

Soumis le : 26 Avril 2014

Forme révisée acceptée le : 15 Mai.2015

Email de l'auteur correspondant :

bredjel@yahoo.fr

Diagnostic et analyse quantitative des défaillances et des usures des sabots de frein en matériau composite C/C des wagons SNTF

^a I. Benbrinis, ^b B. Redjel

^aDoctorant, Direction régionale de transport ferroviaire – Service matériel, Annaba, 23000, Algérie

^bProfesseur, Laboratoire Génie Civil – Université Badji Mokhtar Annaba, BP 12, Annaba 23000, Algérie

Abstract

Un diagnostic des usures des semelles en matériaux composites Carbone/Carbone de freins de Wagons SNTF est dressé à partir d'une analyse du contact acier/composite sur un trajet de 425 Km. L'identification et la classification des usures est mise en évidence à l'aide de l'étude du comportement en ligne des sabots en cours d'exploitation ce qui a permis de cerner celles les plus fréquemment observées. La modélisation paramétrique du phénomène pour chaque rame et pour chaque période a été établie à la base de la quantification des différentes usures constatées sur chaque sabot.

Des tests de résistance du sabot en matériau composite au cisaillement et à la flexion ont été mis en place ce qui a conduit à définir sa conformité par rapport aux normes.

Mots clés : usure, sabot de frein, composite, flexion, cisaillement.

1. Introduction

De nouveaux matériaux tels que les céramiques, les composites performants, les matériaux composites avancés les frittés, ont fait leur apparition ces dernières années dans le domaine du contact et de la friction et dont certains pourraient en particulier avoir des applications dans le domaine du freinage ferroviaire pour augmenter les capacités de dissipation énergétique des sabots de frein [1-2-3]. Ainsi, l'utilisation de semelles de frein en matériaux composites ne générant pas de crissement au freinage et limitant le dépolissage des tables de roulement des roues, fortement génératrices de bruit lors des circulations contribuerait de façon sensible à réduire et à limiter la signature acoustique des trains de fret [2-3-4-5]. Il est à noter que la semelle en matériau composite amalgamée à l'aide d'un liant en résine synthétique 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 [6-7-8].

Des normes internationales ont alors été élaborées puis développées pour standardiser les performances de ces semelles laissant la composition de chaque matériau spécifique à l'exigence du fabricant. La littérature technique et scientifique rapporte que deux types de semelles ont ainsi été définis : la semelle K à haut coefficient de frottement de 0,25 en moyenne et celle L à faible coefficient de frottement de 0,17 en moyenne [8]. Ainsi, les importants progrès réalisés sur les semelles composites ont permis de réduire leur forte sensibilité à l'humidité et de généraliser leur utilisation sur de nombreux matériels [4-5].

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 [4-5-6-8-9].

Des rapports établis par la SNTF consignent tout type d'anomalie observée, le niveau de réparation pour chaque wagon ainsi que tout incident engendré lors du parcours de la rame après une expertise bien détaillée. Parmi les réparations effectuées, les plus inventoriées sont le graissage des timoneries mécaniques et des organes de roulement, le remplacement des sabots usés, la vérification des organes de chocs, du frein et de l'étanchéité du circuit de frein, les soudures diverses [10]

L'analyse des consommations des semelles composites démontre la persistance de l'augmentation de leur utilisation notamment durant la période estivale des mois de Juin, de Juillet et d'Août par rapport aux autres périodes [11-12]. Ces importantes consommations imposées par les fréquences des trajets mettent ainsi la SNTF (Société Nationale de Transport Ferroviaire) en décalage par rapport à son plan de charge et à ses prévisions.

De ce fait, ce travail de recherches sur le terrain porte sur l'analyse de ces sabots de frein en matériaux composites et ce dans le but d'identifier leur comportement et de proposer d'éventuelles solutions quand à cette situation.

2. Matériau constitutif et caractérisation physico mécanique

2.1. Matériau constituant les sabots

Le produit constituant les sabots est un matériau composite carbone / carbone désigné sous l'appellation « C/C » c'est-à-dire constitué d'une matrice en carbone massif renforcée par des fibres, elles-mêmes en carbone. La complémentarité et la combinaison des qualités de chacun des composants que sont les fibres et la matrice confèrent au matériau global des performances mécaniques et thermiques intéressantes.

