

Notes techniques

ÉVALUATION DES MICRO-CAPTEURS À BAS COÛT POUR CARACTÉRISER LES AÉROSOLS SUR LES LIEUX DE TRAVAIL

Les capteurs d'aérosols à bas coût offrent des perspectives prometteuses pour la surveillance de l'air des lieux de travail. Menée en partenariat par plusieurs organismes de recherche européens dont l'INRS, l'étude synthétisée dans cet article vise à comparer certains de ces capteurs avec des méthodes de référence pour mettre en lumière leurs avantages, leurs limites et proposer des pistes d'amélioration.

BENJAMIN SUTTER
INRS,
département
Ingénierie des
procédés

XAVIER SIMON, SÉBASTIEN BAU
INRS,
département
Métrologie
des polluants

CHRISTOF ASBACH, ANA MARIA TODEA
IUTA
(Allemagne)

CARSTEN MÖHLMAN
IFA
(Allemagne)

EELCO KUIJPERS
TNO (Pays-Bas)

L'évaluation de l'exposition des salariés aux aérosols est encadrée par le Code du travail, des normes françaises et des recommandations de l'INRS. Des méthodes spécifiques permettent de mesurer la concentration particulaire dans l'air pour la comparer à sa valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP), réglementaire ou indicative [1]. Ces méthodes utilisent des dispositifs de prélèvements individuels, qui collectent des fractions ciblées de l'aérosol : inhalable, thoracique ou alvéolaire. Les particules collectées sont ensuite analysées par des méthodes chimiques ou physiques selon l'agent recherché. Cette approche conventionnelle détermine la valeur moyenne d'exposition à l'agent chimique ciblé, mais elle ne caractérise pas les pics de concentrations générés par les procédés mis en œuvre sur les lieux de travail. Pour suivre l'évolution des concentrations en aérosol au cours du temps, des instruments de mesure en temps réel, comme des compteurs optiques de particules ou des photomètres, sont nécessaires. Ces instruments portables sont utilisés par les hygiénistes pour mieux comprendre les variations de concentrations et de tailles des aérosols et répondre à divers objectifs, comme l'étude de poste, l'aide à l'établissement de stratégies de prélèvement, l'amélioration des moyens de protection, ou encore la localisation des sources d'émission [2]. Malgré leur utilité, leur coût relativement élevé en limite l'utilisation systématique.

Depuis 2010, les « micro-capteurs » d'aérosols à « bas coût » (en anglais, *Low-Cost Sensors* ou *LCS*), dont les prix évoluent entre 10 et 500 € l'unité, ont émergé sur le marché. Ces capteurs, de quelques dizaines de grammes et de dimensions comprises entre 1cm et 10cm, permettent un déploiement facilité en comparaison des instruments portables, généralement plus lourds et plus encombrants. L'utilisation accrue de ces micro-capteurs peut également contribuer à limiter les opérations de maintenance des appareils portables habituellement utilisés. Pour ces raisons, ces micro-capteurs d'aérosols sont intéressants pour un usage dans le cadre de l'évaluation de la qualité de l'air au travail.

Cependant, des questions sur leurs performances freinent leur utilisation en santé au travail : précision, sensibilité, linéarité, temps de réponse, robustesse, vieillissement, encrassement, etc.

En 2019, l'INRS et plusieurs partenaires européens, avec le soutien du mandat européen M/461 « *Développement de méthodes pour la caractérisation des nanomatériaux et des expositions aux nanomatériaux* », ont lancé un projet de recherche pré-normatif visant à évaluer les performances de ces capteurs vis-à-vis d'aérosols de nano-objets, leurs agglomérats et agrégats (NOAA)¹. Les résultats de ce projet permettent aujourd'hui de proposer des premières recommandations pour une utilisation dans les environnements de travail, qui mériteraient d'être complétées à l'avenir. Cet article présente le fonctionnement des capteurs à bas coût, les résultats principaux issus des



RÉSUMÉ

En 2019, l'INRS et plusieurs partenaires européens ont lancé un projet de recherche pré-normatif, visant à évaluer les performances des micro-capteurs d'aérosols à bas coût vis-à-vis d'aérosols de nano-objets, leurs agglomérats et agrégats (NOAA). Cet article présente le fonctionnement de ces dispositifs, les résultats des expérimentations

en laboratoire et en situation réelle, ainsi que leurs avantages et limites pour une utilisation sur les lieux de travail. Bien que pratiques et peu coûteux, ces micro-capteurs présentent des écarts significatifs par rapport aux instruments de référence pour la mesure des concentrations et celle de la distribution granulométrique des aérosols.

