

DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE D'EVALUATION DES PERFORMANCES DES MICROCAPTEURS DE PARTICULES EN CONDITION DE CIRCULATION AUTOMOBILE SUR PARIS

B. Berthelot^{1*}, A. Delater¹, S. Fable¹, C. Raventos¹, J. Queron¹, et O. Le Bihan¹

¹INERIS, 60550, Verneuil-en-Halatte, France

*Courriel de l'orateur : brice.berthelot@ineris.fr (olivier.le-bihan@ineris.fr)

TITLE

Development of a methodology for the evaluation of performances of low-cost optical PM_{2,5} sensors for indoor air quality monitoring in mobility situations by car around Paris.

RESUME

Dans la mesure où le temps quotidien moyen en habitacle automobile au sein de la population des pays industrialisés dépasse l'heure, la surveillance des expositions individuelles aux PM dans de tels environnements constitue une préoccupation croissante à laquelle les capteurs optiques bas-coûts cherchent à répondre. Si les avantages apportés par de tels équipements sont nombreuses, les verrous scientifiques et technologiques sont tout aussi nombreux. Centrée sur les PM_{2.5} et réalisée en conditions réelles de mobilité à Paris et ses environs, cette étude vise ainsi à présenter les premiers résultats d'une méthodologie innovante comparant des données fournies par des capteurs optiques bas-coûts, des compteurs particulaires et des mesures obtenues par gravimétrie en conditions réelles de circulation. Si les résultats des deux campagnes illustrent de forts écarts entre les valeurs nominales affichées par les capteurs et celles obtenues par gravimétrie, ils tendent cependant à valider l'approche méthodologique et à montrer que les coefficients de corrélation référence-capteurs restent élevés ($r = 0,74$). L'exploitation de l'ensemble des acquisitions fournit les pistes de compréhension des biais métrologiques observés.

ABSTRACT

Since the average time spent in automotive interiors in industrialized countries exceeds one hour a day, the monitoring of individual PM exposures in such environments is a matter of public concern. Low-cost optical sensors seem to be able to tackle this challenge thanks to interesting features. However, although the benefits of such products are many, technical locks subsist and are just as numerous. Focused on PM_{2.5} and carried out in real conditions of mobility by Paris, this study aims to present the first results of an innovative methodology comparing data provided by low-cost optical sensors, optical PM-counters and reference measurements under real traffic conditions. Although the results of the two campaigns show large differences between the nominal values provided by the sensors and those obtained by gravimetry, they nevertheless tend to validate the methodological approach and to show that the reference-sensor correlation coefficients remain high ($r = 0,74$). The exploitation of all the acquisitions provides the tracks for understanding the metrological biases observed.

MOTS-CLÉS: air intérieur, capteurs bas-coûts, particules fines, PM_{2,5} / **KEYWORDS:** : indoor air quality, automobile, PM_{2.5} sensors

1. INTRODUCTION

Les préoccupations croissantes liées aux expositions individuelles aux particules en mobilité, et la prise en compte des résultats d'études menées dans les transports en commun encouragent l'emploi de capteurs optiques bas-coût de particules dans les véhicules pour permettre une surveillance des expositions en continu et en temps réel (Geiss, Barrero-Moreno et al. 2010, Dias and Tchepel 2018). Si les évolutions techniques des dernières décennies ont favorisé l'essor de nouveaux paradigmes, les performances de ces produits émergents et innovants invitent à la prudence et, à mieux cerner les limites métrologiques intrinsèques à leur technologie *via* des études sur le terrain. Si diverses études pour évaluer les gains de ces microcapteurs en situation de surveillance en point fixe éclosent (LCSQA 2018), il n'existe à jour aucune étude en habitacle automobile et en conditions réelles de roulage où les performances des microcapteurs sont considérées.

