

Un coefficient de frottement amoindri grâce aux disques revêtus

M. Hoff^[1,2], Y. Chen^[3], M. Morgener^[4] et C. Bressot^[4]

^[1]UTC-ESCOM, Laboratoire Transformations Intégrées de la Matière Renouvelable (TIMR, EA 4297), 60203 Compiègne, France

^[2]MAT Friction Noyon SAS, 205 rue de l'Europe, 60400 Noyon, France 3.

^[3]Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM), Pôle MMS, 52 Av. Félix Louat, 60300 Senlis, France

^[4]Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), Rue Jacques Taffanel, 60550 Verneuil-en-Halatte, France

Des essais de tribologie ont été réalisés sur le banc pion-disque du CETIM avec des pions prélevés de la même plaquette de frein de type Low Steel et un disque en fonte et deux disques revêtus de Cr2O3 et de WC-CoCr. Les résultats des essais montrent une réduction de 50 à 90 % d'émission de particules grâce aux disques revêtus. Le coefficient de frottement est plus faible avec les disques revêtus, notamment à faible vitesse. Les résultats d'analyses au MEB-EDX montrent que la dureté, la rugosité et le taux de portance des disques, la réactivité chimique (oxydation) et l'abrasivité des trois couples sont des paramètres pouvant expliquer cette diminution d'émission.

Les particules émises par le transport routier apparaissent comme une cause croissante de préoccupations. Les travaux de l'Agence Européenne pour l'Environnement (AEE) ont mis en évidence la part prépondérante des émissions automobiles parmi les pollutions particulaires en Europe^[1]. D'après Timmers et al.^[2], 90 % des émissions de PM10 (Particulate Matter) dues aux véhicules à moteur à combustion interne (ICE) auraient pour origine des sources hors échappement telles que l'usure des systèmes de freinage, l'usure des pneus, l'usure de la chaussée et la remise en suspension des particules présentes sur la route^[3]. Les PM10 sont toutes les particules suspendues dans l'air, ayant un diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm. Les systèmes de freinage seraient responsables de 25 % des émissions de PM10 hors échappement^[3].

Bien que la toxicité des particules de freinage ne soit pas totalement avérée et qu'elle reste peu documentée, l'Union européenne s'intéresse tout de même aux émissions de PM10 puisque de nombreuses études démontrent leur capacité

à s'introduire dans les voies respiratoires, et à passer dans le sang pour les plus petites d'entre-elles^{[4], [5], [6]}.

Pour réduire les émissions de PM10 dans l'environnement, la Commission européenne a proposé une nouvelle norme, l'Euro 7, qui fait suite à la norme actuelle Euro 6. L'Euro 7 est une norme automobile destinée aux véhicules des catégories M1 et N1, c'est-à-dire de masse inférieure à 3,5 tonnes. Dans cette nouvelle norme, de nouveaux volets ont été ajoutés. Ces nouveaux chapitres concernent deux sources d'émission de particules hors échappement : l'usure des pneus et l'usure des systèmes de freinage.

Un facteur d'émission, c'est-à-dire un seuil de PM10 à ne pas dépasser, exprimé en mg/km/véhicule, a été proposé par la Commission européenne pour être appliqué aux systèmes de freinage. Un facteur d'émission de 7 mg/km/véhicule a été proposé pour les véhicules thermiques, et un seuil de 3 mg/km/véhicule a été proposé pour les véhicules hybrides et électriques. Le moyen de mesure de particules de freinage proposé dans la norme Euro 7 est le

banc dynamométrique. Cependant, pour étudier rapidement les émissions particulaires issues du freinage automobile, des essais de tribologie ont été réalisés sur le banc TGV (Tribomètre à Grande Vitesse de type Pion-Disque) du CETIM mis au point par F. Philippe^[7].

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence de différents types de disque de frein sur le taux d'émission de particules et en particulier de celle des disques revêtus. L'optimisation du matériau de revêtement du disque est, en effet, une piste très prometteuse pour réduire les émissions de particules^{[8], [9], [10], [11]}. Cette optimisation est fondée sur des compréhensions approfondies des mécanismes tribologiques. Les analyses MEB-EDX ont permis d'observer à de forts grossissements la structure et la composition chimique de la surface des pièces d'essais.

1. Méthodologie

1.1 Banc « Pion-Disque »

Les essais de mesure de particules ont été réalisés à l'aide du banc Pion-Disque du CETIM (Figure 1) développé par Philippe et al.^[7]. Le disque de frein est entraîné dans le sens antihoraire par un moteur à courant continu. Le système de masse du banc permet de mettre en mouvement le pion et de créer ainsi un contact avec le disque.

Pour mesurer les particules émises par un système, les conditions d'essais doivent être optimales. La concentra-

tion en nombre de particules dans l'environnement du système testé doit être faible, la plus proche possible de $0 \# / \text{cm}^3$, pour différencier les particules émises par le système de freinage, de celles de l'air ambiant. Le banc pion-disque seul (cf. Figure 1) permet de mesurer les variables tribologiques qui caractérisent un frottement et doit être isolé de l'air ambiant pour permettre de caractériser l'émissivité des matériaux lors de frottements.