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 au moyen d'une ficelle mince et son poids dans l'air est déterminé avec une précision de 1 mg. L'éprouvette est ensuite suspendue librement dans de l'eau à une température comprise entre 18 et 24°C, puis 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 : $m_v = 1,658 \text{ g/cm}^3$

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

Il apparaît une divergence assez importante 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.

2.3. Dispositif de compression

Les éprouvettes destinées à la caractérisation en compression du matériau ont été prélevées dans les semelles et 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 $50 \pm 5 \%$. 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 autre ainsi qu'à une attaque de l'outil par le matériau composite qui est dur.

Deux types d'éprouvettes ont été utilisés pour la compression : des éprouvettes cubiques de $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ et des éprouvettes cylindriques de 2.5 cm de hauteur et de 2 cm de diamètre.

Le diamètre et la hauteur des éprouvettes sont mesurés avec une précision de 10 μm . Les éprouvettes sont soumises à l'essai d'écrasement sur une machine de compression type Zwick/Roell de capacité 20 KN pilotée par ordinateur. La vitesse de déplacement de la traverse est fixée à 2 mm/min. La figure 1 montre le dispositif utilisé.



Figure 1 : test de compression sur une éprouvette cylindrique

3. Diagnostic des usures et méthodologies expérimentales des essais

La démarche de conduite du diagnostic adoptée dans cette étude est basée sur deux types d'essais. Le premier s'effectue en ligne afin de déduire les probabilités des types de l'usure et les causes possibles. Le second est un test de résistance des sabots qui est une méthode d'homologation de ce type de semelle conformément aux normes UIC 2006 [4-5].

3.1. Essais en ligne ou en exploitation

3.1.1. Semelles pour essais

12 Diagnostic et analyse quantitative des défaillances et des usures des sabots de frein en matériau composite C/C des wagons SNTF

Il est important de signaler que les semelles utilisées pour les essais doivent impérativement présenter les dimensions du modèle original correspondant à la production en série. Chaque programme a été effectué avec des semelles neuves du même lot de fabrication.

La composition du matériau constitutif des semelles composites a été choisie de façon à assurer le meilleur compromis entre les caractéristiques de frottement, l'agressivité vis-à-vis de la table de roulement de la roue, l'influence sur l'adhérence roue/rail, la compatibilité avec les installations de signalisation (circuits de voie), l'usure et la durée de vie des semelles composites ainsi que les autres exigences vis-à-vis de l'évaluation de conformité.

Il est aussi important de signaler qu'au cours des essais en ligne, l'apparition sur les semelles de flammes, l'exsudation du liant, les crissements permanents et les fortes odeurs sont strictement interdites. De plus, les semelles ne doivent ni s'effriter ni se délaminer sur une surface importante et elles ne doivent pas présenter d'avaries entravant leurs performances mécaniques. Toutes ces précautions ont été prises et surveillées durant tous les trajets des expérimentations.

3.1.2. Conditions des essais en service

Les essais en service ont été réalisés sur un nombre de 32 wagons dotés de freins de conceptions différentes et évoluant dans des conditions atmosphériques variables en période hivernale et en période estivale, pendant plusieurs navettes sans interruption sur le parcours Djebel Onk – Annaba d'une distance de 452 Km sur un même véhicule. Ce parcours est suffisant pour produire des anomalies. Un système d'investigation employé depuis des années par la SNTF a contribué à effectuer cette mesure. Il est intéressant de noter que ces essais en service doivent surtout permettre de prouver que la semelle composite en question est utilisée dans les conditions indiquées dans la demande d'évaluation de conformité, qu'elle n'occasionne pas de détérioration aux roues et qu'elle n'induit pas de perturbation dans la circulation des trains.

Pour les besoins de l'analyse, chaque observation a été symbolisée comme suit :

A : usures sur un seul coté du sabot - B : usure acceptable (conforme) - C : fissure anormale ou cassure - D : décollage du composite de l'armature métallique de la semelle - X : usure très avancée au delà de la limite d'usure - Y : inclusion métallique sur la roue - Z : semelle carbonisée ou brûlée.

Après chaque parcours d'une rame composée de trente-deux wagons à essieux destinés aux transports de phosphate de Djebel Onk (lieu de chargement) jusqu'à Annaba (poste d'entretien et de remplacement des sabots), les observations des usures constatées sont ainsi relevées selon la classification par symbole et ce pour les deux périodes hivernale et estivale.

3.2. Tests mécaniques d'homologation (UIC 2006)

3.2.1. Résistance au cisaillement

Un dispositif utilisant une presse hydraulique a été adopté comme montré sur les figures 2 et 3 conformément aux spécifications UIC 2006 [10]. Une tôle entre les deux parties de la semelle a été utilisée pour assurer une bonne transmission de l'effort.



