



**Laboratoire Central de Surveillance
de la Qualité de l’Air**

**DEVELOPPEMENT D'UN PROTOCOLE POUR
L'EVALUATION EN LABORATOIRE DES CAPTEURS PM**

**François Gaie-Levrel, Lola Brégonzio-Rozier,
Alexandre Bescond, Tatiana Macé (LNE)**

Décembre 2019



LE LABORATOIRE CENTRAL DE SURVEILLANCE DE LA QUALITÉ DE L'AIR

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air est constitué des laboratoires de l'IMT Lille Douai, de l'INERIS et du LNE. Il mène depuis 1991 des études et des recherches à la demande du Ministère chargé de l'environnement, et en concertation avec les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). Ces travaux en matière de pollution atmosphérique ont été financés par la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (bureau de la qualité de l'air) du Ministère chargé de l'Environnement. Ils sont réalisés avec le souci constant d'améliorer le dispositif de surveillance de la qualité de l'air en France en apportant un appui scientifique et technique au ministère et aux AASQA.

L'objectif principal du LCSQA est de participer à l'amélioration de la qualité des mesures effectuées dans l'air ambiant, depuis le prélèvement des échantillons jusqu'au traitement des données issues des mesures. Cette action est menée dans le cadre des réglementations nationales et européennes mais aussi dans un cadre plus prospectif destiné à fournir aux AASQA de nouveaux outils permettant d'anticiper les évolutions futures.

TABLE DES MATIERES

RESUME	6
1. CONTEXTE	7
2. RAPPEL DES ETUDES PRECEDENTES	8
3. OBJECTIF DE L'ETUDE 2019	9
4. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAIS	9
4.1 Chambre d'exposition	9
4.2 Instrumentation associée à la génération d'aérosols	9
4.3 Instrumentation associée aux mesures de référence	9
5. METHODES DE DETERMINATION DE LA JUSTESSE, DES LIMITES DE DETECTION ET D'ESTIMATION DE LA REPETABILITE	10
6. RESULTATS	10
6.1 Caractérisation des aérosols générés	10
6.2 Evaluation de la justesse et de la linéarité des capteurs testés	11
6.3 Evaluation des limites de détection des capteurs testés	13
6.4 Estimation de la répétabilité des capteurs testés	13
7. CONCLUSION & PERSPECTIVES	14
8. REFERENCES	15

RESUME

Une étude de faisabilité d'un protocole d'évaluation en laboratoire de capteurs pour la mesure des concentrations massiques particulières a été menée entre 2017 et 2018 par le LCSQA-IMT Lille Douai. Ces essais ont porté sur deux natures de particules (poussières d'Arizona et chlorure de potassium) représentatives d'une fraction des particules de l'air ambiant. En 2019, le LCSQA-LNE a repris ces travaux dans le but d'optimiser ce protocole d'évaluation de par la mise en place d'une instrumentation spécifique associée à la génération d'aérosols et aux mesures de référence autour d'une chambre d'exposition. Concernant la génération des particules en phase aérosols, un générateur en voie humide ayant une stabilité temporelle adaptée aux essais a été impliqué pour la production de poussières d'Arizona. Couplés à cette même chambre, des instruments de référence ont été utilisés pour les mesures de distributions granulométriques en nombre (SMPS+APS) et de concentrations massiques (TEOM 50°C équipé d'une tête $PM_{10}/PM_{2,5}$) avec des résolutions temporelles inférieures à la minute. Le banc d'essais développé dans le cadre de cette étude a ensuite été mis en œuvre pour définir des modes opératoires pour la détermination de certaines performances des capteurs telles que la linéarité, la justesse, les limites de détection et la répétabilité (conditions de réalisation des essais et traitement statistique). Ces modes opératoires ont ensuite été mis en application sur des capteurs disponibles en laboratoire pour tester leur robustesse. Les essais et les résultats obtenus montrent qu'ils sont adaptés à la détermination de la linéarité, la justesse, les limites de détection et la répétabilité des capteurs.

