

Rapport bibliographique

*Évaluation des performances des capteurs low cost de
pollution atmosphérique*

ZARROUK Moez

Encadré par : BOUBRIMA Ahmed et RIVANO Hervé

Tuteur : MEILLIER Céline



Master IRIV

Parcours Images et Données

Mai 2024

Table des matières

1	Introduction Générale	1
1.1	Contexte du stage	1
1.2	Objectif principal du PFE	2
1.3	Structure du rapport	2
2	Méthodes de mesure des particules polluantes	3
2.1	Les particules polluantes	3
2.1.1	Définition	3
2.1.2	Unités de mesures	4
2.2	Méthodes de mesure des particules polluantes	5
2.2.1	Les méthodes de mesure de référence	5
2.2.2	Beta Attenuation Method (BAM)	6
2.2.3	Le fonctionnement de la BAM	7
2.2.4	Les capteurs PM à coût faible	8
2.2.4.1	Fonctionnement des capteurs à coût faible	9
2.2.4.2	Caractéristiques et limites	10
3	Évaluation des performances des micro-capteurs	12
3.1	Métriques de performance et mesures statistiques	12
3.1.1	Le coefficient de détermination r^2	13
3.1.2	RMSE et MAE	13
3.1.3	Erreur moyenne de biais : MBE	14
3.1.4	Coefficient de variation : CV	14
3.2	Analyse des données	15
3.2.1	Préparation des données	15
3.2.2	Relation entre les capteurs à faible coût et le capteur de référence	15
3.2.3	Variabilité intra-modèle	16
3.2.4	Reproductibilité des capteurs	17
3.2.5	Impact de la température et de l'humidité relative	17
3.3	Techniques de détection des anomalies des micro-capteurs	20

3.3.1	Approches basées sur les mesures des capteurs	20
3.3.2	Approches basées sur la consommation des capteurs	20
3.4	Méthodologie retenue	21
4	Conclusion	22

1 Introduction Générale

1.1 Contexte du stage

Ce stage de fin d'étude s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de la qualité d'air dans la région Auvergne Rhône Alpes et la région Île de France. La pollution de l'air a un impact important sur l'environnement et surtout sur la santé [1]. C'est pour cette raison que la surveillance de la qualité de l'air est exigée par les agences environnementales[2], les régions et les états afin d'évaluer l'exposition environnementale de la population à de multiples polluants de l'air.

L'instrument de référence utilisé pour répondre aux normes internationales en matière de mesure de la qualité d'air se caractérise par un coût élevé et un niveau de maintenance important [1]. De plus, sa résolution spatiale et temporelle est insuffisante pour caractériser avec granularité fine les variations des concentrations des polluants atmosphériques. C'est pour cela que grâce aux avancements technologiques, les agences environnementales et les régions comme Auvergne Rhône Alpes et Île de France commencent à s'intéresser à des microcapteurs à forte résolution temporelle et spatiale (grâce à leur faible coût).

Les capteurs à faible coût, aussi connus sous le nom de capteurs low cost, ont le potentiel de compléter et d'étendre les capacités des réseaux existants de surveillance de l'air ambiant. Ils permettent aussi de fournir des mesures à l'échelle du quartier (grâce à leur coût très faible), ce qui contribue à l'amélioration de la prise de décision concernant la réduction des effets de la pollution atmosphérique [3]. Cependant, les

capteurs à faible coût sont susceptibles la plupart du temps à fournir des mesures imprécises et loin de décrire la réalité. L'évaluation des performances des capteurs de particules polluantes est le principal sujet d'intérêt de ce stage. En effet, les particules polluantes et principalement les particules fines sont très néfastes à la fois pour la santé et pour l'environnement.

1.2 Objectif principal du PFE

L'objectif de ce stage est de déterminer la capacité des capteurs à faible coût à décrire le niveau de pollution de l'air en étant le plus proche de la réalité. Cela revient à analyser leurs performances en fonction de tous les facteurs pouvant les impacter (météo, encrassement, vieillissement, etc.).

1.3 Structure du rapport

Dans ce rapport bibliographique, nous allons dans un premier lieu aborder les généralités relatives à la mesure des particules polluantes (définitions, unités de mesure, etc.). Ensuite, nous récapitulons les méthodes de fonctionnement des moniteurs de référence et des capteurs à faible coût tout en abordant les limites de chaque technologie de mesure. Enfin, nous présentons les méthodes statistiques utilisées dans la littérature pour l'évaluation de la performance des capteurs et la détection des anomalies qu'ils pourraient avoir.

2 Méthodes de mesure des particules polluantes

Dans ce chapitre, nous allons examiner les méthodes de référence de mesure reconnues par les agences environnementales, ainsi que les méthodes utilisées par les capteurs low cost pour mesurer les particules polluantes.

2.1 Les particules polluantes

2.1.1 Définition

Les polluants de type particules (Particulate Matter ou PM) se composent d'un mélange de substances organiques et minérales sous forme liquide ou solide en suspension dans l'air [4]. Elles sont regroupées par leur taille (longueur du diamètre de la particule). En effet, la taille détermine le taux de pénétration des particules dans les voies respiratoires [5].

