

Mesure thermique en freinage ferroviaire : couplage de mesures par caméra IR et pyrométrie bichromatique

Jean THEVENET^{1,2*}, Haytam KASEM³, Monica SIROUX^{1,2}, Philippe DUFRENOY³, Bernard DESMET^{1,2}

¹Univ Lille Nord de France, F-59000, France

²UVHC, TEMPO/DF2T, F-59313 Valenciennes, France

³Laboratoire de Mécanique de Lille (LML UMR CNRS 8107) Avenue Paul Langevin, 59655 Villeneuve D'Ascq Cedex, France

* (auteur correspondant : jean.thevenet@univ-valenciennes.fr)

Résumé – Le travail présenté porte sur l'utilisation conjointe d'une caméra infrarouge et d'un pyromètre bichromatique pour effectuer des mesures de température de surface d'un disque de frein au cours d'un freinage d'arrêt. Le pyromètre bichromatique permet de mesurer simultanément la température et l'émissivité de la surface du disque. L'émissivité mesurée permet de corriger les images issues de la caméra. Les évolutions de températures ainsi obtenues sont corrélées avec les évolutions des efforts normal et tangentiel mesurées par un capteur piézoélectrique dans le contact.

Nomenclature

A_{λ_i}	constante d'amplification, $V.W^{-1}.m^3.sr$	<i>Symboles grecs</i>	
C_1	1 ^{ère} constante, $W.m^2.sr^{-1}$	ε	émissivité
C_2	2 ^{ème} constante, $m.K$	λ	longueur d'onde, m
L	luminance spectrale, $W.m^{-3}.sr^{-1}$	μ	coefficient de friction
S	signal du détecteur, V	<i>Indices et exposants</i>	
T	température, K	1	capteur 1 du pyromètre bichromatique
t	temps, s	2	capteur 2 du pyromètre bichromatique

1. Introduction

Deux catégories de méthodes sont habituellement utilisées pour la mesure de température en situation de freinage. Une technique directe par contact utilise des thermocouples (thermocouples frottants ou incorporés) [1]. La deuxième méthode est la mesure sans contact (aussi appelée mesure radiométrique) consistant à mesurer la température de surface par thermographie [2] et pyrométrie [3]. La plus grande difficulté des mesures radiométriques en freinage est la connaissance de l'émissivité du disque de frein, qui varie pendant le freinage avec l'état de surface et la température [4].

Un pyromètre bichromatique rapide à fibre optique a été développé au laboratoire. Ce pyromètre a été testé sur le banc de freinage du Centre Technologique en Transports Terrestres de Valenciennes, permettant ainsi l'obtention de la température de surface et de l'émissivité en régime transitoire sur un disque de frein [5].

Cet article est consacré à une mesure thermique en freinage ferroviaire réalisée en utilisant simultanément une caméra IR et un pyromètre bichromatique. La mesure d'émissivité effectuée avec le pyromètre bichromatique permet ainsi de corriger les images obtenues avec la caméra IR. Une corrélation entre les variations de température et les variations des efforts normaux et tangentiels est également présentée.

2. Dispositif expérimental

2.1. Tribomètre

Les essais de freinage ont été réalisés sur un tribomètre de freinage de type pion-disque développé au Laboratoire de Mécanique de Lille. Ce tribomètre permet de reproduire à échelle réduite les conditions de chargement et les niveaux thermiques atteints à l'échelle 1 [6].

La figure 1 présente un schéma de principe du tribomètre. Un moteur électrique permet d'entraîner le disque en rotation jusqu'à une vitesse de 4000 tr.min⁻¹ (c'est à dire une vitesse de glissement maximale de 70 m.s⁻¹ au rayon maximal de 160 mm). Le tribomètre permet de simuler une inertie de 3,35 kg.m². Le vérin hydraulique à l'arrière du patin permet de soumettre un effort de 1200 N. L'instrumentation du tribomètre est composée d'un tachymètre pour la mesure de la vitesse de rotation et d'un capteur 3D piézoélectrique pour la mesure de l'effort de freinage permettant le calcul du coefficient de friction μ .