En termes de perspectives, il s'agira d'optimiser ces modes opératoires en y associant des conditions de température et d'humidité relative contrôlées afin de tester l'effet de ces paramètres sur les performances des capteurs. Concernant la température, une gamme globale allant de 5°C à 40°C est prévue en lien avec une gamme d'humidité relative allant de 10% à 85%. Le premier challenge de cette nouvelle étude consistera à déterminer des points de fonctionnement en termes de température et d'humidité relative. Par la suite, pour chacun de ces points de fonctionnement, des gammes de concentrations particulières en nombre et en masse seront identifiées et optimisées en injectant au sein de la chambre d'exposition des aérosols plus ou moins hygroscopiques (huiles, sels, dust, ...) et possédant des indices de réfraction connus.

1. CONTEXTE

En France, un suivi régulier des concentrations massiques particulières est effectué par les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). Ces concentrations sont mesurées en utilisant la méthode de référence gravimétrique Européenne définie au sein de la Directive CAFE dans les normes européennes (EN 12341: 2014). Cependant, les pesées des filtres prélevés constituent un processus coûteux et décalé dans le temps, ce qui implique une difficulté à résoudre temporellement les épisodes de pollution urbains à court terme. C'est la principale raison pour laquelle de nombreux états membres s'appuient sur des instruments plus rapides en ayant déterminé leur équivalence à la méthode de référence gravimétrique (CEN/TS 16450: 2013). A l'instar des microbalances à éléments oscillants (TEOM) et des jauges radiométriques (jauges bêta) basées sur un processus de filtration, de nombreux instruments optiques peuvent également être utilisés, tels que des photomètres (Gebhart, 2001), des compteurs de particules (Görner *et al.*, 2012 ; Binnig *et al.*, 2007) et des spectromètres optiques (Sioutas, 1999 ; Hairston *et al.*, 1996). Cependant, ces méthodes optiques dépendent de propriétés spécifiques telles que la taille, la forme et l'indice de réfraction des particules (Eidhammer *et al.*, 2008), ce qui implique l'utilisation de coefficients d'étalonnage qui sont généralement valables pour un aérosol type bien défini notamment en termes de granulométrie et de composition chimique. En France, seul l'analyseur FIDAS 200 (PALAS, Allemagne) est actuellement reconnu équivalent à la méthode gravimétrique sur des sites de fond urbain et ruraux.

Par ailleurs, de nombreux questionnements apparaissent autour de la justesse et de la fiabilité des mesures en lien avec des variations des facteurs environnementaux comme, par exemple, la température, l'humidité et la pression. L'évaluation des dispositifs de mesure de concentration massique est donc indispensable afin de s'assurer de leurs performances métrologiques et de l'adéquation des informations délivrées en fonction du niveau d'exigence souhaité.

A titre d'exemple, les capteurs récemment mis sur le marché sont souvent évalués dans des conditions réelles sur le terrain en lien avec des instruments de référence auxquels leurs données sont comparées (Zheng *et al.* 2018, Feinberg *et al.* 2018 ; Kelly *et al.* 2017). Des tests en laboratoire sont également effectués lors des évaluations et impliquent l'exposition de ces capteurs à un polluant identifié et pour une gamme de concentrations donnée au sein d'une chambre environnementale (Redon *et al.*, 2018 ; Jayaratne *et al.* 2018 ; Papapostolou *et al.* 2017 ; Liu *et al.* 2017, Kelly *et al.* 2017). Ces évaluations peuvent inclure une température variable avec des conditions d'humidité relative définies ainsi que l'introduction de polluants interférents déterminés. Austin *et al.* (2015) ont caractérisé un capteur en générant des aérosols mono- et polydispersés à température ambiante au sein d'une chambre d'exposition par comparaison avec des mesures réalisées avec un spectromètre optique.

Liu *et al.* (2017) s'intéressent à l'influence de la composition de l'aérosol sur la réponse des capteurs. Kelly *et al.* (2017) ont réalisé des essais en soufflerie à température ambiante pour des concentrations particulières allant de 200 à 850 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Wang *et al.* (2015) ont effectué des études de laboratoire contrôlées à des températures de 5°C, 20°C et 32°C et des humidités relatives de 20 %, 67 %, 75 %, et 90 %. Ils ont constaté que les mesures des capteurs étaient généralement corrélées linéairement par rapport aux instruments de référence. Enfin, la problématique de la variabilité contrôlée pour des points de fonctionnement associant simultanément température (T), humidité relative (HR), concentration particulaire (C_p) et composition chimique des aérosols est rarement posée. Cela s'avère possible avec d'autres chambres associées aux études de processus atmosphériques, telles que la chambre CESAM en France (Lamkaddam *et al.* 2017, Wang *et al.* 2011). Néanmoins, ces dernières présentent des fonctionnements en régime statique associés à de grands volumes ($> 1 \text{ m}^3$) qui limitent l'application à la caractérisation métrologique des particules sur un large spectre de taille.

