

REDUCTION DES EMISSIONS DE PARTICULES DE FREINAGE PAR MODIFICATION DE LA COMPOSITION DU MATERIAU DE FRICTION

M. Hoff^{1,2}, M. Morgeneyer¹, Y. Chen³, C. Bressot⁴

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 Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM), 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

*marie.hoff@utc.fr

TITLE

Reduction in brake particle emission by modifying friction material composition

RESUME

Cette étude étudie l'influence sur les émissions de freinage de sept matériaux de friction testés sur des disques en fonte et caractérisés sur banc pion-disque équipé d'appareils de mesure de particules. Les matériaux LS04, LS06 et NAO01 ont permis de réduire les émissions en nombre de particules et les PM₁₀, respectivement jusqu'à 71 % et 57 %. En revanche, les coefficients de friction ont été réduits jusqu'à 27 % est observé. Les analyses au MEB-EDS réalisées sur les pions ont montré différents mécanismes d'usure, pouvant expliquer les différences d'émissions entre les matériaux. Des corrélations ont été observées entre la concentration en fer des PM₁₀ et l'émission, ainsi sur la teneur en fibres d'acier des matériaux.

ABSTRACT

This study focuses on the influence on brake wear emissions of seven brake pad formulations tested on grey cast iron discs and characterized using a pin-on-disc bench equipped with particle measuring devices. The materials LS04, LS06 and NAO01 allowed to reduce brake particle number and PM₁₀ emissions by up to 71% and 57%, respectively. On the other hand, the coefficients of friction were reduced by up to 27%. The microscopic analyses carried out on the pins showed different wear mechanisms that could explain the differences in emissions observed between the materials. Correlations were observed between the iron content of PM₁₀ and the emission, as well as with the steel fibre content in the materials.

MOTS-CLÉS : émissions de freinage, composition des matériaux de friction, mécanismes d'usure, émission de fer, MEB-EDS/ **KEYWORDS:** brake emissions, friction material composition, wear mechanisms, iron emission, SEM-EDXS

1. INTRODUCTION

Plusieurs solutions sont envisagées pour atteindre les seuils d'émissions de freinage de PM₁₀ imposés par la norme Euro 7, telle que la modification des matériaux de friction. En Europe, deux familles de matériaux sont principalement utilisées : les low steel (LS) et les NAO. Les low steel possèdent une teneur en fibres d'acier inférieure à 30 % en volume (Grigoratos & Martini, 2015). Les NAO ne possèdent pas de fibres d'acier. Des études montrent que les matériaux NAO sont moins émissifs que les matériaux low steel (Candéo et al., 2023). Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de matières premières contenues dans les plaquettes de frein sur les émissions de particules (Joo et al., 2020; Song et al., 2022). L'effet de la teneur en fibres d'acier a été peu étudié. Tsybrii et al. (2022) a observé une augmentation de l'émission de particules ayant une taille optique supérieure à 2 µm, lorsque la teneur en fibres d'acier des formules augmentait. Hagino (2024) a suggéré que l'augmentation des émissions de PM_{2.5} et PM₁₀ observée avec l'augmentation de la quantité de fer dans les plaquettes, provenait de l'augmentation de la teneur en fibres d'acier des plaquettes. Cependant, l'effet de la teneur en fibres d'acier des plaquettes sur les émissions de PM₁₀ n'a jamais été étudié. Cette étude s'intéresse à cet effet en étudiant l'influence de la composition de matériaux de friction sur les émissions de particules (PM₁₀, PN, taille). Des analyses au microscope des pièces d'essais et des analyses chimiques des particules recueillies ont été réalisées pour comprendre les mécanismes d'usure à l'origine des émissions.