Figure 2: essai de la résistance au cisaillement



Figure 3: presse hydraulique

3.2.2. Résistance à la flexion

Le même dispositif de la presse hydraulique a été adopté pour les tests mécaniques de la résistance à la flexion réalisés conformément aux spécifications de l'UIC 2006, afin de localiser les parties les plus fragiles du sabot composite [10].

Essai n° 1 : 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 [10] et d'une longueur de 320 mm, une semelle composite a été soumise à un effort monotone croissant appliqué par une presse hydraulique (figures 4 et 5).



Figure 4: essai de flexion n°1



Figure 5 : application

Essai n° 2 : cet essai permet de définir la cause réelle de la déformation si elle 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 6).



Figure 6 : Essai n° 2 de flexion

Ces deux essais sont effectués à chaque fois avec de nouvelles semelles. La sollicitation est appliquée de façon monotone à une vitesse de 30 mm/min.

Résultats, analyse et discussions

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

Les figures 7 et 8 montrent un exemple de relevé de courbe charge-déplacement obtenu durant l'essai de compression pour les deux types d'éprouvettes testés. Ces courbes présentent la même allure et sont linéaires jusqu'à la rupture totale traduisant le caractère élastique fragile du matériau. Il est à signaler que les prélèvements des cylindres et des cubes ont été effectués dans des endroits différents et des semelles différentes.



Figure 7 : comportement en compression de l'éprouvette cylindrique

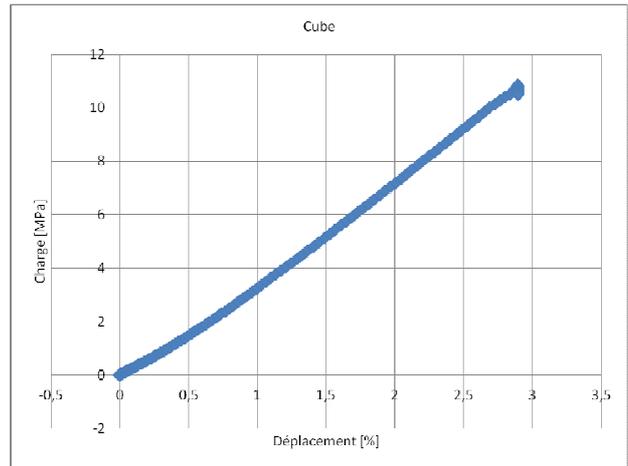


Figure 8 : comportement en compression de l'éprouvette cubique

4.2. Résultats des essais en ligne (en exploitation) :

Les 32 wagons exploités comprennent 256 sabots. Chaque wagon est équipé de 8 sabots. La figure 9 montre un exemple d'un wagon à essieux utilisé pour le transport du phosphate équipé de 8 sabots aux roues extrêmes.



Figure 9 : Exemple d'un wagon à essieux utilisé pour le transport du phosphate et équipé de huit sabots aux roues extrêmes

Ainsi l'addition des différents types d'usures constatées doit obéir à l'équation paramétrique suivante :

$$\sum n_i \cdot J = 256$$

n_i : nombre de sabots correspondant à un type d'usure i variant de 0 à 256

$J = A, B, C, D, X, Y, Z$ type d'usure constatée sur chaque sabot

4.2.1. Période hivernale

Les observations après le remplacement des sabots au poste d'entretien de Annaba sur les sabots usés des deux roues de chaque essieu ont été relevées, rassemblées puis dépouillées. Les usures sont ensuite quantifiées en utilisant les symboles adoptés pour leur dénomination. Il est à

14 Diagnostic et analyse quantitative des défaillances et des usures des sabots de frein en matériau composite C/C des wagons SNTF

signaler que pour chaque roue les défaillances ont été relevées sur les deux sabots gauche et droit et ce pour les 3 rames.

La sommation des différentes usures constatées sur chaque sabot a été établie pour les trois tests effectués sur les trois rames expérimentées. Les résultats donnent les équations suivantes :

- Premier essai (1ère rame) :

$$10A+12B+106C+45D+36X+24Y+23Z=256$$

- Deuxième essai (2ème rame) :

$$15A+17B+91C+60D+31X+20Y+20Z=256$$

- Troisième essai (3ème rame) :

$$20A+17B+81C+40D+51X+14Y+33Z=256$$

Le tableau 1 résume le nombre de sabots endommagés par nature d'usure et leur taux pour chaque rame.