Les deux majeures classes de taille de PM sont PM_{10} , particules ayant un diamètre inférieur à 10 micromètres, et $PM_{2.5}$, particules ayant un diamètre inférieur à 2.5

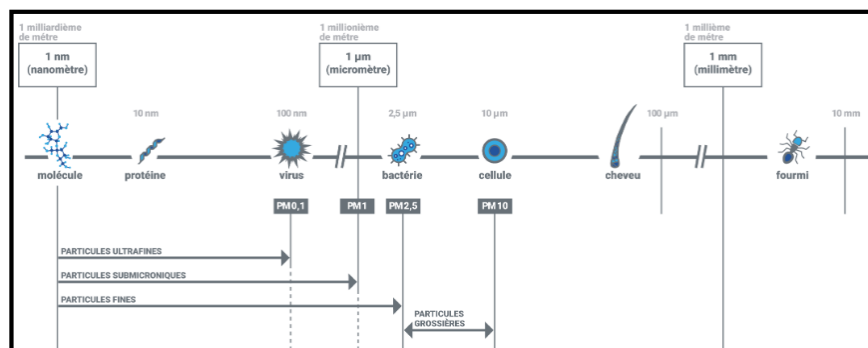


Figure 2.1 : Source :AirParif [4]

micromètres [4]. Ces deux classes, selon l'EPA (Environmental Protection Agency) et WHO (World Health Organisation) [4] [6], ont un impact néfaste sur la qualité de l'air ainsi que sur la santé humaine causant des maladies respiratoires et cardiovasculaires, et des cancers pulmonaires. Cela est dû à leur composition chimique qui détermine la capacité des particules à réagir avec les organes cibles telles que les poumons [5]. Cette composition chimique est extrêmement hétérogène avec des matières organiques telles que le carbone noir, et inorganiques telles que le nitrate et l'ammonium. Ces particules sont issues des émissions liées aux trafics routiers, chauffage au bois et la combustion de gaz et de fioul [4].

2.1.2 Unités de mesures

Les concentrations chimiques dans l'air sont généralement mesurées en unités de masse de la substance (micro-gramme ou gramme) par unité par volume d'air (mètre cube). Ces concentrations peuvent aussi être exprimées en ppb (parts of billion) grâce à la formule de conversion ci-dessous en se basant sur la masse molaire du polluant, la température et la pression atmosphérique.

$$\text{Concentration (ppb)} = 24.45 \times \frac{\text{Concentration } (\mu\text{g}/\text{m}^3)}{\text{Masse Molaire}}$$

Tel que $24.45 \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$ est le volume molaire à 25°C et 1atm .

Cependant, cette unité de mesure ne fonctionne pas avec les Particules fine vu leur composition chimique, elles sont donc Exprimées en $\mu\text{g m}^{-3}$ ou g m^{-3} .

2.2 Méthodes de mesure des particules polluantes

2.2.1 Les méthodes de mesure de référence

Les capteurs de pollution de référence sont reconnus par l'EPA grâce à leur conformité aux normes exigées par le NAAQ (National Ambient Air Quality). Ils reposent sur des méthodes de référence fédérales (FRM) pour garantir la cohérence et la fiabilité des données sur la qualité de l'air collectées par les agences gouvernementales et les organismes de réglementation [7]. Ces méthodes s'appuient principalement sur des filtres pour collecter les particules fines en fonction de leur taille sur des filtres distincts. Chaque filtre est ensuite pesé (après l'équilibrage de l'humidité) avant et après le passage des particules pour déterminer la différence de masse due aux PM collectées. Le volume d'air est calculé à partir du débit d'air entrant par unité de temps. La concentration des particules est donc la masse totale divisée par le volume d'air, en microgrammes par centimètre cube [5].

Malgré leur précision, ces méthodes ne sont pas optimales car elles permettent des mesures uniquement une fois toutes les 24 heures. De plus, leur coût élevé et la limitation dans le déploiement des capteurs sont des obstacles à la réalisation d'un suivi continu et en temps réel, essentiel pour prendre des décisions éclairées en vue d'améliorer la qualité de l'air [3].

Il y a aussi d'autres méthodes de mesure de référence qui sont les méthodes fédérales équivalentes (FEM) et qui sont conçues pour être équivalentes aux FRM en termes de fiabilité et qui utilisent des technologies pour effectuer les mesures de concentration des particules. Ces méthodes permettent d'avoir des mesures en temps réel.[7] Le

tableau ci-dessous récapitule [8] les méthodes de référence ainsi qu'un exemple de modèle de capteurs l'utilisant et leurs caractéristiques telles que la précision, le débit d'entrée d'air mesurée en litre par minute (LPM), la plage de température et de pression dans laquelle se font les mesures.

Méthode	Précision	Débit	Temp.	Pression	Capteur
Instack Particulate filtration		14-25LPM	30-45°C	600-800mmHg	RAAS10-200
TEOM (Tapered element oscillating monitor)	$\pm 0.75\%$	0.5-4.0LPM	8-25°C		TEOM1405-DF
Dichotomous Air Sampler		10-19LPM	40-50°C		Thermo Scientific Partisol 2000-D
Beta Attenuation Method	$\pm 2\%$	16.7LPM	10-40°C		BAM1020

Table 2.1 : Caractéristiques des méthodes de mesure de la pollution de l'air.

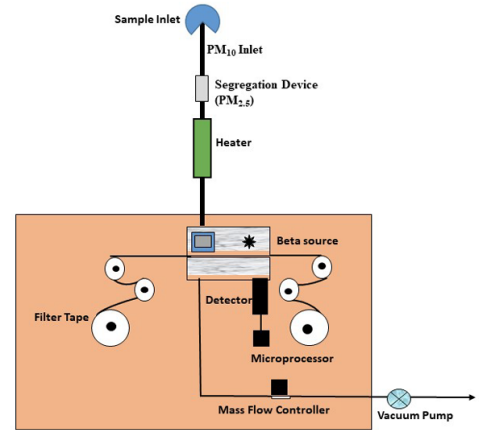
Dans la sous-section suivante nous détaillons la méthode de référence la plus utilisée, à savoir la Beta Attenuation Method (BAM).

