

# Caractérisation expérimentale d'un contact électrique glissant représentatif de la liaison pantographe-caténaire

## Experimental study of a pantographe catenary sliding contact

Théo Kziayk<sup>1</sup>, Philippe Baucour<sup>1\*</sup>, Eric Gavignet<sup>1\*</sup>, Didier Chamagne<sup>1\*</sup>

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

**Résumé** - La liaison pantographe-caténaire est un système à problématiques nombreuses, comme l'usure et l'échauffement de la bande de captage. Un outil de simulation permettant de prédire la distribution de température dans une bande de captage a été récemment élaboré. Pour alimenter celui-ci, un banc d'essai modulable et flexible reproduisant un contact entre un pantographe et une caténaire est réalisé. Dans cet article, la configuration d'un contact pantographe-caténaire sera dans un premier temps décrite. L'originalité et les points forts seront ensuite présentés en expliquant les solutions techniques retenues pour piloter et instrumenter le banc d'essai.

**Mots-clés** : Banc expérimental ; Mesures thermiques ; Instrumentation ; Liaison électrique glissante ; Procédé électrothermique.

**Abstract** - Sliding electrical contact is found to collect current in pantograph-catenary system. Problematics, as the wear and the heating, are observed and lead to failure system and pre-worn materials. Recently, a modeling tool has been created to predict the heat of strip. To get the right entries parameters a bench test representative of a catenary pantograph link has been built. In this article, the configuration of a pantograph catenary sliding electrical contact is investigated. The novelty are described by explaining the technical tools used to instrument and drive the bench test.

**Keywords**: Experimental setup; Thermal measurement; Instrumentation; Sliding electrical contact; Thermoelectrical device.

## 1. Introduction

Le contact électrique glissant entre une bande de captage et un fil caténaire est un sujet complexe. Dû aux nombreux phénomènes physiques mis en jeu, la caractérisation du vieillissement des matériaux d'une liaison pantographe-caténaire (LPC) et l'anticipation des travaux de maintenance ou la prévention de casse sont difficiles à prendre en compte. Des outils de simulations ont été développés pour étudier une LPC lorsque le train est à l'arrêt [1] ou en mouvement [2]. Ces travaux ont pointé l'importance de la thermique du contact. Différents bancs d'essai ont également été construits, pour par exemple caractériser le contact électrique [3], comprendre l'influence des arcs électriques [4] ou étudier la surface des matériaux [5]. Cet article présente l'état d'avancement dans le design et la réalisation d'un nouveau banc d'essai représentatif d'une LPC. Il découle de deux thèses et d'un partenariat entre le laboratoire FEMTO-ST et la SNCF. Ce banc d'essai a pour but de mieux appréhender l'usure de la bande de captage et son lien avec l'échauffement thermique en surface. Dans un premier temps, la configuration d'une liaison pantographe caténaire est expliquée. L'ensemble du banc d'essai est ensuite décrit et sa représentativité critiquée. Les perspectives sont enfin abordées suivies d'une conclusion et de perspectives à court et moyen termes.

## 2. Liaison pantographe caténaire

La caténaire désigne l'ensemble des câbles porteurs et du fil de contact porté. Ce dernier est destiné à alimenter le train en étant en contact avec la bande de captage. Cette bande de captage, le plus souvent par paire, est au sommet du pantographe. Comme le montre la figure 1, le pantographe est un dispositif articulé permettant d'assurer une force de contact entre la bande de captage et le fil conducteur ( $\approx 90$  N). La caténaire est désaxée par rapport à la voie ferrée comme indiqué sur la figure 2. Ainsi, la zone de contact entre le fil et la bande se déplace donc latéralement par rapport au pantographe. Ce mouvement permet de réduire et répartir l'usure tribologique de la bande de captage.