Dans ce contexte, la méthodologie proposée a trait à l'évaluation des performances des microcapteurs optiques bas coûts dans ces environnements, en situation de mobilité péri-urbaine et urbaine à Paris. Pour se faire, un véhicule familial est équipé avec des équipements de référence, des équipements candidats (les microcapteurs) ainsi que des compteurs optiques de particules. Si ces derniers présentent les habituelles limites intrinsèques à ce type de transduction, celles-ci sont également partagées avec les microcapteurs. Se faisant, employer de tels produits permet de présenter des dynamiques d'évolution et d'obtenir des informations fidèles mais non nécessairement justes. L'enjeu de cette étude est de proposer une méthodologie où les équipements de suivi des concentrations particulaires comportent à la fois une méthode de référence et des compteurs optiques. La première partie de cette communication présente une première campagne d'essais dont l'intérêt est d'apprécier les niveaux de concentration qui peuvent être rencontrés en conditions

de circulation et de confronter à cette occasion les mesures gravimétriques et les mesures de comptage converties en concentrations massiques. La seconde partie présente quant à elle les résultats obtenus quand l'ensemble des équipements sont installés.

2. MATERIEL ET METHODE

2.1. Instrumentation

Les suivis des concentrations particulières en PM_{2.5} ont été réalisés *via* l'emploi de deux techniques de mesure : la gravimétrie comme méthode de référence et l'optique.

En ce qui concerne les mesures gravimétriques, un préleveur par impaction PM-2.5 (DGI) de la marque DEKATI est couplé à une pompe à membrane dont le débit est fixé à 30 L/min. L'ensemble permet des prélèvements sur des filtres en quartz présentant une porosité de 2,2 µm. Les valeurs des pesées obtenues selon les recommandations de la NF ISO 15767 et EN 12341, et la pondération par les volumes prélevés sur la durée de l'essai fournissent les concentrations particulières massiques moyennes et les incertitudes associées et ce, pour chaque essai réalisé. En ce qui concerne les mesures optiques, cette étude a exploité les données fournies par deux compteurs optiques de particules de marques distinctes (modèles Portable Laser Aerosolspectrometer (v. 1.108) de chez Grimm et DustTrak de chez TSI) et trois exemplaires d'un capteur bas-coûts accessible à la vente au grand public. Outre une information relative à la mesure des PM_{2.5}, les capteurs fournissent également toutes les minutes un suivi des températures, de l'humidité relative ainsi que de la position par GPS. Dans la suite du document, les équipements dits « de suivi » feront référence aux compteurs optiques et au DEKATI, quand les capteurs seront considérés comme des équipements « candidats ».

Pour les deux campagnes de mesure de cette étude, il faut noter que les compteurs optiques ont été préalablement étalonnés en usine. Leur emploi en conditions réelles s'est donc fait en respectant les réglages obtenus en sortie d'usine. En particulier, aucun étalonnage additionnel avec un aérosol particulier n'a été entrepris. Il en va de même pour les capteurs. Dernier détail méthodologique, l'indicateur optique GRIMM était positionné sur le mode « accumulatif » et mesurait des concentrations de particules en µg/m³ dans des classes de taille allant de > 0,23 µm à > 20 µm.

2.1. Véhicule & Déroulement des campagnes

Les deux campagnes de mesures ont été réalisées au sein d'un véhicule familial de type *crossover* lors de parcours urbains à Paris et ses alentours. Les emplacements des points de prélèvement et de mesure en air intérieur ont été sélectionnés afin de permettre l'évaluation d'une mesure d'exposition et reposent sur l'expérience acquise lors d'une précédente étude (INERIS 2017).

Se déroulant entre le 4 et le 15 février 2019, la première campagne embarque les équipements dits « de suivi » et sert plusieurs desseins. De prime abord, elle permet d'évaluer les niveaux de concentrations particulaire massique rencontrés sur des trajets et des durées de prélèvement définis au préalable. Dans un second temps, le respect des recommandations de méthodologie et de calcul proposées par la norme NF ISO 15767 permet ensuite l'évaluation des incertitudes élargies de chaque essai ainsi que la détermination des limites de quantification de la méthode gravimétrique employée dans un habitacle automobile. Ceci s'avère alors crucial pour la validation des essais exploitables pour la comparaison des méthodes optiques et de référence ainsi que pour la détermination des durées minimales de prélèvement.

