

Premiers résultats d'échauffement et d'usure d'un banc représentatif du contact électrique glissant caténaire-pantographe

Théo KZIAZYK^{1*}, Eric GAVIGNET¹, Philippe BAUCOUR¹, Didier CHAMAGNE¹

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

*theo.kziazyk@femto-st.fr

Résumé - L'usure et l'échauffement lors du contact électrique glissant pantographe-caténaire sont des problématiques encore mal comprises. Un banc d'essai représentatif de ce contact a récemment été développé et réalisé. Les caractéristiques, les solutions techniques et la configuration de ce banc d'essai sont ici présentés en comparaison avec la liaison étudiée. Les premiers résultats d'échauffement et d'usure observés sur deux types de bande de captage sont présentés. Une critique de ces résultats est ensuite réalisée. Le matériau des bandes de captage étant anisotropique, l'analyse des résultats s'appuie sur des mesures de diffusivité thermique selon les trois dimensions.

1. Introduction

Dans une précédente communication [1], nous avons présenté un banc d'essai représentatif d'un contact électrique glissant, et plus précisément d'une Liaison Pantographe Caténaire (LPC). Ce banc a pour but de caractériser l'échauffement et l'usure des bandes de captage que l'on retrouve sur les pantographes des trains, tramways ou métros. En effet, en captant le courant par frottement sur le fil de contact de la caténaire, les bandes de captage sont soumises à de nombreuses contraintes, ce qui engendre de multiples problèmes (casse par exemple) et nécessite une maintenance importante. Le contact électrique glissant entre une bande de captage et le fil de contact est régi par de nombreux phénomènes physiques qui en fait un sujet complexe. Dans ce cadre, des outils de simulations ont également été développés afin d'étudier une liaison pantographe-caténaire lorsque le train est à l'arrêt [2] ou en mouvement [3] et ont notamment mis en évidence l'importance de la thermique du contact. Cette importance se retrouve dans la corrélation entre la température de contact et l'usure d'une bande observée par Chen.G.X [4]. L'échauffement et l'usure sont influencés principalement par le courant, provoquant un effet Joule [5] et des arcs électriques [6], par la vitesse [7], la force de contact [8], et par les conditions environnementales comme l'humidité [9] ou la température ambiante [10]. Les résultats présentés ici sont le fruit d'un partenariat entre le laboratoire FEMTO-ST et le Centre d'Ingénierie du Matériel (CIM) de la SNCF. Ils décrivent l'usure, l'échauffement ainsi que des mesures de diffusivité thermique observés sur deux nuances de bande de captage différentes.

2. Description du banc d'essai

Le schéma synoptique du banc d'essais est représenté figure 1. Il repose sur la mise en rotation d'un disque en cuivre (de diamètres intérieur et extérieur 250 et 1000 mm) représentant la caténaire sur lequel vient s'appuyer un échantillon de bande de captage en carbone. Cet échantillon, appelé pion, est découpé directement dans une bande de captage réelle et la face en contact avec le disque est la face normalement en contact avec la caténaire dans une LPC.

