

PROTOCOLE D'ÉVALUATION ET D'UTILISATION D'UNE STATION LOW-COST DE MESURE DES PARTICULES FINES

M.-L. Aix*¹, D J. Bicout¹

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, UMR 5525, VetAgro Sup, Grenoble INP, TIMC, 38000 Grenoble, France
* marie-laure.aix@univ-grenoble-alpes.fr

TITLE

Protocole for evaluation and use of a low-cost particulate matter monitoring station

RÉSUMÉ

Les capteurs « low-cost » pourraient révolutionner la mesure des particules fines (PM) mais il paraît nécessaire d'évaluer leurs performances. Ce travail propose un protocole de montage, d'évaluation et d'utilisation d'une station comportant un capteur PMS7003. Les performances de mesure des PM_{2.5} (PM de taille <2,5µm) sont comparées aux directives de l'Environmental Protection Agency américaine (EPA). Il apparaît que certaines métriques (pente et NRMSE) sont non conformes en l'absence de calibration. Une calibration linéaire les ramène dans les limites de l'EPA et une calibration mécanistique améliore encore la précision. Les RMSEs sont alors de 0.90 µg/m³ (échelle horaire) et 0.48 µg/m³ (journée).

ABSTRACT

The use of low-cost sensors could revolutionize the measurement of fine particles (PM). Therefore, we must evaluate their performance. Here we report the assembly, evaluation and use of a station using a PMS7003 sensor. Its performance to measure PM_{2.5} (PM<2.5µm) is compared to the recommendations of the US Environmental Protection Agency (EPA). Some metrics (slope, NRMSE) are not compliant. A linear calibration brings them within EPA limits and a mechanistic calibration further improves accuracy. We can achieve RMSEs of 0.90 µg/m³ (hourly scale) and 0.48 µg/m³ (daily scale).

MOTS-CLÉS: capteurs low-cost, PM_{2.5}, calibration / **KEYWORDS:** low-cost sensors, PM_{2.5}, calibration

1. INTRODUCTION

Ces dernières années, nous assistons à une croissance de l'intérêt pour les microcapteurs optiques "low-cost". Parmi ceux-ci, le PMS7003 est l'un des plus utilisés pour la mesure des particules fines (PM). Il est plébiscité à la fois par les citoyens, les organismes officiels de mesure de qualité de l'air et la communauté scientifique. Il paraît donc important de mieux connaître ses performances et d'évaluer l'incertitude associée à ses mesures. S'appuyant sur une méthodologie développée par l'EPA (Duvall et al., 2021) et déjà utilisée récemment dans une étude (Zimmerman, 2022), notre travail vise à donner un aperçu des performances et des limites d'un concept de station de qualité de l'air utilisant le PMS7003. Notre objectif est de fournir un mode d'emploi couvrant le montage, l'évaluation des performances et le déploiement de ce type de dispositif. Nous nous focalisons ici sur la mesure des particules fines de taille inférieure à 2,5µm (PM_{2.5}). L'approche décrite ci-dessus peut s'adapter et s'appliquer à d'autres dispositifs similaires.

2. MONTAGE

Le dispositif de mesure des PM que nous avons mis en œuvre comporte deux capteurs low-cost : le PMS 7003 (Plantower), capteur optique de PM, ainsi que le DHT22 (MaxDetect), capteur d'humidité relative et de température. Ils sont connectés à un microcontrôleur Wi-Fi ESP8266 qui collecte les informations et les transforme selon un algorithme. Des fils de couleur sont utilisés pour connecter les composants entre eux et un boîtier en polycarbonate IP66 les protège des intempéries. Fin 2020, le coût total d'une telle station avoisinait les 65€. Pour la réalisation des objectifs de ce travail, nous avons construit 9 stations en partenariat avec Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (Atmo AuRA).

3. PERFORMANCES

Pour évaluer les performances des stations, nous avons réalisé une expérience de colocation sur la station des Frênes (Grenoble) en collaboration avec Atmo AuRA. Il s'était agi alors de comparer les valeurs des

capteurs à celles remontées par le Fidas® 200 (Palas GmbH) d'Atmo. Ce processus de colocation s'est étalé sur 8 mois, du 28 janvier 2021 au 29 septembre 2021.