La seconde campagne quant à elle s'est tenue entre le 17 juin 2019 et le 10 juillet 2019 et embarque l'ensemble des équipements à savoir : le préleveur, les compteurs optiques et les capteurs optiques bas-coûts. La validation des données gravimétriques pour chaque essai s'est également reposée sur les recommandations de la norme ISO. Les conditions de température et humidité relative ont été relevées pour chaque essai afin d'être par la suite exploitées pour expliquer les biais entre mesures de référence et mesures fournies par les capteurs bas-coûts.

Si lors de la première campagne, les itinéraires ont pu varier afin de diversifier les ambiances de mesure (sources potentielles de pollution, conditions environnementales...), la seconde campagne s'est tenue à un seul et même parcours empruntant notamment l'A86, le boulevard périphérique de Paris et Paris même.

3. RESULTATS ET DISCUSSION PRELIMINAIRE

3.1. Campagne n°1 : validation du choix des équipements de suivi

Lors de la première campagne de mesure, 19 prélèvements de PM_{2.5} en habitacle automobile et en situation de mobilité urbaine ont été réalisés sur des périodes moyennes de 3,02(± 0.15) heures. Le suivi des recommandations de la norme NF ISO 15767 a alors mené à déterminer en conditions de répétabilité une

limite de quantification de la méthode gravimétrique à partir de pesées de filtres témoins. Cette limite a été évaluée à 23,9 µg et a conduit au rejet des valeurs issues de 10 des essais réalisés.

Pour chaque équipement de suivi, la Figure 1 présente les boîtes à moustache des valeurs en PM2.5 obtenues sur les plages horaires de prélèvement dédiées à chacun des 9 essais restants. Comme attendu, les méthodes optiques, du fait des hypothèses prises en compte pour les conversions en masse des particules, tendent à sous-estimer en contexte de mobilité urbaine les concentrations particulières massiques.

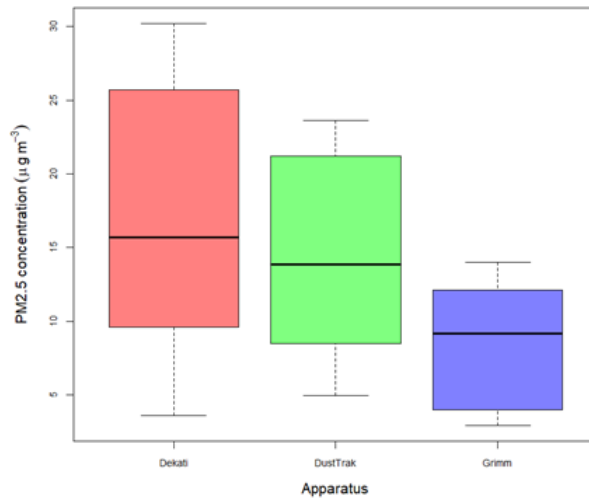


Figure 1. Boîte à moustache des valeurs PM2.5 fournies par chaque équipement de suivi pour les neuf essais validés de la première campagne.

L'étude de linéarité des valeurs fournies par les méthodes optiques vis-à-vis de celles obtenues par gravimétrie est alors menée et est présentée de façon synthétique en Figure 2. Sur la diagonale se trouvent les histogrammes des valeurs associées aux 9 essais validés pour chacun des équipements de suivi. Sur la partie triangulaire inférieure de la matrice de graphiques de la Figure 2 sont présentées les graphiques liés à l'étude de linéarité. Enfin, sur la partie triangulaire supérieure sont présentées les valeurs des coefficients de corrélation linéaire ainsi que les valeurs de la statistique de Student obtenues pour les jeux de données associant deux équipements. Les valeurs de l'ensemble des statistiques de Student semblent valider les hypothèses de linéarité entre les variables ($p < 0,05$). Les valeurs élevées pour les coefficients de corrélation ($r > 0,93$) conduisent alors à penser que les biais observés (en Figure 1) entre les valeurs de référence et celles issues des compteurs optiques sont bien le fait des hypothèses de calcul, notamment sur la masse volumique, prises par défaut. Enfin, la valeur la plus forte obtenue pour le coefficient de corrélation ($r = 0,97$) a été obtenue lors de la confrontation des résultats fournis par les deux équipements optiques. A ce stade, il faut noter que la comparaison a pu être effectuée pour la totalité des 19 essais dans la mesure où la plage de mesure des appareils optiques nous le permet.