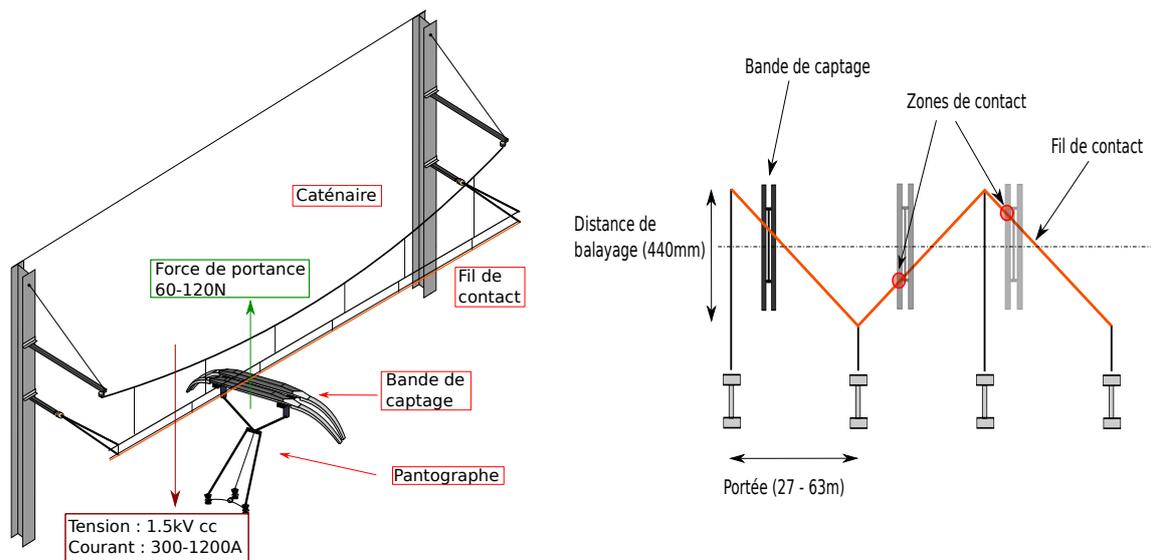


Figure 1 : Schéma de la liaison caténaire-pantographe, adapté de [2]. Figure 2 : Désaxement du fil de contact par rapport à la bande de captage, adapté de [2].

Pour bien appréhender cette liaison, plusieurs données sont à prendre en compte :

- La distance de portée : le plus souvent 54 m
- La distance de balayage : 440 mm ou 220 mm dans un tunnel
- La vitesse du train :  $140 \text{ km.h}^{-1}$  max. pour un TER
- La force de contact entre le fil conducteur et la bande de captage : 60-120 N
- Le type d'alimentation utilisée. Elle peut être de type alternative ou continue. La tension continue, qui génère le plus de problèmes, est généralement de 1,5 kV pour des courants pouvant atteindre 700 A par bande de captage.
- Les facteurs environnementaux comme la température ambiante ou l'humidité de l'air.

Les facteurs clés influençant l'échauffement et l'usure de la bande de captage sont :

**Le matériau :** On trouve principalement du cuivre ou cuivre allié pour le fil de contact, du carbone ou un carbone imprégné de cuivre pour le pantographe. Le carbone a des propriétés d'auto-lubrification évitant une usure mécanique importante [6]. Cependant, le carbone a une résistance électrique plus importante que le cuivre, conduisant à son échauffement par effet Joule. Les bandes de captage imprégnées en cuivre résolvent partiellement cette problématique [7]. De plus, le carbone est un matériau anisotropique qui présente des caractéristiques physiques différentes selon les trois axes spatiaux [8]. De nombreux types de carbone sont utilisés

et montrent des comportements différents [9].

**Le courant** induit un échauffement par effet Joule [10] et par production d'arcs électriques [11]. Différents comportements ont été observés en fonction du matériau étudié et du banc d'essai utilisé [7, 9]. Il a été mis en évidence que les arcs électriques créent des points chauds, entraînant différents types d'usure et désignant les arcs électriques comme le principal facteur d'usure [10, 12]. Enfin, le coefficient de frottement diminue lorsque le courant augmente [13].