3.1. Critères de l'EPA (Duvall et al., 2021)

L'EPA est l'agence qui implémente les lois fédérales de protection de l'environnement aux États-Unis. C'est le cas par exemple du Clean Air Act, qui règlemente l'ensemble des émissions atmosphériques. Dès 1998, le Congrès a demandé à l'EPA d'élargir ses recherches sur les effets sanitaires des PM. Depuis, l'EPA soutient activement la recherche sur les PM. Particulièrement active dans le domaine des capteurs low-cost, elle a défini 5 critères permettant de comparer les valeurs des capteurs à celles d'une référence : le coefficient de détermination (R^2), la pente, l'ordonnée à l'origine, la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et la racine de l'erreur quadratique moyenne normalisée (NRMSE). Le R^2 rend compte de la relation linéaire entre le capteur et la référence, tandis que le RMSE reflète l'écart entre les mesures des stations low-cost et celles de la référence ; il indique donc la précision du capteur. Enfin, l'EPA utilise d'autres indicateurs, obtenus en comparant les valeurs des différents capteurs low-cost entre elles, indépendamment de la référence. C'est par exemple le cas du coefficient de variation (CV) et de l'écart-type (SD). Les standards de l'EPA pour les capteurs (repris en gris sur la Figure 2) sont les suivants : $R^2 \geq 0.7$, $RMSE \leq 7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ou $NRMSE \leq 30\%$, $SD \leq 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ou $CV \leq 30\%$, $\text{pente} = 1 \pm 0.35$ et $-5 \leq \text{intercept} \leq 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Duvall et al., 2021).

3.2. Avant calibration

Nous avons retiré du jeu de données les périodes de dust sahariens et celles où l'humidité relative (HR) dépassait 98%. Lorsque l'on étudie les données des stations à la fréquence horaire, les métriques telles que la pente et le NRMSE sortent des standards de l'EPA (Figure 2, partie "Avant calibration") ; les autres métriques restant conformes. Lorsque l'on passe à une fréquence journalière, on constate que le NRMSE s'améliore, mais reste non conforme. La pente évolue peu. Il est donc nécessaire de procéder à une calibration des stations. Par ailleurs, le passage à une fréquence journalière permet une amélioration de l'ensemble des autres métriques, sauf l'ordonnée à l'origine (intercept) qui est légèrement dégradée.

3.3. Calibration

Dans un souci de simplicité et de transparence, nous avons utilisé deux modèles empiriques : (1) un modèle linéaire, (2) un modèle mécanistique prenant en compte l'HR et la température mesurées par le capteur. Ces modèles ont été ajustés sur 75% du jeu de données et testés sur les 25% restants (Figure 1).



Figure 1. Découpage de la période de colocation

Les formules des modèles (Tableau 1 ci-dessous), dont les coefficients sont issus du meilleur ajustement, ont été obtenues avec le logiciel « RStudio Server 2021.09.1 ».

Tableau 1. Formules de calibration ($PM_{2.5 \text{ adj}}$ = concentration en $PM_{2.5}$ ajustée (corrigée) du capteur, RH_{int} = humidité relative interne mesurée par le capteur DHT22, T_{int} = température interne mesurée par le DHT22).

Échelle	Modèle linéaire	Modèle mécanistique
Horaire	$PM_{2.5 \text{ adj}} = 0.49 PM_{2.5} + 2.49$ (Aix et al., 2023)	$PM_{2.5 \text{ adj}} = 0.50 + 0.65 \frac{PM_{2.5}}{\left(1 + 0.25 \frac{RH_{\text{int}}}{100 - RH_{\text{int}}}\right)^{\frac{1}{3}}} + 0.08 T_{\text{int}}$ (Aix et al., 2023)
Journalière	$PM_{2.5 \text{ adj}} = 0.54 PM_{2.5} + 1.92$	$PM_{2.5 \text{ adj}} = 0.27 + 0.67 \frac{PM_{2.5}}{\left(1 + 0.38 \frac{RH_{\text{int}}}{100 - RH_{\text{int}}}\right)^{\frac{1}{3}}} + 0.07 T_{\text{int}}$

