
Soumis le : 26/04/2014

Forme révisée acceptée le : 17/01/2017

Auteur correspondant : bredjel@yahoo.fr

Nature & Technology

Caractérisation expérimentale physico mécanique et étude tribologique des sabots de frein en matériau composite C/C à matrice organique des wagons SNTF

Issam Benbrinis^{a,b}, Bachir Redjel¹

¹Laboratoire Génie Civil, Université Badji Mokhtar Annaba, BP 12, 23000, Annaba, Algérie.

²Département Génie Mécanique – Université Badji Mokhtar Annaba, BP 12, Annaba 23000, Algérie.

Résumé

La mesure de la dureté Rockwell du composite carbone-carbone C/C utilisé dans les sabots de frein a permis à partir d'un abaque spécifique de déduire les duretés Brinell (HB) et Vickers (HV). Le comportement ainsi que le mode de rupture en compression de ce matériau composite organique, étudiés sur des éprouvettes cubiques et cylindriques aboutissent à des valeurs des résistances comparables. Ces dernières se caractérisent par une dispersion. Des tests de résistance du sabot de frein au cisaillement et à la flexion ont été mis en place ce qui a conduit à définir sa conformité par rapport aux normes. Des essais de freinage réalisés sur le tribomètre de freinage de type CSM+ ont permis d'étudier le comportement en frottement et d'identifier les mécanismes physiques de frottement activés au contact sous sollicitations de freinage sévères.

Mots-clés : Composite C/C - Dureté – Rockwell – Sabot de frein – Frottement

Abstract

The measure of the Rockwell hardness of the composite carbon-carbon C/C used in brake blocks allowed from a specific abacus to deduct the Brinell hardness (HB) and the Vickers hardness (HV). The behavior as well as the mode of fracture in compression of this organic composite material, studied on cubic and cylindrical specimens end up in values of the comparable resistances. The latter are characterized by a scatter. Resistance tests of the brake block in shear and in bending have been set up what led to define its conformity with regard to the standards. Braking tests realized on braking CSM + type tribometer allowed to study the friction behavior and to identify the friction physical mechanisms activated in the contact under severe braking mechanical actions.

Keywords: C/C Composite – Hardness – Rockwell – Brake block - friction

1. Introduction

Le choix d'un matériau de frottement est aujourd'hui considéré à juste titre comme un problème d'optimisation de l'équilibre entre des qualités qui sont souvent contradictoires. Il faut signaler que de nombreux matériaux comme le plomb, l'amiant ou le cadmium dotés de propriétés tribologiques très intéressantes sont désormais de plus en plus interdits à cause principalement de leur toxicité et des risques majeurs qu'ils peuvent causer à l'espèce humaine et à l'environnement. La recherche de solutions de substitution qu'il faudra toujours confronter aux dures réalités du service est aujourd'hui indispensable. Un choix judicieux de matériaux de frottement doit tenir compte de

nombreux facteurs très divers comme la sécurité et la durée de fonctionnement, la facilité de remplacement des pièces d'usure, le développement durable, la préservation de l'environnement, le prix de revient.

Il est clair que ce choix des matériaux pour tout système industriel ou structure mécanique reste une tâche importante et très complexe car il conditionne non seulement le succès du produit mais aussi son rapport cout/performance sur toute la durée de vie d'exploitation utile. Ainsi, l'utilisation de semelles de frein en matériaux composites amalgamée à l'aide d'un liant en résine synthétique, ne générant pas de crissement au freinage tout en limitant le dépolissage des tables de roulement des roues, génératrices de bruit fort lors des circulations tend à

se substituer à celles de l'acier ou des alliages métalliques et pourrait contribuer de façon sensible à réduire et à limiter la signature acoustique des trains de fret [1-5]. Il est à noter que la semelle en matériau composite intègre en général, des matériaux de friction métalliques comme la fonte, le cuivre, le carbone, les oxydes métalliques et un abrasif en silice et engendre souvent des odeurs de caoutchouc brûlé lorsque le freinage est violent [6].

Parmi les matériaux en progrès constant, le composite carbone carbone C/C de type organique qui possède de bonnes propriétés mécanique et tribologique commence à être très employé dans la fabrication des semelles de frein. Cependant, les phénomènes d'oxydation le dégradent dès que la température dépasse les 500 degrés. Des travaux récents soulignent l'importance des propriétés thermiques des composites C/C 2D ou 3D dans leurs performances en simulation de freinage [7]. Il faut signaler que les travaux relatifs aux simulations de freinage restent très peu nombreux. Ces travaux se limitent à des études quasi-industrielles ayant surtout pour objectif de tester des matériaux différents dans des conditions se rapprochant de la réalité et de comparer leurs comportements tribologiques notamment de point de vue de la variation du frottement et du taux d'usure. J.D. Chen et al. [8-9] étudiant l'influence de la vapeur d'eau sur une variété de composites, montrent que plus l'humidité relative est élevée, plus la transition vers un régime de frottement haut est retardée. Les taux bas d'humidité relative conduisent alors à un taux d'usure et à un frottement tous les deux plus importants lors de la stabilisation de ce dernier après la transition. B.K. Yen [10] montre, à partir d'essais de frottement avec un système pion/disque à très faible vitesse et sous une atmosphère contrôlée, que la structure des matériaux intervient peu sur le comportement tribologique de base de ces derniers. Il confirme encore que la structure anisotrope du graphite et son aptitude au clivage n'expliquent pas son frottement faible dans l'air. D'autre part, il rapporte aussi que la vapeur d'eau joue un rôle de lubrifiant pour les matériaux carbonés. F.M. Kustas et al. [11] remarquent que le frottement des composites C/C 3D à la température ambiante sous vide est très faible par rapport au frottement obtenu avec l'essai de référence alors que le frottement sous vide à 1000°C s'est avéré aussi élevé que ce dernier. Les gaz résiduels dans leur chambre à vide sont responsables du faible frottement à température ambiante. A 1000°C ces contaminants ne jouent plus leur rôle de lubrifiants. Les effets de la mise en œuvre sur les mécanismes de fissuration et de déformation de composites C/C stratifiés sous sollicitations uni axiales de compression et de cisaillement ont été étudiés expérimentalement par K.