**La vitesse du train** a pour effet de refroidir par convection le pantographe. Cependant, le fait d'augmenter la vitesse a également pour conséquence d'accroître les vibrations et les pertes de contact, conduisant à une augmentation de la fréquence et de l'amplitude des arcs électriques [4] et à une accélération de l'usure [14].

**La force de contact** évite la perte de contact entre le fil de contact et la bande de captage. Augmenter la pression exercée par le pantographe diminue la fréquence d'apparition des arcs électriques [10] et l'usure de la bande [15].

**L'environnement** représente un ensemble de propriétés difficiles à contrôler et aux influences difficilement caractérisables. Parmi ces propriétés nous pouvons citer le rayonnement solaire, la température ambiante, le gel ou l'humidité. Ces propriétés ont un impact sur d'autres paramètres ou phénomènes physiques comme l'oxydation, la résistance électrique de contact ou le taux d'arcs électriques observé.

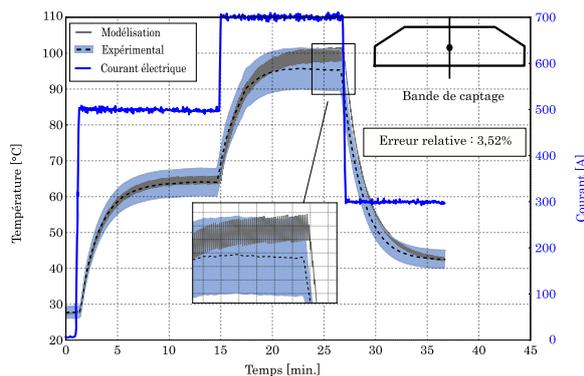


Figure 3 : Profil de température au centre de la bande de captage [2].

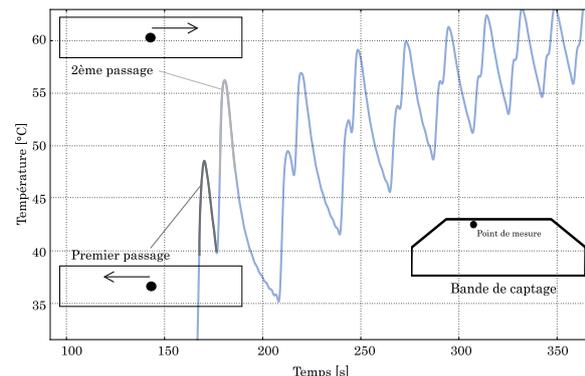


Figure 4 : Effet du point de rebroussement sur le profil de température [2].

### 3. Présentation du banc d'essai

Le banc d'essai présenté dans l'article vient en appui d'un outil numérique de simulation appelé MONICA (MOdélisation Numérique de l'Interface CAténaire). L'outil MONICA permet d'observer et de prédire l'évolution thermique d'une bande de captage en mouvement [2] (voir figures 3 et 4).

Ce banc d'essai permet d'une part de compléter l'outil MONICA en estimant l'usure et la variation des paramètres thermophysiques dans le temps, et d'autre part de mieux comprendre le contact électrique glissant dans une LPC. Par ailleurs, il permet de caractériser rapidement et précisément de nouveaux matériaux ou d'évaluer des matériaux déjà existants. La figure 5 présente le synoptique du banc d'essai.

