationale des Chemins de fer, Rapport captage de courant à grande vitesse et à puissance élevée, **A129 RP 6-F à 10-F** Doc. SNCF (1976).
- [2] ERRI, Courant admissible au point de contact caténaire pantographe à l'arrêt et au démarrage, **A 186 RP 2** Doc. SNCF(1996).
- [3] H. Khirzada, Analyse de données permettant de dégager les principaux facteurs causant l'échauffement du fil de contact des caténaires, Rapport de stage Université de Franche-Comté (2010).
- [4] IG.TE.ZC1, Captage à l'arrêt, Rapport d'analyse des essais d'échauffement, **Direction de l'ingénierie** Doc. SNCF (2011).
- [5] N.Laraqi, A.Bairi, Theory of thermal resistance between solids with randomly sized and located contacts, **International Journal Of Heat And Mass Transfer** 45 (2002) 4175-4180.
- [6] C.Fieberg, R.Kneer, Determination of thermal contact resistance from transient temperature measurements, **International Journal Of Heat And Mass Transfer** 51 (2008) 1017-1023.
- [7] F.Dubas, Conception d'un moteur rapide à aimant permanents pour l'entraînement de compresseurs de piles à combustible, Thèse Université de Franche-Comté (2006).
- [8] F.Robert, Modélisation et simulation de transformateurs pour alimentations à découpage, Thèse Université Libre de Bruxelles (1999).
- [9] F.Yang, Current-induced thermal stresses in a metal cylinder, **Journal Of Applied Physics** 106 (2009).
- [10] J.Grandvuillemin, Étude des phénomènes électrothermiques régissant les lignes d'alimentation d'un réseau électrique automobile, Thèse Université de Franche-Comté (2009).
- [11] F.Incropera, D.Dewitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Wiley Sixth Edition (2007).
- [12] J-L.Batoz, G.Dhatt, Modélisation des structures par éléments finis, Éditions Hermès (1990).
- [13] A. Bruno-Alfonso, L. Cabezas-Gomez, H. Aparecido Navarro, Alternate treatments of jacobian singularities in polar coordinates within finite-difference schemes, **World Journal of Modelling and Simulation** 8 (2012) 163-171.
- [14] A. S. Reimer, A. F. Cheviakov, A Matlab-based finite-difference solver for the Poisson problem with mixed Dirichlet-Neumann boundary conditions, **Computer Physics Communications** 184 (2013) 783-798.
- [15] S.A.Schaaf, On the superposition of a heat source and contact resistance, **Quarterly of Applied Mathematics** 5 (1947) 107-111.
- [16] A.Vaudrey, Estimation des Conditions de Frontières en Géométrie Cylindrique à l'aide des Problèmes Inverses, Rapport DEA CREST (2002).
- [17] J.D.Anderson Jr., J.Degroote, G.Degrez, E.DICK, R.Grundmann, J.Vierendeels, Computational Fluid Dynamics. An Introduction, Wendt JF Editor (2008).