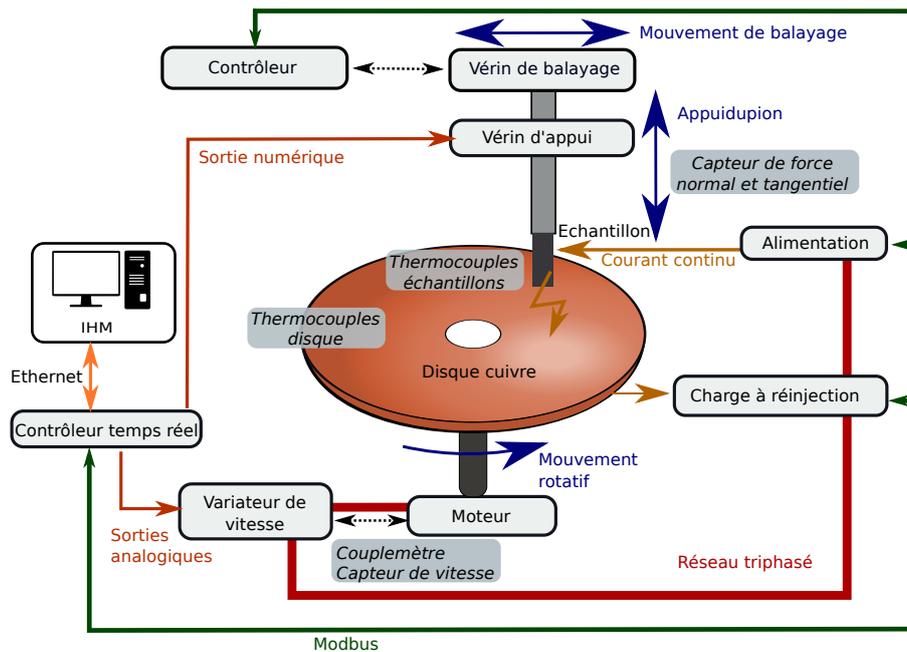


Figure 1 : Synoptique du banc d'essai. En rouge le réseau triphasé, en orange la circulation du courant continu, en bleu les mouvements observés et en vert les raccordements par connexions ModBus.

L'ensemble du banc est piloté à l'aide d'un contrôleur temps réel de type Compact RIO (Reconfigurable Input Output) et du logiciel LabVIEW. Les différents capteurs et actionneurs mis en place pour représenter au mieux la liaison glissante entre la bande de captage et le fil de contact sont décrits ci-dessous :

Force de contact : La force de contact entre le pion de carbone et le disque en cuivre est imposée en début d'essai grâce à un vérin de pression commandé en tout ou rien. Un ressort de compression modifiable, de raideur connue, est inséré dans un cylindre métallique entre le vérin et le pion. Il permet d'approcher la raideur du pantographe, d'encaisser les vibrations du banc et d'éviter la mise en résonance du pion. De plus, un capteur de force traction compression est installé entre le vérin de pression et le pion afin de mesurer la valeur de la force de pression exercée. La gamme de force obtenue varie de 30 à 120 N.

La vitesse linéaire, allant jusqu'à 100 km.h^{-1} , est atteinte par rotation du disque grâce à un moteur asynchrone de puissance 9,4 kW commandé à l'aide d'un variateur de vitesse de type ATV320. Une boucle PID implantée dans le variateur permet d'obtenir une vitesse linéaire constante en modifiant la vitesse de rotation du disque en fonction de la position du pion estimée par le logiciel. La vitesse angulaire et le couple développés sont mesurés à l'aide d'un couplemètre inséré en sortie du moteur.

Le mouvement de balayage est réalisé par un vérin de translation piloté à l'aide d'un contrôleur de position PCON et d'un protocole réseau de type MODBUS RS485. Le temps d'aller retour est calculé numériquement et la position du pion est vérifiée par le contrôleur de position à chaque changement de sens. L'amplitude de balayage maximale est de 300 mm en tenant compte des caractéristiques physiques du disque et en prenant des marges de sécurité. La vitesse de déplacement obtenue varie de $8 \text{ à } 80 \text{ mm.s}^{-1}$.

Alimentation du contact : une alimentation, d'une puissance allant jusqu'à 30 kW, permet d'injecter un courant dans le pion variant entre 0 et 300 A. Le courant collecté au niveau du disque en cuivre est réintroduit sur le réseau grâce à une charge à réinjection, permettant ainsi

de le réutiliser et de ne pas échauffer l'environnement du banc.

Deux échantillons de bande de captage de surface 10 cm^2 sont mis en contact avec la périphérie du disque en cuivre. Ces échantillons permettent de faire circuler le courant de l'alimentation jusqu'au disque en cuivre. Leur position est équidistante à celle du pion afin d'obtenir une densité de courant similaire entre les deux échantillons.