Ces résultats amènent à valider la méthodologie de travail en habitable automobile puisque les équipements de suivi présentent des résultats cohérents entre eux à un facteur d'échelle près.

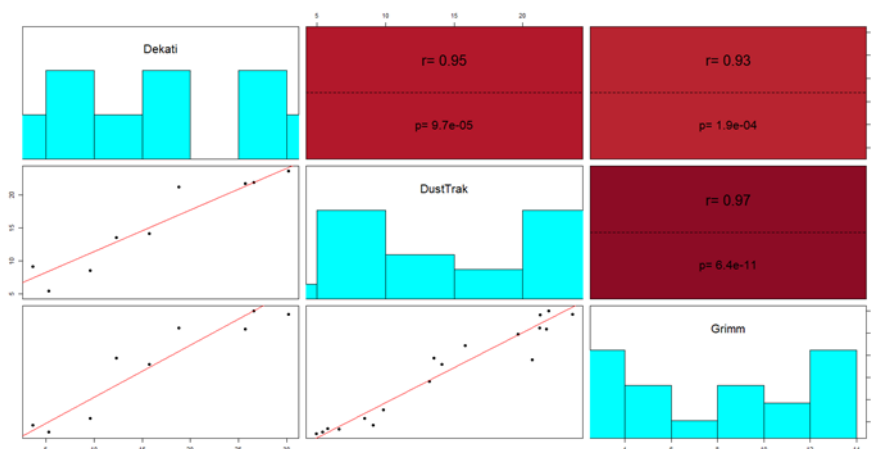


Figure 2. Matrice de corrélation pour la comparaison des valeurs obtenues par gravimétrie (Dekati) avec les valeurs obtenues par méthode optique (DustTrak et Grimm).

3.2. Campagne n°2 : évaluation des performances des microcapteurs

Du fait du retour d'expérience de la première campagne, la durée moyenne des prélèvements a été allongée pour passer à 5,75(± 0.13) heures. Se faisant la totalité des 8 essais réalisés ont pu être exploités directement. Une nouvelle fois les méthodes optiques sous-estiment fortement les valeurs en PM2.5. Pour les compteurs optiques, le DustTrak présente une nouvelle fois une valeur moyenne ($11.25 \pm 3.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$) plus proche de la valeur de référence ($20.57 \pm 5.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$) que le Grimm ($5.13 \pm 1.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Pour les valeurs des capteurs, les valeurs sont proches les unes des autres ($1.88 \pm 0.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $2.33 \pm 0.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $2.33 \pm 0.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$) mais totalement fausses vis-à-vis de la référence ($20.57 \pm 5.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

De manière analogue à la campagne 1, une matrice de corrélation a été produite à partir des valeurs moyennes obtenues par chaque équipement et pour chacun des essais de la seconde campagne. La lecture de cette matrice mène tout d'abord à écarter le capteur Sensor #3 du fait d'une trop faible significativité statistique lors de la confrontation. Pour les autres combinaisons d'équipement, les hypothèses de linéarité sont statistiquement satisfaisantes et permettent de poursuivre l'étude. Il faut alors noter la très forte corrélation entre les valeurs fournies par les deux compteurs optiques ($r = 0.92$) et, avec les capteurs Sensor #2 et Sensor #3 où les coefficients de corrélation varient de 0.82 à 0.93.

La confrontation avec les valeurs gravimétriques conduit pour Sensor #1 et Sensor #2 à des coefficients de corrélation identiques ($r = 0.74$) et légèrement supérieures pour le DustTrak et le Grimm.