2. MATERIELS ET METHODE

Les essais ont été réalisés sur un banc pion-disque équipé d'un système mécanique (pion Ø5 mm/disque) isolé de l'air ambiant pollué en particules. Le banc est instrumenté d'appareils pour mesurer le nombre de particules (TSI 3775 CPC, 4 nm – 3 µm), la taille des particules jusqu'à 20 µm (TSI 3082 SMPS, 14 nm – 700 nm ; TSI 3321 APS, 520 nm – 20 µm). Les prélèvements de PM₁₀ sont recueillis sur des filtres en PTFE (Polytétrafluoroéthylène), reliés à un cyclone dont le débit de fonctionnement a été ajusté à 1,6 l/min pour prélever les particules de taille inférieure à 10 µm. Les PM₁₀ sont analysées chimiquement selon la norme NF-EN-17294-2, par les techniques ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry), et ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry). Les pions sont analysés par microscopie électronique à balayage (MEB) couplé à la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS).

Le Tableau 1 indique les teneurs en fer et en fibres de fer pour chaque matériau de friction testé.

Tableau 1. Composition chimique en fer des matériaux de friction et teneur en fibres d'acier

	LS01	LS02	LS03	NAO01	LS04	LS05	LS06
Fe (% massique) *	24,961	17,396	34,277	0,697	15,036	22,684	13,369
Autres éléments (% massique)	75,039	82,604	65,723	99,303	84,964	77,316	86,631
Fibres d'acier (% volumique)	16,50	16,50	23,00	0,00	8,00	16,50	8,00
Fibres d'acier (% massique)	37,64	36,13	51,72	0,00	19,93	37,91	18,88

* Pourcentage non restreint aux fibres d'acier

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Concentration en nombre de particules

La concentration particulaire moyenne des 7 matériaux de friction est présentée dans le Tableau 2 (Hoff et al., 2025a). L'ordre des concentrations pondérée (C) est le suivant : $C_{LS01} \approx C_{LS02} \approx C_{LS05} \approx C_{LS03} > C_{LS04} > C_{LS06} \approx C_{NAO01}$. Les trois matériaux LS04, LS06 et NAO01 permettent de réduire l'émission particulaire, respectivement de 24 %, 71 % et 60 %, par rapport au matériau de référence (LS01).

Tableau 2. Concentrations moyennes en nombre de particules par vitesse d'essai et moyennes pondérées

	LS01	LS02	LS03	LS04	LS05	LS06	NAO01
Concentration particulaire moyenne à 35 km/h, #/cm ³	9	13	9	4	11	1	1
Concentration particulaire moyenne à 60 km/h, #/cm ³	54	51	63	32	64	9	4
Concentration particulaire moyenne à 110 km/h, #/cm ³	317	341	281	279	318	118	197
Concentration particulaire moyenne pondérée (C)*, #/cm ³	63	67	62	48	68	18	25

* Calculée avec un poids de 50 % à 35 km/h, 38 % à 60 km/h et 12 % à 110 km/h.

3.2. Coefficient de friction

Le Tableau 3 présente les coefficients de friction en fonction des vitesses d'essai pour chacun des sept matériaux de friction étudiés (Hoff et al., 2025a). Le coefficient de friction décroît dans l'ordre suivant : μ_{LS02} , $\mu_{LS03} \approx \mu_{LS05}$, μ_{LS01} , μ_{LS04} , $\mu_{LS06} \approx \mu_{NAO01}$. La réduction des émissions avec les matériaux LS04, LS06 et NAO01 s'accompagne d'une baisse du coefficient de friction de 17 à 29 % par rapport au LS01, probablement liée dans le cas de LS04 et LS06 à la moindre adhésion entre la fonte du disque et les fibres d'acier des plaquettes.

Tableau 3. Coefficient de friction (CoF) moyen par vitesse d'essai

	LS01	LS02	LS03	LS04	LS05	LS06	NAO01
CoF moyen à 35 km/h	0.38	0.48	0.43	0.31	0.42	0.28	0.29
CoF moyen à 60 km/h	0.37	0.47	0.42	0.31	0.42	0.29	0.26
CoF moyen à 110 km/h	0.31	0.39	0.32	0.29	0.34	0.29	0.35