Le banc est donc placé dans une enceinte étanche (3) reliée à deux caissons de filtration (cf. Figure 2). Le premier caisson (2), composé de deux filtres de type F7 et H13, est placé à l'entrée du circuit pour filtrer l'air entrant dans le circuit. L'air circulant dans le circuit est, en effet, prélevé dans le local où se situe le banc. Le second caisson (6), de même nature que le premier, est placé à la sortie du circuit pour ne pas rejeter dans l'air ambiant les particules générées pendant le freinage.

Lorsque l'air sort de l'enceinte étanche par le conduit d'extraction (4), une partie se dirige vers le caisson de filtration de sortie (6) et l'autre partie rentre dans la ligne de prélèvement et se dirige vers les appareils de mesure : le CPC pour compter le nombre de particules, l'APS et SMPS pour mesurer la taille des particules, et le filtre pour mesurer la masse des particules prélevées.

Le conduit d'extraction (4) se situe en face de la zone de contact entre le pion et le disque.

Le flux d'air passe ainsi à travers cette zone de contact où les particules sont émises au cours des séquences de frottement (cf. Figure 3).

Figure 3 Schéma simplifié du banc Pion-Disque (vue du dessus).

1.2 Mesure du nombre de particules (CPC)

Dans cette étude, la concentration en particules exprimée en $[\# / \text{cm}^3]$ a été mesurée à l'aide d'un CPC (Condensation Particle Counter) de la marque TSI (modèle 3375). Cet appareil permet de compter les particules ayant un diamètre aérodynamique situé entre 4 nm et 3 μm . Les particules sont grossies par condensation du butanol à basse température pour pouvoir être détectées par capteur optique, de type laser.

1.3 La technique MEB-EDX

La technique MEB-EDX est une technique de microscopie combinant à la fois la mi-

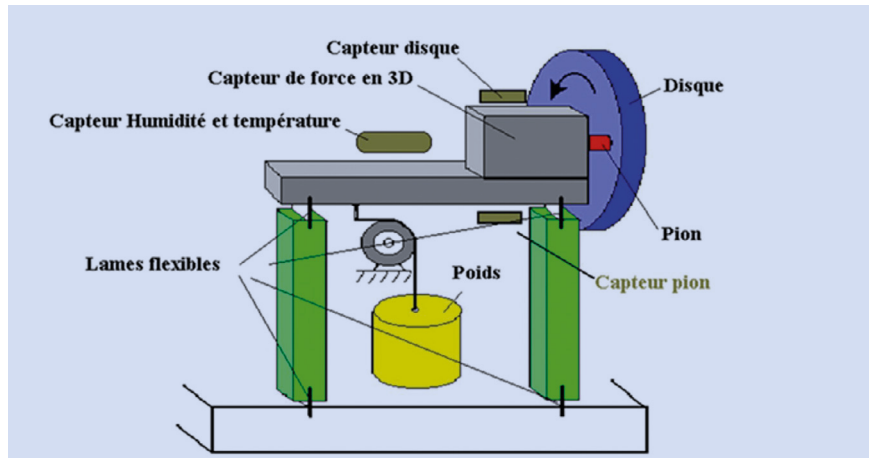


Figure 1. Schéma du banc TGV du CETIM Senlis.

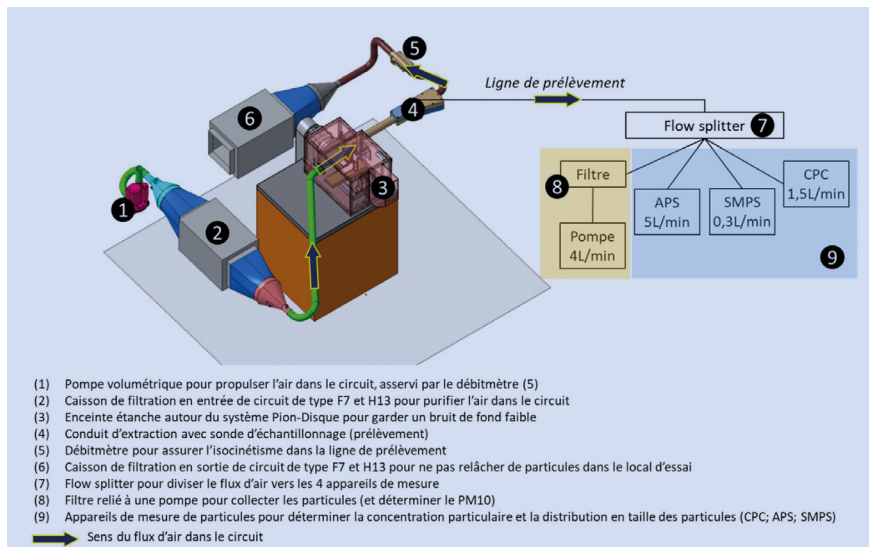


FIGURE 2 : Schéma global du banc dans son système de confinement.