2.2.2 Beta Attenuation Method (BAM)

D'après [8] et [9], la méthode d'atténuation beta est l'une des techniques de mesure en temps réel les plus utilisées pour la surveillance des particules dans l'air ambiant. C'est une méthode fédérale équivalente en regard de l'utilisation des particules bêta pour mesurer la concentration des particules.



(a) Modèle



(b) Schema de fonctionnement

Figure 2.2 : BAM 1020

2.2.3 Le fonctionnement de la BAM

Une fois le flux d'air est rentré et filtré à travers une entrée à 16LPM (litre par minute). Les particules sont donc piégées sur une bande filtrante. La source bêta qui est le ^{14}C , au-dessus du filtre, émet des rayons bêta ; ces particules sont atténuées et atteignent le détecteur à scintillation sensible aux rayons bêta après avoir traversé le ruban filtrant déposé sur les particules [9].

La figure 2.2 montre le schéma de fonctionnement du capteur "BAM 1020".

Le détecteur transforme la lumière en un signal électrique et calcule la concentration en micro-gramme par centimètre cube suivant cette formule : $C = \frac{A \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{\mu Q t}$

C = Concentration en micro-gramme par cm^{-3}

\dot{A} = Surface du filtre par laquelle le flux d'air est passé en cm^2

I = Intensité du rayon bêta atténuée

I_0 = Intensité initiale

μ = Coefficient d'atténuation en $\text{cm}^2\mu\text{g}^{-1}$

Q = Débit d'air en L min^{-1}

t = Temps en minutes

Cette méthode de mesure a plusieurs limites. En effet, elle dépend des conditions météorologiques telles que la température et l'humidité relative ce qui implique une sous-estimation ou surestimation des concentrations des particules ainsi que sa résolution spatiale est faible.[9]

2.2.4 Les capteurs PM à coût faible

Les capteurs PM à bas coût suscitent de plus en plus d'intérêt grâce à leurs compositions et leur faible coût par rapport aux capteurs de référence [10]. En effet, ils sont caractérisés par un prix bien inférieur à 1000 euros (pour la partie sonde). Cependant, ces capteurs n'ont pas encore atteint la performance voulue pour être déployés sans l'accompagnement des capteurs de référence pour vérifier les valeurs mesurées. A cela s'ajoute qu'aucune agence ne se repose sur ses mesures à cause de leur dégradation rapide avec le temps [3] [11].

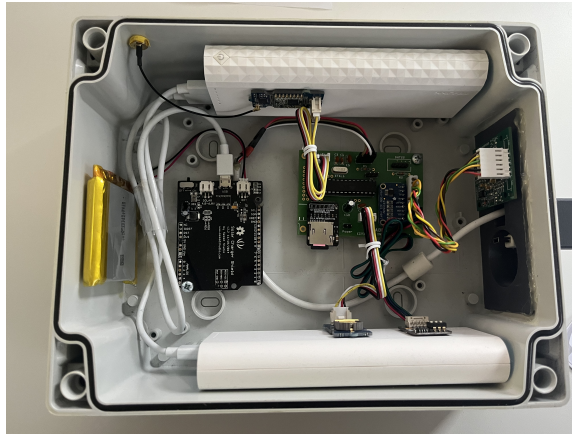


Figure 2.3 : Exemple d'un micro-capteur de pollution

Il n'existe pas de définition commune d'un capteur, il convient de faire la distinction entre le module de détection du polluant et l'ensemble de système de surveillance comprenant un ou plusieurs modules de détection ainsi qu'un boîtier de protection, un système d'alimentation (batterie), un microprocesseur pour convertir le signal de la lumière en unités de concentration, du matériel électronique et des composants pour le stockage et la transmission des données [2.4](#).

Dans tous les travaux de la bibliographie, le terme capteur désigne le module de détection.

2.2.4.1 Fonctionnement des capteurs à coût faible

Les capteurs low cost sont des capteurs optiques basés sur la technique de dispersion de la lumière qui est le principe fondamental de leur fonctionnement. Ces capteurs sont équipés d'un ventilateur pour faire circuler l'air et d'une LED émettant des faisceaux lumineux avec une longueur d'onde entre le domaine du visible et le domaine infra-rouge pour garantir la détection de particules ayant un diamètre entre $0.1-100\mu\text{m}$ [\[5\]](#).

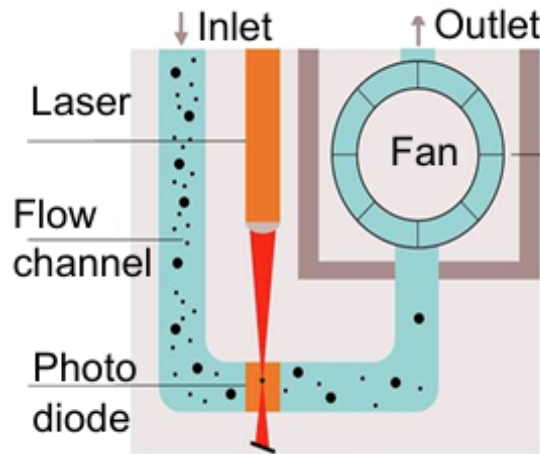


Figure 2.4 : Principe de fonctionnement des capteurs low cost des PM

Quand le faisceau lumineux traverse les particules, la lumière dispersée est collectée par une photodiode. La taille de la particule est ensuite déterminée et comptée en comparant l'intensité lumineuse à une courbe standard calibrée à l'aide des particules dont la taille est déjà connue. Cela permet donc de calculer la concentration.[12]

Chaque modèle de capteur a sa propre méthode de calcul de la concentration faite son fabricant, ce qui explique les petites différences entre les modèles de capteurs low cost. La figure 3.1 présente quelques modèles de capteurs low cost et leurs caractéristiques.

