
Émissions en conditions représentatives des polluants issus du freinage de véhicules routiers, développement méthodologique et caractérisation des particules ultrafines, métaux et composés organiques volatils.

1) État de l'art

La pollution atmosphérique représente un enjeu majeur de par ses impacts sur le climat, l'environnement et la santé. L'exposition à la pollution de l'air aurait entraîné en France en 2018 plus de 40 000 morts prématurées (EEA, 2020). Le secteur des transports est une des sources principales de polluants atmosphériques. Notamment, le trafic routier demeure un des principaux émetteurs de particules, avec 15 % des émissions de particules fines $PM_{2,5}$ (CITEPA, 2024). Une part croissante des émissions du trafic routier provient de sources dites hors-échappement : l'abrasion des freins, des pneus et de la chaussée, et la remise en suspension des polluants de la chaussée. Avec la baisse des émissions à l'échappement, et avec l'électrification du parc pour la décarbonation du secteur, la part des émissions hors-échappement tend à devenir majoritaire (Harrison et al., 2021). Les polluants issus du freinage ont des effets avérés sur la santé (Selley et al., 2020), et contribuent à environ la moitié des particules hors-échappement (Piscitello et al., 2021). Ils incluent notamment des particules, des métaux, mais aussi des composés organiques volatils (Perraud et al., 2024) ou du « Black Carbon » (Lyu and Olofsson, 2020), récemment identifiés dans la littérature et encore mal documentés.

Des travaux récents ont permis de définir des méthodologies d'étude de ces polluants, en vue de les réglementer dans la future norme EURO 7 (Grigoratos et al., 2023; Mathissen et al., 2023). Ces méthodologies s'appuient en partie sur des bancs de freinage ou bancs tribologiques, étudiant un système composé d'un disque de frein et de plaquettes. En complément de ces essais, des études en conditions plus représentatives, sur véhicule réel, seraient un levier pour mieux décrire les émissions, par exemple par des essais en laboratoire sur un banc à rouleaux. Cela permettrait d'étudier les émissions des véhicules hybrides et électriques équipés de freinage régénératif, qui permet de réduire le recours au freinage mécanique, mais dont l'impact sur les émissions demeure mal décrit en conditions réelles. L'impact du poids (particulièrement sensible pour les véhicules électriques) pourrait également être mieux décrit, en comparant des véhicules citadins, des SUV ou encore des utilitaires. Aussi, les conditions simulées de conduite et de dispersion des polluants sont conçues pour être proches de conditions réelles (urbaines, rurales, autoroutières), permettant aux freinages d'être représentatifs de la réalité selon des scénarii de conduite adaptés. Toutefois, malgré leur intérêt pour accroître la représentativité des résultats obtenus, ces mesures sur banc à rouleaux présentent des difficultés méthodologiques, et nécessitent le développement de protocoles spécifiques.

Par ailleurs, les normes réguleront dans un premier temps les particules en masse (Dornoff and Rodríguez, 2024). Elles n'incluront pas les émissions des particules les plus fines, quantifiées en nombre, ou des métaux, malgré leurs impacts. Elles n'incluront pas non plus les polluants du freinage récemment identifiés, comme les composés organiques volatils ou le Black Carbon. Leur étude est essentielle pour mieux décrire l'impact réel du trafic routier sur la santé et l'environnement, mais elle reste associée à des difficultés de prélèvement et d'analyses et à un manque global de données robustes. Il existe donc un besoin de développement sur les méthodes d'échantillonnage et de quantification de ces polluants.

2) Objectifs et déroulement des travaux de thèse

Ce sujet de thèse vise à renforcer les connaissances sur les émissions polluantes issues du freinage des véhicules routiers en conditions représentatives, à travers trois objectifs spécifiques :

- **Développement méthodologique** pour la mesure des polluants du freinage de véhicules routiers sur banc à rouleaux
- **Mesures en ligne sur banc à rouleaux** des émissions de particules fines et ultrafines et du Black Carbon pour divers véhicules routiers (citadines, SUV, électriques, ...) sous différentes conditions de conduite
- Caractérisation off-line des **métaux et composés organiques volatils**, et **étude toxicologique** par le potentiel oxydant des polluants émis lors du freinage.

Le premier objectif vise à **développer une méthodologie expérimentale** pour permettre une mesure représentative sur banc à rouleaux des polluants gazeux et particulaires émis lors du freinage de véhicules routiers légers et utilitaires. Le travail consistera tout d'abord en une **partie bibliographique**, pour documenter les méthodes existantes et l'état des connaissances sur les conditions de prélèvement. Ensuite, les connaissances acquises serviront à **définir un protocole expérimental** pour mesurer les polluants émis lors du freinage sur le banc à rouleaux. Le protocole précisera notamment la technique d'échantillonnage des polluants, les conditions de prélèvement et la méthode analytique de quantification des émissions. Elle précisera les éventuelles adaptations à réaliser sur le banc à rouleaux, ainsi que les contraintes spécifiques liées aux mesures embarquées. Enfin, la méthodologie sera testée en vue d'identifier des difficultés techniques et de **l'optimiser**. Les données obtenues (nombre de particules par freinage par exemple) seront comparées avec la littérature pour évaluer la fiabilité de la méthodologie développée.

Le second objectif vise à **appliquer la méthodologie précédemment définie, sur le banc à rouleaux**, pour les mesures en ligne de polluants. Des essais seront menés avec divers véhicules légers en vue de **produire des données sur les émissions de particules fines et ultrafines et de Black Carbon** issues des freins. Les véhicules testés couvriront diverses gammes (citadine, SUV, utilitaire) et natures de freins (divers couples disques/plaquettes, et aussi freinage régénératif des véhicules électriques). Plusieurs conditions de conduite seront simulées (urbain, péri-urbain, autoroutier). Les résultats seront analysés en vue de discuter **l'impact de ces paramètres : poids, technologies de freins, type de plaquettes, fréquence et intensité des freinages, vitesse de conduite**.