3.3. Distribution en tailles des particules

La Figure 1 présente les courbes de distribution granulométrique pour chaque vitesse d'essai (moyennées sur la durée de l'essai) des matériaux LS01, LS04, LS06 et NAO01 (LS02, LS03 et LS05 étant similaires à LS01) (Hoff et al., 2025a). Les distributions sont principalement submicroniques. Le LS01 présente un mode principal entre 300-550 nm à 35 km/h, tandis que les matériaux LS04 et LS06 présentent respectivement un mode principal à 80 nm et à 20 nm. Le matériau NAO01 ne présente pas de mode de distribution identifiable à 35 km/h (émissivité trop faible). Tous les matériaux présentent un mode principal entre 300-500 nm à 60 km/h, tandis que les matériaux LS06 et NAO01 présentent également un mode secondaire à 20 nm. Un mode principal entre 300-500 nm a été identifié pour tous les matériaux à 110 km/h. Aucune émission supérieure à 2 µm n'est observée. L'augmentation de la génération de particules ultrafines avec LS04 et LS06 pourrait être due à l'augmentation de la dégradation des composants organiques de ces matériaux, qui contiennent moins de fibres d'acier, et qui conduisent donc moins la chaleur.

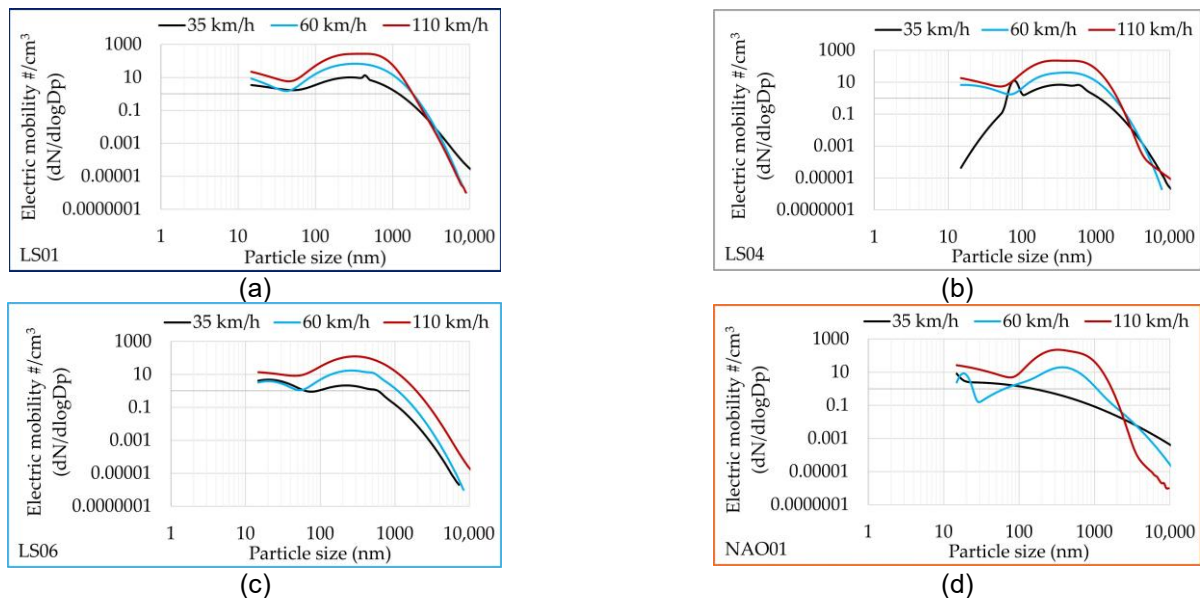


Figure 1. Distribution en tailles des particules par vitesse d'essai : (a) LS01 ; (b) LS04 ; (c) LS06 ; (d) NAO01

3.4. Facteurs d'émission de PM₁₀

Le facteur d'émission de PM₁₀ (EF_{PM10}) des 7 couples de friction est présenté dans le Tableau 4 (Hoff et al., 2025a). Un facteur d'émission $< 0,54 \mu\text{g}/\text{km}$ a été attribué au NAO01 car la quantité de particules générées lors du cycle (1 μg), était trop faible et inférieure à la limite de quantification du système de mesure. Le facteur d'émission du matériau de référence LS01 est de $4,10 \mu\text{g}/\text{km}$. Les matériaux LS04 et LS06 (avec le NAO01) sont les moins émissifs et ont permis de réduire les émissions de PM₁₀ de 23 % et 57 % par rapport au LS01.