2.2.4.2 Caractéristiques et limites

Les capteurs à faible coût font des mesures en temps réel (une mesure toutes les secondes), ainsi qu'ils sont sensibles à des concentrations de l'ordre de $1\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Cependant, ce sont des capteurs qui ont une durée beaucoup plus inférieure à celle annoncée par les fabricants [13]. Leurs composants tels que le ventilateur ou la LED peuvent tomber en panne peu de temps après le déploiement des capteurs. Ils sont très sensibles aussi aux conditions météorologiques surtout l'humidité relative dès qu'elle

devient supérieure à 85% [14], ce qui peut perturber les mesures et user les composants. De plus, les mesures sont basées sur des calibrations effectuées sur des particules de taille connue et sous des conditions bien précises différentes des conditions réelles dans lesquelles elles sont faites en pratique [13].

3 Évaluation des performances des micro-capteurs

Pour assurer une bonne qualité de mesure, les capteurs à faible coût sont évalués par différentes approches pour déterminer leur capacité à décrire le niveau de pollution d'air avec la façon la plus proche de la réalité en les comparant à des capteurs de références validés par les agences de protection de l'environnement [15].

Les données issues des capteurs sont analysées afin de déterminer le niveau de leur performance, l'impact des conditions météorologiques ainsi que les anomalies causant leur détérioration.

3.1 Métriques de performance et mesures statistiques

Les concentrations des PM mesurées par les capteurs, regroupées par taille, sont stockées dans une base de données accompagnée par les facteurs météorologiques susceptibles d'influencer l'évaluation des capteurs tels que les conditions météorologiques. L'évaluation des capteurs repose donc sur des métriques et des mesures statistiques.

Les articles scientifiques parcourus mettent en évidence les mesures statistiques de trois indicateurs clés de performance des capteurs : La corrélation, l'erreur de mesure et la précision. La corrélation est utilisée pour évaluer les degrés de relation entre les mesures estimées du capteur et des valeurs de référence. L'erreur de mesure compare la différence entre les estimations du capteur et les mesures de référence correspondantes. Quant à la précision, elle mesure l'accord entre les mesures répétées d'une même propriété dans des conditions identiques.

3.1.1 Le coefficient de détermination r^2

Le coefficient de détermination r^2 fournit une mesure de l'importance de la relation entre les variations des concentrations de PM générées le capteur à faible coût et le capteur de référence. Ce coefficient est une mesure de l'ajustement du modèle de la régression linéaire aux valeurs observées qui sont les valeurs du capteur de référence. Dans l'équation ci-dessous, y_i représente les valeurs observées qui sont les valeurs du capteur de référence, \hat{y} représente la valeur prédite par le modèle de régression linéaire et \bar{y} représente la moyenne des mesures du capteur de référence :

$$r^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

D'après [14], dans une situation idéale où le capteur correspond parfaitement au capteur de référence, la pente (slope en anglais) serait égale à 1, le terme constant (intercept en anglais) serait égal à 0 et le coefficient r^2 serait proche de 1. D'après [14] et [3], il existe une relation entre le capteur et le capteur de référence à partir d'une valeur seuil de r^2 qui est 0.7.

3.1.2 RMSE et MAE

La MAE (erreur moyenne absolue) et la RMSE (erreur quadratique moyenne) mesurent l'ampleur de l'erreur de mesure. La RMSE plus de poids aux erreurs les plus significatives, tandis que la MAE traite chaque erreur d'une manière égale [14]. Les équations pour RMSE et MAE sont données ci-dessous :

$$\text{Root Mean Squared Error (RMSE)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

$$\text{Mean absolute error (MAE)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

3.1.3 Erreur moyenne de biais : MBE

La MBE entre le capteur PM à bas coût et le capteur PM de référence décrit la direction de l'erreur et indique si le capteur a tendance à sous-estimer ou surestimer le capteur de référence [14]. L'équation pour MBE est ci-dessous :

$$\text{Mean Bias Error (MBE)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)$$

3.1.4 Coefficient de variation : CV

Le coefficient de variation est une métrique recommandée par l'EPA [16] pour mesurer la précision des capteurs à bas coût. En effet, Il est calculé comme suit :

$$\text{CV} = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\%$$

Tel que σ est l'écart-type μ est la moyenne des données sur une minute provenant d'unité du même modèle du capteur. La valeur finale de CV pour chaque modèle de capteur a été déterminée comme la moyenne de toutes les valeurs temporaires de CV. D'après [16], les capteurs à faible CV (inférieur à 10%), ont une reproductibilité élevée ce qui veut dire qu'ils fournissent des mesures fiables et cohérentes.

3.2 Analyse des données

3.2.1 Préparation des données

En général, les données des capteurs low cost sont comparées à celles du capteur de référence, puis téléchargées et stockées sur un serveur distant, pour être affichées sur une page web privée actualisée toutes les minutes. La page permet donc un téléchargement direct des données [3]. Une fois disponible, un nettoyage des données est effectué en éliminant les valeurs négatives, les valeurs nulles, les valeurs invalides (NaN) et les valeurs qui se trouvent en dehors de la plage de mesure ou en dehors des limites de concentrations typiques de PM [3]. Les données sont ensuite moyennées en général sur des intervalles de temps d'une heure et mises en correspondance par date et heure avec les données horaires du capteur de référence. Selon [3], les données récupérées devraient représenter au minimum 75% des données brutes.