Anand et V. Gupta [12] qui constatent une grande dépendance des propriétés mécaniques relatives au nombre de cycles d'imprégnation par carbonisation et aux différents traitements thermiques. L'analyse des travaux concernant le frottement des composites C/C révèle des similitudes avec ceux concernant les graphites (régimes de frottement bas et haut avec l'existence d'une transition brutale). En général, l'approche adoptée pour l'analyse des mécanismes physiques de frottement et d'usure repose sur le concept de tribologie à trois corps. Ce concept introduit dans les années 1970 par M. Godet [13], puis développé par Y. Berthier [14-15] met en jeu un troisième corps formé entre les deux premiers que sont le sabot et la roue. Ce troisième corps qui prend un sens matériau et un sens cinématique constitue avec les deux premiers, accompagnés du mécanisme assurant le frottement, le triplet tribologique qui doit être considéré lors de l'étude de tout phénomène tribologique [16]. Ainsi, les progrès importants réalisés sur les semelles composites ont permis de réduire leur forte sensibilité à l'humidité et de généraliser leur utilisation sur de nombreux matériels et systèmes mécaniques [3-4]. Il faut néanmoins noter que les semelles en matériaux composites restent encore sujettes aux inclusions métalliques que sont les particules arrachées à la roue, ce qui les rend ensuite plus agressives vis-à-vis de cette dernière. Leurs capacités thermiques encore faibles limitent leur utilisation à des applications nécessitant des niveaux d'énergie moyens [3, 4, 6].

Ce travail porte sur l'analyse des sabots de frein en matériaux composites des wagons de transport du minerai de la SNTF (Algérie) dans le but d'étudier leur comportement au cours du service. Une caractérisation physico mécanique du matériau de base est investiguée et a permis de mesurer certaines propriétés de base importantes.

2. Matériau constitutif et protocoles expérimentaux de caractérisation physico mécanique

L'objectif de la mesure des caractéristiques physiques est une identification partielle du matériau pour être certain, lors des contrôles de réception ou des vérifications ultérieures, que ces caractéristiques ne se sont guère modifiées et que le matériau utilisé correspond au matériau homologué de part la nature des matrices et des renforts. Ces caractéristiques fournissent des informations intéressantes pour l'utilisation du matériau.

2.2. Mesure de la masse volumique

Deux méthodes ont été utilisées pour la mesure de la masse volumique m_v : la méthode classique et la méthode du pendule. Cette dernière consiste à suspendre l'éprouvette au crochet du bassin d'une balance électronique au moyen d'une ficelle très mince. La masse de l'éprouvette dans l'air est alors déterminée avec une précision de 1 mg. L'éprouvette suspendue par la suite librement dans de l'eau à la température ambiante comprise entre 18 °C et 24 °C, est alors pesée une nouvelle fois. Il faut signaler qu'avant le pesage, les bulles d'air adhérant à l'éprouvette sont éliminées, ce qui peut être facilité par la présence de traces de détergent dans l'eau. Dans ce cas la masse volumique est donnée par le rapport entre le poids dans l'air et la différence entre le poids dans l'air et celui dans l'eau. Les valeurs mesurées sont :

- méthode classique : $m_v = 1,66 \text{ g/cm}^3$
- méthode du pendule : $m_v = 1 \text{ g/cm}^3$

Il apparaît une divergence assez importante et significative entre les résultats donnés par ces deux méthodes. Le nombre de mesures limité ainsi que la difficulté dans la précision de la deuxième méthode peuvent être une des causes probables de cet écart significatif. Il est cependant intéressant de signaler que la valeur mesurée par la première méthode est très proche de l'ordre de grandeur de celle mesurée par R. Devi et R. Rao [17] sur des composites C/C multidirectionnels densifiés par voie liquide (précurseur non précisé) et qui est de $1,8 \text{ g/cm}^3$ ainsi que de celle obtenue par C. Taylor [18] sur des composites C/C densifiés par différentes voies et qui est de $1,6 \text{ g/cm}^3$.

2.3. Mesure de la dureté Rockwell

Les éprouvettes pour l'essai de dureté Rockwell sont d'abord préparées par découpage d'un échantillon de 40 x 40 mm de la garniture à l'endroit spécifié sur la semelle. Elles subissent par la suite un usinage du dos jusqu'à la disparition de toute la tôle, support et l'obtention d'une surface lisse parallèle à la surface supérieure de freinage.

L'essai de dureté Rockwell est effectué de façon classique conformément au procédé A de la norme ASTM D 785-65. La norme NF EN ISO 6508-1 est aussi utilisée pour ce type d'essai. Ce dernier consiste à imprimer, en deux temps, dans la couche superficielle de l'éprouvette, un pénétrateur qui est un cône en diamant à un angle de 120° et d'extrémité sphérique de diamètre 0,2 mm et à mesurer

l'accroissement rémanent de la profondeur de pénétration par une lecture directe. L'utilisation du cône permet d'éviter une dispersion importante.

Ainsi, après la mise en place de l'éprouvette sur l'appareil (figure 6), il est procédé en moins de 10 secondes à l'application de la charge minimale de 10 kgf (98,0665N) en remettant à zéro la petite aiguille du cadran de l'appareil. La grande aiguille est pour sa part réglée sur (B) 30 sur l'échelle graduée correspondante de l'appareil. Le cône s'enfonce d'une profondeur e_0 .