La surface de contact entre le pion en carbone et le disque est relativement similaire en terme de forme et de dimension à celle d'une LPC. Elle est d'environ 1 cm^2 , surface de contact mesurée dans les travaux d'une thèse menés par T. Bausseron [11]. Plus précisément, la surface de contact peut être approximée par un rectangle de $0,5 \text{ cm}$ de largeur et 2 cm de longueur ce qui équivaut à une densité de courant de 80 A/cm^2 , valeur très inférieure aux valeurs mises en jeu sur les lignes ferroviaires.

La représentativité de ce banc a ses limites. D'une part les conditions environnementales ne sont pas prises en compte (température ambiante, taux d'humidité, phénomènes de convection et de rayonnement). D'autre part, les vibrations engendrées sur le fil de contact lors du passage du train ne sont pas fidèlement reproduites. Ces vibrations sont responsables d'arcs électriques échauffant localement le fil de contact et conduisant à différents phénomènes d'usure de la bande de captage. Enfin, la structure propre du banc d'essai met en évidence des fréquences de vibration et un comportement mécanique différents d'une liaison caténaire pantographe. L'impact de ces différences de représentativité reste à ce stade difficile à évaluer mais une augmentation du banc est tout à fait envisageable pour la suite des travaux.

3. Résultats des premiers essais

3.1. Conditions d'essais

L'objet des essais est d'observer et de caractériser l'usure et l'échauffement de deux nuances de bande de captage différentes utilisées sur les lignes ferroviaires exploitées par la SNCF. Dans chacune d'entre elles a été découpé un pion dont les dimensions sont indiquées dans la figure 2. Trois essais ont été réalisés sur chaque pion dans les mêmes conditions expérimentales : une vitesse linéaire de 60 km.h^{-1} , un courant de 80 A et une force de contact de 60 N . La première nuance, appelée 'A', est un carbone imprégné à 50% de cuivre tandis que la deuxième nuance 'B' est un carbone imprégné à plus de 25% de cuivre. Pour des raisons de confidentialité, les méthodes de fabrications, le type de carbone, la méthode d'imprégnation en cuivre et les caractéristiques thermiques et électriques sont inconnues. Afin de mesurer l'échauffement du pion, et pour les deux nuances, trois thermocouples de type K et de diamètre de fils $125 \mu\text{m}$ sont insérés dans l'échantillon selon la répartition indiquée figure 2. Ceux-ci sont introduits dans des trous, remplis préalablement d'une pâte thermique conductrice, d'une profondeur de 10 mm et de diamètre 1 mm . Les tensions prélevées aux bornes des thermocouples sont ensuite amplifiées à l'aide d'amplificateurs d'instrumentation avec compensation de soudure froide (type AD8495) puis isolées de la partie puissance par l'intermédiaire de circuits d'isolement (AMC1211) afin d'être connectées sur le module d'acquisition du contrôleur temps réel.

Le disque en cuivre est également instrumenté à l'aide de 24 thermocouples de type K et de diamètre $125 \mu\text{m}$ insérés à une profondeur de 6 mm de la surface et répartis sur 3 cercles distincts à 5 , 20 et 30 mm du bord extérieur du disque comme représenté sur la figure 3. Le disque étant en rotation, un module de mesure sans fil développé spécifiquement au laboratoire, est placé au centre du disque afin d'enregistrer les valeurs des températures. Le principe de ce système est représenté figure 3 et repose sur la mise en œuvre d'un microcontrôleur ESP32 dont les entrées analogiques sont connectées aux différents thermocouples par l'intermédiaire

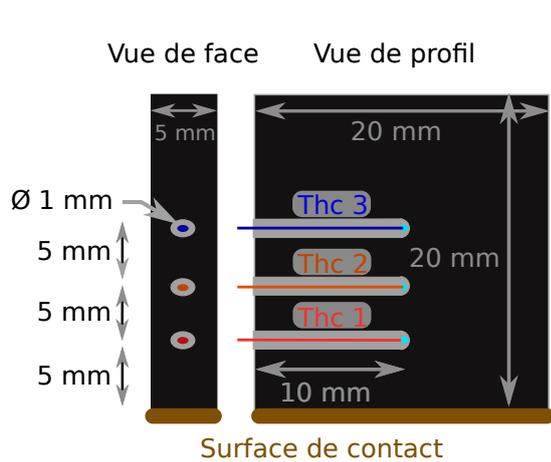


Figure 2 : Implantation des thermocouples dans un échantillon d'une bande captage.