Tableau 1 : Taux des différents types d'usure en hiver

Type d'usure	première rame		deuxième rame		troisième rame	
	sabot	taux %	sabot	taux %	sabot	taux %
A	10	3.9	15	5.86	20	7.81
B	12	4.70	17	6.64	17	6.64
C	106	41.40	91	35.55	81	31.64
D	45	17.58	60	23.44	40	15.62
X	36	14.06	31	12.10	51	19.92
Y	24	9.38	20	7.81	14	5.47
Z	23	8.98	20	7.81	33	12.89

Ces résultats sont représentés dans l'histogramme de la figure 10.

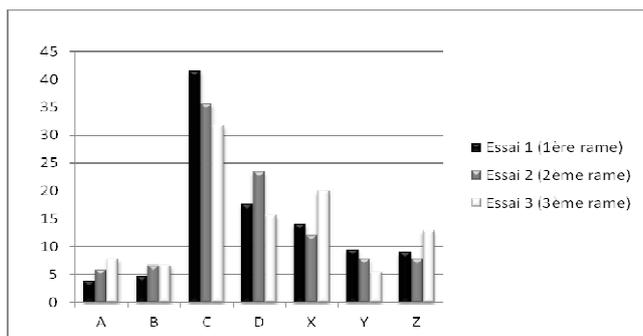


Figure 10 : histogramme du taux des sabots usés pour les différents types d'usure en période hivernale.

L'analyse des résultats de mesures enregistrés permet de dresser les constats suivants :

-type d'usure (A) : l'usure sur un seul coté de sabot est à un taux variant de 3.9 à 7.81. Ce type d'usure est dû généralement aux défauts géométriques des semelles. Il peut aussi être provoqué par un défaut au niveau du dispositif de détrompage de la fixation comme le montrent les figures 11 et 12.



Figure 11: dispositif de fixation



Figure 12 : semelle usée

-type d'usure (B) : [4.7 - 6.64] : peu de semelles s'usent conformément aux exigences prescrites par les fabricants, ce qui démontre qu'il s'agit d'un sérieux problème de qualité des sabots.

-type d'usure (C) : [31.64 - 41.40] : ce cas d'usure est très répandu comme le confirment les taux élevés mesurés. Il a même été distingué que la propagation de la fissure est souvent systématique à partir de l'entaille qui sépare les deux parties des semelles et qui a été créée pour une meilleure dissipation de la chaleur résultante du frottement semelle-roue (figures 13 et 14)



Figure 13 : semelle fissurée



Figure 14 : semelle fissurée à partir de l'entaille

-type d'usure (D) : [15.62 - 23.44] : ce type d'usure reflète une non conformité de la liaison du composite avec l'armature ce qui provoque un endommagement des portes semelles et même des roues (figure 15).



Figure 15 : décollage du composite aux extrémités
Tableau 2 : Taux des différents types d'usure

-type d'usure (X) : [14.06 - 19.92] : d'habitude ce type d'usure est peu rencontré dans des conditions climatiques pareilles (figure 16). Ses conséquences provoquent parfois des incidents très graves en ligne notamment l'incapacité de freinage car même le régleur de timonerie ne peut rattraper la course de liaison semelle-roue.



Figure 16 : usures exceptionnelles des semelles

-type d'usure (Y) : [5.47 - 9.38] : ce type d'anomalie est issu des différents types d'usures (C, D, X). Cette anomalie peut aussi engendrer des déraillements en ligne car elle cause parfois des surchauffes et des agressivités au niveau des organes de roulements des roues (boite chaude).

-type d'usure (Z) : [7.81 - 12.98] : sans tenir compte que ce défaut de brûlure est inacceptable, la première constatation d'expertise de ces semelles brûlées, montre bien quelles dégagent une mauvaise odeur. De ce fait une analyse chimique s'impose pour définir si ce matériau contient ou non des minéraux toxiques tels que l'amiante ou autres.

4.2.2 Période estivale

Les mêmes types d'essais de la période hivernale ont été reproduits durant la période estivale de Juin, Juillet et Août pour les trois rames et ce pour observer l'influence de la température sur la nature et le degré d'usure sur les sabots. Les résultats observés ont été eux aussi rassemblés, dépouillés puis classifiés.

Le tableau 2 résume le nombre de sabots endommagés par nature d'usure et leur taux pour chaque rame comme pour le cas de la période hivernale.