2.2. Mesures de températures

La température de surface du disque est mesurée par :

- une caméra infrarouge CEDIP (temps d'intégration 54 μ s, fréquence d'acquisition 50 images/sec) utilisant un objectif de focale 100 mm, placée à 1 m de la surface de frottement et visant la partie en bas à droite du disque (figure 2) en considérant une émissivité uniforme égale à 1
- un pyromètre bichromatique rapide (bande passante de la chaîne de mesure 0-50 kHz) à fibre optique placée sur le rayon de friction moyen (100 mm) à 90° du centre du contact pion-disque dans le coin en haut à droite de l'image de la caméra IR (figure 2). L'extrémité de la fibre optique est maintenue en utilisant une fixation en plastique noire afin d'éviter les réflexions parasites sur la surface du disque. La distance entre la fibre et la surface de frottement du disque est de 5 mm donnant un diamètre de spot de 2,4 mm.

Le pyromètre bichromatique a été développé spécifiquement pour la mesure de température en freinage. Il est composé de deux détecteurs HgCdTe équipés de deux filtres IR passe-bandes centrés sur $\lambda_1 = 2,55 \mu\text{m}$ et $\lambda_2 = 3,9 \mu\text{m}$, choisis pour limiter l'erreur due à l'hypothèse de corps gris [5], d'une fibre optique en verre fluoré et d'un système d'acquisition et de conditionnement des données [5]. Le signal fourni par chaque détecteur est proportionnel à la luminance issue de la surface du disque pour chaque longueur d'onde. Les constantes d'amplifications ont été déterminées lors de l'étalonnage du pyromètre [5] :

$$S_{\lambda_i} = A_{\lambda_i} L_{\lambda_i} = A_{\lambda_i} \varepsilon_{\lambda_i} C_1 \lambda_i^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_i T}\right) \quad \text{avec } i = 1 \text{ ou } 2 \quad (1)$$

La température de surface du disque est déterminée à partir du rapport des signaux de sorties S_{λ_1} et S_{λ_2} , en faisant l'hypothèse d'un comportement de corps gris pour la surface du disque :

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \left(\frac{S_{\lambda_1} A_{\lambda_2}}{S_{\lambda_2} A_{\lambda_1}} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 \right)} \quad (2)$$

L'émissivité de surface du disque peut être obtenue à partir de la formule suivante :

$$\varepsilon_{\lambda_i} = \frac{\frac{S_{\lambda_i}}{A_{\lambda_i}}}{C_1 \lambda_i^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_i T}\right)} \quad (3)$$

Une pastille réfléchissante a été placée sur le disque, dans une zone hors frottement, afin d'utiliser un dispositif top-tour permettant de synchroniser les mesures effectuées par les deux dispositifs radiométriques utilisés (figure 2). Le premier passage de la pastille devant le top-tour déclenche l'acquisition, une image caméra est enregistrée à chaque passage de la pastille.

2.3. Procédure expérimentale

Les essais sont réalisés sur un couple de matériaux ferroviaire : acier XC 48 pour le disque et matériau composite Flertex 671 pour le patin.

Pour chauffer la surface du disque, plusieurs freinages ont été réalisés pour accumuler de la chaleur. L'acquisition est déclenchée quand la surface du disque atteint une température de l'ordre de 220°C. Les paramètres expérimentaux du freinage d'arrêt réalisé sont regroupés dans le tableau 1.

Vitesse de rotation initiale [tr.min ⁻¹]	Pression de contact [MPa]	Inertie [kg.m ²]	Température de surface initiale [°C]
1500	0,6	8	220

Tableau 1 : Paramètres expérimentaux

Les paramètres expérimentaux sont choisis pour atteindre un niveau d'énergie totale de l'ordre de 100 kJ correspondant à celui dissipé au niveau de chaque disque en similitude avec un freinage d'arrêt ferroviaire à échelle réelle avec une vitesse initiale de 80 km.h⁻¹.