En conséquence, un manque est à déplorer en termes de protocole d'évaluation. En particulier, ces instruments dont le principe ne repose généralement pas sur des mesures directes de masse, ne sont étalonnés ni dans les conditions réelles d'utilisation, ni sur l'ensemble de leur domaine d'application. La traçabilité des mesures au système international d'unités (SI) n'est généralement pas établie. Il y a donc un réel besoin d'homogénéiser les pratiques d'évaluation en disposant de méthodes validées pour l'étalonnage des capteurs pour les mesures de concentrations massiques. Dans le cadre normatif, qui reste actuellement très lacunaire, un groupe de travail européen (TC 264/WG 42) a récemment été créé pour élaborer des spécifications techniques indiquant les lignes directrices pour l'évaluation des performances des capteurs utilisés pour la mesure indicative de polluants gazeux et particuliers dans l'air ambiant.

Ainsi, l'ensemble de ces travaux met en avant la nécessité de développer des protocoles d'évaluation des capteurs à des atmosphères contrôlées pour des points de fonctionnement stables.

2. RAPPEL DES ETUDES PRECEDENTES

Une étude de faisabilité d'un protocole d'évaluation en laboratoire de capteurs pour la mesure des concentrations massiques particulières a été menée entre 2017 et 2018. Ces essais ont porté sur deux natures de particules (poussières d'Arizona et chlorure de potassium) représentatives d'une fraction des particules de l'air ambiant (voir rapport Redon *et al.*, 2018).

3. OBJECTIF DE L'ETUDE 2019

En 2019, l'objectif de l'étude concernait l'optimisation de ce protocole d'évaluation de par la mise en place d'une instrumentation spécifique associée à la génération d'aérosols et aux mesures de référence autour d'une chambre d'exposition à température ambiante. Concernant la génération des particules en phase aérosols, un générateur en voie humide ayant une stabilité temporelle adaptée aux essais a été impliqué dans le cadre d'une production de poussières d'Arizona. Couplés à cette même chambre, des instruments de référence ont été utilisés pour les mesures de distributions granulométriques en nombre (SMPS+APS) et de concentrations massiques (TEOM 50°C équipé d'une tête PM₁₀/PM_{2,5}) avec des résolutions temporelles inférieures à la minute.

4. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAIS

4.1 Chambre d'exposition

La chambre d'exposition est constituée d'une enceinte en acier inoxydable et est équipée de modules d'injection pour l'introduction des aérosols et de prélèvement afin de connecter l'instrumentation de référence. Un thermo-hygromètre étalonné a été utilisé afin de mesurer la température et l'humidité relative dans la chambre d'exposition. Pour cette étude, les conditions environnementales en termes de température et d'humidité relative (HR) au sein de cette chambre d'exposition ont été respectivement de $20,0^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ et $50\% \pm 2\%$. Notons également que les essais ont été réalisés à pression atmosphérique.

4.2 Instrumentation associée à la génération d'aérosols

La génération des aérosols a été réalisée en voie humide en utilisant un nébuliseur couplé à un système de sécheurs par diffusion. Contrairement à la voie sèche, ce générateur a été identifié et choisi pour sa meilleure stabilité temporelle dans le cadre d'une production de poussières d'Arizona.

4.3 Instrumentation associée aux mesures de référence

La distribution granulométrique des particules générées au sein de la chambre d'exposition a été mesurée à l'aide de deux instruments, à savoir le Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) et l'Aerosol Particle Sizer (APS). Le SMPS permet de mesurer une distribution en nombre de particules dans une gamme de diamètres de mobilité électrique compris entre 10 nm et 1 µm, tandis que l'APS permet de déterminer la concentration particulaire en nombre en fonction du diamètre aérodynamique pour un domaine de taille allant de 0,6 à 20 µm. Les instruments ont été étalonnés en taille avec des suspensions de référence de polystyrène latex (PSL).