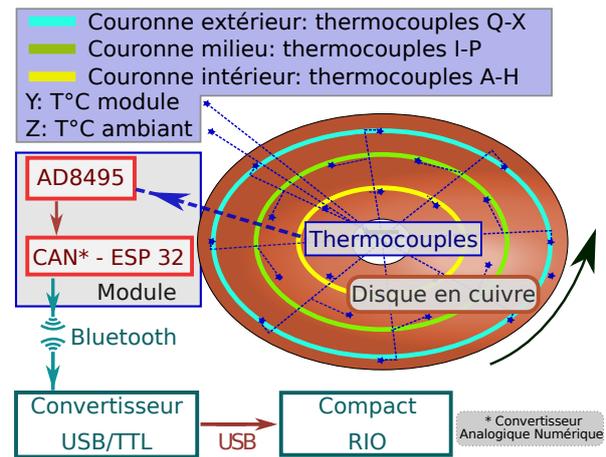


Figure 3 : Schéma synoptique de mesure de température sans fil.

d'amplificateurs d'instrumentation de type AD8495. Les données sont ensuite envoyées par liaison Bluetooth selon le protocole série RS232 au système compact RIO afin d'être exploitées. Deux thermocouples supplémentaires sont connectés au système de mesure afin d'enregistrer la température ambiante proche du contact pion/disque et la température du module de mesure en lui-même.

3.2. Echauffements et usures observés

Hormis l'essai 3 fait avec la nuance B pour un temps de 2,5 h, chaque essai a duré 4 h. La figure 4 représente une courbe d'échauffement caractéristique. Celui-ci est calculé comme étant la différence entre les températures mesurées dans le pion et la température ambiante. L'échauffement augmente sur une courte durée par le frottement mécanique, puis de manière beaucoup plus abrupte par effet Joule et par l'apparition d'arcs électriques lorsqu'il y a circulation du courant électrique. Le régime permanent est observé au bout d'une heure d'essai environ.

Un important gradient peut être observé entre les trois thermocouples implantés dans le pion alors que ceux-ci sont relativement proches les uns des autres. Le pion est maintenu sur les 3/4 de sa hauteur par une pince en cuivre. De par sa conductivité thermique élevée, cet élément en cuivre provoque un puits froid (évacuation de flux) dans les fils électriques d'alimentation. Le gradient de température dans le pion est donc écrasé comme présenté sur la figure 5. Des modélisations en éléments finis (logiciel Comsol ©) sont en cours afin de mesurer et de mieux comprendre le comportement du gradient. Cela permettrait notamment de remonter par calcul à la température de contact.

Le tableau 1 présente les résultats obtenus concernant l'échauffement en régime permanent et l'usure des pions mesurée à l'aide d'une balance de précision (Kern PLS). On observe tout d'abord une certaine répétabilité dans l'usure mesurée sur la nuance A. En revanche, l'usure mesurée sur la nuance B décroît au fil des essais ce qui reste inexpliqué. On peut aussi remarquer que la nuance A s'use plus de deux fois plus vite que la nuance B, alors que les niveaux de températures sont plus élevés dans cette dernière. Ce comportement d'usure se retrouve dans les observations de la SNCF, ce qui donne une cohérence à ces premiers résultats. Au fil des essais, on peut voir une augmentation de l'échauffement. Cela est expliqué par la perte de matière et donc par une distance plus courte entre le point de contact et les thermocouples. Une différence