3.2.2 Relation entre les capteurs à faible coût et le capteur de référence

Dans [3], les auteurs mesurent la corrélation de quatre capteurs $PM_{2.5}$ à faible coût utilisant la technique de dispersion de la lumière et issus de 4 fabricants différents (voir la figure 3.1) avec un capteur de référence TEOM, mentionné dans la table 2.1. Trois capteurs de chaque modèle(fabricant) ont été placés sur le même site en Pologne pour comparer la performance des capteurs sous les mêmes conditions de mesures.

Les auteurs trouvent sur la période de mesure un coefficient de détermination r^2 élevé, ce qui montre la relation linéaire entre les capteurs et la référence pour les moyennes sur une heure sur avec PMS7003 avec une valeur de 0.89. Cependant, le capteur OPC-N2 présente un coefficient modéré (0.61) à cause de la dispersion des données.

Sensor model	SDS011	ZH03A	PMS7003	OPC-N2
Manufacturer	Nova Fitness	Winsen	Plantower	Alphasense
Approximate price (\$)	20	20	20	500
Dimensions (mm)	71 × 70 × 23	50 × 32.4 × 21	48 × 37 × 12	75 × 63.5 × 60
Approximate weight (g)	50	30	30	105
Power supply voltage (V)	5	4.5–5.5	4.5–5.5	4.8–5.2
Working current (mA)	220	70–140	≤100	175
Detectable size range (μm)	0.3–10	0.3–10	0.3–10	0.38–17
Size bins	Not available	Not available	6 size bins	16 size bins
Estimated PM _x concentration	PM _{2.5} , PM ₁₀	PM ₁ , PM _{2.5} , and PM ₁₀	PM ₁ , PM _{2.5} , and PM ₁₀	PM ₁ , PM _{2.5} , and PM ₁₀
Concentration range (μg/m ³)	0–999.9	0–1000 (for PM _{2.5})	Effective range: 0–500 Maximum range: above 1000 (for PM _{2.5})	0.01–1500·10 ³ (for PM ₁₀)

Figure 3.1 : Les caractéristiques des capteurs low cost issus de fabricants différents et utilisant la même technique de mesure.

Pour déterminer en détail la relation entre les mesures des capteurs et la référence, les auteurs dans [3], [14] et [16] ont essayé de voir la relation entre l’erreur par heure et les concentrations mesurées par le capteur de référence dans le but d’identifier l’impact des concentrations mesurées par les capteurs low cost . En effet, [14] a comparé 12 capteurs low cost avec un instrument de référence qui est le BAM, dont le fonctionnement est expliqué dans la partie 2.2.3. Afin d’examiner l’impact potentiel des concentrations de $PM_{2.5}$ sur la réponse des capteurs, les erreurs de biais horaires ont été tracées en fonction du BAM pour les 12 capteurs. Cela permet de voir en effet la sensibilité des capteurs low cost aux niveaux de pollution, et ainsi déterminer si le capteur low-cost sous-estime ou surestime l’instrument de référence. Les auteurs ont ensuite tracé l’erreur relative de $PM_{2.5}$ (concentration en %) en fonction du BAM ($PM_{2.5}$, concentrations horaires) pour voir l’impact de la plage de concentration sur la performance du capteur.

3.2.3 Variabilité intra-modèle

La variabilité intra-modèle au sein d’un certain nombre de capteurs du même modèle (3 pour le cas de [3]) se définit comme les degrés d’accord entre les capteurs. Cela est

déterminé en calculant les concentrations moyennes de PM mesurées par les capteurs individuels, puis en les comparant avec la moyenne des moyennes et l'écart-type pour cette moyenne des moyennes. L'écart-type pour la moyenne des moyennes fournit une mesure de la variabilité intra-modèle. Un écart-type élevé pour la moyenne des moyennes indique une forte variabilité intra-modèle, tandis qu'un écart-type faible indique une faible variabilité intra-modèle.

3.2.4 Reproductibilité des capteurs

Le calcul du coefficient de variabilité permet de déterminer la reproductibilité du modèle du capteur, en effet, il permet de déterminer le degré de fiabilité du modèle et degrés de répétabilité entre les capteurs de ce modèle. Cette caractéristique est évaluée dans [3] et [16] vu qu'elle est essentielle pour déterminer la performance des capteurs d'après EPA.

3.2.5 Impact de la température et de l'humidité relative

Un facteur important causant la dégradation du capteur low cost est l'humidité relative. En effet, d'après [11], à partir d'un certain seuil, la performance du capteur se dégrade. Cela est aussi examiné par les papiers, en effet, dans [14], les erreurs de biais horaires ont été tracées en fonction de l'humidité relative horaire pour les 12 capteurs. Idéalement, la pente de la ligne de meilleur ajustement devrait être nulle et se situer sur l'axe $y = 0$ (voir figure 3.2). Cela détermine à quelle valeur de l'humidité, les mesures du capteur commencent à s'éloigner de celles de référence.