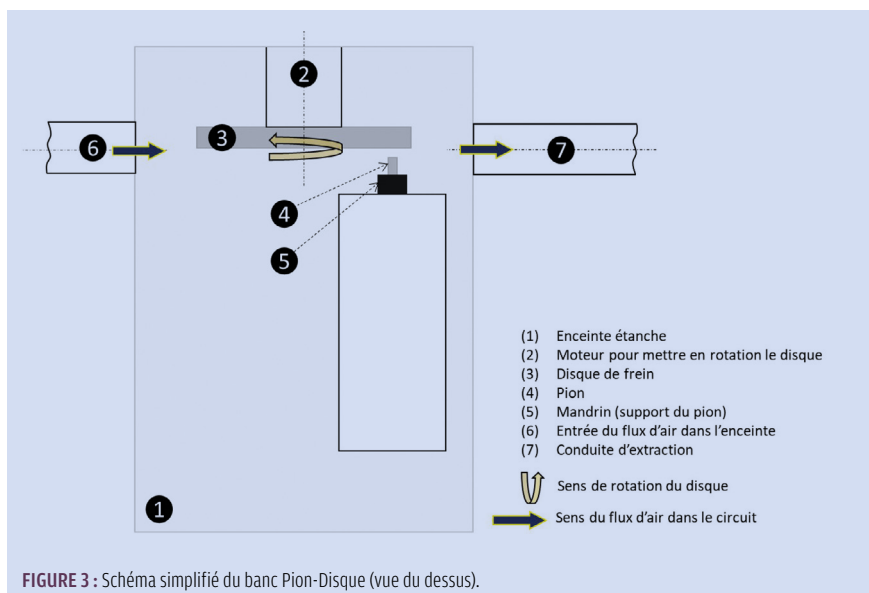


FIGURE 3 : Schéma simplifié du banc Pion-Disque (vue du dessus).

Nature du disque	Composition du dépôt	Porosité	Dureté	Rugosité (Ra)	Portance
Fonte	93% Fe, 3.37% C, 2.06% Si, ...	0%	<<1100HV0.3		
Cr ₂ O ₃	>99.6% de Cr ₂ O ₃	5%	1100HV0.3	0.528µm	≈80%
WC-CoCr	86% WC, 10% Co, 4% Cr	<1%	1100HV0.3	0.133µm	≈50%

Tableau 1 : Principales propriétés des trois disques d'essai.

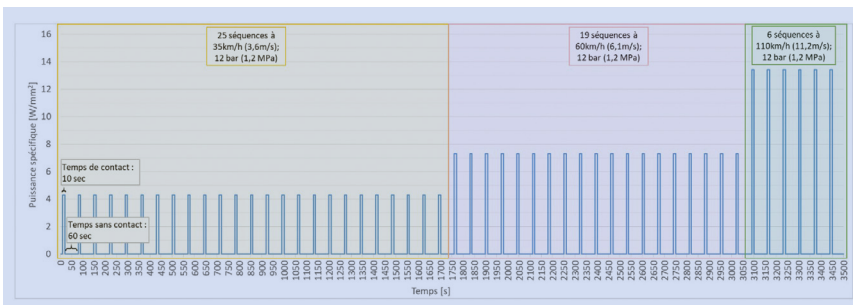


FIGURE 4 : Protocole expérimental.

	référence		
	LS03 Fonte	LS03 Cr ₂ O ₃	LS03 WC-CoCr
CoF à 35km/h	0,49	0,30	0,35
Réduction/référence		-39%	-29%
CoF à 60km/h	0,45	0,30	0,35
Réduction/référence		-33%	-22%
CoF à 110km/h	0,40	0,33	0,47
Réduction/référence		-18%	18%

TABLEAU 2 : Coefficient de friction à différentes vitesses du matériau LS03 testé sur fonte, disque de Cr₂O₃ et disque WC-CoCr.

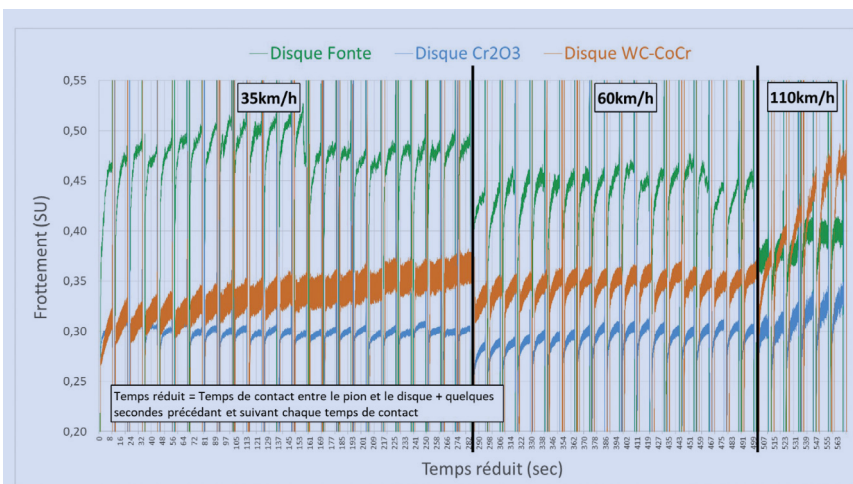


FIGURE 5 : Coefficient de friction des trois disques d'essai.

croscopie électronique à balayage (MEB) et la spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDX). Cette technique permettra d'observer à de forts grossissements la surface des pièces d'essais, et de connaître leur composition chimique en surface, dont le numéro atomique est supérieur à 5 (Bore).

1.4 Matériaux de friction et disques de frein

Un matériau de friction de type Low Steel (LS03), proposé par le fabricant de plaquettes de frein MAT Friction Noyon, a été testé sur 3 disques de frein de différentes natures : une fonte standard, un disque revêtu de d'oxyde de chrome (Cr₂O₃) et

un disque revêtu de carbure de tungstène (WC-CoCr). Le disque de référence est un disque en fonte qui est régulièrement utilisé dans des essais de friction.