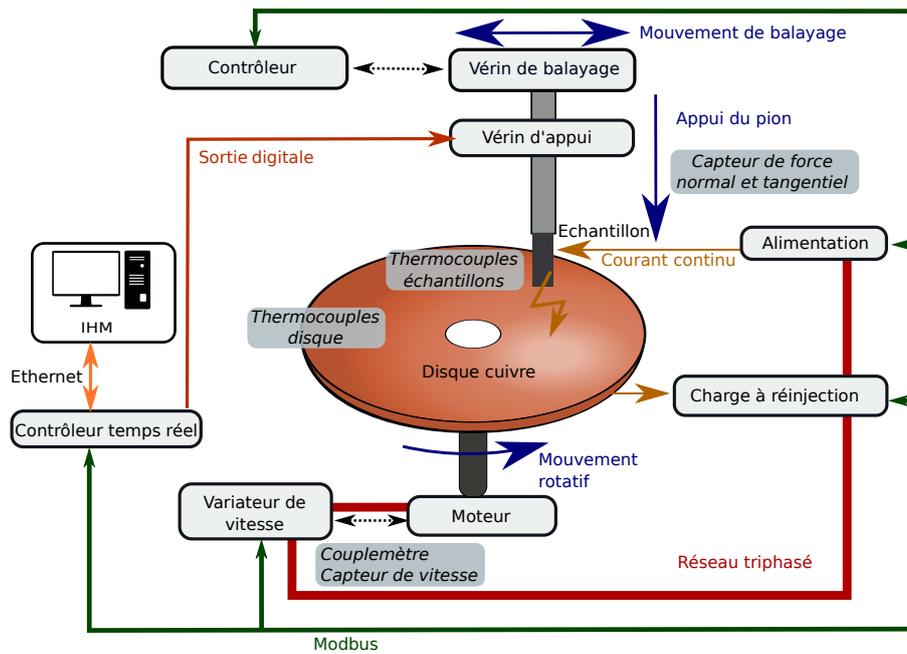


Figure 5 : Synoptique du banc d'essai. En rouge le réseau triphasé, en jaune la circulation du courant continu, en bleu les mouvements observés et en vert les raccordements par connexions ModBus.

Pour assurer le bon fonctionnement du banc et être le plus représentatif possible de la LPC, des capteurs ont été mis en place afin de commander convenablement les actionneurs listés ci-dessous. 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. Ce système est équipé de différents modules d'entrées et sorties analogiques et numériques et d'un module de communication série de type RS485. Différents éléments ont été mis en place pour représenter au mieux la liaison glissante entre la bande de captage et le fil de contact :

**Force de contact :** un pion, échantillon découpé dans une bande de captage, représente celle-ci. Ce pion est mis en contact avec le disque en cuivre représentant le fil de contact grâce à un vérin. Pour respecter le sens de circulation du courant dans l'échantillon de la bande de captage, la face en contact avec le disque en cuivre est celle normalement en contact avec le fil de contact dans une LPC. Un capteur de force traction-compression est installé entre le pion en carbone et le vérin de pression. Son étendue de mesure est de 250 N et sa sortie est lue par voie analogique. Le vérin de pression est commandé en tout ou rien et permet d'imposer la force de contact au début d'un essai. Un ressort de compression modifiable ayant une raideur connue est mis dans un tube entre le vérin de pression et le pion en carbone. Il permet d'approcher la raideur du pantographe, d'encaisser les vibrations du banc et d'éviter la mise en résonance du pion. La force de contact  $F_N$  est mesurée tout au long de l'essai. Un deuxième capteur de pression permet de mesurer la force tangentielle  $F_T$ . Le coefficient de frottement  $C_f$  est ainsi calculé :

$$C_f = \frac{F_N}{F_T} \quad (1)$$

**La vitesse linéaire**, pouvant atteindre  $100 \text{ km.h}^{-1}$ , est atteinte par rotation du disque grâce à un moteur asynchrone de 9,4 kW commandé à l'aide d'un variateur de vitesse. La commande se fait grâce à la communication de type ModBus RS485 entre le Compact RIO et le variateur de vitesse ATV320 pilotant le moteur asynchrone. La vitesse angulaire et le couple développé au niveau du moteur sont mesurés par un couplemètre. Une boucle PID permet d'obtenir une

vitesse linéaire constante en modifiant la vitesse de rotation du disque en fonction de la position du pion . Cette vitesse suit une loi de variation dont la courbe est présentée sur la figure 6. Les premiers essais ont montré que, pour une vitesse de  $30 \text{ km.h}^{-1}$ , l'erreur moyenne entre la consigne et la vitesse mesurée est de 3%.