Tableau 2 : taux des différents types d'usure en été

Type d'usure	première rame sabot		deuxième rame sabot		troisième rame sabot	
	taux %		taux %		taux %	
A	5	1,95	8	3,12	2	0,78
B	8	3,12	7	2,73	5	1,95
C	30	11,71	40	15,62	25	9,76
D	47	18,35	38	14,84	51	19,92
X	58	22,65	61	23,82	67	26,17
Y	38	14,84	35	13,67	23	8,98
Z	70	27,34	67	26,17	83	32,42

Ces résultats sont représentés sur l'histogramme de la figure 17.

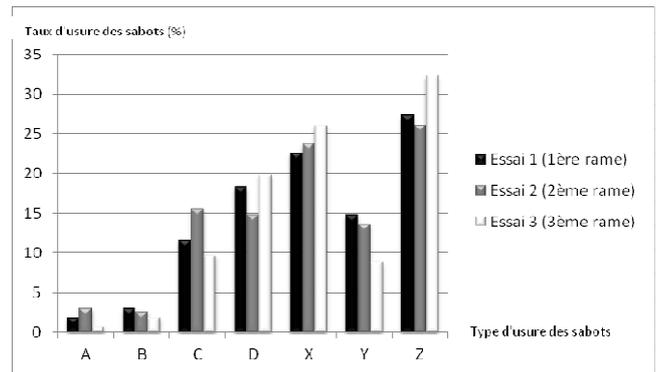


Figure 17: histogramme du taux des sabots usés des différents types d'usure en période estivale.

Afin d'analyser objectivement ces résultats, une comparaison entre les deux périodes explique mieux l'influence de la température sur l'usure des sabots.

-type d'usure (A) : le taux d'usure par rapport à la période hivernale est presque le même. Le dérèglement de la timonerie mécanique n'a pas de rapport avec les changements climatiques.

-type d'usure (B) : contrairement à l'usure A, le taux d'usure conforme à cette période est presque nul. De ce fait le comportement des semelles composites durant la période estivale est médiocre par rapport à celui de la période hivernale.

-type d'usure (C) : la présence des fissurations aux niveaux des sabots persiste mais avec en faible pourcentage. L'abaissement de la température favorise les cassures du matériau composite.

-type d'usure (D) : un même pourcentage est enregistré pour les deux périodes.

-type d'usure (X) : une influence légère de la température sur les endommagements des semelles au-delà de la limite d'usure est constatée. L'augmentation de la température a fait que les semelles s'usent plus rapidement pendant la période estivale et avant même que la rame n'atteigne le parcours prévu. L'usure des sabots dépasse la limite prévue.

-type d'usure (Y) : il y'a une apparition des criques thermiques aux niveaux d'un nombre très important de roues. Ceci peut provoquer une paralysie de la circulation et induire même des accidents.

-type d'usure (Z) : les observations du freinage en ligne pendant cette période et sur les descentes indiquent une création d'un sillant rouge d'étincelle entre la roue et la semelle. Ces observations expliquent très bien le

16 Diagnostic et analyse quantitative des défaillances et des usures des sabots de frein en matériau composite C/C des wagons SNTF

pourcentage de cette usure. On passe d'un taux moyen de 10,15 pendant la période hivernale à un taux de 28,64 en été.

4.2.3. Constat

A partir des observations relevées pour les deux périodes, les constats suivants peuvent être dressés :

- Pour l'usure A et d'après les caractéristiques géométriques des semelles, le dispositif de fixation ne semble pas être conforme aux normes en vigueur (p.ex. ISO -2768) [6-7].

- Pour l'usure B, un nombre très réduit de semelle s'use conformément aux exigences.

- L'usure C est un type contraire aux règles d'homologation des semelles. Selon les normes UIC [10] une semelle conforme aurait résisté aux sollicitations de flexion et de cisaillement, ce qui n'était pas le cas pour ces types de semelles qui présentent des fissures et des cassures aux moindres efforts de freinage.

- Pour l'usure D, contrairement à ce qui a été exigé par les normes en vigueur, un bon assemblage composite-tôle arrière n'a pas été assuré. C'est ce qui explique certainement la facilité de décollage du composite de l'armature métallique.

- Les mêmes constats peuvent être faits pour l'usure X : une semelle composite conforme ne s'use jamais au-delà de sa limite d'usure, qui est de 10mm en respectant un parcours kilométrique de 45000Km.