3. Résultats et discussion

3.1. Comportement thermique

L'observation des images de la caméra IR met en évidence l'existence de deux phases durant le freinage d'arrêt. Dans un premier temps, au début du freinage, le contact est localisé sur le rayon extérieur de la piste de frottement avec la formation d'une bande chaude entraînant un gradient thermique radial (figure 3.a). Dans un second temps, la bande chaude migre de l'extérieur vers le rayon intérieur. Cette migration est associée à une augmentation de la température de la bande chaude (figure 3.b et 3.c). Ce phénomène est observé systématiquement pendant les freinages et a déjà été rapporté dans d'autres articles [7, 8].

La température et l'émissivité de la surface du disque ont été mesurées sur le rayon moyen de la piste de frottement avec le pyromètre bichromatique. Les figures 4 et 5 représentent l'évolution de la température et de l'émissivité du disque mesurées par pyrométrie bichromatique. L'augmentation de la température à environ t = 13 s correspond au passage de la bande chaude au rayon moyen. On peut également noter la présence de fluctuations importantes de la température d'environ 110°C à la fréquence de rotation du disque et correspondant à la distribution circumférentielle des températures de la piste de frottement. L'émissivité est d'environ 0,55 au début du freinage. Au moment du passage de la bande

chaude l'émissivité décroît, puis augmente à nouveau pour se stabiliser à nouveau à 0,55 en moyenne. Comme pour la température on observe des fluctuations de l'émissivité d'environ 0,1. La diminution de l'émissivité au moment du passage de la bande chaude est liée à la variation physico-chimique de la surface du disque. En effet, le déplacement la bande chaude vers le rayon moyen, conduit à une élimination des enduits d'oxyde par frottement et une diminution de l'émissivité du disque.

La mesure d'émissivité réalisée avec le pyromètre bichromatique permet de corriger les images de la caméra. Les acquisitions des images de la caméra sont déclenchées par la pastille réfléchissante collée sur le disque. Ainsi la caméra enregistre une image à chaque tour de disque dans la même position angulaire avec un temps d'intégration de 54 μ s. La distribution angulaire de la température au rayon moyen est convertie dans le domaine temporel compte tenu de la vitesse de rotation du disque de façon à permettre la comparaison avec la température mesurée par le pyromètre bichromatique. La figure 6 présente ainsi les profils obtenus avec la caméra pour les deux valeurs d'émissivité et le profil mesuré par le pyromètre bichromatique. On remarque une correspondance entre le profil obtenu par pyrométrie bichromatique et le profil corrigé de la caméra.

3.2. Corrélation entre le comportement tribologique et la température de surface

Les fluctuations de la température de surface ont été corrélées avec les variations instantanées des efforts tangentiel et normal mesurés dans le contact par un capteur piézoélectrique pendant l'apparition de la bande chaude au rayon moyen de friction (figure 7). Prenant en compte le fait que les efforts sont mesurés dans le contact alors que la température est mesurée à 90° de la zone de contact. Cette déviation est ajustée en avançant le signal de température de 18 ms. On peut observer que les variations de température sont corrélées avec les variations des efforts normal et tangentiel.

4. Conclusion

Les variations de température de surface d'un disque de frein pendant un freinage d'arrêt ont été observées à l'aide d'un pyromètre bichromatique et d'une caméra IR. Les essais de freinage d'arrêt ont été réalisés sur un tribomètre de type pion-disque. L'émissivité de la surface du disque a été mesurée à l'aide du pyromètre bichromatique. Les observations réalisées par ces deux instruments ont mis en évidence l'apparition d'une bande chaude et sa migration vers l'intérieur du disque au cours du freinage. L'apparition de la bande chaude a pu être associée à une augmentation de la température et une diminution de l'émissivité due à l'élimination des enduits d'oxyde dans le contact. Les mesures d'émissivité obtenues par pyrométrie bichromatique ont permis de corriger les images issues de la caméra IR et les deux dispositifs conduisent alors à des mesures en bon accord. Une corrélation a pu être mise en évidence entre les mesures de température et les variations de l'effort tangentiel et l'effort normal, permettant de corréler les variations de températures à l'évolution des conditions de contact.