Les résultats montrent également que ces dispositifs permettent de détecter les changements de concentration en temps réel, ce qui peut être précieux pour la surveillance des procédés, la gestion de la sécurité des travailleurs ou la priorisation des actions de prévention.

EVALUATION OF LOW-COST MICROSENSORS TO CHARACTERISE AEROSOLS IN THE WORKPLACE

In 2019, INRS and several European partners launched a pre-normative research project aimed at evaluating the performance of low-cost aerosol microsensors regarding aerosols of nano-objects and their aggregates and agglomerates (NOAA). This article presents the functioning of these devices, the results of lab and field experiments, and the

advantages and limits of their use in the workplace. Although practical and inexpensive, these micro-captors present significant differences compared to the reference instruments for measuring aerosol concentrations and size distribution. The results also show that these devices can be used to detect real-time concentration changes,

that can be very useful for monitoring processes, managing worker's safety and prioritising prevention actions.



© Gaël Kerbaol/INRS/2024

expérimentations en laboratoire et en situation réelle, ainsi que leurs avantages et limites pour une utilisation sur les lieux de travail.

Conception et principe de fonctionnement Observations générales

L'étude présentée dans cet article traite uniquement des « capteurs » (Cf. Encadré), dont il existe des dizaines de références disponibles à l'achat.

La Figure 1 présente un panel non exhaustif de ces capteurs. Il est intéressant d'observer la variabilité des conceptions de ces capteurs en fonction des fabricants et des usages pour lesquels ils ont été initialement développés : industrie automobile, mesure/évaluation de la qualité de l'air environnemental, de la qualité de l'air intérieur, etc.

La nature des données produites varie en fonction des modèles de capteurs. Néanmoins, la plupart des capteurs produisent des valeurs de concentrations massiques (par exemple, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ d'air) exprimées selon le référentiel environnemental, à savoir les fractions particulaires $\text{PM}_{2,5}$ et PM_{10}^2 [3]. Certains capteurs proposent aussi d'autres concentrations massiques suivant les fractions particulaires PM_1 ou PM_4 , des concentrations en nombre de particules (par exemple, en particules/ cm^3 d'air) selon les mêmes fractions de taille de particules, la répartition des particules selon différentes classes de taille, ou encore des mesures des conditions internes des capteurs en température, pression ou humidité relative de l'air.

Il est important de noter que les données de fractions de concentrations massiques renvoyées par les capteurs ($PM_{2,5}$ et PM_{10}) ne sont pas directement transposables dans le domaine de la qualité de l'air au travail. En effet, ce sont les fractions particulaires inhalable, thoracique et alvéolaire qui font référence pour l'évaluation de l'exposition des salariés [4-6]. Même si les fractions PM_{10} et PM_4 mesurées par certains capteurs se rapprochent respectivement des fractions thoracique et alvéolaire³, cela constitue une contrainte majeure à l'utilisation de ces capteurs dans un contexte d'évaluation de l'exposition professionnelle.

Principe de mesure

Tous les capteurs d'aérosols à bas coût identifiés utilisent le même principe de fonctionnement, basé sur la diffusion de la lumière engendrée par l'interaction entre des particules et un faisceau laser [7]. La Figure 2 schématise le principe général de fonctionnement des capteurs d'aérosols. Ce fonctionnement peut être décomposé en quatre étapes :

- l'émission de lumière à l'aide d'une diode laser, généralement à une longueur d'onde de 660 nm ;
- l'interaction lumière/matière, lorsque l'aérosol traverse la chambre de détection, les particules diffusent de la lumière dans toutes les directions ;
- la détection de la lumière diffusée à l'aide d'une ou plusieurs photodiodes positionnées à certains angles ;
- la conversion de la lumière diffusée en signaux électriques par ou les photodiodes. Le nombre et l'intensité des impulsions détectées sont ensuite analysés et convertis en concentrations en particules.