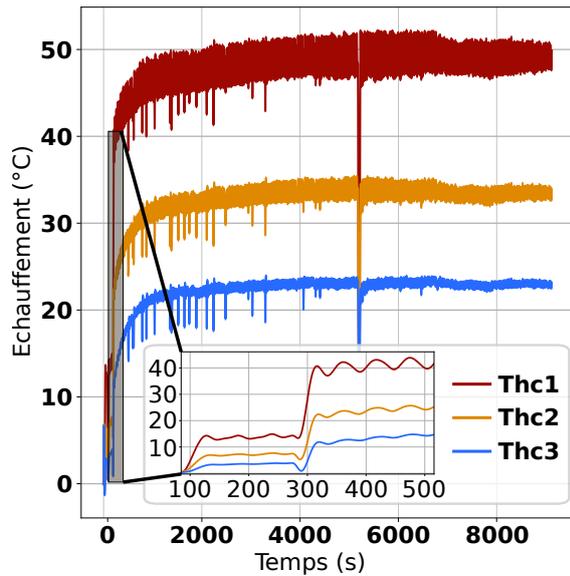


Figure 4 : Courbe d'échauffement caractéristique dans un pion. Mesures faites pendant l'essai 3 de la nuance B ($I=80\text{ A}$, $F=60\text{ N}$, $v=60\text{ km.h}^{-1}$).

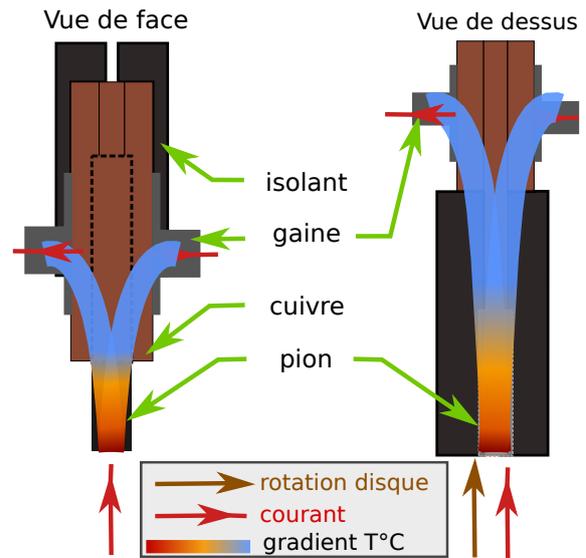


Figure 5 : Schéma du gradient de température observé au sein du pion.

Nuance	Essai	Thc1 (°C)	Thc2 (°C)	Thc3 (°C)	Usure (mg/100km)
A	1	45	31,7	22,3	0,21
	2	47,1	32,7	21,4	0,22
	3	49	33,5	23	0,21
B	1	57	46	37	0,11
	2	55,6	43,6	32	0,088
	3	59,7	47,9	35	0,077

Tableau 1 : Résultats d'échauffements et d'usures pour les trois essais réalisés sur les deux échantillons de nuance de bande de captage.

de 10 °C est observée entre chaque thermocouple d'une nuance à l'autre, ce qui peut être surprenant dans un premier temps puisque la nuance A est plus riche en cuivre et devrait mieux conduire la chaleur. Dans ce contexte, des mesures de diffusivité ont donc été réalisées afin d'essayer d'expliquer ces différences d'échauffement entre la nuance A et la nuance B.

3.3. Diffusivité thermique des nuances

Sur la figure 6 sont tracées les diffusivités thermiques des deux nuances en fonction de la température. Ces mesures ont été obtenues en découpant des échantillons d'1 cm² ayant une épaisseur de 2 à 3 mm. Dans chaque dimension et pour chaque nuance, trois coupes ont été effectuées. Les mesures ont été réalisées sur un LFA1000 *Laser Flash Thermal Constant Analyser*. Cette technique consiste à envoyer une courte impulsion laser sur une face d'un échantillon puis à mesurer la réponse d'échauffement sur l'autre face par un capteur infra-rouge.