Figure 6 : appareil utilisé pour la mesure classique de la dureté

Dans les 10 secondes suivant l'application de la charge minimale et immédiatement après le positionnement du cadran, la charge est accrue à partir de la charge minimale 98 N jusqu'à la charge maximale 588 N. La charge maximale est ensuite retirée après 15 secondes et la charge ramenée à la valeur minimale. Le cône remonte et se stabilise à une profondeur e_2 . Ces indices Rockwell peuvent se lire directement sur le cadran gradué. La dureté Rockwell C désigné par HRC est donnée par $HRC=500*[100 - (e_2 - e_0)]$. Selon les normes, la dureté s'exprime par un nombre sans dimension.

Trois tests ont été appliqués pour chaque échantillon et la valeur moyenne est adoptée pour la caractérisation. Dix échantillons ont été expérimentés. La norme allemande DIN 50-150 a établi un abaque spécifique permettant de déduire les duretés Brinell (HB) et Vickers (HV) par une conversion à partir de la mesure de la dureté Rockwell. Par ailleurs, il existe une relation entre la dureté Brinell HB et

la résistance à la rupture en traction R_m . Pour les aciers au carbone : $R_m = 3.5 \text{ HB}$. Le tableau 1 résume les résultats obtenus de mesure et des conversions ainsi que l'écart-type et le coefficient de variation relatifs à HRC.

Tableau 1
Valeurs mesurées et converties des duretés

Dureté	HRC	HV	HB
Moyenne	35.5	350	333
Écart-type	1.85	-	-
Coef. de variation	5.2%	-	-

Malgré toutes les précautions prises lors des manipulations, les résultats de mesure de la dureté montrent une dispersion. Celle ci est principalement due au caractère hétérogène du matériau ainsi qu'à son état de surface qu'il est très difficile de rendre parfaitement lisse malgré toutes les opérations de précaution effectuées dans ce sens. Toutefois l'ordre de grandeur de cette dispersion semble être acceptable pour ce type de matériau composite.

2.4. Epreuves et dispositif de compression

Les éprouvettes destinées à la caractérisation en compression du matériau ont été prélevées dans les semelles comme indiqué sur la figure 2 puis conditionnées immédiatement avant les essais durant trois jours à une température de $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ et à une humidité relative de $50 \pm 5 \text{ } \%$. Il est à signaler qu'après l'usinage des éprouvettes, il a été remarqué une très mauvaise odeur due à la possibilité de la présence de l'amiante ou d'autres substances nocives ainsi qu'à une attaque de l'outil par le matériau composite qui est dur. Deux types de corps d'épreuves ont été utilisés pour la compression : des éprouvettes cubiques de $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ (figure 7) et des éprouvettes cylindriques de 2.5 cm de hauteur et de 2 cm de diamètre conformes aux prescriptions normatives EN 12350-1, EN 12390-1, EN 12390-2 et EN 12504-1 (figure 8). Le diamètre et la hauteur des échantillons sont mesurés avec une précision de $10 \text{ }\mu\text{m}$. Les éprouvettes sont centrées sur le plateau inférieur de la machine de compression avec une précision de 1 % de la dimension nominale pour les éprouvettes cubiques et de 1% aussi du diamètre pour les éprouvettes cylindriques.

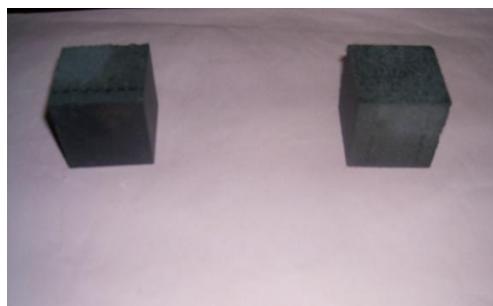


Figure 7 : éprouvettes cubiques de compression



Figure 8 : éprouvettes cylindriques de compression

Les éprouvettes sont soumises à l'essai d'écrasement conformément à la norme ASTM D695 sur une machine de compression de marque Digitec à affichage digital. La vitesse de chargement est lente et constante et est de l'ordre de 15000 KN/s appliquée sans choc avec un accroissement de façon continue et une force de départ de 10 KN. L'essai est mené jusqu'à la rupture complète de l'éprouvette. La figure 9 montre le dispositif utilisé.



Figure 9: dispositif utilisé en compression

2.5. Tests d'homologation des résistances au cisaillement et à la flexion trois points (UIC 2006)

Pour la mesure de la résistance au cisaillement, un dispositif expérimental utilisant une presse hydraulique a été adopté comme conforme aux spécifications UIC 2006 [3]. Pour assurer une bonne transmission, une tôle entre les deux parties de la semelle a été utilisée. La figure 10 montre l'assemblage du montage de l'expérimentation mise en place.



Figure 10: Montage de l'essai de la résistance au cisaillement sur la presse hydraulique

Le même dispositif de la presse hydraulique a été aussi adopté et utilisé pour les tests mécaniques de mesure de la résistance à la flexion. Ces tests sont réalisés conformément aux spécifications de l'UIC 2006, afin de localiser les parties les plus fragiles du sabot composite [3].

Deux types d'essais ont alors été investigués :

- Essai de type n° 1 : Cet essai a été mené conformément aux conditions prescrites UIC 2006 portant sur l'application d'un effort de l'ordre de 19 KN pour une semelle de type K [3] et d'une longueur de 320 mm. Ainsi, une semelle en matériau composite considéré a été soumise à un effort monotone croissant appliqué par la presse hydraulique comme l'illustre la figure 11.



Figure 11 : essai de mesure de la résistance à la flexion de type 1

- Essai de type 2 : ce type d'essai expérimental illustré par la figure 12 permet surtout d'identifier et de définir la cause réelle de la déformation. Il s'agit de vérifier si cette dernière est due à l'entaille qui sépare les deux parties de la semelle ou s'il s'agit d'une mauvaise qualité du matériau.



Figure 12 : essai de flexion de type 2

Il est à signaler que ces deux essais sont à chaque fois effectués avec de nouvelles semelles en matériau composite. La sollicitation est appliquée de façon lente et monotone à une vitesse de 30 mm/min afin d'éviter les effets dynamiques.