Le matériau Low Steel testé est sans amiante, composé de fibres d'acier en faible quantité (<30% en volume). Ce matériau a la particularité d'être riche en fibres synthétiques. Les pions sont neufs avant chaque essai et ont un diamètre de 5mm.

1.5 Les conditions d'essais

Le cycle d'essai est composé de 50 séquences de frottement de 10 secondes, séparées les unes des autres de 60 secondes. L'essai consiste en un enchaînement de 25 séquences de frottement à 35km/h, suivies de 19 séquences de frottement à 60km/h et de 6 séquences de frottement à 110km/h. Quant à la pression de contact, elle a été fixée à 12 bars. Ces vitesses et le nombre de séquences de frottement, associé à chaque vitesse, ont été déterminés pour se rapprocher de l'essai normalisé WLTP.

Les pions ont tous été rodés au préalable pendant une heure, au moyen de 50 séquences de 10 secondes à 80 km/h, espacées de 60 secondes, et à une pression de contact fixe de 12 bars.

2 Résultats

2.1 Coefficient de friction (CoF)

Le coefficient de friction a été mesuré pour tous les essais réalisés lors de la campagne. Le coefficient de friction est tracé en fonction du temps réduit sur le graphe ci-dessous (Figure 5). Le temps réduit correspond au temps de contact entre le pion et le disque ainsi que quelques secondes précédant et suivant chaque temps de contact. Ainsi, les temps sans contact entre le pion et le disque ne sont que partiellement représentés sur ce graphique. Les coefficients de friction obtenus lors des frottements avec le matériau LS03 sont très différents selon la surface des disques.

Une diminution du coefficient de friction a été observée avec l'utilisation des disques revêtus.

Le test entre le matériau LS03 et le disque revêtu de Cr₂O₃ met en évidence un coefficient de friction (CoF) plus faible de 20% à 40% par rapport à son équivalent en fonte.

Le coefficient de friction résultant du test impliquant le matériau LS03 et le disque revêtu de WC-CoCr montre une valeur plus faible de 20% à 35km/h et de 30%

à 60km/h par rapport à son équivalent avec le disque de fonte.

Par ailleurs, le test impliquant le disque revêtu de carbure de tungstène montre une fluctuation du coefficient de friction à la vitesse de 110km/h. Par rapport au test du matériau LS03 sur le disque de fonte, le coefficient de friction est plus élevé, d'environ 20 % en fin d'essai, et non-constant (cf. courbe orange, Figure 5).

2.2 Emissions en nombre de particules

Quelles que soient les conditions de tests choisis, les concentrations en particules augmentent avec la vitesse d'essai. Les résultats montrent également que la concentration particulaire a été fortement réduite par l'utilisation des disques revêtus. Les moyennes en concentration particulaire des différents couples de matériau de friction et de disque de frein montrent une réduction allant de 50% à 90% selon le revêtement et la vitesse d'essai, par rapport au matériau de référence, à savoir le matériau LS03 testé sur le disque en fonte.

Un pic élevé d'émission de particules à 1913 #/cc a été mesuré à 110km/h avec le disque revêtu de WC-CoCr. Si on ne prend pas en compte les deux dernières

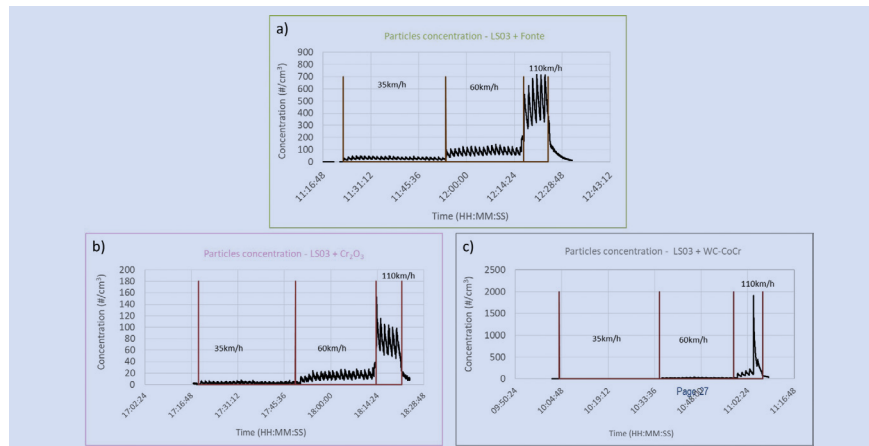


FIGURE 6 : Concentration en nombre de particules - a) LS03 sur Fonte ; b) LS03 sur Cr2O3 ; c) LS03 sur WC-CoCr.

Vitesse	Part de durée dans l'essai	Référence		
		LS03 Fonte	LS03 Cr ₂ O ₃	LS03 WC-CoCr
35km/h	50%	29	3	2
	Réduction par rapport à la référence		-90%	-93%
60km/h	38%	86	15	20
	Réduction par rapport à la référence		-83%	-77%
110km/h	12%	468	77	242
	Réduction par rapport à la référence		-84%	-48%
Résultats pondérés du comptage [# / cm³]		103	16	38
Réduction par rapport à la référence			-84%	-64%

TABLEAU 3 : Comparaison des concentrations particulaires moyennes du matériau LS03 testé sur fonte et disques revêtus.

