

# Evaluation des températures locales dans un contact glissant pion-disque par pyrométrie bichromatique

Monica SIROUX<sup>1,2\*</sup>, Haytam KASEM<sup>1,2,3</sup>, Jean THEVENET<sup>1,2</sup>, Bernard DESMET<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Univ Lille Nord de France, F-59000 Lille, France

<sup>2</sup>UVHC, TEMPO, F-59313 Valenciennes, France

<sup>3</sup>Laboratoire de Mécanique de Lille (LML UMR CNRS 8107)

Avenue Paul Langevin - 59655 Villeneuve D'Ascq Cedex

\* (auteur correspondant : Monica.Siroux@univ-valenciennes.fr)

**Résumé** - Le travail présenté porte sur la mise au point d'une métrologie thermique permettant d'évaluer les températures locales dans un contact glissant de type pion-disque en freinage. Un tribomètre pion-disque a été adapté à cet effet. Il comporte un pion creux dont la partie centrale de la face en contact avec le disque est en fluorine (transparente dans l'infrarouge). Les températures locales sont obtenues en insérant dans le patin la fibre optique d'un pyromètre bichromatique visant la surface frottante au travers de la fluorine.

## Nomenclature

$A$  constante d'amplification,  $V.W^1.m^3.sr$   
 $C_1$  1<sup>ère</sup> constante de Planck,  $W.m^2.sr^{-1}$   
 $C_2$  2<sup>ème</sup> constante de Planck,  $m.K$   
 $L$  luminance,  $W.m^{-3}.sr^{-1}$   
 $S$  signal du détecteur,  $V$   
 $t$  temps,  $s$   
 $T$  température,  $K$

## *Symboles grecs*

$\varepsilon$  émissivité,  
 $\lambda$  longueur d'onde,  $\mu m$

## *Indices et exposants*

1 1<sup>er</sup> détecteur du pyromètre bispectral  
2 2<sup>ème</sup> détecteur du pyromètre bispectral  
bichro pyromètre bispectral  
corr corrigé

## 1. Introduction

L'évaluation des températures dans un contact glissant a fait l'objet de nombreuses études [1, 2, 3]. On peut notamment citer les mesures par pyrométrie et thermographie [4, 5, 6, 7]. Cependant, pour la plupart des mesures radiométriques, la difficulté réside dans la connaissance de l'émissivité de la surface [8, 9]. Récemment un pyromètre bichromatique rapide à fibre optique a été développé pour répondre aux problèmes spécifiques liés à la mesure des températures de surface d'un disque de frein (fréquence de rotation du disque élevée, présence de points chauds de quelques millimètres sur le disque, accès difficile, émissivité du disque inconnue). Ce pyromètre a été testé sur un banc de freinage, permettant ainsi l'obtention de la température de surface et de l'émissivité en régime transitoire sur un disque de frein [10, 11].

Une application de cette technique bispectrale permettant l'évaluation des températures locales dans un contact glissant est présentée ici. Un tribomètre pion-disque a été adapté à cet effet. Il comporte un pion creux dont la partie centrale de la face en contact avec le disque est en fluorine (transparente dans l'infrarouge). Les températures locales sont obtenues en insérant dans le patin la fibre optique du pyromètre visant la surface frottante au travers de la fluorine.

## 2. Le dispositif expérimental

### 2.1. Le tribomètre de freinage

Les tests sont réalisés sur un tribomètre de freinage, représentatif d'un freinage ferroviaire à échelle réduite, de type pion-disque à axe horizontal. Ce banc d'essais permet la réalisation de tests de freinage de maintien et d'endurance. La Figure 1 présente un schéma du tribomètre : le disque d'essais est situé à l'extrémité d'une ligne d'arbre entraînée en rotation par un moteur asynchrone et le pion est monté sur un chariot porte-garniture mobile en translation. Le pion est appliqué à pression constante sur le disque tournant à vitesse constante. Un ressort hélicoïdal de compression d'une rigidité de  $26200 \text{ N.m}^{-1}$  permet d'exercer une pression réglable par déplacement du chariot supportant l'ensemble du dispositif porte-garniture. La pression de freinage simulée peut varier de 0 à 0,8 MPa et la vitesse de glissement de 0 à  $15 \text{ m.s}^{-1}$ . Un couplemètre placé sur la ligne d'entraînement du disque permet la détermination du couple de freinage lors des essais.

