

DISPOSITIFS POUR LE PIÉGEAGE PASSIF DES PARTICULES FINES EN ENVIRONNEMENT EXTÉRIEUR

T.H. Trinh^{*1}, C. Pham^{**2}, J.M. Nhut^{**1}, F. Vigneron¹, C. Vieville³, N. Reiminger^{**4,5}, X. Jurado⁴, H. Ba¹, T. Romero¹, L. Truong-Phuoc¹, N. Hertel⁶, C. Legorgeu⁴, L. Vidal⁷, C. Pham-Huu^{**1}

- (1) Institut de Chimie et Procédés pour l'Energie, l'Environnement, et de la Santé (ICPEES), UMR 7515 de CNRS-Université de Strasbourg, 25 rue Becquerel, 67087 Strasbourg cedex 02, France
(2) SICAT SAS, 20 place des Halles, 67000 Strasbourg, France
(3) ACM GmbH, Industriestrasse 1, B310, 77731 Willstätt, Allemagne
(4) AIR&D, 32 rue Wimpfeling, 67000 Strasbourg, France
(5) Laboratoire ICUBE, UMR 7357, CNRS/Université de Strasbourg, 67000, Strasbourg, France
(6) TrapAparT SAS, 20 place des Halles, 67000 Strasbourg, France
(7) Institut de Science des Matériaux de Mulhouse (IS2M), UMR 7361 de CNRS, Université de Haute-Alsace, 15, rue Jean Starcky, BP 2488, 68057 Mulhouse cedex, France

*Courriel de l'orateur : th.trinh@unistra.fr

**Auteurs correspondants / Superviseurs : cuong.pham-huu@unistra.fr ; nhut@unistra.fr

TITLE

Devices for passive trapping of particulate matters in outdoor environment air

RESUME

La réduction de la concentration des aérosols (fines et ultrafines) en suspension est indispensable afin d'améliorer la qualité de l'air extérieur dans les milieux urbains. Notre projet vise à capturer des particules fines dans l'air avec une solution simple, mais efficace et éco-responsable. Deux prototypes ont été installés à proximité des deux axes routiers bien fréquentés de l'agglomération de Strasbourg (France), pour l'étude du captage des particules fines et ultrafines avec des pièges passifs, lavables, régénérables, avec une faible consommation d'énergie, tout en respectant la nature et le bien-être de la communauté environnante. Les pièges ont permis de capturer jusqu'à 90 g PM_{total}/m² sur une période d'exposition de 14 semaines. Les modèles empiriques ainsi que des simulations théoriques sont en cours de développement, et basées sur différentes données collectées *in situ*, en temps réel tout au long de l'expérience. La solution proposée pourrait être un moyen efficace dans la réduction des fortes pollutions par des particules d'une agglomération urbaine.

ABSTRACT

Particles aerosols reduction is very important for improving ambient air quality in urban area to jugulate indirect diseases. Our project aims to study a simple but efficient and eco-friendly solution for particulate matter (PM) trapping, and especially fine and ultrafine PM. Two prototypes were installed in a real environment next two high traffic road of Strasbourg (France), to experiment trapping of PM using passive, washable, regenerable with minimum energies consumption, in respect of nature and community health. Our air filters have been proved capacity of capturing up to 90 g total PM/m² during a period of 14 weeks of exposure. Empiric models and theory simulation are in process, based on *in situ*, real-time data collected during experiment. The developed solution could represent an efficient alternative for the reduction of air pollution by PM in urban area.

MOTS-CLES : Filtre passif, particules fines, simulation CFD / **KEYWORDS**: Passive filter, particulate matters, CFD simulation