3. Analyse des résultats et discussion

3.1. Courbe charge-déplacement en compression du matériau de l'étude

Les figures 13 et 14 montrent des exemples type de relevé du tracé de courbe charge-déplacement obtenus durant l'essai de compression pour les deux types de géométries d'éprouvettes testés. Ces courbes présentent la même allure montrent un comportement linéaire élastique du début de l'application de la sollicitation jusqu'à la

rupture totale de l'échantillon traduisant le caractère élastique fragile du matériau. Les prélèvements des cylindres et ceux des cubes ont été effectués dans des endroits différents sur des semelles différentes.

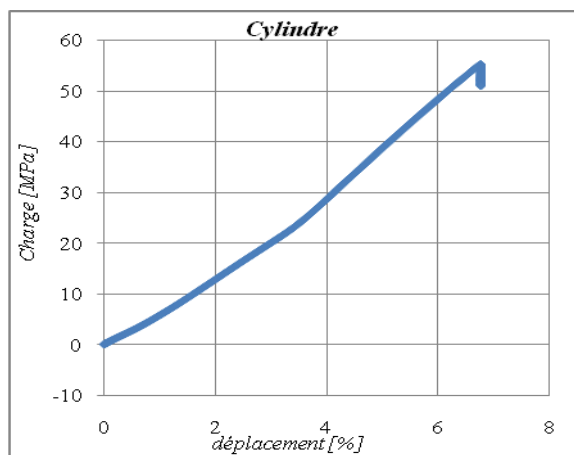


Figure 13 : comportement en compression de l'éprouvette cylindrique

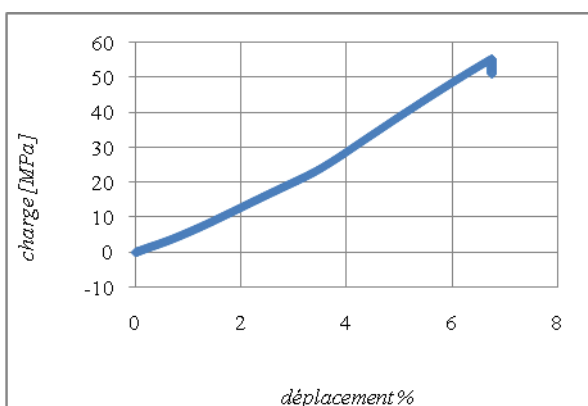


Figure 14 : comportement en compression de l'éprouvette cubique

3.2. Contrainte à la rupture

Le tableau 2 résume les résultats de mesure de la contrainte à la rupture moyenne en compression obtenues sur des éprouvettes cubiques et cylindriques, les écarts-types calculés ainsi que les coefficients de variation.

Tableau 2
Résultats des Résistances à la compression et des dispersions

	Nbre	Résist (MPa)	Ecart.typ (MPa)	Coef.variat (%)
Cylindre	10	85.0	11.0	13.0%
Cube	5.0	86.5	4.8	05.5%

Comme il apparait, ces résultats se caractérisent par une dispersion due à l'aspect composite du matériau, à la dispersion de l'essai mécanique lui-même ainsi qu'à l'aspect probabiliste de la rupture pour les deux corps d'éprouvettes. Cependant l'ordre de grandeur de cette dispersion reste acceptable dans la mesure où il est cadré dans la plage de celui indiqué dans la littérature pour les matériaux à caractère composite granulaire. Il est important de signaler que les éprouvettes ont rarement des caractéristiques comparables car nominalement elles sont non identiques du fait de l'hétérogénéité au niveau de la microstructure ainsi que de la présence de défauts de différentes dimensions et densités aléatoirement distribués au sein du volume de chaque échantillon et qui sont par conséquent à l'origine de la ruine de ces matériaux. Cette dernière peut alors être déclenchée à différents niveaux de contraintes selon l'orientation, la localisation, la dimension et la densité des microporosités, des inclusions, des discontinuités de fabrication et de la faiblesse des interfaces et se propager par la suite de façon instable.

Les deux géométries indiquent des valeurs comparables. Le rapport entre la valeur donnée par le cylindre et celle donnée par le cube est en moyenne de 0,98 ce qui est satisfaisant. Il est à noter que pour faire une analogie avec le matériau béton ce rapport sur des éprouvettes 15/30 pour le cylindre et sur des cubes de 20 cm d'arête en béton varie de 0,7 à 0,9 et qu'une moyenne de 0,83 est alors adoptée par le comité européen du béton pour ce matériau [19-20]. Enfin il faut signaler que les valeurs mesurées de la contrainte à la rupture aussi bien sur le cylindre que sur le cube rentrent dans les plages données par les fiches techniques des caractéristiques physiques et mécaniques de ce type de matériau composite C/C relevées dans la littérature scientifique et technique

Malgré leur nombre important les éprouvettes cylindriques affichent une dispersion des valeurs de la résistance plus importante que celles montrées par les éprouvettes cubiques.

3.3. Modes de rupture en compression

La figure 15 montre des exemples de mode de ruine des éprouvettes cubiques en compression.

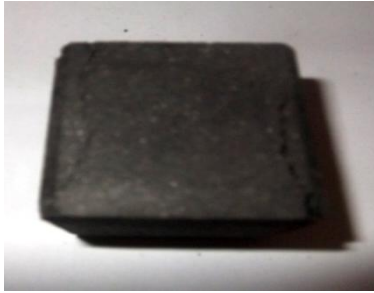


Figure 15 : exemple de rupture du cube

La rupture s'effectue selon des plans obliques avec la formation de deux pyramides tronquées et opposées par la petite base. Ce mode de rupture est typique sur les éprouvettes cubiques. C'est un mécanisme analogue à celui observé sur les bétons et les matériaux cimentaires et il est surtout conditionné par les forces de frottement que se développent entre les faces de l'éprouvette et les plateaux de la presse et qui sont dirigées à l'intérieur du cube bloquant de la sorte le développement des déformations transversales [21]. La figure 16 schématise ce mécanisme.