En appliquant les règles de changement d'échelle, les essais réalisés sur le tribomètre sont mécaniquement et thermiquement représentatifs de freinages réalisés en service. La configuration d'essai comporte un disque de diamètre 160 mm et d'épaisseur 11,25 mm et un plot de diamètre 38 mm et d'épaisseur 15 mm de façon à respecter un facteur de similitude géométrique et thermique de 18 par rapport au dispositif à l'échelle 1 [12].

Une instrumentation orientée sur le suivi des températures à l'interface pion-disque a été mise en œuvre. Les températures locales dans le contact glissant pion-disque sont déterminées par un pyromètre bichromatique à fibre optique. Afin de réaliser des mesures de températures dans le contact, le pion du tribomètre est un cylindre en matériau de friction comportant un perçage au centre pour le passage de la fibre optique et une partie centrale de la face en contact avec le disque (diamètre 8 mm et d'épaisseur 5 mm) en fluorine. La fluorine a été choisie en raison de sa transmittivité élevée dans l'infrarouge : 0,92 pour la gamme spectrale 1-5  $\mu\text{m}$ . La fibre optique du pyromètre, insérée dans le pion percé, est en contact avec la fluorine et vise ainsi la surface de contact patin-disque (la taille du spot de mesure est de 2,4 mm). De plus, la température en sortie du contact pion-disque est mesurée par un pyromètre monochromatique commercialisé par la société IMPAC (référence IP 140, gamme de température : 75-550 °C, bande spectrale : 2-2,8  $\mu\text{m}$ , temps de réponse : 2 ms). Les deux pyromètres visent le rayon moyen de frottement du disque qui est de 48,5 mm et une centrale d'acquisition permet d'enregistrer les signaux des deux pyromètres.

### 2.2. Le pyromètre bichromatique

Le pyromètre bichromatique, développé pour des mesures de température et d'émissivité sur les disques de frein [10], est composé de deux détecteurs HgCdTe équipés de deux filtres passe-bandes à bande étroite ( $2,55 \pm 1\% \mu\text{m}$  et  $3,9 \pm 1\% \mu\text{m}$ ), d'une fibre optique en verre fluoré (transmittivité moyenne de l'ordre de 0,85 pour la gamme spectrale 0,5-4  $\mu\text{m}$ ) et d'un système de conditionnement des signaux. Les deux détecteurs sont montés sur un système de refroidissement Peltier à trois étages pour limiter le bruit des détecteurs, le tout est placé sur un dispositif de refroidissement à ailettes. Les détecteurs équipés des filtres passe-bandes placés sur le refroidisseur Peltier et le système d'acquisition et de conditionnement des signaux sont placés dans un boîtier métallique pour isoler les détecteurs de l'environnement. Ce boîtier est ventilé afin d'éviter l'échauffement des différents composants. La plage de mesure du pyromètre bichromatique est de 200-1000 °C et son temps de réponse de 8  $\mu\text{s}$  [11].

Le principe du pyromètre bichromatique consiste à effectuer deux mesures simultanées de luminances grâce à deux détecteurs équipés des filtres des longueurs d'onde différentes  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  :

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

Avec :  $S_{\lambda_i}$  signaux en sortie de la chaîne de détection et  $A_{\lambda_i}$  constantes d'amplification des deux détecteurs.

En faisant l'hypothèse que l'émissivité de la cible est la même pour les deux longueurs d'onde  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  (hypothèse du corps gris), on peut déterminer la température de surface à partir du rapport des deux signaux spectraux en sortie de la chaîne de détection :

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

Ensuite, l'émissivité de la surface peut être obtenue à partir de la formule suivante :

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

L'incertitude de mesure sur la température et l'émissivité est obtenue par la méthode de propagation des incertitudes [9, 10, 11].

### 3. Résultats

Des essais de freinage de maintien ont été réalisés sur le tribomètre. Les paramètres des essais sont : force normale 511 N correspondant à une pression de contact 0,45 MPa, vitesse de rotation 38,96 rad.s<sup>-1</sup>, vitesse de glissement 2,65 m.s<sup>-1</sup>. Le couple de matériaux étudié est un couple de matériaux utilisé en freinage ferroviaire : acier XC38 pour le disque et matériau composite à matrice organique (CMO) pour le pion. Le pion en CMO se compose de plus de 30 composants (acier, fibres minérales...) et des particules (cuivre, laiton, graphite, particules minérales...) tous incorporés dans une matrice de résine phénolique.