1. INTRODUCTION

Les particules fines (Particulate Matters - e.g. PM₁₀ référant à des particules de diamètres inférieures à 10 µm) sont une source importante de pollution atmosphérique, qui causent près de 48000 décès par an en France, et au moins 4 millions à l'échelle mondiale (Burnett et al., 2018; Pascal et al., 2016 ; WHO, 2023). Une grande partie de ces particules présentes dans l'air ambiant des zones urbaines vient principalement des émissions liées au transport routier (ADEME, 2022; CETU, 2012). La réduction des particules fines à proximité des grands axes de circulation constitue donc une priorité pour l'amélioration de la qualité de l'air dans les zones densément peuplées. L'amélioration des moteurs et le traitement direct des émissions en sortie de moteur ont permis une réduction importante des émissions de particules. Même si cette tendance observée se poursuit grâce au renouvellement du parc et la part croissante des véhicules électriques, ces mesures restent néanmoins sans effet sur la pollution en particules provenant de l'usure des freins, des pneumatiques, et du revêtement de la route, qui représente plus de la moitié des émissions résiduelles des véhicules (Beji et

al., 2020, 2021 ; OECD, 2020 ; Timmers & Achten, 2016). Issu de la collaboration entre l'ICPEES, et les sociétés SICAT et Air&D, le projet interdisciplinaire TrapAparT vise à développer une solution opérationnelle de traitement de l'air extérieur à proximité immédiate d'axes routiers à fort passage et donc fortement pollués, afin de réduire les concentrations de particules aux abords des voies de circulation. Deux prototypes de piégeage passif ont été réalisés et installés le long de deux axes routiers très fréquentés dans l'Eurométropole de Strasbourg (EMS), l'un sur le terre-plein central Avenue du Rhin, et l'autre à quelques mètres de la bande d'arrêt d'urgence de la voie rapide M35 (Fig. 1A, 1B et 1C). L'objectif du projet est, d'une part de développer des dispositifs de filtrations passives de l'air, en fonction des variations météorologiques et saisonnières afin de quantifier et optimiser leurs efficacités de piégeage en environnements réels, et d'autre part de développer un outil de simulation intégrant l'intelligence artificielle, afin d'exploiter les nombreuses données expérimentales collectées en temps réel, en termes de température, humidité relative, pressions, vitesses du vent, concentrations et tailles des PM pour caractériser et améliorer la qualité de l'air urbain.

2. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les tests réalisés sur différents médias et l'expérience acquise au laboratoire nous ont permis de sélectionner un support dit de « référence », l'Aero (Aerosleep), un matériau léger, constitué d'un tissage de microfibrilles de polyester. De structure alvéolaire à porosité ouverte, il possède une très faible perte de charge par rapport aux différents matériaux testés, critère nécessaire pour que l'air chargé en PM puisse passer à travers le filtre de manière naturelle (piégeage passif) (Aguayo et al., 2018 ; Pan et al., 2014). Grâce aux vents naturels ou les courants d'air générés par les véhicules en circulation, qui transportent les aérosols, la filtration passive est réalisée en installant les filtres dans les positions prédéfinies par rapport au passage du vent, grâce aux simulations CFD se basant sur le sens du vent réalisées auparavant. Le support génère une très faible perte de charge, à la fois sans et avec un revêtement d'huile en surface. De plus, il est résistant à la combinaison de base forte, eau chaude et ultrason, utilisée pour la régénération. Une huile spécifique est choisie comme revêtement de référence, en se basant sur les propriétés de viscosité (stable entre 0°C et 40°C), olfactives (faible odeur) et son bon rapport coût-bénéfice. La couche de revêtement est à base d'huile d'origine végétale qui respecte l'environnement et la santé publique. Les protocoles d'infiltration, lavage des pièges et d'analyse des PM récoltés ont été établies afin de contrôler des paramètres et assurer la comparabilité entre les différents échantillons. Le test à blanc (support sans revêtement) et test de recyclage sont aussi réalisés dans les conditions réelles pour reconfirmer l'utilité de la couche de revêtement, et la possible réutilisation des pièges.