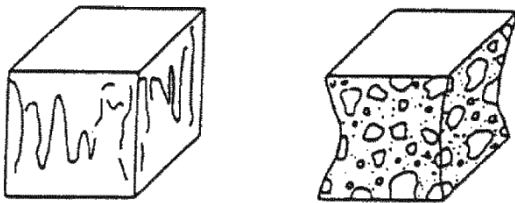


Figure 16 : schématisation du mode de rupture du cube

Le mode de rupture des éprouvettes cylindriques est montré sur la figure 17. Le mécanisme de ruine se caractérise par l'apparition et la formation de lignes de rupture selon des plans parallèles à la direction de l'effort de compression comme schématisé sur la figure 18. C'est un exemple illustratif d'une rupture correcte du cylindre.



Figure 17 : exemple de rupture du cylindre

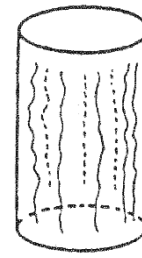


Figure 18 : schématisation du mode de rupture du cylindre

3.4. Résultats de l'essai de cisaillement

Après l'application de l'effort tangentiel dans l'espace de 4 S d'une façon régulière comme recommandé par l'UIC 2006 [6], un fléchissement de la semelle est remarqué. Cette flexion apparaît dès que la valeur maximale de 15 KN de l'effort appliquée est atteinte. La semelle s'est cassée brusquement de façon soudaine. La rupture s'opère par un délaminage suivant le plan longitudinal comme mécanisme d'endommagement et de fracture dominant. Les figures 19 et 20 illustrent parfaitement ce mode de ruine.



Figure 19 : Résultat des essais de cisaillement



Figure 20 : assemblage (tôle-composite) décollé

Cette expérience met en évidence le mauvais assemblage entre le dos (tôle) et le matériau composite. Ce constat concorde avec les résultats des essais en ligne.

3.5. Résultats des essais de la flexion

- Essai n°1 : après application d'une charge et le premier développement de l'effort la semelle s'est mise à fléchir rapidement avant de s'éclater juste au milieu et d'une façon brusque (figure 21). Ceci s'est opéré avant même que la charge n'atteigne 10 KN. Il est clair selon les observations constatées qu'une déformation plastique apparaît et que l'entaille étant par sa présence le siège de fortes concentrations de contraintes favorise la propagation de la fissure.



Figure 21 : résultat de l'essai n° 1 de la flexion

- Essai n° 2 : les mêmes constats de l'essai n°1 de la flexion sur la partie homogène du sabot ont été relevés sur l'essai n°2 (figure 22).



Figure 22 : résultat de l'essai n° 2 de la flexion

4. Test tribologique d'usure

Afin de mieux comprendre et identifier les mécanismes d'endommagement qui se produisent sur les dispositifs industriels des sabots de freins lors des trajets, des tests tribologiques simulant l'usure ont été réalisés sur un tribomètre à pion-disque CSM+ à module/version 4.4U doté d'un affichage numérique. Le taux d'acquisition est de 10 Hz. L'ensemble du dispositif relié à un microordinateur présente les résultats de la variation du coefficient de frottement en fonction des trois paramètres que sont le temps, le déplacement et le nombre de tour. Les essais sont réalisés à la température de 25 °C dans un environnement caractérisé par une humidité relative de 50% et sont compatibles avec les normes DIN 50324, ASTM G99 et ASTM G133.

Le taux d'usure pour l'échantillon est calculé en déterminant la perte de volume par unité de distance parcourue. Les échantillons de forme cylindrique, de diamètre 20 mm et de hauteur 15 mm sont mis en contact avec une bille montée sur un bras élastique. Chaque échantillon subit un déplacement rotatif comme l'illustre le dispositif de la figure 23. La faible déflexion du bras permet de déterminer les forces tangentielles et par conséquent le coefficient induit par ce déplacement.

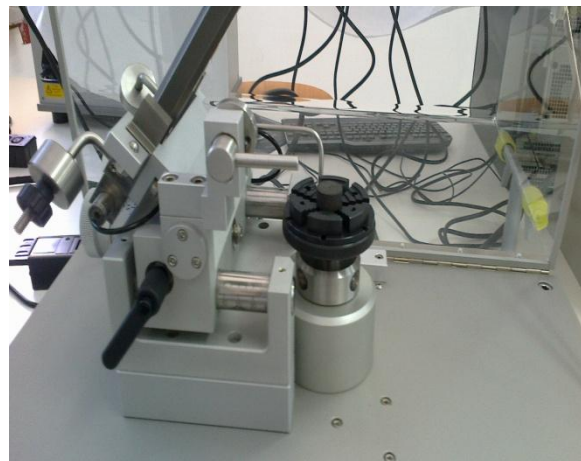


Figure 23 : dispositif tribologique

Le suivi du coefficient de frottement et de l'usure est un aspect essentiel dans la compréhension des mécanismes d'endommagement qui se produisent sur des dispositifs industriels comme les sabots de freins. Le tableau 3 montre un exemple des conditions et des paramètres du test considéré.