Références

- [1] J. Denape, N. Laraqi, Aspect thermique du frottement : mise en évidence expérimentale et éléments de modélisation, *Mécanique & Industries*. 1 (2000), 563-579.
- [2] M. Siroux, S. Harmand, B. Desmet, Experimental study using infrared thermography on the convective heat transfer of a TGV brake disc in the actual environment, *Optical Engineering*. 41 (2002), 1558-1564.

- [3] F. Cabannes, Pyrométrie optique Traité : Mesures et contrôle, *Techniques de l'ingénieur*. R 2610 (1990).
- [4] J. Thevenet, M. Siroux, B. Desmet, Brake disc surface temperature measurement using a fiber optic two-color pyrometer, *9th International Conference on Quantitative Infrared Thermography QIRT 2008* (Cracovie, Juillet 2008), 87-94.
- [5] J. Thevenet, Développement d'une métrologie thermique des contacts glissants en freinage, *Thèse de doctorat*, Université de Valenciennes (2009)
- [6] Y. Desplanques, G. Degallaix, R. Copin, Y. Berthier, A tribometer for the study of materials under railway braking conditions, *Tribology Research: From Model Experiment to Industrial Problem* (2001), 381-391.
- [7] A. E. Anderson, R. A. Knapp, Hot spotting in automotive friction systems, *Wear*. 135 (1990), 319-337.
- [8] S. Panier, P. Dufrénoy, D. Weichert, An experimental investigation of hot spots in railway disc brakes, *Wear*. 256 (2004), 764-773.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier la Communauté Européenne et la région Nord-Pas de Calais pour le soutien financier donné à cette étude.

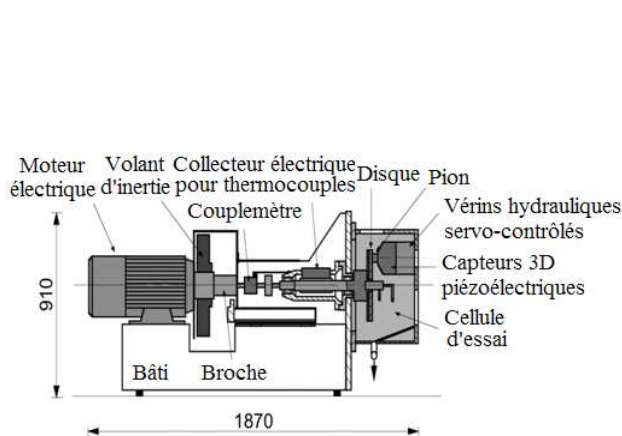


Figure 1 : Schéma récapitulatif du tribomètre

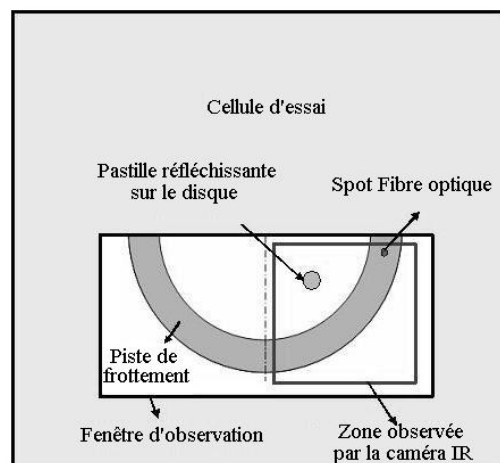


Figure 2 : Représentation schématique de la zone observée par la caméra IR et le pyromètre bichromatique à fibre optique