La figure 3 montre l'évolution de la température du disque enregistrée pendant un freinage de maintien :

- $T_{bichro}$  est la température obtenue avec le pyromètre bichromatique dans le contact,
- $T_{\lambda_1}$  et  $T_{\lambda_2}$  sont les températures obtenues dans le contact avec chaque détecteur monochromatique du pyromètre bichromatique, en supposant un comportement de corps noir pour la surface du disque ( $\varepsilon=1$ ),
- $T_{pyro}$  est la température obtenue avec le pyromètre monochromatique IMPAC<sup>TM</sup>, en sortie du contact supposant un comportement de corps noir pour la surface du disque ( $\varepsilon=1$ ).

Les trois températures  $T_{\lambda_1}$ ,  $T_{\lambda_2}$  et  $T_{pyro}$  sont obtenues en supposant un comportement de corps noir de la surface du disque, elles sont donc sous-estimées par rapport à la température réelle de surface.

On peut noter que les températures monochromatiques  $T_{\lambda_1}$  et  $T_{\lambda_2}$  obtenues par les 2 détecteurs du pyromètre bichromatique sont proches de la température monochromatique

obtenue avec le pyromètre monochromatique IMPAC. Cependant une différence significative est observée entre la température bichromatique  $T_{\text{bichro}}$  et les températures monochromatiques  $T_{\lambda 1}$ ,  $T_{\lambda 2}$  et  $T_{\text{pyro}}$  (supposant un comportement de corps noir pour la surface du disque). Cette différence s'explique par l'évolution de l'émissivité du disque au cours du freinage.

La figure 4 montre l'évolution de l'émissivité au cours du freinage calculée à partir de l'équation (3). On remarque que l'émissivité varie entre 0,2 et 0,9 pendant le freinage. L'évolution de l'émissivité au cours du temps peut s'expliquer par la variation de température et la modification de l'état de surface du disque au cours du freinage. La température bichromatique est de l'ordre de 400°C ; l'incertitude estimée sur la température est inférieure à 15°C et l'incertitude estimée sur la mesure de l'émissivité est inférieure à 0,1[11].

La figure 5 présente une comparaison de la température locale mesurée dans le contact par pyrométrie bichromatique avec la température estimée en sortie du contact par le pyromètre monochromatique IMPAC  $T_{\text{Corr}}$ . Cette dernière est corrigée en tenant compte de l'émissivité obtenue par pyrométrie bichromatique et du décalage temporel (du à la rotation du disque) entre la mesure dans le contact et en sortie du contact. On remarque que les deux températures ont des profils similaires et que l'écart entre les deux températures est faible (en moyenne de l'ordre de 45 °C).

## 4. Conclusion

Une métrologie thermique permettant d'évaluer les températures locales dans un contact glissant de type pion-disque en freinage est présentée ici. Un tribomètre pion-disque a été adapté à cet effet. Il comporte un pion percé dont la partie centrale de la face en contact avec le disque est en fluorine (transparente dans l'infrarouge). Les températures locales sont obtenues en insérant dans le patin la fibre optique d'un pyromètre bichromatique visant au travers de la fluorine la surface frottante. Des essais de freinage de maintien ont été réalisés sur le tribomètre pour un couple de matériaux ferroviaires : acier XC38 pour le disque et matériau composite à matrice organique (CMO) pour le pion. La température locale de surface du disque a été obtenue par pyrométrie bichromatique et comparée avec la température estimée par pyrométrie monochromatique en sortie du contact. Les premiers résultats obtenus montrent que l'écart entre les températures locales dans le contact pion-disque et la température en sortie du contact reste faible.