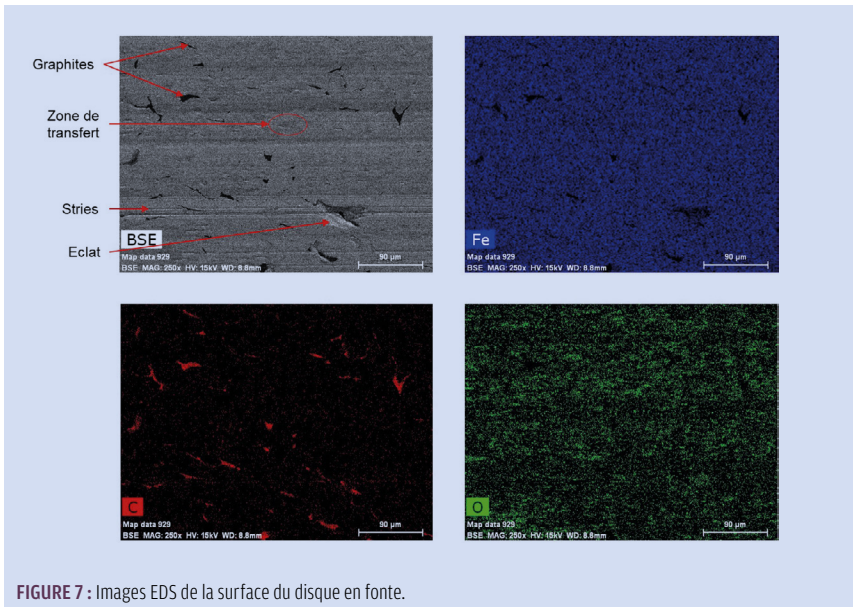


FIGURE 7 : Images EDS de la surface du disque en fonte.

séquences à 110 km/h, la moyenne de la concentration particulière est d'environ 115 #/cc.

2.3 MEB-EDX

Le disque en fonte et les trois pions d'essai ont été observés au microscope électronique à balayage après les essais de friction.

La surface du disque en fonte à graphite lamellaire, comporte des stries de frottement, des éclats et de nombreuses zones de transfert à l'origine d'un « troisième corps ». Les zones de transfert sont composées de fer et d'oxygène : il s'agit d'oxyde de fer qui n'est pas visible en vue de coupe à cause de sa faible épaisseur, de l'ordre de quelques nanomètres. Sur la cartographie de l'élément carbone, les zones rouges correspondent aux lames de graphite présentes dans la fonte.

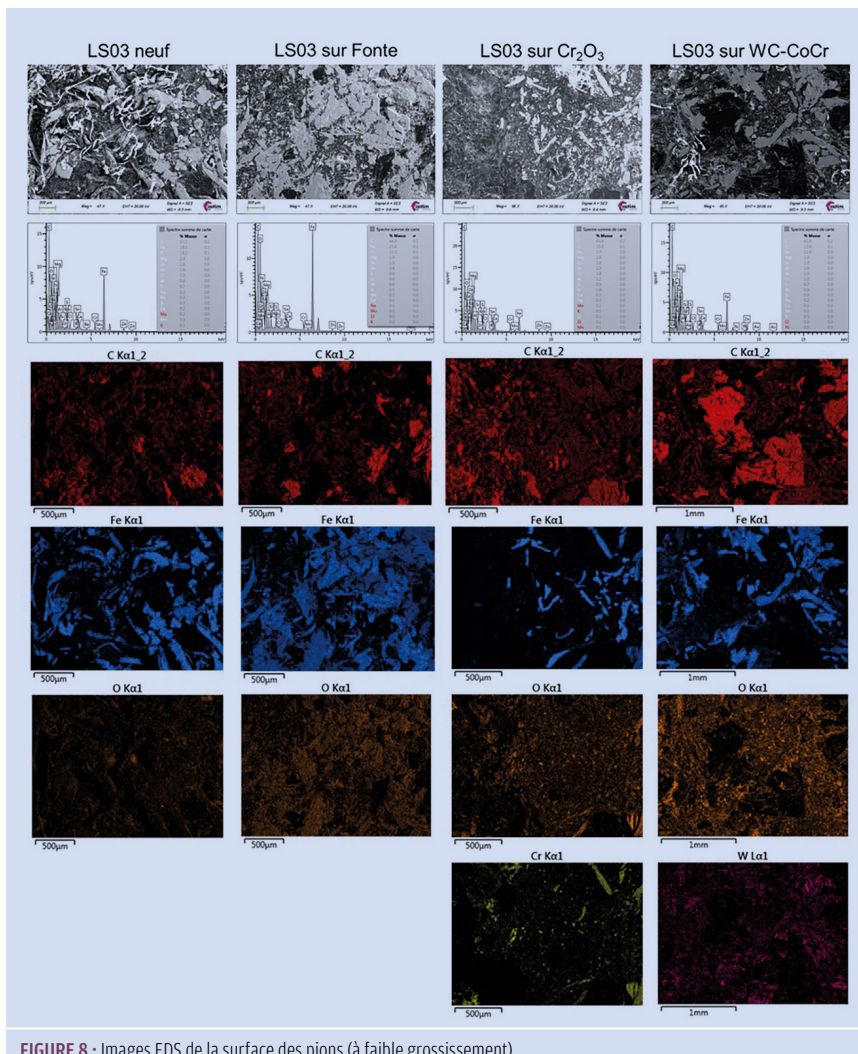


FIGURE 8 : Images EDS de la surface des pions (à faible grossissement).