Tableau 4. Facteurs d'émission des 7 couples de friction

Matériau de friction	LS01	LS02	LS03	NAO01	LS04	LS05	LS06
EF_{PM10} ($\mu\text{g}/\text{km}$)	4,10	7,06	6,76	$< 0,54$	3,15	6,88	1,75

3.5. Composition chimique des PM₁₀

La concentration massique de chaque élément chimique présent dans les PM₁₀ est présentée dans le Tableau 5 (Hoff et al., 2025a). Le fer est l'élément chimique principalement détecté dans les particules émises, avec des concentrations comprises entre $2,60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $76,50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ selon les couples de frottement. La plupart des composés chimiques présents dans les plaquettes se retrouvent également dans les PM₁₀. La concentration en fer dans les PM₁₀ est corrélée avec l'émission de particules : elle augmente lorsque la concentration particulaire (cf. Tableau 2) augmente, ou lorsque le facteur d'émission de PM₁₀ (cf. Tableau 4) augmente.

Tableau 5. Composition chimique des PM₁₀ par techniques ICP

	Concentration massique ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)									
	Ba	Cr	Cu	Fe	S	Sn	Ti	Zn	Zr	Ca
Limite de quantification	0,13	0,25	0,05	2,46	4,92	0,13	0,49	0,25	0,13	4,92
LS01	0,34	0,32	0,17	55,88	9,31	0,22		0,32		
LS02	0,24		0,13	76,50						17,20
LS03		0,36	0,13	60,70		0,25		0,37		25,90
LS04	0,96	0,27	0,05	31,60	18,62	0,23		2,04		
LS05	0,50	0,62	0,17	70,40		0,30	0,06	0,33		25,90
LS06	0,18			32,02						
NAO01	0,68		0,05	2,60		0,35	0,37		0,75	43,10

3.6. Microscopie électronique à balayage et compréhension des mécanismes tribologiques

Les images MEB-EDS du pion LS01 montrent la formation de larges plateaux répartis de manière hétérogène à sa surface (Figure 2) (Hoff et al., 2025a). Les similitudes entre les cartographies du fer et de l'oxygène suggèrent la formation de plateaux composés d'oxydes de fer pouvant expliquer la forte émissivité du LS01. Les matériaux les moins émissifs montrent des résultats différents. Du fer non oxydé est observée sur le pion LS06 (indiquée par des flèches orange sur la Figure 2), et semble être des fibres d'acier. De petits dépôts d'oxydes de fer apparaissent également à la surface du LS06. Une couche de friction uniforme d'oxydes de fer est observée sur le pion NAO01. La teneur massique en fer des pions LS06, LS04 et NAO01 (17,0 %, 13,3 % et 11,9 %) est inférieure à celle du LS01 (20,0 %), indiquant des couches de friction plus fines pour ces

matériaux. La baisse de fibres d'acier dans LS04 et LS06 réduit les contacts entre fonte et acier, limitant l'adhésion, un phénomène absent chez le NAO01 qui ne contient pas de fibres d'acier.