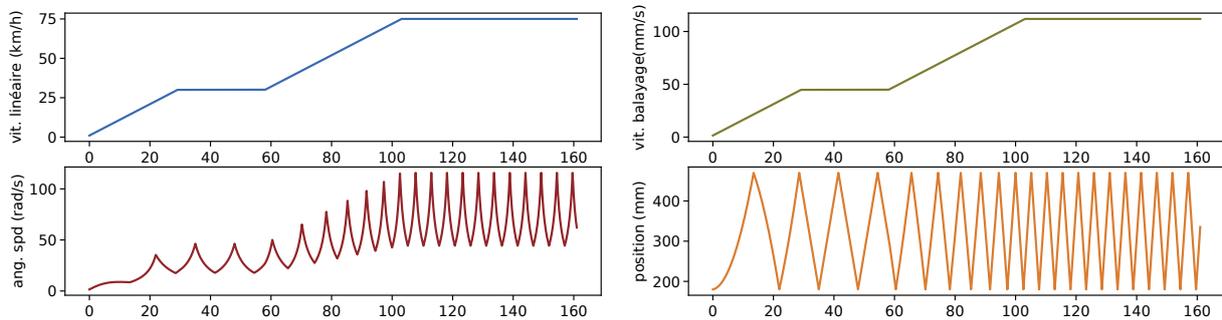


Figure 6 : Asservissement du banc d'essai : En bleu la vitesse linéaire désirée, en rouge la vitesse angulaire, en jaune la vitesse de balayage et en vert la position du pion sur le disque.

**Le mouvement de balayage** est réalisé par un vérin de translation. Un contrôleur de position PCON-CB, commandé également par protocole ModBUS RS485, pilote un vérin de translation afin d'assurer le mouvement de balayage. 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. Le rayon interne du disque est de 125 mm tandis que le rayon externe est de 500 mm. L'amplitude de balayage maximale est de 300 mm en prenant des marges de sécurité et sa vitesse varie de 10 à  $80 \text{ mm.s}^{-1}$ . La position et la vitesse transversale du pion suivent une loi de variation simulée sur la figure 6. Cette loi permet d'être représentatif du mouvement de balayage triangulaire caténaire-pantographe représenté par la figure 2.

**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 pour une tension variable de 0 à 100 V. 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 plus importante ( $10 \text{ cm}^2$ ) sont mis en contact avec la périphérie du disque en cuivre. Une surface de contact plus importante permet de diminuer la résistance et l'échauffement électrique. 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 figure 7 représente ce système.

Lors des premiers tests, une différence de courant a été observée au niveau des courants traversant les deux échantillons. En effet, plusieurs essais ont mis en évidence, pour un courant injecté de 2 A, une répartition de 1.2 A sur une bande et de 0.8 A sur l'autre bande. Cette différence peut provenir d'une différence de résistance électrique de contact ou, moins probablement, du non respect de l'équidistance. En effet, l'ordre de grandeur de la résistance du disque en cuivre est de  $10^{-9} \Omega$  alors que la résistance de contact carbone-cuivre est de  $10^{-4} \Omega$ .

**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  $1 \text{ cm}^2$ , surface de contact mesurée dans les travaux d'une thèse menés par T. Bausseron [16]. Plus précisément, la surface de contact peut être approximée par un rectangle de 0,5 cm de largeur et 2 cm de longueur.

**Fil de contact thermiquement neuf** : pour que le cuivre en contact avec le pion soit toujours à température ambiante à l'image d'une LPC réelle, un système de refroidissement permet de

refroidir le disque.