La Figure 8 montre respectivement la surface des pions à un faible grossissement, ainsi que leur composition chimique dont les concentrations des trois éléments prépondérants soit en carbone, fer et oxygène :

- sur le pion neuf, les fibres d'acier sont faiblement oxydées ;
- sur le pion ayant frotté sur fonte, les taux en surface de fer et d'oxygène sont plus élevés que ceux du pion neuf, le taux en carbone est plus faible. Comme les cartographies du fer et de l'oxygène coïncident : il est possible d'en déduire la présence d'oxyde de fer en surface du pion ;
- sur les pions au contact des disques revêtus, les taux en surface de fer et d'oxygène sont plus faibles que ceux du pion ayant frotté sur fonte, tandis que le taux en carbone est plus élevé. De plus, les cartographies du fer et de l'oxygène ne coïncident pas, suggérant que les fibres d'acier sont très peu oxydées ;
- les analyses EDS du pion après les essais de frottement avec le disque revêtu de Cr_2O_3 montrent la présence de chrome dans les porosités du pion, et en particulier de particules d'oxyde de chrome Cr_2O_3 , (cf. Figure 9 : LS03 testé sur le disque revêtu de Cr_2O_3 à fort grossissement (Mag 1.20K X) Figure 9) ; impliquant que le disque en Cr_2O_3 s'use ;
- les analyses EDS du pion après les essais de friction avec le disque en WC-CoCr montrent la présence de tungstène ; les particules de carbure de tungstène semblent recouvrir les fibres d'acier. Le disque en WC-CoCr montre également des preuves d'usure ;

3. Discussions

Les résultats ont aussi montré une diminution de la concentration particulaire émise lors de l'utilisation des disques revêtus. Plusieurs hypothèses ont pu être émises :

- l'effet de la dureté du disque : la dureté des disques revêtus étant bien plus élevée que celle du disque en fonte, l'usure par abrasion est donc réduite, et la perte de matière l'est également ;
- l'oxydation du disque : la réactivité chimique (oxydation) pour former une couche d'oxyde à l'interface pion-disque est différente selon la nature du disque : les taux de fer à la surface des pions suggèrent que la réactivité chimique est différente selon les couples - LS03/Fonte > LS03/WC-CoCr > LS03/Cr₂O₃ - et cela peut ainsi expliquer pourquoi le frottement entre le matériau LS03 et la fonte émet le plus de particules ;
- l'effet de la rugosité et de la portance des disques (ratio entre le nombre de vallées et le nombre de pics) : plus ces paramètres sont élevés, plus le contact entre le pion et le disque est faible, pouvant réduire ainsi l'usure. De plus, lorsqu'un matériau est poreux, il possède des porosités fermées favorisant la formation de sillons au fur et à mesure de l'usure. La porosité du disque en fonte étant nulle, cela peut expliquer sa forte émissivité par rapport aux disques revêtus.

La baisse du coefficient de friction avec l'utilisation des disques revêtus pourrait être due à l'augmentation du taux en carbone en surface du pion, car le carbone possède de très bonnes propriétés lubrifiantes. L'augmentation du taux en carbone à la surface des pions peut être due à un étalement des matières contenant du carbone en surface ou alors à la carbonisation des matières organiques. Par rapport au disque en fonte, la conductibilité du disque revêtu de Cr₂O₃ est plus faible. Cela pourrait entraîner une augmentation de température à l'interface du contact lors du frottement et pourrait favoriser la carbonisation. Le carbone rend les pions testés sur disques revêtus ce qui entraîne de plus faibles émissions.

Conclusion et perspectives

Les essais sur pion-disque selon un protocole inspiré du cycle WLTP, avec une pression constante, montrent une réduction de 50 % à 90 % des émissions de particules de tailles comprises entre 4 nm et 3 µm avec des disques revêtus de Cr₂O₃ et WC-CoCr, par rapport à un disque en fonte