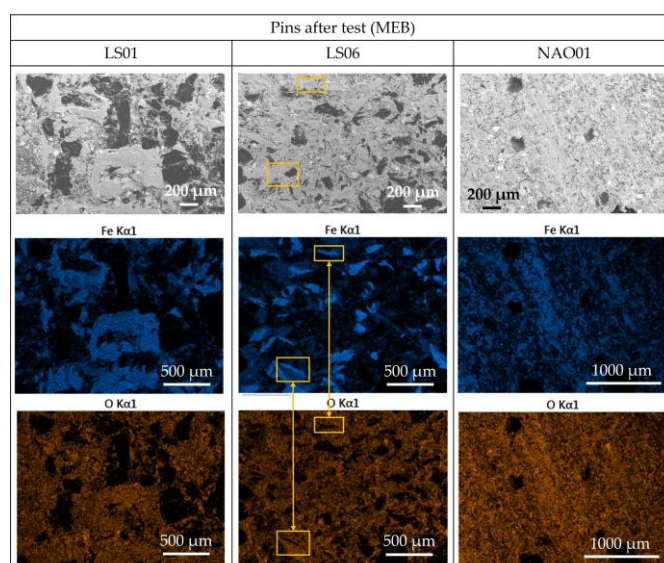


Figure 2. Images au MEB des pions LS01, LS06 et NAO01 après essai

3.7. Relation entre matière première et émission

Les émissions en nombre (concentration moyenne pondérée) et en masse ($EF_{PM_{10}}$) sont corrélées à la teneur en fibres d'acier (% volumique) contenue dans les plaquettes. La concentration en fer mesurée dans les PM_{10} est également corrélée à la teneur en fibres d'acier des plaquettes. En revanche, les différences d'émission entre les matériaux LS01, LS02 et LS05, contenant chacun 16,50 % de fibres d'acier, ne sont pas dues à leur teneur en fibres d'acier. La haute émissivité du LS05 par rapport au LS01 peut être due à sa teneur plus élevée en oxydes de magnésium (vs. réduction de la teneur en oxydes d'aluminium). La haute émissivité du LS02 peut être due à sa teneur en abrasifs durs plus élevée que le LS01. Dans cette étude, aucune autre corrélation n'a été observée entre l'émission et les autres matières premières contenues dans les plaquettes.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le freinage automobile étant une source majeure de pollution atmosphérique, l'amélioration de la composition des matériaux de friction représente une piste intéressante pour réduire les émissions de PM_{10} , jusqu'à 57 % et les émissions particulières, jusqu'à 71 %. Cette étude a montré que la réduction de la teneur en fibres d'acier dans les plaquettes a un rôle important pour réduire les émissions de freinage. Néanmoins, des études supplémentaires devront être menées afin de déterminer si le fer contenu dans les PM_{10} provient du disque ou des plaquettes, notamment dans le cas des matériaux à faible teneur en fibres d'acier.

Les auteurs sont reconnaissants aux institutions comme l'UTC, l'INERIS et le CETIM et les entreprises respectives comme MAT-FRICTION et MANN-HUMMEL pour avoir rendu possible ce projet transdisciplinaire. Nous remercions l'ADEME (AQACIA 2022/ projet D-BRAKE [2166D0017]), le ministère français de l'écologie, ainsi que l'ANRT [2022/0336] pour leur soutien financier.

- Candéo, S., Leonardi, M., Gialanella, S., & Straffellini, S. (2023). Influence of contact pressure and velocity on the brake behaviour and particulate matter emissions. *Wear*, 514-515. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204579>
- Grigoratos, T., & Martini, G. (2015). Brake wear particle emissions: a review. *Environ Sci Pollut Res Int*, 22(4), 2491-2504. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3696-8>
- Hagino, H. (2024). Brake Wear and Airborne Particle Mass Emissions from Passenger Car Brakes in Dynamometer Experiments Based on the Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicle Test Procedure Brake Cycle. *Lubricants*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/lubricants12060206>
- Hoff, M., Chen, Y.-M., Meunier, L., Bressot, C., & Morgeneyer, M. (2025a). Effect of Friction Material on Vehicle Brake Particle Emissions. *Atmosphere*, 16(9). <https://doi.org/10.3390/atmos16091075>
- Joo, B. S., Jara, D. C., Seo, H. J., & Jang, H. (2020). Influences of the average molecular weight of phenolic resin and potassium titanate morphology on particulate emissions from brake linings. *Wear*, 450-451. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203243>
- Song, W., Gweon, J., Park, J., Kwon, S.-U., Lee, J. J., Kim, Y. C., & Jang, H. (2022). Effects of abrasive particles on the particulate matter emission of brake friction composites. *Wear*, 504-505. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204436>
- Tsybrii, Y., Zglobicka, I., Kuciej, M., Nosko, O., & Golak, K. (2022). Airborne wear particle emission from train brake friction materials with different contents of steel and copper fibres. *Wear*, 504-505. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204424>