- D'après l'usure Y, il ne peut s'agir que d'une mauvaise qualité de semelle pour la simple raison que la durée de vie potentielle des roues est de 1200 000 Km alors que ce type de semelle s'attaque aux roues occasionnant des rebutés à des distances beaucoup moins importantes.

- L'usure Z est désormais la somme de toutes les défaillances car ses impacts sur la santé sont néfastes à cause des matières dégagées. Ce type de semelle présente un réel danger pour l'utilisateur surtout lors des transports des citernes carburants.

4.3. Résultats des tests mécaniques

4.3.1. Résultats de l'essai de cisaillement :

Après l'application de l'effort tangentiel dans l'espace de 4 S d'une façon régulière tel que recommandé par l'UIC 2006 [7], une flexion de la semelle a été remarquée dès que la valeur maximale de 15 KN de l'effort appliquée est atteinte. La semelle s'est cassée brusquement (figures 18 et 19).



Figure 18 : Résultat des essais de cisaillement



Figure 19: 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.

4.3.2. Résultats des essais de la flexion

Essai n° 1 : après application d'une charge (le premier développement de l'effort après 4 S) la semelle s'est mise à fléchir rapidement et avant même que la charge n'atteigne 10 KN, la semelle a éclaté juste au milieu et d'une façon brusque (figure 20). 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 20: 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 21).



Figure 21 : résultat de l'essai n° 2 de la flexion

5. Conclusion

L'analyse de diagnostic de défaillance des semelles composites telle que présentée montre que l'étude du comportement des semelles composites en ligne c'est-à-dire en cours d'exploitation fait apparaître des usures et des dégradations anormales par rapport à un vieillissement ordinaire. Les essais de flexion et de cisaillement font apparaître l'éclatement du produit et mettent en évidence sa non conformité par rapport aux règles en vigueur. A cet effet, et suite aux données collectées à chaque étape de cette étude, il apparaît clairement que le produit « semelles composites » actuellement utilisé n'est pas encore conforme aux normes et règles en vigueur et des mesures urgentes doivent être prises par la Société Nationale des Transports Ferroviaires devant cet état de fait, en inscrivant des postes de dépenses très importants et en développant de nouveaux matériaux composites innovants à base de résines performantes renforcées de fibres résistantes appropriées [13].

Références bibliographiques

[1] X. Bourrat, "Structure in carbons and carbon artefacts", Science of carbon materials, H. Marsh and F.Rodriguez-Reinoso, Pub. Universidad de Alicante, 1999, pp. 1-97.

[2] X. Bourrat X., A. Oberlin & R. Bachelard, *Carbon*, 31, 2, 1993, pp. 287-302.

[3] A. Fillion, "Composites C/C et C/C-SiC pour applications tribologiques", Thèse de Doctorat de l'Université de Bordeaux I, n° 2168, 2000.

[4] 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.

[5] 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.

[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] Sites Internet

- 1) www.uic.asso.fr Activités Techniques et Recherches Produits.
- 2) www.deschampsweb.com/site/eb/frein/partie2/partie2.htm - 154k
- 3) www.gcubureau.org/page/7/@fck_resource@/file/pdf/9-01-annexe1_fr.pdf
- 4) lwdr.free.fr/semelles.htm

[8] Techniques de l'ingénieur, 2ème édition, Février 2002.

[9] R. Outremer « Dessin, conception et normalisation », 5ème édition, France, Juillet 1982.

[10] I. Benbrinis & B. Redjel « Diagnostic et étude de l'agressivité causée par l'adhérence des sabots en matériau composite sur les roues métalliques des trains (contact acier-composite) » international conference on corrosion science and engineering, 28-29 October 2013, Université Annaba, Algérie, recueil des résumés.

[11] I. Benbrinis & B. Redjel « Tests de résistance des sabots de frein des wagons en matériau composite carbone-carbone et caractérisation mécanique » 1er congrès international des composites et des matériaux avancés CICMA 2014, 3-4 Mars 2014, Khenchela, Algérie, recueil des résumés p. 60.

[12] I. Benbrinis & B. Redjel, « Identification, analyse et modélisation des usures de sabots de frein en matériau composite des wagons de chemin de fer et étude des défaillances du matériau » Congrès Français de Mécanique CFM 2013, 26-30 Aout 2013, Bordeaux, (recueil des résumés sur CD), France.

[13] B. Redjel « matériaux composites » cours Licence Matériaux LMD, Département Génie Civil, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2011.