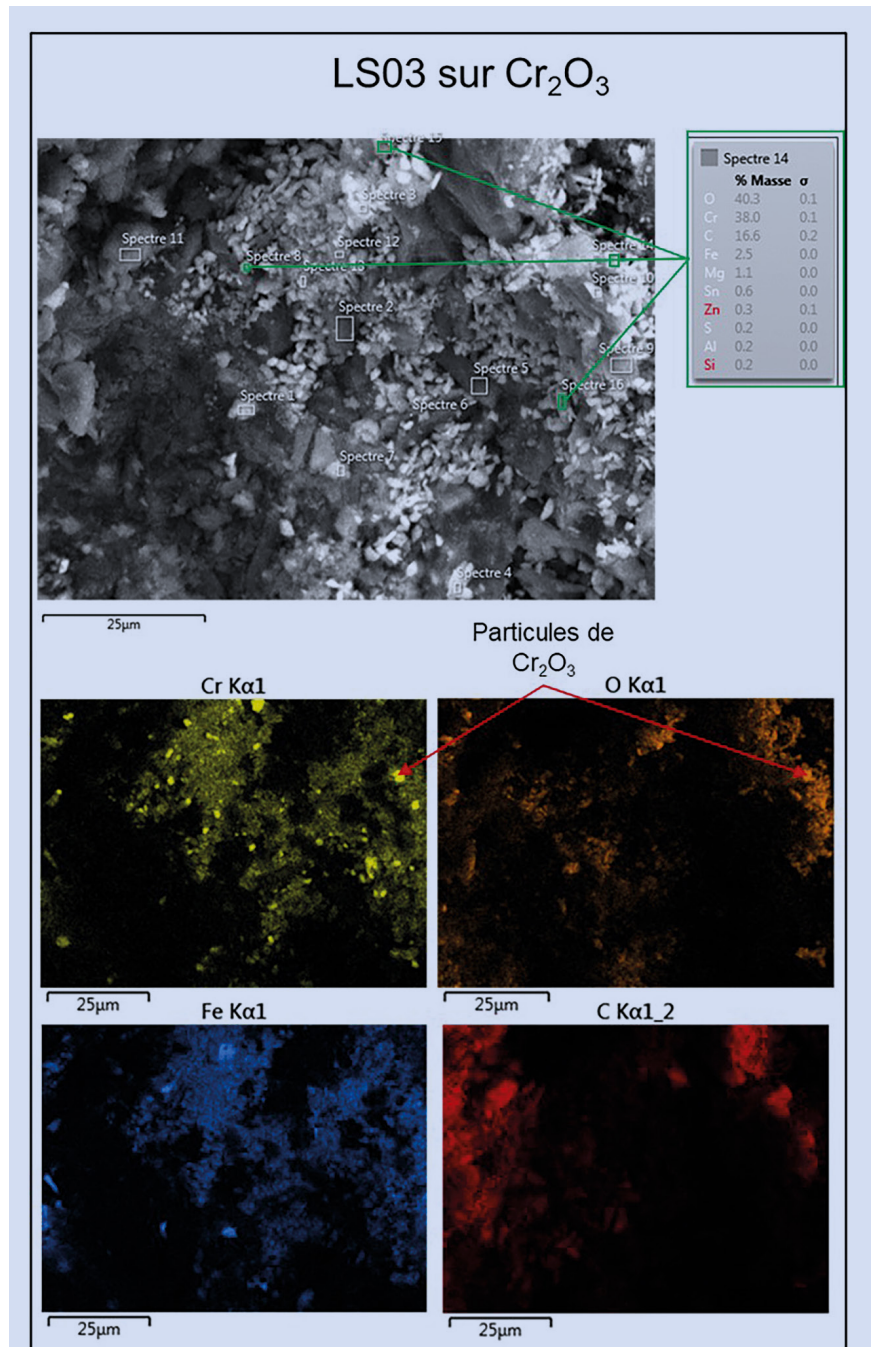


FIGURE 9 : LS03 testé sur le disque revêtu de Cr₂O₃ à fort grossissement (Mag 1.20K X).

	Pion neuf	Pion testé sur Fonte	Pion testé sur Cr ₂ O ₃	Pion testé sur WC-CoCr
Carbone [%]	57,7	44,9	63,9	62,9
Fer [%]	18,3	25,6	7,7	12,9
Oxygène [%]	14,2	22,3	15,0	13,8