Dans [3], les auteurs ont tracé les concentrations mesurées par le capteur de référence en fonction des concentrations mesurées par le capteur à bas coût pour trois intervalles

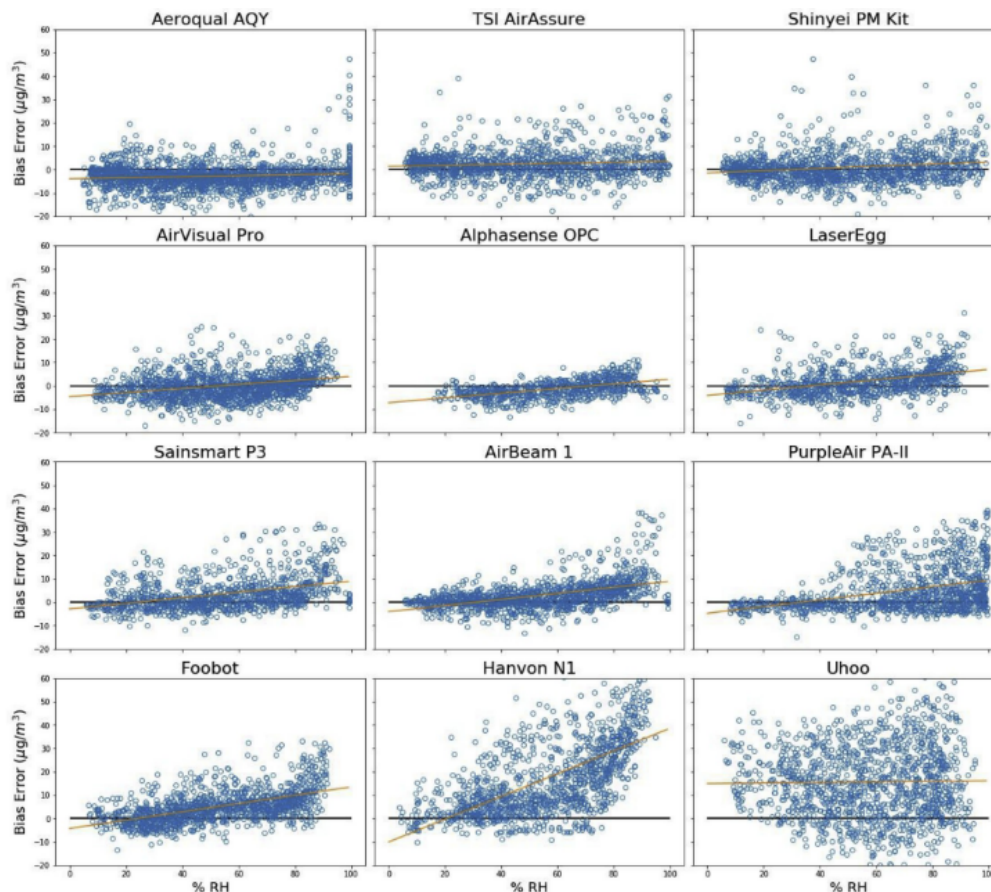


Fig. 1. Impact of Relative Humidity (RH) on the bias error between Sensor and Met One BAM.

Figure 3.2 : L'impact de l'humidité relative sur 12 capteurs low cost .

de valeurs d'humidité relative. Ils ont ensuite réalisé une régression linéaire pour étudier l'effet de l'humidité sur le capteur à bas coût (figure ci-après). Leurs analyses ont montré que pour une humidité élevée, les capteurs sont moins performants. Ainsi, les auteurs de [17] ont montré que la température exerce une influence sur les capteurs low cost en diminuant le coefficient de détermination r^2 .

[17], [18], et [19] ont étudié l'influence des conditions météorologiques sur la performance des capteurs à bas coût, et ils sont arrivés à constater que l'humidité a un impact plus fort que celui de la température. En effet, lorsque l'humidité relative est