Quant aux concentrations massiques particulières, elles ont été mesurées à l'aide d'une microbalance TEOM 50°C couplée à une tête de prélèvement PM₁₀ / PM_{2,5} en ayant une résolution temporelle de 30s. Les mesures effectuées sont traçables au système international *via* un étalon de travail (générateur de particules).

5. METHODES DE DETERMINATION DE LA JUSTESSE, DES LIMITES DE DETECTION ET D'ESTIMATION DE LA REPETABILITE

Le banc d'essais développé dans le cadre de cette étude (cf. paragraphe précédent) a ensuite été mis en œuvre pour définir des modes opératoires pour la détermination de certaines performances des capteurs telles que la linéarité, la justesse, les limites de détection et la répétabilité (conditions de réalisation des essais et traitement statistique).

Ces modes opératoires consistent dans un premier temps à optimiser des concentrations massiques particulières générées au sein de la chambre d'exposition en amont des essais impliquant des capteurs. Dans un second temps, des concentrations massiques croissantes de PM_{2,5} et PM₁₀ selon les conditions environnementales précédemment présentées sont générées. Les réponses individuelles de chaque capteur et les valeurs de référence doivent être mesurées en continu. Pour chaque concentration massique, des mesures successives sont relevées pendant 15 min après atteinte de la stabilité.

La justesse est évaluée en calculant les pentes (a) et les ordonnées à l'origine (b) de la droite de régression entre les réponses des capteurs et les valeurs de référence (tests de linéarité).

La limite de détection (LD) est évaluée à partir des essais de linéarité et de justesse et est calculée selon :

$$LD = \frac{|b| + 3u_b}{a}$$

Avec : $|b|$ la valeur absolue de l'ordonnée à l'origine
 u_b l'incertitude sur l'ordonnée à l'origine
 a la pente de la droite de régression

L'estimation de **la répétabilité** est effectuée en générant successivement deux concentrations massiques de PM_{2,5} et PM₁₀ à 20°C et à 50% HR au sein de la chambre d'exposition. Les réponses individuelles de chaque capteur et les valeurs de référence sont mesurées en continu. Les mesures sont relevées pendant 1 heure après atteinte de la stabilité pour chaque concentration massique avec une résolution temporelle de 30s.

6. RESULTATS

Les modes opératoires ont ensuite été mis en application sur des capteurs disponibles en laboratoire pour tester leur robustesse.

6.1 Caractérisation des aérosols générés

Différents types de poussières d'Arizona ont été utilisés afin d'atteindre les concentrations massiques particulières cibles. La densité des aérosols générés est de $\rho = 2,65 \text{ g/cm}^3$ avec un indice de réfraction de $n = 1,54$ d'après Wang et al. (2009).

Les distributions granulométriques en nombre des aérosols générés au sein de la chambre d'exposition ont été caractérisées par une gamme de taille allant de quelques nanomètres à 7 μm . En termes de concentrations massiques, quatre niveaux moyens ont été générés successivement dans la chambre d'exposition afin d'évaluer les capteurs en $\text{PM}_{2,5}$ et PM_{10} (Tableau 1).

Tableau 1 : Concentrations massiques moyennes PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$ mesurées au sein de la chambre d'exposition grâce à la mesure de référence (TEOM 50°C)

$\text{PM}_{2,5} (\mu\text{g}/\text{m}^3)$		$\text{PM}_{10} (\mu\text{g}/\text{m}^3)$	
Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
0,9	2,3	0,9	2,3
61,7	3,8	55,1	3,8
116,8	4,8	87,7	3,5
244,3	4,4	217,0	4,2

Ainsi, les quatre gammes de concentrations de référence générées pour les $\text{PM}_{2,5}$ et PM_{10} sont de $0,9 \pm 2,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $61,7 \pm 3,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $116,8 \pm 4,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $244,3 \pm 4,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $0,9 \pm 2,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $55,1 \pm 3,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $87,7 \pm 3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $217,0 \pm 4,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement.