ENCADRÉ

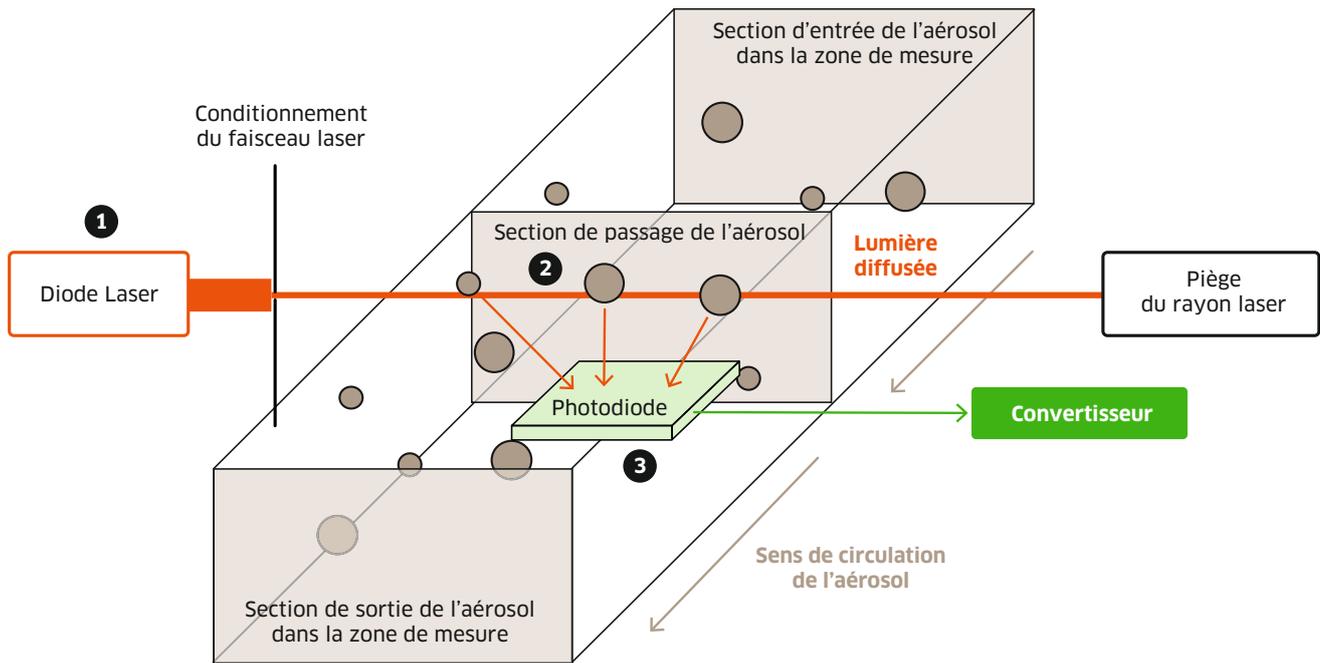
DÉFINITIONS ET APPELLATIONS

- **Élément sensible** : partie qui produit un signal au passage de l'aérosol. Il nécessite une alimentation électrique. Le signal brut doit être mesuré par des éléments externes. Non disponible isolément dans le commerce, il est optimisé par chaque fabricant selon l'usage prévu.
- **Capteur ou micro-capteur** : association de l'élément sensible avec une carte électronique pour l'alimentation, le recueil du signal brut et sa conversion en données numériques ou textuelles. C'est une « boîte noire », dont les algorithmes de calcul sont inconnus. Des connaissances en électronique sont nécessaires pour l'alimenter et communiquer avec lui (ordinateur, carte Arduino, etc.).
- **Moniteur ou système capteur** : contient le capteur, permet son alimentation électrique, recueille et transfère les données vers un enregistreur local (carte mémoire) ou un serveur pour des services de compilation de données, d'archivage, etc. C'est un outil « clés en main » utilisable par tout utilisateur souhaitant connaître les concentrations d'aérosols dans l'air. L'intégration du capteur dans un moniteur augmente significativement le coût de 250 € à quelques milliers d'euros. Certains moniteurs intègrent aussi d'autres capteurs, notamment de gaz, pour une mesure multi-polluants.

Outre ces éléments de fonctionnement connus, les fabricants ne donnent aucun détail sur les algorithmes de conversion embarqués dans les capteurs, probablement pour des raisons de protection de leur propriété intellectuelle. Il en est de même en ce qui concerne la méthode de calibrage employée par le fabricant, pour laquelle on ne connaît que très rarement la nature de l'aérosol utilisé.