Tableau 3

Conditions et paramètres du test insérés dans la machine

Composite organique N 1		
Echantillon1		
référence :		
Substrat :	100C6	
Mesure tribo1		
Paramètres tribologiques		
Tribomètre module / Version 4.4U	Acquisition	Echantillon
- Date : 03/06/2014 11:12:04	- Rayon : 4,50 [mm]	- Couche : ECH 1
	- Vitesse lin. : 10,00 [cm/s]	
	- Force normale : 2,00 [N]	
	- Condition d'arrêt : 100,00 [m]	
	- Arrêt effectif : Mètres	
	- Taux d'acquisition : 10,0 [Hz]	
Partenaire statique	Environnement	
- Substrat : 100C6	- Température : 25,00 [°C]	
- Fournisseur : CSM	Atmosphère : AIR	
- Dimension : 6,00 [mm]	- Humidité : 50,00 [%]	
- Géométrie : Bille		
Echantillon	Partenaire statique	Calculs
Aire de l'usure : 0,0 µm²	diamètre de la trace d'usure : 0,0 µm	Usure échantillon : 0 mm³/n/m
Module d'Young : 0,0 gpa	Module d'Young : 0,0 gpa	Usure du partenaire : 0 mm³/n/m
Coef. de Poisson (Nu) : 0,000	Coef. de Poisson (Nu) : 0,000	Stress herzien max: 0 gpa

Un exemple type de la variation du coefficient de frottement en fonction du temps est illustré par la figure 24.

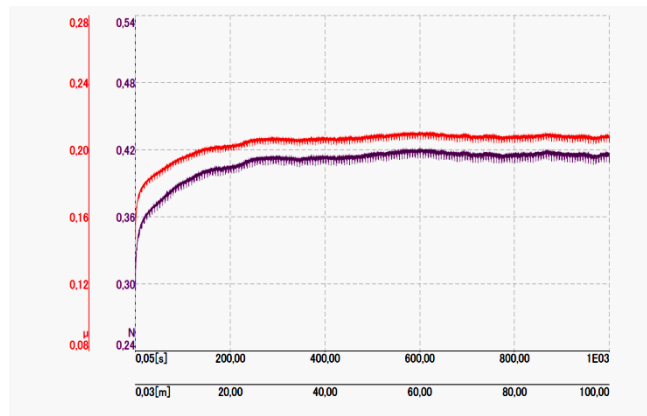


Figure 24 : variation du coefficient de frottement en fonction du temps

Le coefficient de frottement augmente rapidement au début de la simulation pour se stabiliser par la suite autour d'une valeur constante. Celle-ci comme l'illustre davantage l'exemple de la variation de ce coefficient de frottement en fonction des trois paramètres : temps, déplacement, nombre de tours de la figure 25 se stabilise à partir de 200s autour de la valeur de 0,21. Cette valeur reste comparable et conforme à celle donnée par le fabricant. Il faut signaler que des travaux récents soulignent surtout l'importance des propriétés thermiques des composites C/C 2D ou 3D dans leurs performances en simulation de freinage [22]. F.M. Kustas et al. [11] remarquent que le frottement des composites C/C 3D à la température ambiante sous vide est faible par rapport au frottement obtenu avec l'essai de référence.

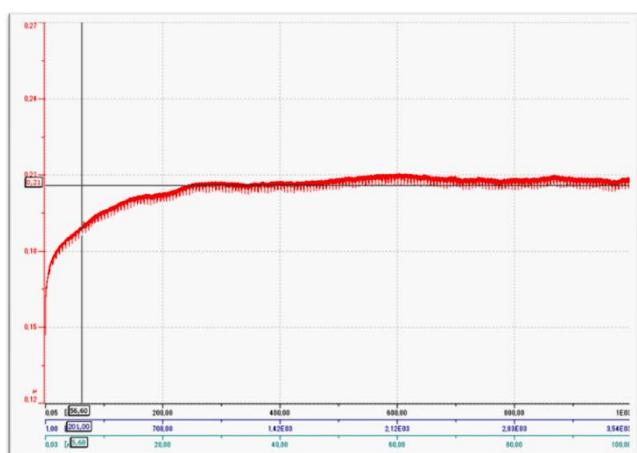


Figure 25 : variation du coefficient de frottement en fonction du temps, du déplacement et du nombre de tours.

Il est important de signaler que les matériaux composites à matrices de polymères renforcés avec des fibres de carbone (PRFC) sont connus pour l'excellente combinaison de leurs propriétés mécaniques et thermiques avec leur faible masse.

Cependant, leurs propriétés tribologiques restent largement méconnues ce qui limite encore leur utilisation dans les industries aussi bien de grande diffusion que de pointe. Peu de résultats sur les mesures du coefficient de frottement des PRFC sont disponibles dans la littérature scientifique et technique. Cependant certaines études expérimentales ont tenté d'explorer les effets de la charge normale, de la vitesse ou des conditions environnementales sur la valeur et la variation du coefficient de frottement et sur l'usure des matériaux composites renforcés par fibres de carbone à haut module et à haute résistance mécanique [23-24-25]. Les effets de la fraction volumique et de l'orientation des fibres ont été aussi considérés [26]. Des modèles numériques d'un contact entre un composite fibreux et une aspérité de corps opposé ont été proposés [27]. Signalons que tous ces travaux décrivent le frottement sous charge normale suffisamment forte pour induire une usure du composite. Etudiant expérimentalement le frottement entre deux PRFC composites sous faible charge normale O. Smerdova et al. [28] signalent une légère augmentation du coefficient de frottement avec le changement d'orientation des fibres des deux composites de parallèle à perpendiculaire par rapport au sens de glissement alors que le modèle analytique proposé supposant que l'aire réelle de contact est constituée d'une multitude de microcontacts de trois types : fibre-fibre, fibre-matrice et matrice-matrice prédit une indépendance de cet angle. Par ailleurs, les essais soulignent une diminution du coefficient de frottement de moitié avec une augmentation de la fraction volumique de fibres V_f de 0% à 62%, ce qui correspond à la dépendance qualitative trouvée dans le cadre du modèle. Dans une étude sur la caractérisation tribologique d'un alliage d'aluminium AA5083 réalisée par un test classique en utilisant un tribomètre pion-disque permettant seulement de déterminer un coefficient de frottement de type Coulomb, D. T. Pham et al. [29] montrent en tenant compte des incertitudes de mesures que les coefficients de frottement mesurés pour une variation de la vitesse de 0.0005 m/s à 0.05 m/s et pour des charges variant de 0.08 N à 0.42 N sont peu sensibles à la vitesse sauf aux vitesses plus faibles ($V=0.0005$ m/s et $V=0.001$ m/s) qui affichent des coefficients plus petits Ils concluent que la valeur moyenne du coefficient de Coulomb se stabilise autour de 0.2 et que sa variation est négligeable quand la charge appliquée change. Etudiant le comportement tribologique de composites à matrice organique sélectionnés pour des applications de freinage devant assurer un gain de capacité d'évacuation d'énergie, une diminution de l'usure et une réduction des masses non suspendues O. Roussette et al [30] concluent que le coefficient de frottement instantané