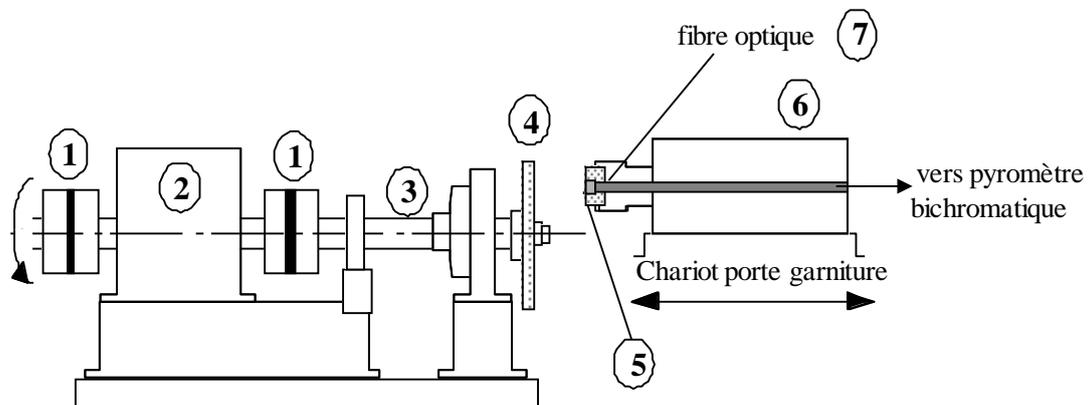
## Références

- [1] N. Alilat, Etude numérique et expérimentale du comportement thermique d'un dispositif de friction pion–disque soumis à l'usure, Thèse de doctorat, Université Paris 10 (2004).
- [2] N. Laraqi, N. Alilat, J.M. Garcia de Maria, A. Baire, Temperature and division of heat in a pin-on-disc frictional device-Exact analytical solution, *Wear* 266 (7-8) (2009), 765-770.
- [3] T. Bouache, Comportement thermique et caractérisation des échanges interfaciaux d'un frein à disque par approches théorique et expérimentale, Thèse de doctorat, Université Paris 10 (2006).
- [4] F. E. Kennedy S. C Cullen, J. M. Leroy, Contact temperature and its effects in an oscillatory sliding contact, *ASME J. Tribol.* 111 (1989), 63-69.
- [5] R. Komanduri, Z.B. Hou, A review of the experimental techniques for the measurement of heat generated in some manufacturing process and tribology, *Trib.Int.* 34 (2001) 653-682.
- [6] D. Majcherczak, P. Dufrenoy, Y. Berthier, Tribological, thermal and mechanical coupling aspects of the dry sliding contact, *Trib. Int.* 40 (2007), 834-843.

- [7] M Siroux, A-L. Bulthe, Y. Desplanques, B. Desmet, G. Degallaix, Thermal analysis of periodic sliding contact on a braking tribometer, *App. Therm. Eng.* 28 (2008), 2194-2202.
- [8] F. Cartigny, R. Copin, M Siroux, S. Harmand, Y. Desplanques, B. Desmet, G. Degallaix, Cartographies d'émissivité de la surface d'un disque de frein, Cong. SFT (Lyon, 2000) 351-356.
- [9] M. Siroux, Habilitation à diriger des recherches, Université de Valenciennes (2008).
- [10] J. Thevenet, Développement d'une métrologie thermique des contacts glissants en freinage, Thèse de doctorat, Université de Valenciennes (2009).
- [11] J. Thevenet, M. Siroux, B. Desmet, Measurements of brake disc surface temperature and emissivity by two-color pyrometry, *App. Therm. Eng.*, In press (2010).
- [12] H. Bartys Application des superalliages aux disques de frein ferroviaires, Thèse de doctorat, Université de Valenciennes (2003).

**Remerciements**

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



- |                              |  |
|------------------------------|--|
| 1 : accouplements élastiques | 5 : patin                                    |
| 2 : couplemètre              | 6 : dispositif d'application de la garniture |
| 3 : arbre de transmission    | 7 : fibre optique du pyromètre bichromatique |
| 4 : disque                   |  |