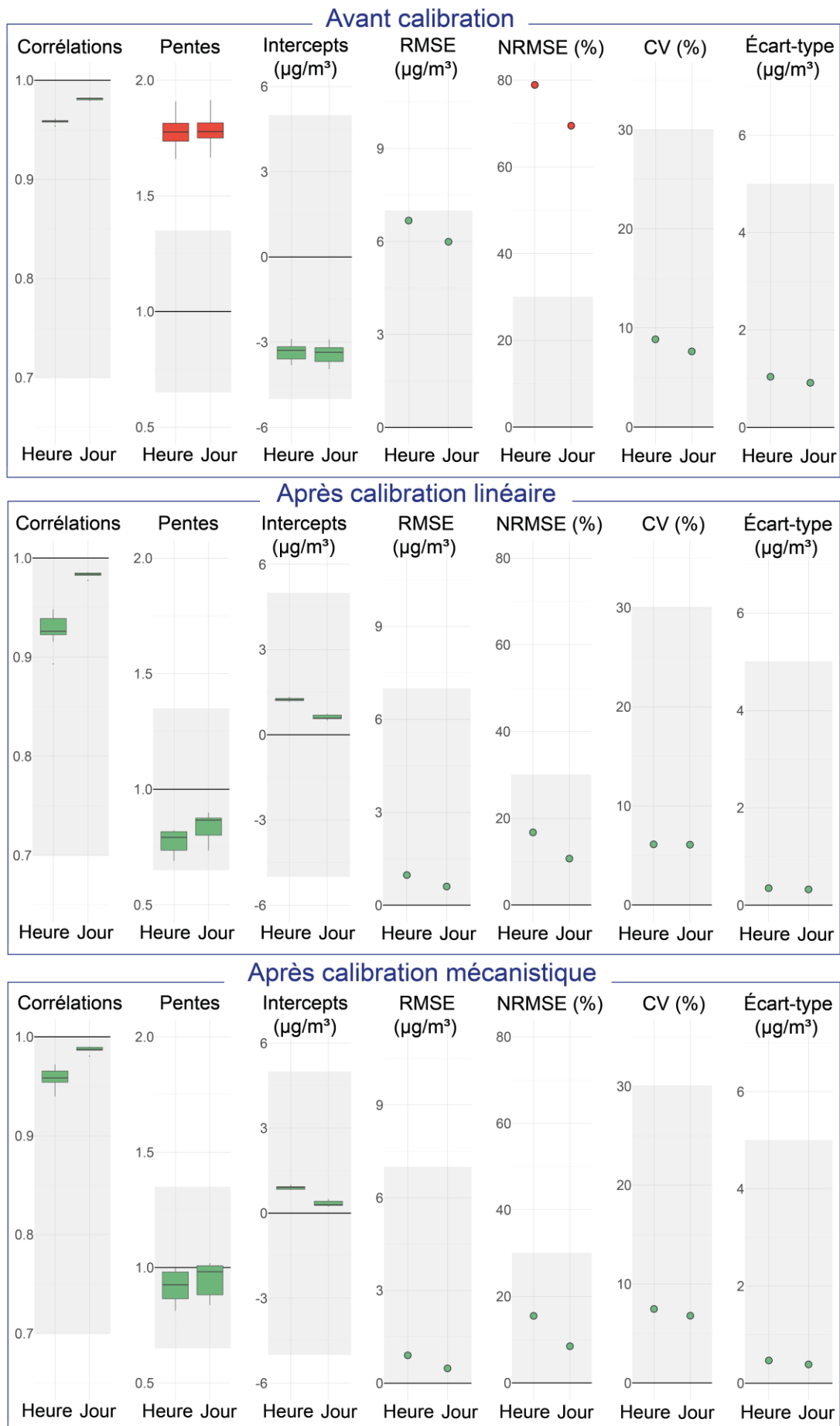


Figure 2. Indicateurs de performance des stations low-cost (zones grisées : standards EPA, lignes en gras : valeurs cibles, "Heure" = fréquences horaires, "Jour" = fréquences journalières). Le rouge est utilisé lorsque les métriques sortent des limites recommandées par l'EPA, le vert correspondant à une conformité.