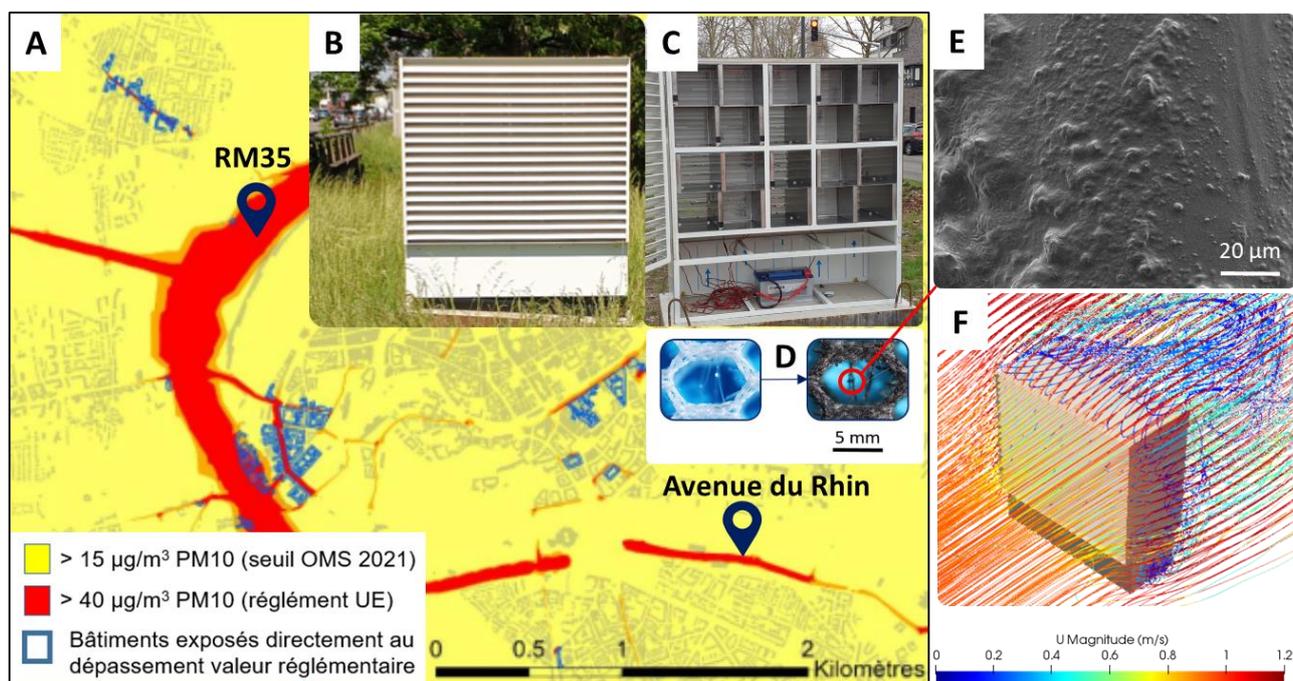


Figure 1 | (A) Carte d'exposition aux valeurs limites de PM10 à Strasbourg - AtmoGrandEst, 2018. Les zones en rouge représentent des densités élevées du trafic (i.e. autoroutes, périphérique, centre-ville) (B et C) Photos digitales des prototypes de l'autoroute M35 (gauche) et de l'Avenue du Rhin (droite). (D) Photos digitales d'une partie d'un filtre neuf et d'un filtre exposé 8 semaines sur l'autoroute M35. (E) Image d'analyse MEB d'une partie d'un filtre exposé 8 semaines sur M35 du 02/03/2022 à 27/04/2022. (F) Simulation CFD de l'aérodynamique du prototype sur l'autoroute M35 – Air&D 2022.

Le piégeage des particules par les prototypes expérimentaux a augmenté régulièrement jusqu'à 14 semaines d'exposition avant de marquer une stabilisation, voire une saturation du média filtrant sur les semaines suivantes. En effet, 84 ± 6 g/m² de PM sont captés après 14 semaines d'exposition sur prototype M35, contre 50 ± 8 g/m² sur prototype Avenue du Rhin. Les analyses obtenues par granulométrie (réalisées au CETIM Grand-Est) ont montré que les PM10 représentaient $45\% \pm 5\%$ du volume total, dont 21% de PM2.5 (particules fines) et 6% de PM1 (particules ultrafines, extrêmement nocives pour la santé). Le mécanisme de captage est basé sur l'effet d'adhésion sur la couche fine à base d'huile qui enrobe le support. En effet, une fois entrées dans la matrice du filtre, les particules sont freinées par le film liquide collant du revêtement (Fig. 1D et 1E). Si la force de l'inertie était supérieure à la combinaison des forces de mouvement et force d'attraction gravitationnelle, les PM seraient piégés en restant sur le support. Autrement dit, la couche collante sert à capter les particules et les garder sur le filtre (Agranovski & Braddock, 1998 ; Agranovski, 2010; Boskovic et al., 2007 ; Byun et al., 2020 ; Müller et al., 2014 ; Pyankov et al., 2008). À partir de 14 semaines d'exposition, le revêtement deviendrait sec et le piège atteint alors sa saturation, ou son équilibre de dépôt/relargage.