← FIGURE 1
Exemples
de capteurs
d'aérosols à bas
coût disponibles
sur le marché.



↑ FIGURE 2
Schéma de principe du fonctionnement des capteurs d'aérosols à bas coût.

Évaluation des performances

Projet de recherche prénormative

L'INRS s'est engagé en 2019 dans un consortium avec cinq partenaires européens dans le but de réaliser des travaux expérimentaux d'évaluation des performances des micro-capteurs d'aérosols vis-à-vis de différents aérosols produits en voie sèche à partir de poudres de NOAA.

Outre l'INRS, ce consortium se compose de l'UTA, du BAuA, de l'IFA, du TNO et du LNE⁴. Ces travaux ont contribué à élaborer le document normatif XPCEN/TS 18086 (publié le 13 novembre 2024⁵), de type « spécification technique » et faisant état des avantages et des contraintes à l'utilisation de ces micro-capteurs d'aérosols pour évaluer la qualité de l'air des lieux de travail. Des résultats issus de ces travaux, partiellement financés par la Commission européenne dans le cadre du mandat M/461, sont présentés ici.

Performances intrinsèques des capteurs

→ Matériel et méthodes

Six types de micro-capteurs d'aérosols ont été sélectionnés pour cette étude expérimentale, sur la base d'une revue bibliographique ciblée sur différents critères (fréquence d'utilisation, caractéristiques techniques, compatibilité avec un déploiement sur les lieux de travail, coût, encombrement). La Figure 3 présente les principales caractéristiques de ces six capteurs : données mesurées en fonction des canaux de comptage et des fractions massiques, prix.

Selon les fabricants, le diamètre minimal détecté avec une efficacité de 50 % (d_{50}) est égal à 0,3 µm pour tous les capteurs. À l'exception du capteur

Next PM CR destiné aux mesures en salles blanches, tous les capteurs sélectionnés produisent des valeurs pour les fractions massiques $PM_{2,5}$ et PM_{10} . De manière optionnelle, certains capteurs peuvent aussi produire des valeurs pour les fractions massiques PM_1 et PM_4 ou des concentrations en nombre de particules associées à différentes classes de tailles. L'hétérogénéité des données produites par les différents types de capteurs complique la comparaison de leurs performances.

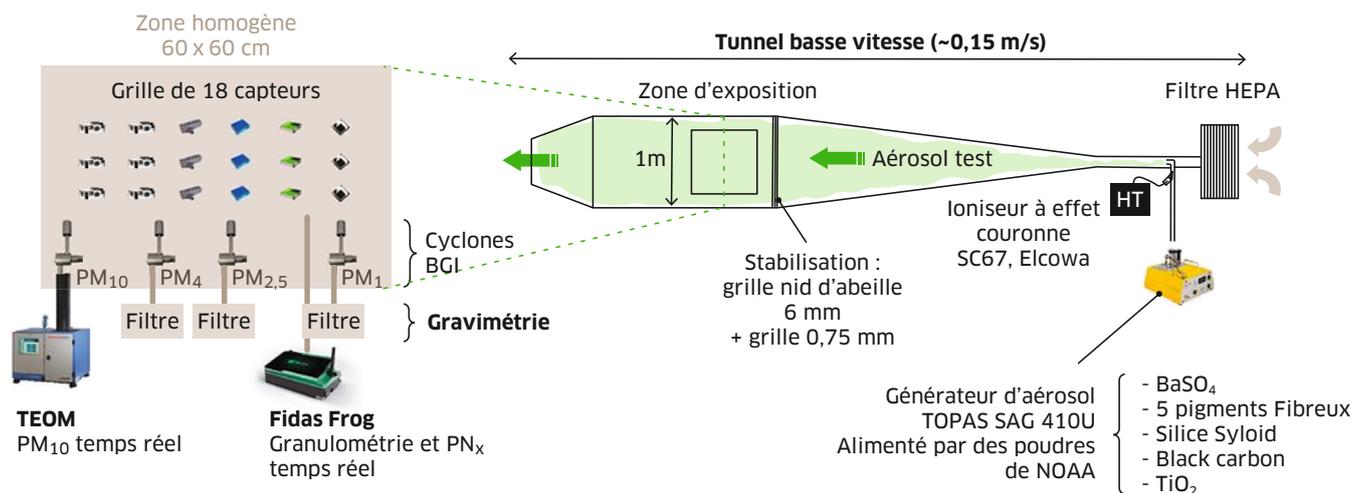
Trois exemplaires de chaque type de capteur ont été placés dans la zone d'exposition homogénéisée d'un tunnel aéraulique à basse vitesse et exposés simultanément à des aérosols d'essais [8]. Neuf poudres de NOAA ont été sélectionnées avec des caractéristiques optiques et physiques variées. Un générateur d'aérosols en voie sèche (TOPAS SAG 410U) a été utilisé pour mettre en suspension chacune des poudres dans le tunnel après une neutralisation des charges électriques des particules par un ioniseur à effet couronne (SC67 Elcowa) ; trois niveaux de concentration massique (100, 500 et 1 000 µg.m⁻³) ont été ciblés.