3.4. Après calibration

La régression linéaire permet de corriger efficacement les concentrations remontées par les capteurs. L'ensemble des métriques devient conforme aux exigences de l'EPA (Figure 2, partie "Après calibration linéaire"). Au niveau horaire, on observe une légère baisse de 3.4% du R² médian. L'utilisation de fréquences journalières offre des métriques plus performantes sans dégradation du R² et avec une amélioration de 40% du RMSE. La calibration mécanistique au niveau horaire permet quant à elle, par rapport à la régression linéaire, une amélioration de 7,4% du RMSE et de 3,5% du R². On observe en revanche une légère dégradation des indicateurs suivants : CV et écart-type. Au niveau journalier, on observe une hausse de 0,4% du R² médian et une amélioration de 20,7% du RMSE par rapport à la régression linéaire.

4. DÉPLOIEMENT

Une fois calibrées, les stations low-cost peuvent être déployées pour l'expérimentation. De manière générale, les conditions environnementales dans lesquelles sont installées les stations doivent être aussi proches que possible de celles de la colocation :

- Le lieu de l'installation doit être situé près d'une alimentation et à portée d'un réseau Wi-Fi.
- Les dispositifs doivent être éloignés de zones fumeurs ou de chantiers.
- La hauteur d'accroche doit être similaire à celle du site d'accueil.
- Aucun obstacle, autre que le support, ne doit se trouver dans un périmètre de 1m.
- Il est recommandé de ne pas orienter les capteurs plein sud et de les abriter (exposition au soleil).

Enfin, nous avons constaté une baisse des performances de mesure de certains capteurs d'humidité relative (DHT22) après 7 mois, une partie des capteurs donnant continuellement des valeurs égales à 100%. Nous recommandons donc l'utilisation de capteurs d'humidité et de température plus robustes (Bosch BME280, Sensirion SHT85...).

5. CONCLUSION

Il ressort de cette expérience qu'une simple calibration linéaire suffit à rendre les métriques de nos stations low-cost conformes aux recommandations de l'EPA en termes de performances. Une calibration mécanistique améliore significativement la précision des capteurs mais entraîne une très légère dégradation du CV et de l'écart-type, restants néanmoins dans les plages de l'EPA. À l'échelle horaire, la calibration mécanistique permet d'atteindre un RMSE de 0.90 µg/m³ et un R² médian de 0.96, ce qui est très satisfaisant. À l'échelle journalière, il est même possible d'obtenir un RMSE de 0.48 µg/m³ et un R² de 0.99 par correction mécanistique. De manière générale, nous constatons qu'il est plus facile de satisfaire les critères de performance EPA lorsque l'on transpose les concentrations à une échelle journalière, plutôt qu'à une échelle horaire.

RÉFÉRENCES

- Aix, M.-L., Schmitz, S., Bicout, D. J. (2023). Open-source calibration of low-cost sensors for high-quality monitoring of fine particulate matter [Document soumis pour publication]
- Duvall, R., A. Clements, G. Hagler, A. Kamal, Vasu Kilaru, L. Goodman, S. Frederick, K. Johnson Barkjohn, I. VonWald, D. Greene, T. Dye. (2021). Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Fine Particulate Matter Air Sensors: Use in Ambient, Outdoor, Fixed Site, Non-Regulatory Supplemental and Informational Monitoring Applications. U.S. EPA Office of Research and Development, Washington, DC, EPA/600/R-20/280. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_Report.cfm?dirEntryId=350785&Lab=CEMM
- Zimmerman, N. (2022). Tutorial: Guidelines for implementing low-cost sensor networks for aerosol monitoring. *Journal of Aerosol Science*, 159, 105872. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105872>

REMERCIEMENTS

Marie-Laure Aix est soutenue par une bourse du Ministère de l'Éducation Nationale de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation. Elle réalise sa thèse au sein de l'École Doctorale Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement (ED ISCE) de l'Université Grenoble Alpes. Nous tenons à remercier chaleureusement Atmo Auvergne-Rhône-Alpes pour l'assistance au montage et à la colocation des stations dans le cadre de notre partenariat.