6.2 Evaluation de la justesse et de la linéarité des capteurs testés

Pour évaluer la justesse et la linéarité de trois capteurs (C1, C2 et C3) en $\text{PM}_{2,5}$ et PM_{10} , les valeurs moyennes et les écarts-types de mesures quart-horaires ont été calculés pour ces capteurs après stabilisation de chaque concentration massique générée au sein de la chambre d'exposition. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Résultats des mesures pour l'évaluation de la linéarité et de la justesse des capteurs C1, C2 et C3 en PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$

$\text{PM}_{2,5} (\mu\text{g}/\text{m}^3)$							
Mesure de référence		C1		C2		C3	
Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
0,9	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
61,7	3,8	14,3	0,7	15,3	0,9	15,4	0,6
116,8	4,8	22,8	0,8	23,4	0,7	24,5	0,6
244,3	4,4	42,8	1,6	46,9	1,8	48,3	1,8
$\text{PM}_{10} (\mu\text{g}/\text{m}^3)$							
Mesure de référence		C1		C2		C3	
Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
0,9	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
55,1	3,8	19,5	1,0	21,3	2,0	21,6	2,4
87,7	3,5	33,6	1,5	34,1	1,4	35,8	1,2
217,0	4,2	65,6	3,4	61,9	3,2	72,0	2,3

Les Figures 1 et 2 représentent les données du tableau 2 afin de déterminer la linéarité et la justesse des capteurs impliqués pour cette étude.

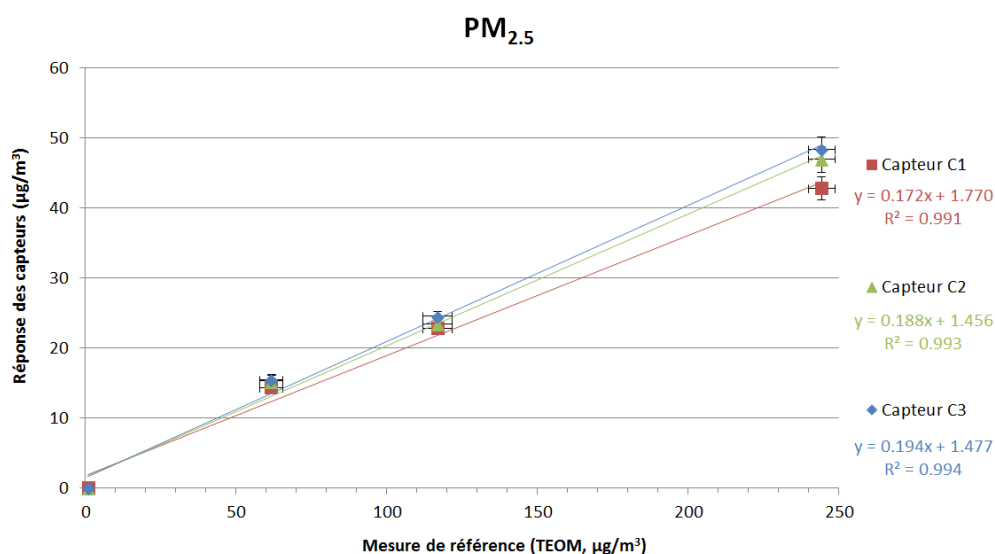


Figure 1 : Représentation graphique des résultats des essais de linéarité et de justesse pour les PM_{2,5}