Lorsque l'on regarde les diffusivité thermique par direction, on observe une répétabilité des mesures pour la nuances A, ce qui n'est pas le cas pour le nuance B. Cela traduit un agencement

plus homogène de cuivre et de carbone au sein de la nuance A. Dans notre étude, la diffusivité thermique qui nous intéresse particulièrement est celle concernant la dimension Z, normale à la surface de contact. Dans la nuance B, cette diffusivité thermique peut aller jusqu'à $0,10 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ tandis qu'elle ne dépasse pas $0,07 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ dans la nuance A. Cela peut donc expliquer, du moins en partie, la différence d'échauffement observée entre les deux pions.

Il est également intéressant de noter l'important écart de valeurs de diffusivité thermique entre les dimensions Y et Z et celle de la dimension X, nettement plus élevée, pour la nuance A. L'échauffement à la zone de contact pourrait alors être plus important sur la nuance A que sur la nuance B. Hors il a déjà été observé que la température de contact et le taux d'usure étaient liés et augmentaient de la même façon [4, 7].

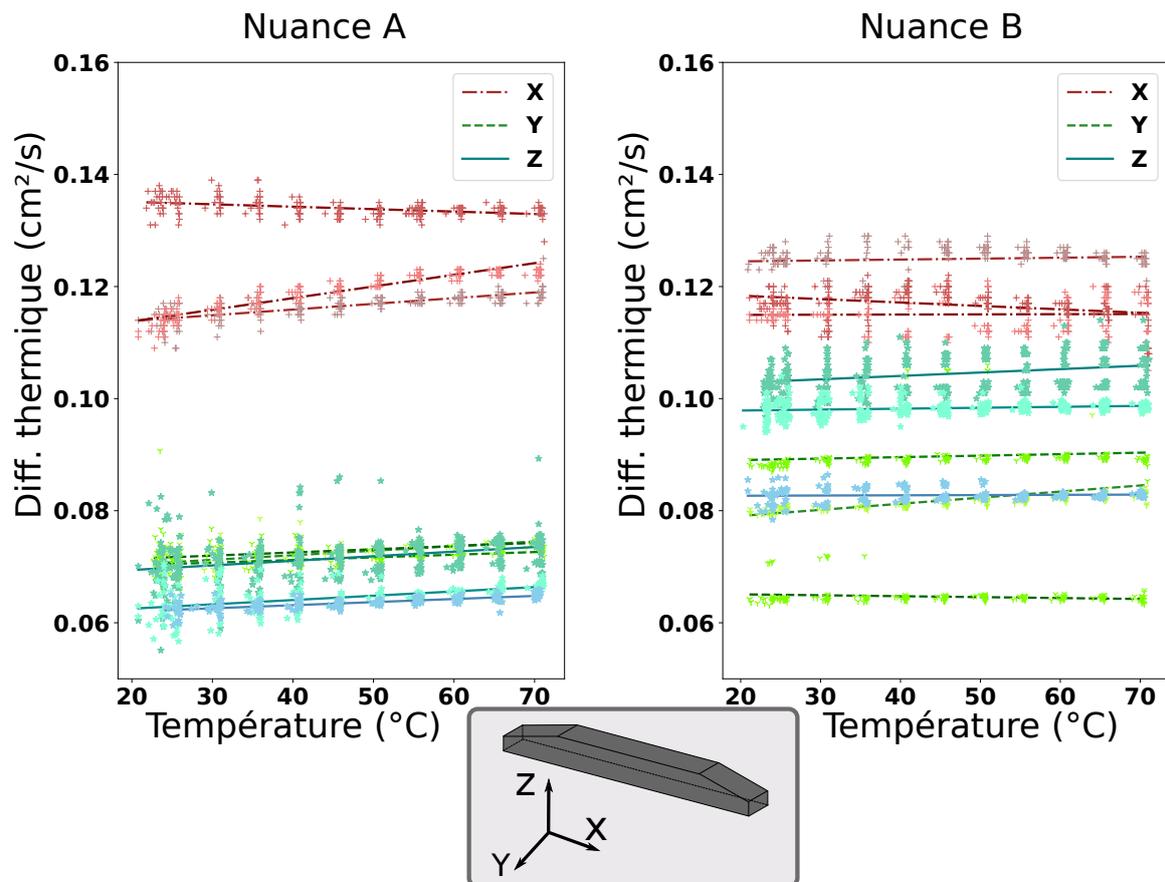


Figure 6 : Mesures de diffusivité thermique à différentes températures et réalisées sur deux nuances de bande de captage et dans les trois dimensions.