Cette représentativité a ses limites. D'une part les conditions environnementales ne sont pas prises en compte, notamment le gel, le soleil, le vent ou la chaleur ambiante. D'autre part les vibrations engendrées sur le fil de contact lors du passage du train ne sont pas représentées. Ces vibrations sont responsables d'arcs électriques échauffant localement le fil de contact et détériorant plus rapidement la bande de captage. Enfin, le banc d'essai a sa structure propre ayant des fréquences de vibration et un comportement mécanique différent d'une liaison caténaire pantographe. L'impact de ces défauts de représentativité sont encore difficiles à évaluer, c'est pourquoi l'évolution du banc d'essai pour en corriger certains reste envisageable.

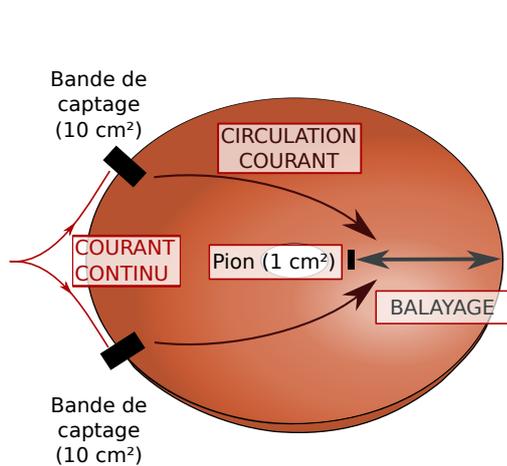


Figure 7 : Schéma de circulation du courant et d'alimentation de liaison disque-pion

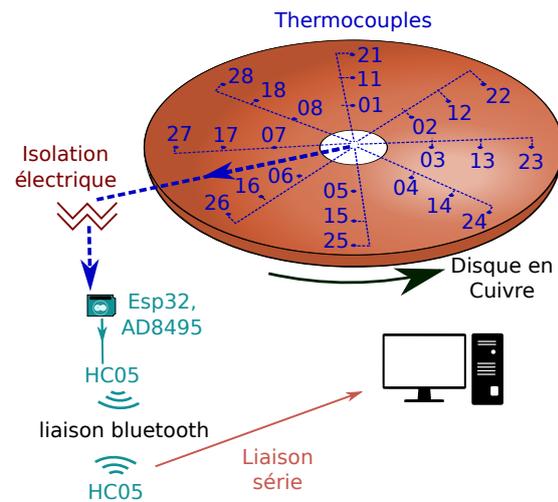


Figure 8 : Schéma du système de mesure de température sans fil sur un disque en cuivre sous tension

## 4. Évolution du banc et campagne d'essai

### 4.1. Perspective d'évolution

**Essai à courant fort et mesure de résistance électrique.** Via l'effet Joule, la résistance électrique de contact joue un rôle important dans l'échauffement du contact. C'est donc une grandeur majeure à déterminer. Une technique, comme la méthode 4 points, doit donc être mise en place pour mesurer précisément la résistance électrique de contact pion-disque sans prendre en compte les deux résistances de contact des bandes de captage. De plus, des capteurs de courant de type LEM seront utilisés pour observer plus précisément la répartition du courant dans les deux bandes de captage avec des courants forts.

**Mesure de température sans fil et isolée.** Un système embarqué a été conçu et est en phase de test afin de mesurer la température globale du disque en cuivre à partir de thermocouples de type K de diamètre 200  $\mu\text{m}$ . Le disque étant en mouvement, une liaison sans fils entre le PC et le disque a été développée. Comme le montre la figure 8, cette chaîne est constituée d'un module de conditionnement pour thermocouple intégrant une amplification et une compensation de soudure froide (AD 8495), de microcontrôleurs (ESP 32) réalisant l'acquisition des valeurs de température et d'un module de liaison sans fil transmettant les données au protocole RS 232

(HC05).

Une caractérisation en température de l'échantillon de carbone est également envisagée à l'aide de trois thermocouples (type K, diamètre 200  $\mu\text{m}$ ) insérés à l'intérieur. Contrairement au système de mesure sur le disque en cuivre, les thermocouples de l'échantillon de carbone sont fixes et connectés au système de commande et de mesure (Compact RIO) par l'intermédiaire d'un module de conditionnement et d'isolement aux hautes tensions.