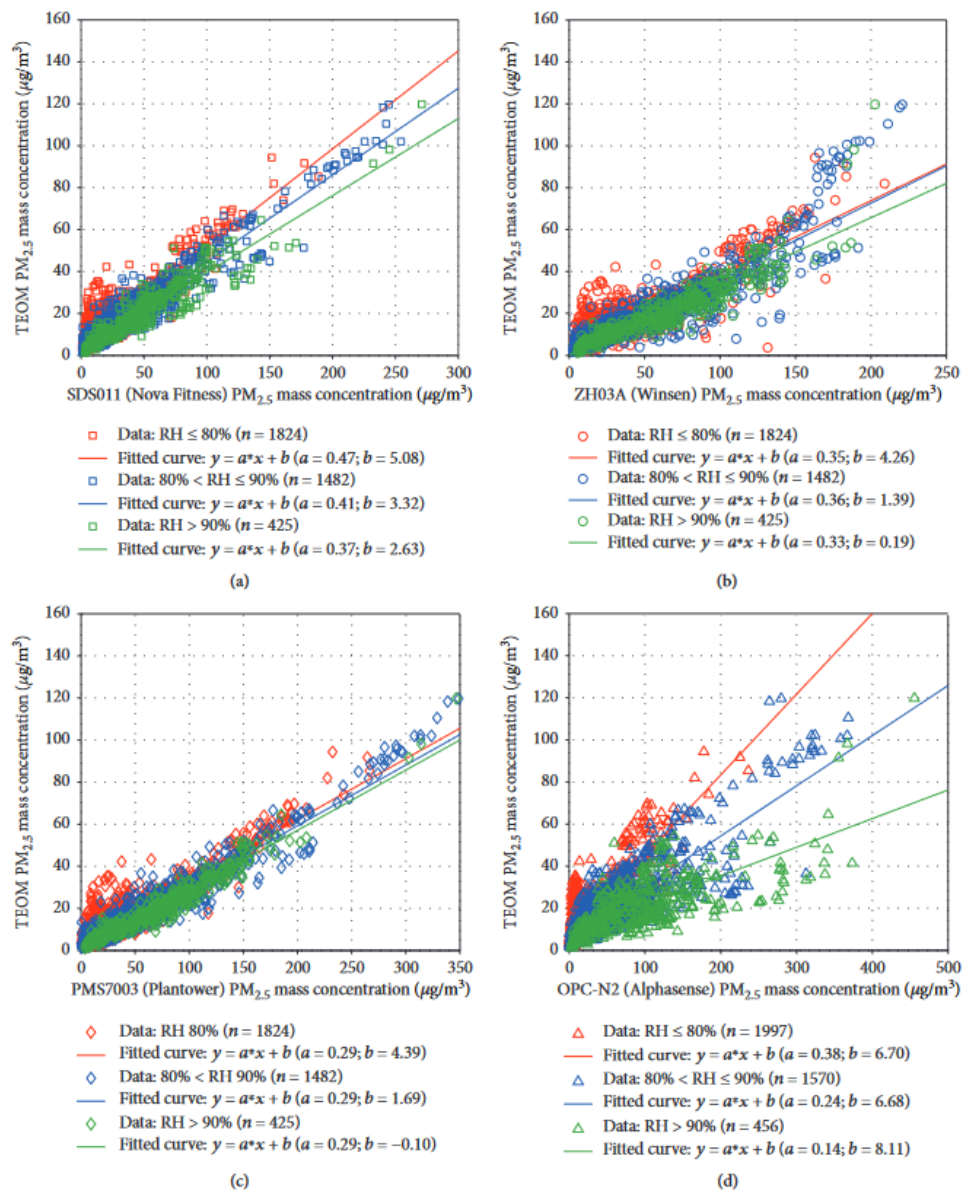


Figure 3.3 : L'impact de l'humidité relative sur 4 capteurs low cost.

élevée, les particules polluantes absorbent l'eau, ce qui entraîne une augmentation du signal de lumière diffusée par les particules. Par conséquent, la concentration de ces dernières est surestimée et les composants deviennent défaillants.

3.3 Techniques de détection des anomalies des micro-capteurs

3.3.1 Approches basées sur les mesures des capteurs

Les approches centrées sur les données décrites se reposent sur des techniques statistiques basées sur des données collectées des capteurs voisins [13],[20]. Ces approches divisent les données continues des capteurs en tranche de temps et identifient trois types d'anomalies :

1. **Anomalie spatiale** est détectée si les données de mesure sont beaucoup plus élevées (ou plus basses) que la moyenne de son capteur de référence haut de gamme voisin dans la même tranche de temps. En effet si l'écart entre les deux capteurs est supérieur à un seuil prédéfini (fixé à 2 écarts types dans le papier), cela est donc considéré comme une anomalie.
2. **Anomalie temporelle** est détectée lorsqu'il y a un écart significatif (supérieur à 2 écarts types) dans le comportement attendu du capteur par rapport à ses données historiques.
3. **Anomalie spatio-temporelle** est détectée si les données de mesure sont identifiées comme des anomalies spatiales et temporelles dans la même tranche de temps.

3.3.2 Approches basées sur la consommation des capteurs

La mauvaise performance des capteurs à bas coût est attribuée à l'impact des facteurs environnementaux associés aux limites des composants bon marché. Une part importante des défaillances des capteurs est causée par la défaillance de ces composants, entraînant ainsi des inexactitudes dans les mesures. Les auteurs de [13] proposent

une approche appelée CurrentSense, qui permet de diagnostiquer l'état du capteur $PM_{2.5}$ sans aucune information sur les conditions météorologiques ainsi que sur les données historiques de mesure. Cette méthode échantillonne le courant consommé par le capteur pour produire une unique empreinte électrique indiquant l'état du capteur (défaillant ou non) et pour isoler le composant responsable de la défaillance. D'après les auteurs, les composants qui sont à l'origine des défaillances sont la LED émettant les faisceaux de lumière, et le ventilateur qui fait passer le flux d'air à l'intérieur du capteur. Ainsi, CurrentSense échantillonne le courant à deux fréquences, à savoir 30 Hz et 5 kHz, afin de capturer toutes les variations et de surveiller les composantes à basse fréquence, où l'on observe la consommation de courant par la LED, et à haute fréquence, où l'on observe la consommation de courant par le ventilateur. Si un changement dans la consommation de courant par un composant est détecté, alors ce composant est considéré comme défaillant. Cette méthode s'est montrée efficace à classer les capteurs défaillants avec une précision de 99%.

3.4 Méthodologie retenue

Dans le cadre de ce stage, nous allons nous concentrer sur l'approche centrée sur les données tout en utilisant les métriques évoquées dans ce chapitre afin de modéliser la performance des capteurs low cost déployés par les agences de suivi de qualité de l'air en France. Cela nous permettra de caractériser entre autres l'impact de l'humidité et de la température (mais aussi l'encrassement et le vieillissement des sondes) sur les concentrations mesurées.

4 Conclusion

Dans ce rapport bibliographique, nous avons dans un premier lieu défini les termes clés du sujet du projet de fin d'étude qui se focalise sur les capteurs low cost des particules polluantes. Les capteurs low cost suscitent en effet l'intérêt des agences environnementales pour surveiller la qualité de l'air grâce à leur faible coût ainsi que leur forte résolution spatiale et temporelle. Cependant, ces capteurs sont souvent susceptibles de fournir des mesures imprécises (pouvant être impactées par la météo, l'encrassement et le vieillissement), ce qui nécessite donc une évaluation de leur performance afin de confirmer leur fiabilité.

Nous nous sommes focalisés ainsi dans ce rapport bibliographique sur la présentation des différentes méthodes de mesure des PM illustrées avec quelques exemples de capteurs. Nous avons ensuite étudié les métriques de performance et les méthodes d'analyse de données utilisées dans la littérature pour évaluer le niveau de performance des mesures et aussi pour détecter leurs anomalies. L'objectif dans la suite de ce PFE sera donc de modéliser les performances des capteurs en fonction de la météo, l'encrassement et le vieillissement du capteur tout en s'appuyant sur des jeux de données fournis par les associations de suivi de qualité de l'air en France.