Figure 1 : Banc d'essai de freinage

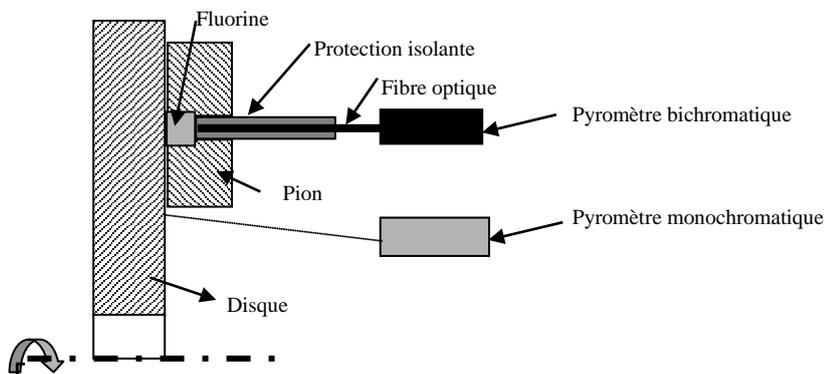


Figure 2. Disque de frein et pion : mesure de températures

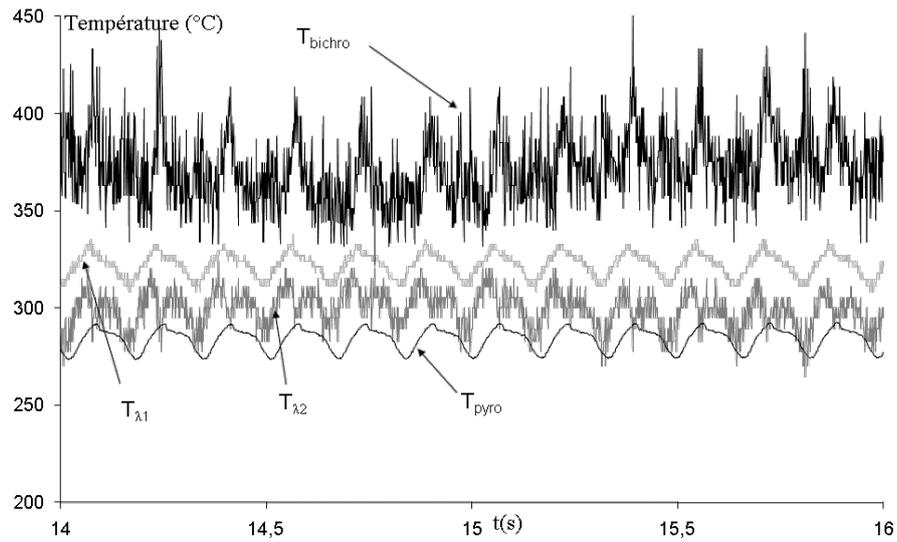


Figure 3. Evolution de la température du disque pendant le freinage

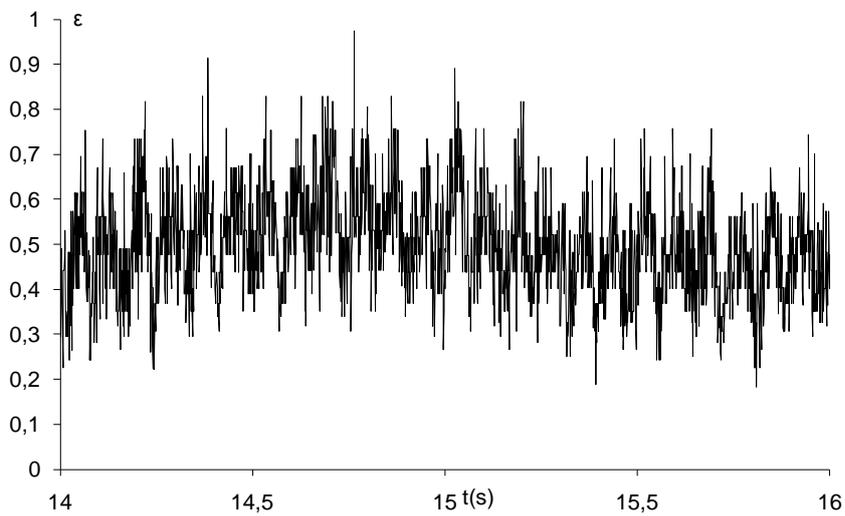


Figure 4. Evolution de l'émissivité du disque pendant le freinage

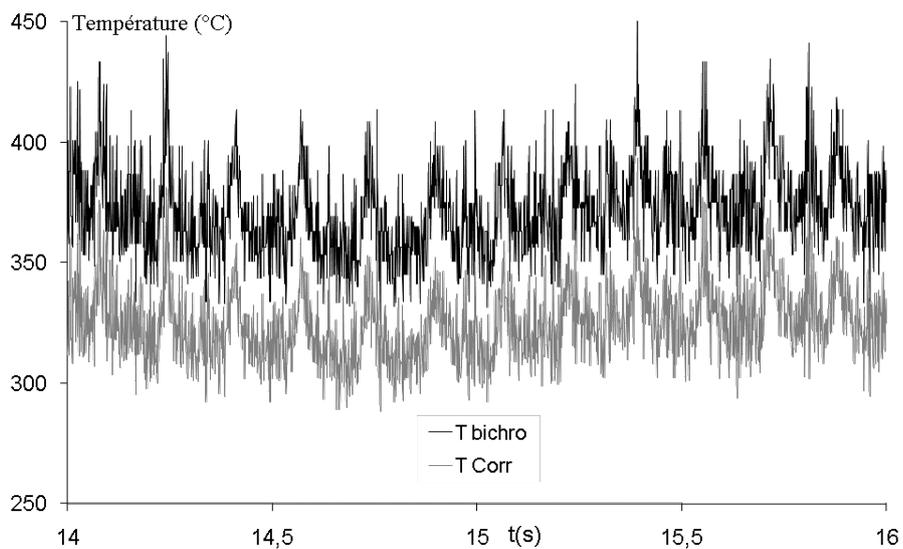


Figure 5. Comparaison de la température bichromatique mesurée dans le contact avec la température corrigée mesurée en sortie du contact par pyrométrie monochromatique