La Figure 4 est une représentation schématique du banc d'essais et de la méthodologie employés pour mener ces travaux. Les concentrations mesurées par les capteurs ont été comparées avec des valeurs de concentration de référence mesurées :

- par un instrument de mesure en temps réel (microbalance à oscillation TEOM) équipé d'un sélecteur de la fraction PM_{10} ;
- par prélèvement sur cyclones [9] et analyse par gravimétrie sur une microbalance de précision des

	ALPHASENSE OPC-R1	NOVA FITNESS SDS011	PLANTOWER PMS 7003	SENSIRION SPS30	GROUPE TERA NEXT PM	GROUPE TERA NEXT PM CR
Concentration en nombre	16 canaux : 0,3 – 12,4 µm	/	6 fractions < 0,3; < 0,5; < 1,0; < 2,5; < 5,0; < 10 µm	5 fractions: < 0,5; < 1,0; < 2,5; < 4,0; < 10 µm	3 fractions: < 1,0; < 2,5; < 10 µm	5 fractions: < 0,5; < 1,0; < 2,5; < 4,0; < 10 µm
Concentration en masse	3 fractions: PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₁₀	2 fractions: PM _{2,5} , PM ₁₀	3 fractions: PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₁₀	4 fractions: PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₄ , PM ₁₀	3 fractions: PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₁₀	/
Prix	≈ 280 €	≈ 30 €	≈ 25 €	≈ 30 €	≈ 65 €	≈ 150 €

↑ FIGURE 3 Caractéristiques de chacun des six types de micro-capteurs d'aérosols sélectionnés.



↑ FIGURE 4 Représentation schématique du banc d'essais et de la méthodologie employée pour comparer les concentrations mesurées par les micro-capteurs d'aérosols à des mesures de référence pour neuf aérosols de poudres de NOAA.

fractions PM₁, PM_{2,5}, et PM₄. Les concentrations en nombre de particules par classe de taille de particules ont été comparées avec les concentrations mesurées par un compteur optique de particules Fidas Frog (Palas).