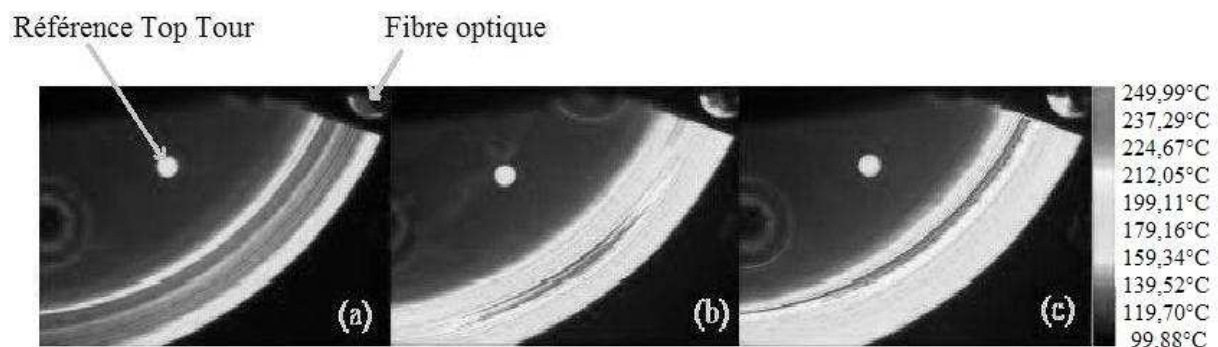


Figure 3 : Images thermographiques (a) formation de la bande chaude, (b et c) migration de la bande chaude vers l'intérieur du disque

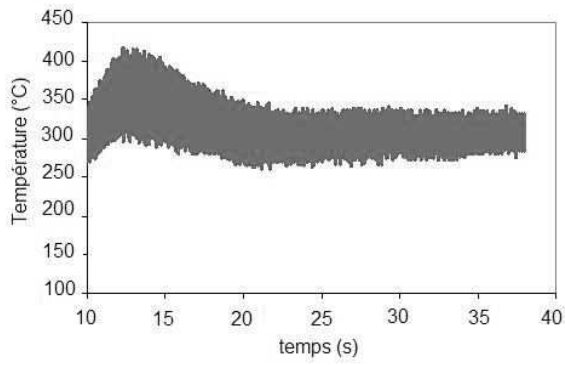


Figure 4 : Evolution de la température de surface obtenue par pyrométrie bichromatique

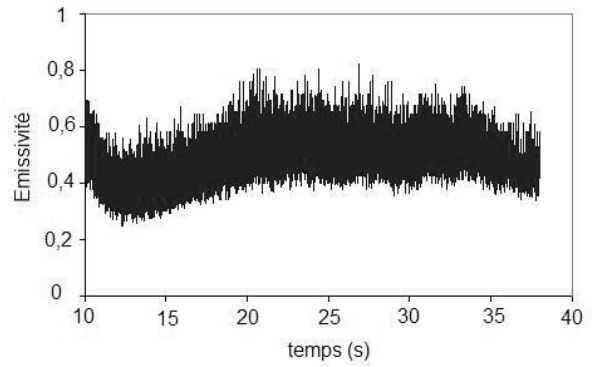


Figure 5 : Evolution de l'émissivité de surface obtenue par pyrométrie bichromatique