Bibliographie

1. BORCHI, F., SPINAZZÈ, A., ROVELLI, S., CAMPAGNOLO, D., DEL BUONO, L., CATTANEO, A. & CAVALLO, D. Miniaturized monitors for assessment of exposure to air pollutants : a review. *International journal of environmental research and public health* **14**, 909. doi :[10.3390/ijerph14080909](https://doi.org/10.3390/ijerph14080909) (2017).
2. WAYLAND, R. & MATHIAS, S. Guidance for ozone and fine particulate matter permit modeling.
3. BADURA, M., BATOG, P., DRZENIECKA-OSIADACZ, A. & MODZEL, P. Evaluation of low-cost sensors for ambient PM_{2.5} monitoring. *Journal of sensors* **2018**, 1-16. doi :[10.1155/2018/5096540](https://doi.org/10.1155/2018/5096540) (2018).
4. *Airparif - La qualité de l'air en Île-de-France* <https://www.airparif.fr/>. Consulté le 30 avril 2024.
5. ALFANO, B. *et al.* A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers' Perspectives. *Sensors* **20**, 1-56 (2020).
6. *Surveiller la Qualité de l'Air* <https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/article/surveiller-la-qualite-de-lair> (2024).
7. LE, T.-C., SHUKLA, K. K., CHEN, Y.-T., CHANG, S.-C., LIN, T.-Y., LI, Z., PUI, D. Y. & TSAI, C.-J. On the concentration differences between PM_{2.5} FEM monitors and FRM samplers. *Atmospheric environment* **222**, 117138. doi :[10.1016/j.atmosenv.2019.117138](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117138) (2020).

8. HALL, E. S. & GILLIAM, J. H. Reference and equivalent methods used to measure national ambient air quality standards (NAAQS) criteria air pollutants - volume i. Publisher : [object Object]. doi :[10.13140/RG.2.1.2423.2563](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2423.2563) (2016).
9. SHUKLA, K. & AGGARWAL, S. G. A technical overview on beta-attenuation method for the monitoring of particulate matter in ambient air. *Aerosol and air quality research* **22**, 220195. doi :[10.4209/aaqr.220195](https://doi.org/10.4209/aaqr.220195) (2022).
10. *low_cost_sensors_web.pdf*
11. ALFANO, B. *et al.* A review of low-cost particulate matter sensors from the developers' perspectives. *Sensors* **20**, 6819. doi :[10.3390/s20236819](https://doi.org/10.3390/s20236819) (2020).
12. LIU, D., ZHANG, Q., JIANG, J. & CHEN, D.-R. Performance calibration of low-cost and portable particular matter (PM) sensors. *Journal of aerosol science* **112**, 1-10. doi :[10.1016/j.jaerosci.2017.05.011](https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.05.011) (2017).
13. MARATHE, S., NAMBI, A., SWAMINATHAN, M. & SUTARIA, R. *CurrentSense : a novel approach for fault and drift detection in environmental IoT sensors in Proceedings of the international conference on internet-of-things design and implementation IoTDI '21 : International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation* (ACM, Charlottesville VA USA, 2021), 93-105. doi :[10.1145/3450268.3453535](https://doi.org/10.1145/3450268.3453535).
14. FEENSTRA, B., PAPAPOSTOULOU, V., HASHEMINASSAB, S., ZHANG, H., BOGHOSSIAN, B. D., COCKER, D. & POLIDORI, A. Performance evaluation of twelve low-cost PM_{2.5} sensors at an ambient air monitoring site. *Atmospheric environment* **216**, 116946. doi :[10.1016/j.atmosenv.2019.116946](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116946) (2019).

15. BORREGO, C. *et al.* Assessment of air quality microsensors versus reference methods : the EuNetAir joint exercise. *Atmospheric environment* **147**, 246-263. doi :[10.1016/j.atmosenv.2016.09.050](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.050) (2016).
16. KANG, Y., AYE, L., NGO, T. D. & ZHOU, J. Performance evaluation of low-cost air quality sensors : a review. *Science of the total environment* **818**. doi :[10.1016/j.scitotenv.2021.151769](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151769) (2022).
17. JIAO, W. *et al.* Community air sensor network (CAIRSENSE) project : evaluation of low-costsensor performance in a suburban environment in the southeastern UnitedStates. *Atmospheric measurement techniques* **9**, 5281-5292. doi :[10.5194/amt-9-5281-2016](https://doi.org/10.5194/amt-9-5281-2016) (2016).
18. RAI, A. C., KUMAR, P., PILLA, F., SKOULODIS, A. N., DI SABATINO, S., RATTI, C., YASAR, A. & RICKERBY, D. End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring. *Science of the total environment* **607-608**, 691-705. doi :[10.1016/j.scitotenv.2017.06.266](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.266) (2017).
19. KARAGULIAN, F., BARBIERE, M., KOTSEV, A., SPINELLE, L., GERBOLES, M., LAGLER, F., REDON, N., CRUNAIRE, S. & BOROWIAK, A. Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmosphere* **10**, 506. doi :[10.3390/atmos10090506](https://doi.org/10.3390/atmos10090506) (2019).
20. CHEN, L.-J., HO, Y.-H., HSIEH, H.-H., HUANG, S.-T., LEE, H.-C. & MAHAJAN, S. ADF : an anomaly detection framework for large-scale PM2.5 sensing systems. *IEEE internet of things journal* **5**, 559-570. doi :[10.1109/JIOT.2017.2766085](https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2766085) (2018).