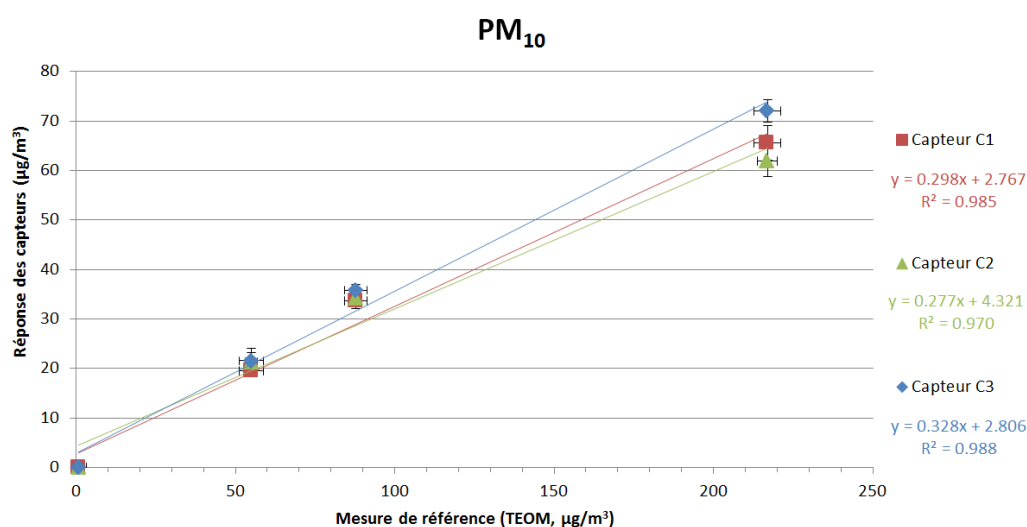


Figure 2 : Représentation graphique des résultats des essais de linéarité et de justesse pour les PM₁₀

Les essais réalisés présentent des comportements similaires entre les capteurs avec des pentes comprises entre 0,172 et 0,194 pour les PM_{2,5}, et des coefficients R^2 compris entre 0,991 et 0,994. Pour les PM₁₀, les pentes obtenues sont comprises entre 0,277 et 0,328 avec des coefficients R^2 compris entre 0,970 et 0,988.

6.3 Evaluation des limites de détection des capteurs testés

En lien avec le calcul et les résultats présentés aux paragraphes 5 et 6.2 respectivement, les résultats obtenus pour l'évaluation des limites de détection des capteurs testés sont présentés dans le Tableau 3 pour les PM₁₀ et PM_{2,5}.

Tableau 3 : Résultats obtenus pour les limites de détection des capteurs C1, C2 et C3 testés en PM₁₀ et PM_{2,5}

		C1		C2		C3	
		Valeur	Incertitude	Valeur	Incertitude	Valeur	Incertitude
PM _{2,5}	a	0,172	0,012	0,188	0,011	0,194	0,010
	b	1,770	1,642	1,456	1,508	1,477	1,455
	LD (µg/m ³)	39,0		31,7		30,1	
PM ₁₀	a	0,298	0,026	0,277	0,035	0,328	0,025
	b	2,767	3,158	4,321	4,160	2,806	3,014
	LD (µg/m ³)	41,0		60,6		36,2	

Ainsi, les limites de détection sont comprises entre 30,1 et 39,0 µg/m³ pour les PM_{2,5}. On constate une plus grande disparité des valeurs pour les PM₁₀ avec une limite de détection de 41,0 µg/m³ pour le capteur C1, de 60,6 µg/m³ pour le capteur C2 et de 36,2 µg/m³ pour le capteur C3.

6.4 Estimation de la répétabilité des capteurs testés

Les résultats obtenus pour l'estimation de la répétabilité sont regroupés dans le Tableau 4 pour les PM₁₀ et PM_{2,5}.

Tableau 4 : Moyennes et écarts-types de répétabilité pour les PM₁₀ et PM_{2,5}

PM _{2,5} (µg/m ³)							
Mesure de référence		C1		C2		C3	
Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
117,0	5,2	23,0	0,9	23,7	0,7	24,8	0,6
245,1	4,4	43,9	2,1	47,1	2,0	48,4	2,0
PM ₁₀ (µg/m ³)							
Mesure de référence		C1		C2		C3	
Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
86,0	4,3	31,8	2,1	33,3	1,6	34,7	1,4
216,9	4,7	65,6	3,3	70,3	3,3	71,4	2,5

Pour les essais PM_{2,5}, les capteurs présentent des écarts-types relatifs de répétabilité compris entre 2,5 et 4,8 %. Pour les essais PM₁₀, ces écarts-types relatifs sont compris entre 3,5 et 6,7 %.

7. CONCLUSION & PERSPECTIVES

Cette étude a permis le développement et l'optimisation d'un protocole d'évaluation de capteurs de par la mise en place d'une instrumentation spécifique associée à la génération d'aérosols et aux mesures de référence autour d'une chambre d'exposition. Les conditions environnementales associées à ce protocole en termes de température et d'humidité relative (HR) ont été respectivement de $20,0^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ et $50\% \pm 2\%$.