montre un niveau voisin de la valeur de 0,35 et une stabilité compatible avec son utilisation industrielle aux pressions élevées. Une augmentation du coefficient de frottement aux basses vitesses de glissement est cependant notée en cours d'expérimentation en fin de freinage. L'étude des mécanismes physiques de frottement et d'usure a révélé à la surface du pion des zones de contact disséminées. Une étude de caractérisation expérimentale du contact frottant disque garniture sous sollicitations sévères de freinage menée par A. Bulthé [31] révèle un comportement différent de l'évolution du coefficient de frottement pour chacun des deux freinages considérés. En effet, au cours du freinage à basse énergie durant lequel les températures ne dépassent pas 100°C sous la surface de frottement dans le disque et dans le patin, le coefficient de frottement est stable autour de 0,3 pendant les deux premiers tiers du freinage avant d'effectuer une remontée importante pour atteindre 0,42 au moment de l'arrêt. Dans le cas du freinage d'arrêt à haute énergie qui constitue une sollicitation sévère du contact conduisant à des températures de masse élevées, de 240°C et 180°C mesurées à 2 mm sous la surface de frottement respectivement dans le disque et dans le patin, l'évolution du coefficient de frottement montre un comportement tribologique perturbé pendant la première partie du freinage avant de se stabiliser autour de la valeur de 0,28 jusqu'à la fin du freinage.

5. Conclusion

Les mesures des caractéristiques physique et mécanique du composite C/C à matrice organique montrent une dispersion caractéristique de l'aspect composite du matériau. Celle-ci est due principalement à l'aspect hétérogène de ce type de matériau. Les valeurs des résistances mesurées sur des échantillons cubique et cylindrique sont convergentes et rentrent dans les ordres de grandeur de celles rapportées par la littérature scientifique et technique.

Le développement de nouveaux matériaux composites innovants à base de résines performantes renforcées de fibres résistantes appropriées s'impose. Enfin la mise en place des essais d'usure réalisés sur un tribomètre permettant de simuler le fonctionnement du dispositif industriel des sabots de frein en matériau composite C/C par une représentativité des essais de freinage sur le tribomètre par rapport au freinage en service ont permis d'évaluer la variation du coefficient de frottement avec le temps.

Les approches expérimentales et numériques sur la caractérisation tribologique du contact et du comportement de différents couples de matériaux de friction utilisés en freinage ferroviaire ont ainsi permis l'identification de certains mécanismes physiques de frottement associé. Malgré ces avancées, il est clair que les sollicitations sévères subies par les organes de freinage à friction engendrent des gradients de températures élevées au contact ce qui complique les études. Une modification des phénomènes physiques mis en jeu au contact des matériaux de friction utilisés souvent à leurs limites de dégradation comme rapporté par de nombreux travaux et investigations expérimentales rencontrées dans la littérature peut engendrer un phénomène de 'fade'. Celui-ci est caractérisé en général par une chute du coefficient de frottement et une augmentation de l'usure ce qui cause surtout des problèmes de sécurité.

En perspective, les investigations industriels doivent s'orienter vers une amélioration des performances des systèmes des freinage en cherchant à mieux appréhender la durabilité des nouveaux matériaux composites de friction sous les sollicitations sévères par une meilleure compréhension des interactions entre les phénomènes physiques de frottement, leurs natures multi échelles et multi physiques ainsi que la nature transitoire du freinage. Au niveau des laboratoires de recherches, l'utilisation des tribomètres de freinage doit permettre la mise en place de bancs d'essais de frottement capable de simuler et de reproduire à l'échelle réduite les conditions de freinage rencontrées en cours de service. La démarche consistera à décomposer autant que possible les phénomènes de frottement et d'usure.

Remerciements

Les auteurs remercient la direction régionale de transport ferroviaire de Annaba et notamment son service matériel pour toutes les facilités accordées au niveau de ses locaux et de ses ateliers ainsi que la direction de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie de Annaba (ENSMMA) pour l'aide fournie quand à l'utilisation de certains appareillages de ses laboratoires.

Référence :