La quantité de PM captées ainsi que leur nature sont liées directement aux variations météorologiques. Sur la M35, le trafic est normalement plus fluide, les véhicules circulant à grande vitesse dans un sens, et freinant moins qu'en zone urbaine, additionné par une concentration de PM élevée (surtout pendant les heures de pointe). Les échantillons de suivi météo mensuelles et demi mensuelles sur M35 sont 2 fois plus encrassées que celles sur l'Avenue du Rhin, où le prototype se trouve dans une rue canyon, à proximité de deux voies de circulation et de deux feux tricolores, et entouré par des arbres et les bâtiments sur les deux côtés. Cela explique les différences entre la composition chimique des deux prototypes. Les particules récoltées sur M35 sont majoritairement liées à l'usure des pneus et de la chaussée. La composition chimique (analyses MET) des particules est constituée majoritairement de produits carbonés. Quant à l'avenue du Rhin, en plus du C et O, les particules métalliques sont assez abondantes, et représentent la dégradation des plaquettes de frein lors du freinage des véhicules devant les feux tricolores, et de l'embrayage lors du redémarrage. Durant l'année, la variation météorologique et saisonnière impacte la quantité de PM captés. Expérimentalement, une humidité élevée accompagnée par la pluie pourrait faire diminuer la concentration de PM dans l'air, ainsi que la quantité de PM passant à travers le filtre. Au contraire, une température stable (de 15 à 25°C environ) sans précipitation, pourrait permettre au revêtement de mieux capter des particules, et allonger son fonctionnement avant saturation.

3. PERSPECTIVES

Ce projet de coopération scientifique pluridisciplinaire vise, d'une part, à développer et optimiser le matériel et le revêtement afin de s'adapter aux variations météorologiques et saisonnières tout en comparant leurs performances avec d'autres systèmes de filtrations d'air étudiés dans la littérature. Et d'autre part, une base de données acquise au cours des différents tests de piégeage des PM est en train d'être synthétisée et exploitée, afin d'alimenter des étapes de l'intelligence artificielle, en vue de créer un modèle de simulation (CFD – Fig. 1F) à plus grande échelle sur l'efficacité de piégeage des PM dans l'EMS pour l'amélioration de la qualité de l'air urbain.

4. REMERCIEMENT ET REFERENCES

Ce travail a été réalisé par la collaboration entre l'ICPEES, SICAT, TrapAparT et Air&D, avec les subventions de CNRS et le projet AQA3P de l'ADEME. Les analyses MEB ont été réalisées au plateforme microscopique de l'ICPEES-ICPMS. Merci pour les aides des personnels de l'Eurométropole de Strasbourg, et spécialement Mme. C. Trautmann (ex Vice Présidente de l'Eurométropole), nos sincères remerciements pour ses discussions au cours du projet. Nous voudrions dédier ce travail au mémoire de M. J.-P. Masquida qui a été participé à l'élaboration du projet.