TABLEAU 4 : Proportion en carbone, fer et oxygène à la surface des pions

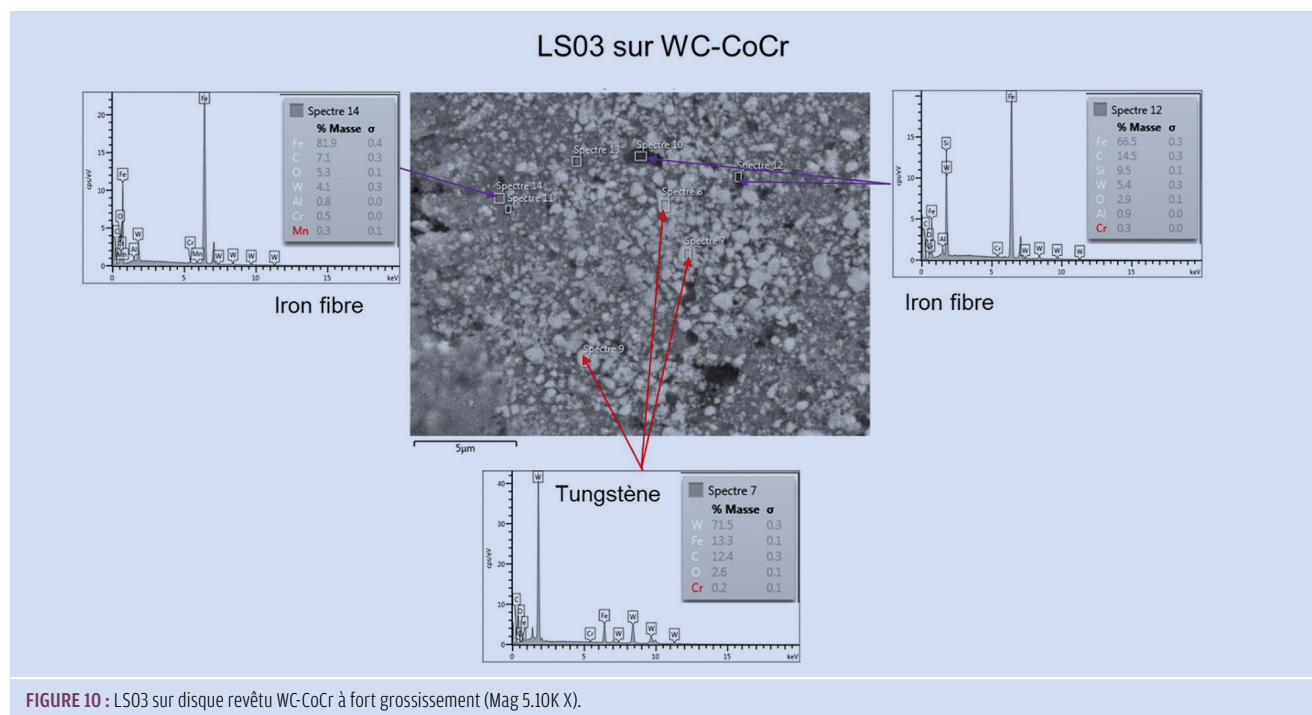


FIGURE 10 : LS03 sur disque revêtu WC-CoCr à fort grossissement (Mag 5.10K X).

non revêtu. Le coefficient de frottement avec les disques revêtus est légèrement plus faible qu'avec le disque en fonte, notamment à faible vitesse.

Les analyses au MEB-EDX montrent que la composition chimique en surface des pions après essai est différente selon le disque utilisé. La présence de carbone est plus importante sur les pions ayant été testés sur les disques revêtus, par rapport à celui testé sur le disque en fonte. Les propriétés de lubrification du carbone peuvent expliquer la baisse du coefficient de friction avec les sollicitations sur les disques revêtus. Les proportions de fer et d'oxygène sont plus faibles sur les pions testés avec les disques revêtus qu'avec le disque en fonte. La diminution de te-

neur en oxygène pourrait être liée à une réduction d'oxyde de fer grâce à l'inertie chimique des disques revêtus, réduisant ainsi l'émission de particules.

La diminution d'émission de particules peut être également liée à une dureté plus élevée des revêtements Cr2O3 et WC-CoCr par rapport à celle de la fonte, réduisant ainsi l'usure abrasive de la piste. La rugosité des disques revêtus, notamment celle du revêtement en Cr2O3 qui possède des porosités fermées, peut aussi favoriser une diminution de l'usure disque par une réduction de la surface de contact réelle. De plus, la capacité du système à créer une couche de transfert est une piste intéressante pour expliquer les variations d'émissivité des couples tribologiques tes-

tés. Des essais plus longs devront être réalisés avec les disques revêtus pour évaluer l'influence de la couche de transfert vis-à-vis de l'émission.

La prochaine campagne permettra de réaliser des comparaisons avec des essais réalisés sur un banc dynamométrique en suivant un protocole d'essai type WLTP. À l'issue de ces essais, les disques revêtus pourront être analysés à leur tour pour mieux comprendre les mécanismes tribologiques à l'origine des émissions.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ADEME pour le financement dans le cadre du projet AQACIA - D-BRAKE. ■

Références

^[1] Guerreiro C, et al. *Air quality in Europe : 2015 report* [Internet]. Luxembourg : publications Office. 2015, (3 juillet 2023). <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/9f0ff3b5-a4a5-11e5-b528-01aa75ed71a1/language-en>

^[2] Victor R.J.H. Timmers, Peter A.J. Achten, *Non-exhaust PM emissions from electric vehicles*, *Atmospheric Environment*, 134, pp.10-17, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.017>

^[3] ADEME. *Emissions des Véhicules routiers - Les particules hors échappement*, 2022 <https://librairie.ademe.fr/air-et-bruit/5384-emissions-des-vehicules-routiers-les-particules-hors-echappement.html>

^[4] T. Grigoratos, G. Martini. *Non-exhaust traffic related emissions - Brake and tyre wear PM*, *JRC Science and*

Policy Reports, pp.23-25, 2014.

^[5] P. Kumar et al. *Nanoparticle emissions from 11 non-vehicle exhaust sources - A review*, *Atmospheric Environment*, 67, pp.252-277, 2013 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.011>

^[6] European Environment Agency. *Air quality in Europe 2019*, 2019 <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2019>

^[7] F. Philippe. *Mesure et caractérisation des particules issues du freinage dans l'automobile sur un banc pion-disque*, Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne, HAL, Id : tel-03335037, 2021

^[8] J. Wahlström et al. *A pin-on-disc tribometer study of disc brake contact pairs with respect to wear and airborne particle emissions*. *Wear*, 384-385, pp. 124-130,

2017. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.05.011>

^[9] Marcel Mathissen et al. *Brake Wear Particle Emissions of a Passenger Car Measured on a Chassis Dynamometer*, *Atmosphere*, 2019. <https://doi.org/10.3390/atmos10090556>

^[10] F.H. Farwick zum Hagen et al. *On-road vehicle measurements of brake wear particle emissions*, *Atmospheric Environment*, 217, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116943>

^[11] Hyo-Sok Ahn, Oh-Kwan Kwon. *Tribological behaviour of plasma-sprayed chromium oxide coating*, *Wear*, 225-229, pp.814-824, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00390-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00390-1)