Concernant la génération des particules en phase aérosols, un générateur en voie humide a été impliqué dans le cadre d'une production de poussières d'Arizona. Couplés à cette même chambre, des instruments de référence ont été utilisés pour les mesures de distributions granulométriques en nombre (SMPS+APS) et de concentrations massiques (TEOM 50°C équipé d'une tête PM10/PM2,5) avec des résolutions temporelles inférieures à la minute.

Les **distributions granulométriques** en nombre des aérosols générés au sein de la chambre d'exposition ont été caractérisées par une gamme de taille allant de quelques nanomètres à $7\text{ }\mu\text{m}$. En termes de **concentrations massiques**, quatre gammes de référence ont été générées pour les PM_{2,5} et PM₁₀, à savoir $0,9 \pm 2,3\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$; $61,7 \pm 3,8\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$; $116,8 \pm 4,8\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$; $244,3 \pm 4,4\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ et $0,9 \pm 2,3\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$; $55,1 \pm 3,8\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$; $87,7 \pm 3,5\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$; $217,0 \pm 4,2\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement.

Le banc d'essais développé dans le cadre de cette étude a ensuite été mis en œuvre pour définir des modes opératoires pour la détermination de certaines performances des capteurs telles que la linéarité, la justesse, les limites de détection et la répétabilité (conditions de réalisation des essais et traitement statistique). Les modes opératoires ont ensuite été mis en application sur des capteurs disponibles en laboratoire pour tester leur robustesse.

Pour les capteurs testés, les **essais de linéarité et de justesse** ont permis de caractériser des comportements similaires entre les capteurs avec des pentes comprises entre 0,172 et 0,194 pour les PM_{2,5}, et des coefficients R^2 compris entre 0,991 et 0,994. Pour les PM₁₀, les pentes obtenues sont comprises entre 0,277 et 0,328 avec des coefficients R^2 compris entre 0,970 et 0,988.

Les **limites de détection** de ces capteurs ont été déterminées entre $30,1$ et $39,0\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{2,5} avec une plus grande variabilité pour les PM₁₀ avec des limites de détection comprises entre $36,2\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ et $60,6\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$.

L'estimation de la **répétabilité** des capteurs testés a permis de déterminer des écarts-types relatifs de répétabilité compris entre 2,5% et 4,8% pour les PM_{2,5} et entre 3,5% et 6,7% pour les PM₁₀.

Les essais et les résultats obtenus montrent que les modes opératoires sont adaptés à la détermination de certaines performances des capteurs telles que la linéarité, la justesse, les limites de détection et la répétabilité.

Ainsi, en termes de perspectives, il s'agira d'optimiser ces modes opératoires en y associant des conditions de température et d'humidité relative contrôlées afin de tester l'effet de ces paramètres sur les performances des capteurs. Concernant la température, une gamme globale allant de 5°C à 40°C est prévue en lien avec une gamme d'humidité relative allant de 10% à 85%. Le premier challenge de cette nouvelle étude consistera à déterminer des points de fonctionnement en termes de température et d'humidité relative. Par la suite, pour chacun de ces points de fonctionnement, des gammes de concentrations particulières en nombre et en masse seront identifiées et optimisées en injectant au sein de la chambre d'exposition des aérosols plus ou moins hygroscopiques (huiles, sels, dust, ...) et possédant des indices de réfraction connus.