Nuance	A			B		
Essai	1	2	3	1	2	3
$\frac{\bar{I}_{mesure}}{I_{consigne}}$	0,81	0,81	0,83	0,88	0,76	0,90

Tableau 2 : *Qualité de captage de courant pendant les six essais.*

3.4. Analyse des essais

Ces essais sont préliminaires et nécessitent d’être analysés et affinés. Néanmoins, ils ont tous été menés dans les mêmes conditions expérimentales, ce qui donne une certaine confiance dans les tendances d’échauffement et d’usure observées sur les deux types de bandes : les valeurs mesurées ne seront peut-être pas les mêmes mais la nuance A semble s’user plus vite que la nuance B.

Les prochains essais devront donc être menés différemment compte-tenu des observations suivantes :

- Le niveau de courant. Durant les essais, le courant est (i) généré par une alimentation de puissance, (ii) acheminé au contact et enfin (iii) récupéré par une charge à réinjection sur le secteur. Cependant, la commande de cette charge est réalisée en tension. Celle-ci étant imposée, une augmentation de la résistance de contact (perte de contact partielle, diminution de la force d’appui etc.) se traduit alors par un courant injecté plus faible. Le rapport entre la moyenne des valeurs mesurées de courant et les valeurs de consigne est alors médiocre (cf. tableau 2), ce qui diminue le phénomène d’échauffement par effet Joule et la fréquence d’apparition et l’amplitude des arcs électriques. On peut notamment relever le mauvais captage de courant de l’essai 2 de la nuance B qui peut expliquer en partie la différence d’échauffement par rapport aux autres essais. De récents essais ont montré qu’en faisant circuler le courant directement avec l’alimentation et sans la charge, le rapport entre courant injecté et courant de consigne devenait proche de 0,99. L’échauffement mesuré au niveau des thermocouples devient aussi plus important. Par exemple, pour la nuance B et avec un courant de 60 A (où 80 A était injecté auparavant), les échauffements mesurés au niveau des thermocouples sont respectivement de 67, 58 et 47 °C.
- La surface du disque en cuivre est généralement couverte d’une patine héritée de plusieurs mois d’utilisation. Il est reconnu en tribologie que cette patine a une influence très importante sur le comportement du contact et des deux matériaux. Il y a notamment une accumulation de différents types de graphites, d’oxyde de cuivre mais aussi de graisses déposées lorsque le disque est manipulé avec les mains. Des tests sans courant menés avec la surface du disque poncée et nettoyée ont mis en évidence un échauffement de plus de 80 °C au niveau du premier thermocouple ainsi qu’une usure rapide du pion (plusieurs mm en moins de 10 km). Un essai de rodage permet d’atténuer ces phénomènes d’échauffement et d’usure avant de commencer un test.
- Les pions sont réutilisés d’un essai à l’autre. Cela modifie d’une part la distance entre les thermocouples et la surface de contact et d’autre part la forme et l’état de cette surface entre deux essais ce qui peut avoir un impact direct sur l’usure. Dans ce travail, on peut notamment observer que les valeurs d’usure faites sur la nuance B diminuent d’un essai à l’autre ce qui peut témoigner d’une forme de rodage. Chaque pion doit donc être rodé de façon identique et n’être utilisé qu’une seule fois.