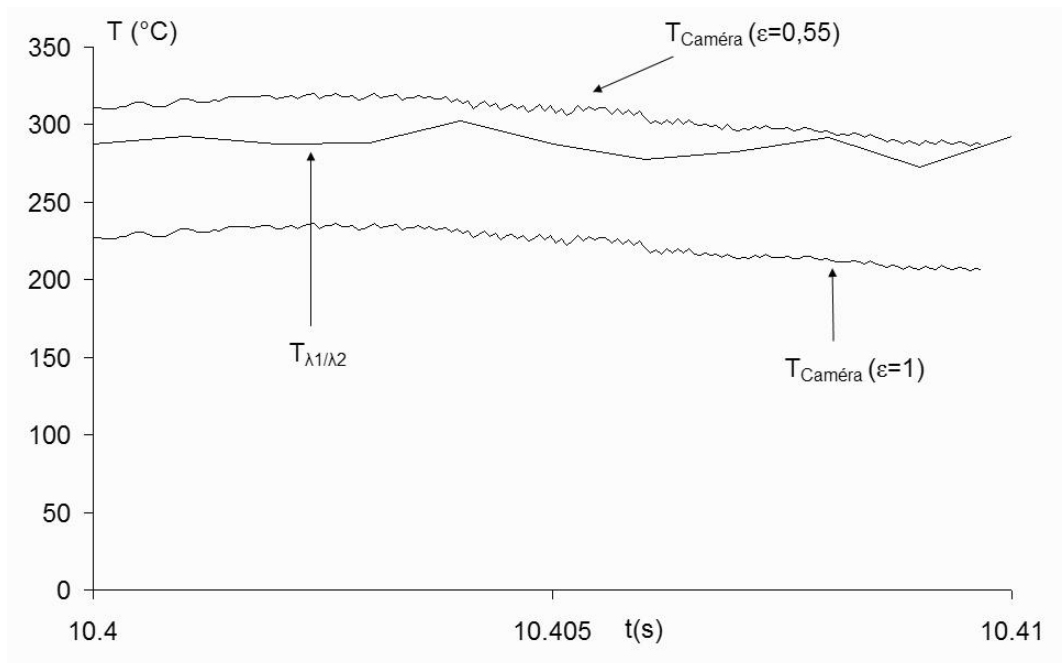


Figure 6 : Profil de température sur le rayon moyen du disque pour différentes émissivités

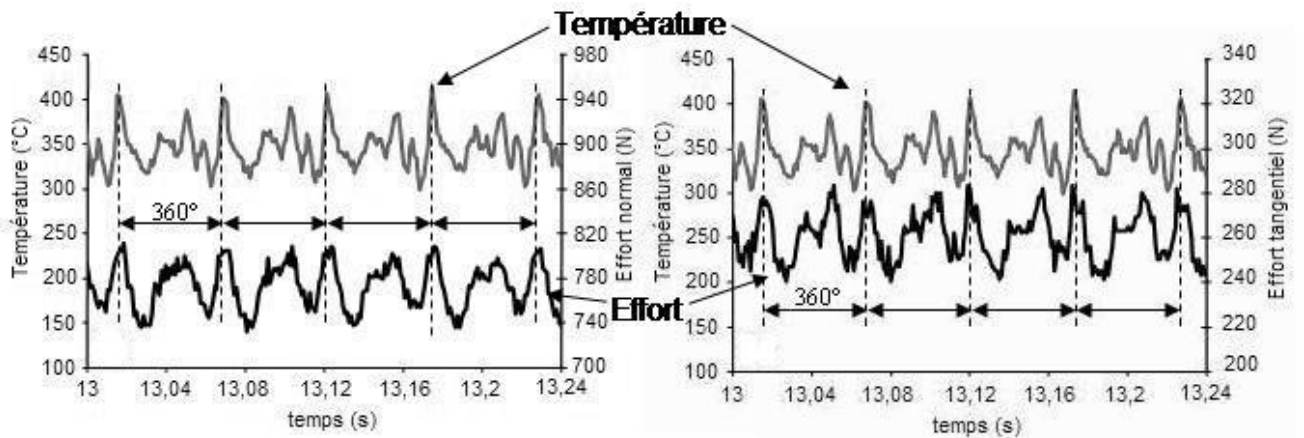


Figure 7 : Evolution de la température réelle du disque et des efforts normal et tangentiel