8. REFERENCES

- Austin E, Novosselov I, Seto E, Yost MG (2015) Laboratory Evaluation of the Shinyei PPD42NS Low-Cost Particulate Matter Sensor. *PLoS ONE* 10(9)
- Binnig, J., Meyer, J., & Kasper, G. (2007). Calibration of an optical particle counter to provide PM_{2.5} mass for well-defined particle materials. *Journal of Aerosol Science*, 38(3), 325–332.
- CEN/TS 16450. (2013) Ambient air—Automated measuring systems for the measurement of the concentration of particulate matter (PM₁₀; PM_{2.5})
- Eidhammer, T., Montague, D. C., & Deshler, T. (2008) Determination of index of refraction and size of supermicrometer particles from light scattering measurements at two angles. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113, D16206.
- EN 12341. (2014) Ambient air—Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM₁₀ or PM_{2.5} mass concentration of suspended particulate matter. CEN/TC 264
- Feinberg, Stephen, Ron Williams, Gayle S. W. Hagler, Joshua Rickard, Ryan Brown, Daniel Garver, Greg Harshfield, et al. (2018) « Long-Term Evaluation of Air Sensor Technology under Ambient Conditions in Denver, Colorado ». *Atmospheric Measurement Techniques* 11 (8): 4605-15
- Gebhart, J. (2001). Optical Direct-Reading Techniques: Light Intensity Systems, in *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*, P. A. Baron and K. Willeke, eds., Wiley-Interscience, New York, 419–454.
- Görner, P., Simon, X., Bémer, D., & Lidén, G. (2012) Workplace aerosol mass concentration measurement using optical particle counters. *Journal of Environmental Monitoring*, 14(2), 420–428.
- Hairston, P. P., Dorman, F. D., Sem, G. J., & Agarwal, J. K. (1996) Apparatus for measuring particle sizes and velocities. U.S. Patent No. 5,561,515
- Jayaratne, R., X. Liu, P. Thai, M. Dunbabin, et L. Morawska. (2018) «The Influence of Humidity on the Performance of Low-Cost Air Particle Mass Sensors and the Effect of Atmospheric Fog, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*: 1-15. <https://doi.org/10.5194/amt-2018-100>.

- Kelly, K. E., J. Whitaker, A. Petty, C. Widmer, A. Dybwad, D. Sleeth, R. Martin, et A. Butterfield (2017) « Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor ». *Environmental Pollution* 221: 491-500
- Lamkaddam, Houssni, Aline Gratien, Edouard Pangui, Mathieu Cazaunau, Bénédicte Picquet-Varrault, et Jean-François Doussin (2017) « High-NO_x Photooxidation of n-Dodecane: Temperature Dependence of SOA Formation ». *Environmental Science & Technology* 51 (1): 192-201
- Liu, Di, Qiang Zhang, Jingkun Jiang, et Da-Ren Chen. (2017) « Performance calibration of low-cost and portable particulate matter (PM) sensors ». *Journal of Aerosol Science* 112 (octobre): 1-10.
- Redon, N., Gaie-Levrel, F., Amodeo, T. (2018) Faisabilité de la mise en œuvre d'un protocole pour l'évaluation en laboratoire de micro-capteurs pour la mesure des concentrations massiques particulières, Note Technique LCSQA, <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/faisabilite-de-la-mise-en-oeuvre-dun-protocole-pour-levaluation-en-laboratoire-de-micro>
- Papapostolou, Vasileios, Hang Zhang, Brandon J. Feenstra, et Andrea Polidori (2017) « Development of an environmental chamber for evaluating the performance of low-cost air quality sensors under controlled conditions ». *Atmospheric Environment* 171 d: 82-90
- Sioutas, C. (1999) Evaluation of the measurement performance of the scanning mobility particle sizer and aerodynamic particle sizer. *Aerosol Science & Technology*, 30(1), 84-92.
- Wang, Xiaoliang & Chancellor, George & Evenstad, James & Farnsworth, James & Hase, Anthony & Olson, Gregory & Sreenath, Avula & Agarwal, Jugal. (2009). A Novel Optical Instrument for Estimating Size Segregated Aerosol Mass Concentration in Real Time. *Aerosol Science and Technology*, , 43, 939-950, 10.1080/02786820903045141.
- Wang, Y., Li, J., Jing, H., Zhang, Q., Jiang, J., Biswas, P., (2015) Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement. *Aerosol Sci. Technol.* 49, 1063-1077.
- Wang, J., Doussin, J. F., Perrier, S., Perraudin, E., Katrib, Y., Pangui, E., and Picquet-Varrault, B. (2011) Design of a new multi-phase experimental simulation chamber for atmospheric photo-smog, aerosol and cloud chemistry research, *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 2465-2494
- Zheng, Tongshu, Michael H. Bergin, Karoline K. Johnson, Sachchida N. Tripathi, Shilpa Shirodkar, Matthew S. Landis, Ronak Sutaria, et David E. Carlson(2018) « Field Evaluation of Low-Cost Particulate Matter Sensors in High- and Low-Concentration Environments ». *Atmospheric Measurement Techniques* 11 (8): 4823-46



direction et secrétariat du LCSQA

INERIS - parc technologique Alata - BP 2 - F60550 Verneuil-en-Halatte
tél. 03 44 55 64 04 - www.lcsqa.org