4. Conclusion

Les résultats présentés dans cet article ont permis de comparer deux nuances de bandes de captage et ont montré un taux d'usure deux fois plus élevé pour la nuance A que pour la nuance B. Parallèlement, les mesures d'échauffement réalisées dans le pion à différentes distances du point de contact sont plus importantes pour la nuance qui s'use le moins. Des mesures de diffusivité thermique ont mis en évidence une différence d'agencement du cuivre et du carbone dans les nuances. Pour la nuance A, l'agencement est homogène tandis qu'il est beaucoup plus hétérogène dans la B. D'autre part la diffusivité thermique de la nuance A dans la direction normale à la surface de contact est beaucoup moins importante que dans les autres directions. Cela peut expliquer les différences d'échauffements mesurées entre les deux matériaux et même témoigner d'un échauffement plus important au point de contact de la nuance A par rapport à la nuance B. Ces résultats doivent être affinés en mettant en place notamment un nouveau protocole de mesure. Une campagne d'essai est donc à venir dans le cadre d'un cahier des charges plus stricte. Plusieurs pistes sont à développer, comme la mise en oeuvre d'une injection de courant plus efficace, le polissage et le nettoyage du disque en cuivre et l'utilisation d'un pion neuf pour chaque test. La phase de rodage devrait alors permettre d'obtenir une patine similaire et des conditions expérimentales identiques en début de chaque essai.

Références

- [1] Théo KZIAZYK, Baucour PHILIPPE, Eric GAVIGNET et Didier CHAMAGNE : Caractérisation expérimentale d'un contact électrique glissant représentatif de la liaison pantographe-caténaire. 2021.
- [2] Thomas BAUSSERON, Philippe BAUCOUR, Raynal GLISES, Sylvain VERSHELDE et Didier CHAMAGNE : Heat modeling of the catenary's contact wire during the electrical power supply of trains in station. *In Volume 8B : Heat Transfer and Thermal Engineering*. American Society of Mechanical Engineers, nov 2014.
- [3] Nicolas DELCEY, Philippe BAUCOUR, Didier CHAMAGNE, Geneviève WIMMER, Giuseppe BUCCA, Nicolas BRUYERE, Odile BOUGER, Gérard AUDITEAU et Thomas BAUSSERON : Analysis of the thermal variations in a moving pantograph strip using an electro-thermal simulation tool and validating by experimental tests. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*, page 095440971987734, oct 2019.
- [4] GX.CHEN, Y.HU, BJ.DONG, HJ.YANG, GQ.GAO, GN.WU, W.ZHANG et ZR.ZHOU : Experimental study on the temperature of the contact strip in sliding electric contact. *Engineering Tribology*, pages 1–8, 2017.
- [5] T. DING, G.X. CHEN, J. BU et 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*, 271(9-10):1629–1636, jul 2011.
- [6] Yanyan ZHANG, Yongzhen ZHANG et Chenfei SONG : Arc discharges of a pure carbon strip affected by dynamic contact force during current-carrying sliding. *Materials*, 11(5): 796, may 2018.
- [7] G.BUCCA, A.COLLINA et E.TANZI : Experimental analysis of the influence of the electrical arc on the wear rate of contact strip and contact wire in a.c. system. *In Advances in Italian Mechanism Science*, 2016.

- [8] Dejan POLJANEC, Mitjan KALIN et Ludvik KUMAR : Influence of contact parameters on the tribological behaviour of various graphite/graphite sliding electrical contacts. *Wear*, 406-407:75–83, jul 2018.
- [9] Z.L. HU, Z.H. CHEN et J.T. XIA : Study on surface film in the wear of electrographite brushes against copper commutators for variable current and humidity. *Wear*, 264(1-2): 11–17, jan 2008.
- [10] A.TUREL, J.SLAVIC et M.BOLTEZAR : Electrical contact resistance and wear of a dynamically excited metal–graphite brush. *Advances in Mechanical Engineering*, 9, 2017.
- [11] T.BAUSSERON : *Etude de l'échauffement de la caténaire lors du captage à l'arrêt : Développement d'un outil informatique*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comte, 2016.

Remerciements : les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à la SNCF, qui finance et prend part aux travaux depuis 2011.