Le troisième objectif vise à décrire les émissions particulaires et gazeuses d'un point de vue physico-chimique et toxicologique. Des échantillons prélevés lors des mesures sur banc à rouleaux – sur filtres par impaction en cascade et cartouches d'adsorbants – seront analysés *a posteriori*. Les premiers serviront à caractériser les **métaux** et autres éléments émis en fonction de leur distribution granulométrique. L'analyse des seconds visera à décrire la nature des **composés organiques volatils** émis lors du freinage. Elle se focalisera sur l'identification de groupes chimiques émis, en vue de leur quantification. Enfin, le **potentiel oxydant** des composés particulaires émis sera étudié selon différents protocoles (DTT, AA). Il permettra de renforcer les connaissances sur l'impact sanitaire des polluants particulaires issus du freinage.

Les travaux menés à travers ces trois objectifs permettront, grâce à un développement méthodologique, de produire une quantité importante de données sur les émissions des freins dans des conditions représentatives de la réalité. Ils couvriront une gamme variée de véhicules du parc roulant et de technologies de freins. Les résultats concerneront des polluants encore mal documentés pour les sources hors-échappement, et éclaireront sur l'impact sanitaire des émissions du freinage.

3) Moyens mis en œuvre et encadrement

Le travail doctoral sera co-encadré entre le laboratoire EASE de l'Université Gustave Eiffel et le Centre d'Enseignement, Recherche et Innovation (CERI) Energie Environnement de l'IMT Nord Europe, avec une inscription à l'école doctorale MEGA. Il sera dirigé par Yao Liu (chargée de recherche HDR à EASE) et co-encadré par Boris Vansevenant (ingénieur de recherche à EASE), Laurent Alleman (enseignant-chercheur à l'IMT) et Alexandre Tomas (professeur à l'IMT). Ils encadreront l'étudiant.e sur les aspects expérimentaux et théoriques, en apportant leurs compétences sur la méthodologie de caractérisation des polluants du trafic routier.

La majorité du travail et les essais sur banc à rouleaux seront menés au laboratoire EASE, sur le campus lyonnais de l'Université Gustave Eiffel. Les analyses hors-ligne seront menées à l'IMT Nord Europe, CERI EE, campus de Douai. Les moyens d'essais et d'analyse seront mis à disposition par le laboratoire EASE et par l'IMT Nord Europe. Les essais seront en partie financés par le projet BrakeAir financé par l'Université Gustave Eiffel sur la période 2025-2026.

4) Candidature

Pour candidater, envoyer CV + LM à : boris.vansevenant@univ-eiffel.fr

Date limite de candidature : 21 avril 2025

5) Mots-clés

Pollution atmosphérique ; trafic routier ; émissions hors-échappement ; émissions des freins ; particules ; métaux ; COV.

6) Références

- CITEPA**, 2024. Rapport Secten - Emissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques 1990-2023. CITEPA.
- Dornoff, J., Rodríguez, F.**, 2024. Euro 7: The new emission standard for light- and heavy-duty vehicles in the European Union. INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION.
- European Environment Agency**, 2020. Air quality in Europe: 2020 report. Publications Office, LU.
- Grigoratos, T., Mathissen, M., Vedula, R., Mamakos, A., Agudelo, C., Gramstat, S., Giechaskiel, B.**, 2023. Interlaboratory Study on Brake Particle Emissions—Part I: Particulate Matter Mass Emissions. *Atmosphere* 14, 498. <https://doi.org/10.3390/atmos14030498>
- Harrison, R.M., Allan, J., Carruthers, D., Heal, M.R., Lewis, A.C., Marnier, B., Murrells, T., Williams, A.**, 2021. Non-exhaust vehicle emissions of particulate matter and VOC from road traffic: A review. *Atmos. Environ.* 262, 118592. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118592>
- Lyu, Y., Olofsson, U.**, 2020. On black carbon emission from automotive disc brakes. *J. Aerosol Sci.* 148, 105610. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105610>
- Mathissen, M., Grigoratos, T., Gramstat, S., Mamakos, A., Vedula, R., Agudelo, C., Grochowicz, J., Giechaskiel, B.**, 2023. Interlaboratory Study on Brake Particle Emissions Part II: Particle Number Emissions. *Atmosphere* 14, 424. <https://doi.org/10.3390/atmos14030424>
- Perraud, V., Blake, D.R., Wingen, L.M., Barletta, B., Bauer, P.S., Campos, J., Ezell, M.J., Guenther, A., Johnson, K.N., Lee, M., Meinardi, S., Patterson, J., Saltzman, E.S., Thomas, A.E., Smith, J.N., Finlayson-Pitts, B.J.**, 2024. Unrecognized volatile and semi-volatile organic compounds from brake wear. *Environ. Sci. Process. Impacts* 26, 928–941. <https://doi.org/10.1039/D4EM00024B>
- Piscitello, A., Bianco, C., Casasso, A., Sethi, R.**, 2021. Non-exhaust traffic emissions: Sources, characterization, and mitigation measures. *Sci. Total Environ.* 766, 144440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144440>
- Selley, L., Schuster, L., Marbach, H., Forsthuber, T., Forbes, B., Gant, T.W., Sandström, T., Camiña, N., Athersuch, T.J., Mudway, I., Kumar, A.**, 2020. Brake dust exposure exacerbates inflammation and transiently compromises phagocytosis in macrophages. *Metallomics* 12, 371–386. <https://doi.org/10.1039/c9mt00253g>