ADEME. (2022) Emissions des Véhicules routiers - Les particules hors échappement. (n.d.). La librairie ADEME. Consulté le 20 Avril, 2023, adresse: <https://librairie.ademe.fr/air-et-bruit/5384-emissions-des-vehicules-routiers-les-particules-hors-echappement.html>

Aguayo, J., Fourrier-Jeandel, C., Husson, C., & loos, R. (2018). Assessment of Passive Traps Combined with High-Throughput Sequencing To Study Airborne Fungal Communities. *Applied and Environmental Microbiology*, 84(11), e02637-17. <https://doi.org/10.1128/AEM.02637-17>

Agranovski, I. E., & Braddock, R. D. (1998). Filtration of liquid aerosols on wettable fibrous filters. *AIChE Journal*, 44(12), 2775-2783. <https://doi.org/10.1002/aic.690441218>

- Agranovski, I. E.** (2010). Filtration of Liquid and Solid Aerosols on Liquid-Coated Filters. In I. Agranovski (Éd.), *Aerosols—Science and Technology* (p. 315-342). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783527630134.ch11>
- Beji, A., Deboudt, K., Khardi, S., Muresan, B., Flament, P., Fourmentin, M., & Lumière, L.** (2020). Non-exhaust particle emissions under various driving conditions: Implications for sustainable mobility. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 81, 102290. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102290>
- Beji, A., Deboudt, K., Khardi, S., Muresan, B., & Lumière, L.** (2021). Determinants of rear-of-wheel and tire-road wear particle emissions by light-duty vehicles using on-road and test track experiments. *Atmospheric Pollution Research*, 12(3), 278-291. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.12.014>
- Boskovic, L., Agranovski, I. E., & Braddock, R. D.** (2007). Filtration of nanosized particles with different shape on oil coated fibres. *Journal of Aerosol Science*, 38(12), 1220-1229. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2007.09.003>
- Burnett, R., Chen, H., Szyszkowicz, M., Fann, N., Hubbell, B., Pope, C. A., Apte, J. S., Brauer, M., Cohen, A., Weichenthal, S., Coggins, J., Di, Q., Brunekreef, B., Frostad, J., Lim, S. S., Kan, H., Walker, K. D., Thurston, G. D., Hayes, R. B., Spadaro, J. V.** (2018). Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(38), 9592–9597. <https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115>
- Byun, H. R., Park, S. Y., Hwang, E. T., Sang, B. I., Min, J., Sung, D., Choi, W. I., Kim, S., & Lee, J. H.** (2020). Antimicrobial Air Filter Coating with Plant Extracts Against Airborne Microbes. *Applied Sciences*, 10(24), 9120. <https://doi.org/10.3390/app10249120>
- CETU.** (2012). Calcul des émissions de polluants des véhicules automobiles en tunnel. https://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/CETU_DocInfo_Calcul_des_Emissions_2012.pdf. Retrieved April 20, 2023.
- Müller, T. K., Meyer, J., Thébaud, E., & Kasper, G.** (2014). Impact of an oil coating on particle deposition and dust holding capacity of fibrous filters. *Powder Technology*, 253, 247-255. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.11.036
- OECD.** (2020). Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport: An Ignored Environmental Policy Challenge. OECD. <https://doi.org/10.1787/4a4dc6ca-en>
- Pan, Y.-L., Wang, C., Hill, S. C., Coleman, M., Beresnev, L. A., & Santarpia, J. L.** (2014). Trapping of individual airborne absorbing particles using a counterflow nozzle and photophoretic trap for continuous sampling and analysis. *Applied Physics Letters*, 104(11), 113507. <https://doi.org/10.1063/1.486910>
- Pascal, M., De Crouy Chanel, P., Wagner, V., Corso, M., Tillier, C., Bentayeb, M., Blanchard, M., Cochet, A., Pascal, L., Host, S., Goria, S., Le Tertre, A., Chatignoux, E., Ung, A., Beaudreau, P., & Medina, S.** (2016). The mortality impacts of fine particles in France. *Science of The Total Environment*, 571, 416–425. DOI: /10.1016/j.scitotenv.2016.06.213
- Pyankov, O. V., Agranovski, I. E., Huang, R., & Mullins, B. J.** (2008). Removal of Biological Aerosols by Oil Coated Filters. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 36(7), 609-614. <https://doi.org/10.1002/clen.200700191>
- Timmers, V. R. J. H., & Achten, P. A. J.** (2016). Non-exhaust PM emissions from electric vehicles. *Atmospheric Environment*, 134, 10-17. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.03.017
- WHO.** Consulté le 20 Avril, 2023, adresse: <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>