## 4.2. Campagne d'essai

Des essais sous différents courants, forces, vitesses et en utilisant différents types de matériaux seront menés très prochainement. Pour chaque essai, l'usure est mesurée par la différence de masse de l'échantillon avant et après essai et par le nombre de kilomètres parcouru par le pion. Cela permettra de mieux identifier les facteurs d'usure et d'échauffement d'une bande de captage. L'usure et l'échauffement du contact seront étudiés afin d'établir une corrélation entre ces deux phénomènes. Ces résultats seront aussi comparés à des observations d'usure faite par la SNCF en conditions réelles.

## 5. Conclusion

Dans cette article, la liaison glissante électrifiée pantographe-caténaire a été décrite en mettant en évidence les facteurs clés impactant l'usure et l'échauffement de la bande de captage. Ces facteurs sont le courant, la force de contact, la vitesse, le matériau de la bande de captage et la vitesse du train. Un banc d'essai a été présenté en décrivant sa représentativité par rapport au contact glissant pantographe-caténaire. Cette représentativité peut être décrite avec une vitesse linéaire constante, un mouvement de balayage, une force de contact, un courant électrique, une surface de contact similaire et un sens respecté au niveau de l'anisotropie du carbone.

## Références

- [1] Thomas BAUSSERON, Philippe BAUCOUR, Raynal GLISES, Sylvain VERSCHELDE 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.
- [2] 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.
- [3] W.WANG, A.DONG, G.WU, G.GAO, L.ZHOU, B.WANG, Y.CUI, D.LIU, D.LI et T.LI : Study on characterization of electrical contact between pantograph and catenary. *In IEEE*, 2011.
- [4] 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.

- [5] T.DING, G.X.CHEN, X.WANG, M.H.ZHU, W.H.ZHANG et W.X.ZHOU : Friction and wear behavior of pure carbon strip sliding against copper contact wire under ac passage at high speeds. *Tribology International*, 44:437–444, 2011.
- [6] Da Hai HE et Rafael MANORY : A novel electrical contact material with improved self-lubrication for railway current collectors. *Wear*, 249(7):626–636, jul 2001.
- [7] M. GRANDIN et U. WIKLUND : Wear phenomena and tribofilm formation of copper/copper-graphite sliding electrical contact materials. *Wear*, 398-399:227–235, mar 2018.
- [8] Faisal NAZEER, Zhuang MA, Lihong GAO, Fuchi WANG, Muhammad Abubaker KHAN et Abdul MALIK : Thermal and mechanical properties of copper-graphite and copper-reduced graphene oxide composites. *Composites Part B : Engineering*, 163:77–85, apr 2019.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Tao DING, Wenjing XUAN, Qiudong HE, Hao WU et Wei XIONG : Study on friction and wear properties of pantograph strip/copper contact wire for high-speed train. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 8(1):125–128, apr 2014.
- [12] Guangning WU, Wenfu WEI, Guoqiang GAO, Jie WU et Yue ZHOU : Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph–catenary system. *Journal of Modern Transportation*, 24(2):132–138, apr 2016.
- [13] T. DING, G.X. CHEN, Y.M. LI, H.J. YANG et Q.D. HE : Arc erosive characteristics of a carbon strip sliding against a copper contact wire in a high-speed electrified railway. *Tribology International*, 79:8–15, nov 2014.
- [14] Guangning WU, Guoqiang GAO, Wenfu WEI et Zefeng YANG : Friction and wear of pantograph and catenary. In *The Electrical Contact of the Pantograph-Catenary System*, pages 71–107. Springer Singapore, 2019.
- [15] Guangxiong CHEN, Hongjuan YANG, Weihua ZHANG, Yuting LU, Saidan ZHANG et Zhongrong ZHOU : Effect of the strip inclination angle on the friction and wear behavior of contact strip against contact wire with electric current. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J : Journal of Engineering Tribology*, 227(12):1406–1417, aug 2013.
- [16] 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.