- [1] X. Bourrat, A. Oberlin, R. Bachelard, *Carbon*, 31, 2, 1993, pp. 287-302.
- [2] A. Fillion, "Composites C/C et C/C-SiC pour applications tribologiques", Thèse de Doctorat de l'Université Bordeaux I, France, n° 2168, 2000.
- [3] Fiches UIC : Union Internationale des Chemins de fer (UIC)
- 1) Fiche UIC n° 541-1 : Frein - Prescriptions concernant la construction des différents organes de frein, 6e édition, novembre 2003.
 - 2) Fiche UIC n° 541-4 : Frein - Freins avec des semelles de frein en matière composite, 2e édition du 01.10.90 et 3e édition du 1er avril 2006.
 - 3) Fiche UIC n° 544-1 : Frein - Performance de freinage, 4e édition, octobre 2004.
- [4] Normes Européennes : Commission Européenne (CEE)
Directive européenne 91/155/CEE de la Commission définissant et fixant, en application de l'article 10 de la directive 88/379/CEE du Conseil, les modalités du système d'information spécifique relatif aux préparations dangereuses, 5 mars 1991, JO L 076 du 22/03/1991.
- [5] G. Akhras « Composites intelligents-Applications et perspectives » Comptes rendus des 16^{ème} Journées Nationales sur les Composites (JNC 16), Toulouse 2009, France.
- [6] Normes Internationales : Organisation internationale de normalisation (ISO)
- 1) 17025:2005 : Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais, 2005
 - 2) 2768-1:1989 : Tolérances générales - Partie 1 : Tolérances pour dimensions linéaires et angulaires non affectées de tolérances individuelles, 1989.
 - 3) 2768-2:1989 : Tolérances générales - Partie 2 : Tolérances géométriques pour éléments non affectés de tolérances individuelles, 1989.
 - 4) 9001:2000 : Systèmes de management de la qualité - Exigences, 2000.
- [7] G. Lu, P. Cui., Q. Wang, "Influence of structure of the reinforcement in C/C composite on its friction and wear behaviour", *Proc. Conf. Carbon 2002*, Shanxi Chungin Audio-Visual Press Ed., Beijing, 15-19 Sept. 2002.
- [8] J.D. Chen, J.H. Chern, C.P. Ju « Effect of load on tribological behaviour of carbon-carbon composites », *Journal of Materials Science* 31 1996, pp. 1221-1229.
- [9] J.D. Chen, J.H. Chern Lin, C.P. Ju, «Effect of humidity on the tribological behavior of carbon-carbon composites » *Wear* 193, 1996, pp. 38-47.
- [10] B.K. Yen "Roles of oxygen in lubrication and wear of graphite in dusting and ambient conditions", *Journal of Materials Science Letters*, 1995, vol. 14, pp. 1481-3.
- [11] F.M. Kustas, R.R. Hanson, J.L. Summer, "Tribological performance of 3D carbon-carbon composite », *Composites Part I: Ambient Environment, Lubrication Engineering*, 1995, Vol. 51. (7), pp. 599-604.
- [12] K. Anand, V. Gupta, «The effect of processing conditions on the compressive and shear strength of 2D carbon-carbon laminates », *Carbon*, 1995, vol. 33, N° 6. pp. 739-48.
- [13] M. Godet "The third body approach, a mechanical view of wear", *Wear* 100, 1984, pp. 437-452.
- [14] Y. Berthier, M. Godet, Third body approach Tribology Series 32, 1996, pp. 21-30.
- [15] Y. Berthier, « Background on friction and wear" in Lemaître *Handbook of Materials Behavior Models*, Academic Press, Section 8.2. 2001, pp. 676-699.
- [16] S. Descartes, Y. Berthier, "Rheology and flows of solid third body: background and application to an MoS_{1.6} coating", *Wear*, 252, 2002, pp. 546-556.
- [17] G. Rohini Devi, K. Rama Rao, "Carbon-carbon composites – an overview", *Defence Science Journal*, 43, 4, 1993, pp. 369-383.
- [18] C. Taylor, "Carbon matrix composites » *Comprehensive Composite Materials*, A. Kelly, C. Zweben, R. Warren (Eds), Pergamon Press, 4, 2000, pp. 387- 426.
- [19] F. Gorisse, «Essais et contrôle des bétons », Editions Eyrolles, Paris, France, 1978.
- [20] F. Gorisse, «Les essais mécaniques » in le béton hydraulique, Presses de l'ENPC, Paris, France, 1982, pp. 379-381.
- [21] F. Chellali, B. Redjel, "La pratique des essais destructifs : l'essai d'écrasement du béton », *Algérie – Equipement, Revue Technique de l'ENTP*, N° 41, Mai 2006, pp. 16-20.
- [22] G. Lu, P. Cui, Q. Wang, "Influence of structure of the reinforcement in C/C composite on its friction and wear behaviour", *Proc. Conf. Carbon 2002*, Shanxi Chungin Audio-Visual Press Ed., Beijing, 15-19 Sept 2002.
- [23] M. Beaumont, T.N. Farris, C.T. Sun, « Scratch testing of advanced composite surfaces », *Composites Part A*, Vol. 28A, 1997, pp. 683-686.
- [24] B.S. Tripathy, M.J. Furey, «Tribological behavior of unidirectional graphile-epoxy and carbon-PEEK composites ». *Wear*, Vol. 162-164, 1993, pp. 385-396.
- [25] B. Suresha, G. Chandramohan, « Effect of normal load and sliding velocity on friction and wear behavior of carbon fiber reinforced epoxy composites ». *Journal of reinforced plastics and composites*, Vol. 26, 2007, pp. 1695-1703.
- [26] H.H. Shim, O.K. Kwon, S.R. Youn, «Effects of fiber orientation and humidity on friction and wear properties of graphite fiber composites », *Wear*. Vol. 157, 1992, pp. 141-149.
- [27] X. Ning, M.R. Lovell, « On the sliding friction characteristics of unidirectional continuous FRP composites ». *Journal of tribology*, Vol. 124, 2002, pp. 5-13.
- [28] O. Smerdova, A. Le Bot, J. Cayer-Barrioz, B. Sarbaev, "Frottement des matériaux composites polymères a renfort de fibre de carbone : expériences et modélisation", *AMAC- Comptes Rendus des JNC 17 – Poitiers-futuroscope 15-17 Juin 2011*, France, pp.178. <hal-00597754>.
- [29] D. T. Pham, A. Gavrus, H. F. tancillette" Conception d'un nouveau test de frottement pour le forgeage à froid par extrusion et études tribologiques d'un alliage d'aluminium" *20ème Congrès Français de Mécanique CFM 20*, Besançon, 29 Août au 2 Septembre 2011, France.
- [30] O. Roussette, Y. Desplanques, G. Degallaix, M. Minet, Y. Gallo « Comportement tribologique en freinage à haute énergie de garnitures en matériaux organiques ».
- [31] A. L. Bulthé "Caractérisation expérimentale du contact frottant disque garniture sous sollicitations sévères de freinage. Prise en compte des interactions tribologie, thermique et physico-chimie", *Thèse de doctorat*, Mécanique, N°d'ordre 39, Ecole Centrale de Lille et Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille 29 novembre 2006, France, 144p.