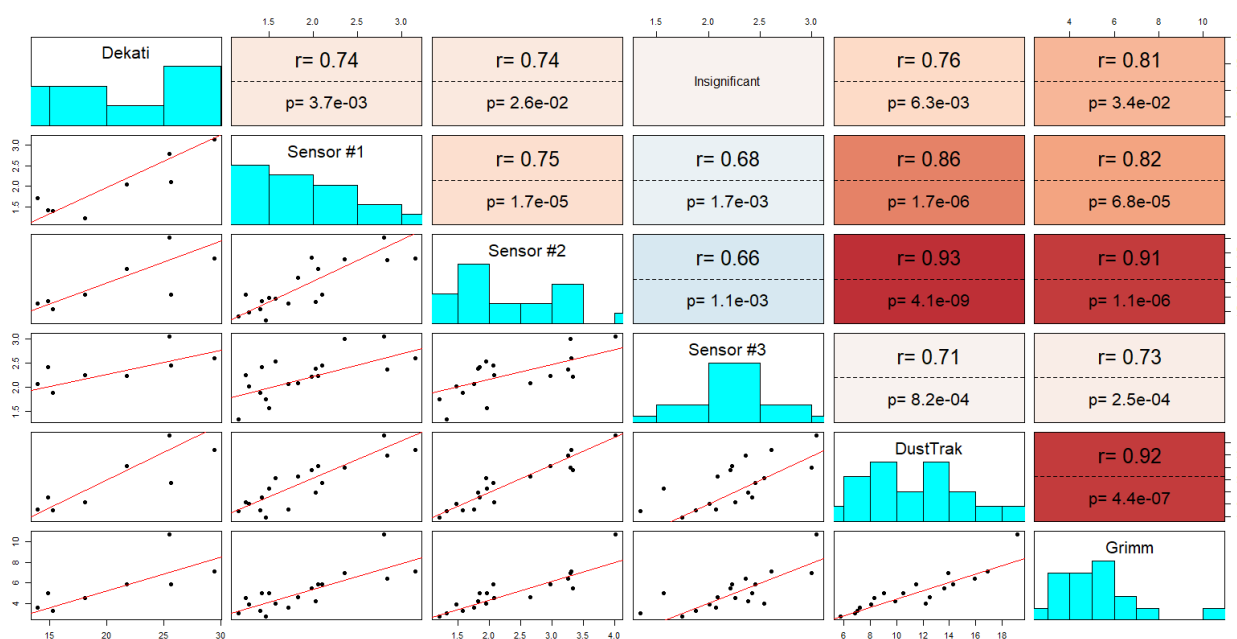


Figure 3. Matrice de corrélation pour la comparaison des valeurs obtenues par gravimétrie (Dekati) avec les valeurs obtenues par méthode optique (DustTrak, Grimm et capteurs).

L'ensemble de ces résultats mène à penser que l'approche, complétée par l'acquisition des données d'ambiance à la mesure fournie par les capteurs, pourra fournir les pistes d'appréciation des plages de fonctionnement des microcapteurs pour des situations similaires, de compréhension des biais observés entre les données fournies par les microcapteurs. Ceci pourra permettre à terme de mieux apprécier les expositions individuelles aux PM2.5 en habitacle automobile ou au sens général en pondérant les expositions par les budgets espace-temps correspondants aux activités des personnes.

Remerciements

Ce travail est cofinancé par l'ADEME dans le cadre du dispositif CORTEA, et plus précisément du projet QABINE II, et par le Ministère de l'Environnement (programme d'appui DRC 30).

Références

Dias, D. and O. Tchepel (2018). "Spatial and Temporal Dynamics in Air Pollution Exposure Assessment." *International Journal of Environmental Research and Public Health* **15**(3): 558.

Geiss, O., J. Barrero-Moreno, S. Tirendi and D. D. Kotzias (2010). "Exposure to Particulate Matter in Vehicle Cabins of Private Cars." *Copyright © Taiwan Association for Aerosol Research* **10**: 581-588.

INERIS (2017). "Rapport final projet QABINE : Qualité de l'Air dans les habitacles en déplacement." *Appel à projet de recherche CORTEA 2015*.

LCSQA (2018). 1er Essai national d'Aptitude des micro-Capteurs (EAμC) pour la surveillance de la qualité de l'air : synthèse des résultats. *Rapport LCSQA*, Laboratoire Central de la Qualité de l'Air.