→ Principaux résultats

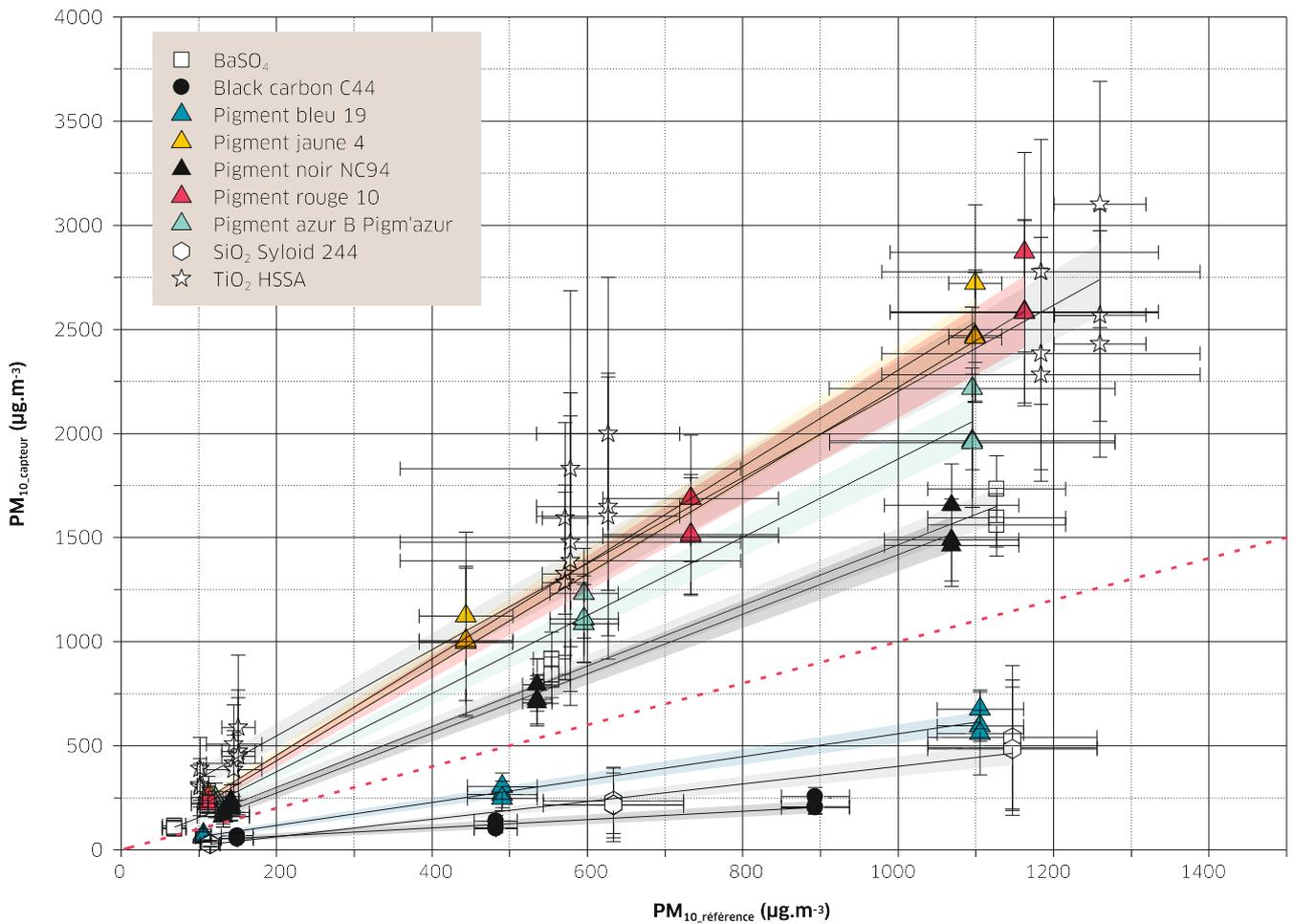
Les valeurs de concentrations (massiques ou numériques) déterminées par les capteurs étudiés ont été comparées à celles issues des méthodes de référence à l'aide de diagrammes de parité tels que celui présenté sur la Figure 5 pour le capteur Alphasense OPC-R1. Ce graphique fait correspondre la valeur moyenne de concentration massique PM₁₀ mesurée par un capteur avec la valeur moyenne de concentration massique en PM₁₀ mesurée par l'instrument de référence. Chaque nature de poudre de NOAA générée est représentée avec une combinaison de

symboles et de couleurs distinctes. Les résultats de la Figure 5 appellent plusieurs constats :

- il existe une relation linéaire entre les concentrations en PM₁₀ renvoyées par les capteurs et celles issues de la mesure de référence, avec des coefficients de régression satisfaisants, supérieurs à 0,95 ;
- les pentes des régressions linéaires varient considérablement en fonction de la nature de l'aérosol de NOAA ;
- les pentes sont systématiquement éloignées de la droite de parité, symbolisée en pointillés rouges ;
- pour chaque expérimentation, les valeurs en PM₁₀ mesurées par les trois capteurs de même type présentent une faible dispersion.

Ces observations restent valables, quels que soient le type de capteur considéré, la grandeur mesurée (PM₁, PM_{2,5}, PM₄, PM₁₀, concentrations en nombre de





↑ **FIGURE 5**
 Comparaison des valeurs moyennes de concentration massique en PM_{10} déterminées par trois spécimens d'un même type de capteur et par l'instrument de référence, pour neuf poudres de NOAA générées à trois niveaux de concentration différents. Les barres d'erreurs (intervalles horizontaux et verticaux) symbolisent les variations de concentrations observées durant la période de mesure et égales à \pm un écart-type.

particules) et la nature de l'aérosol d'essai. Il existe par ailleurs une forte hétérogénéité des concentrations mesurées entre les différents modèles de capteurs étudiés (pouvant varier d'un facteur 0,02 à 4 par rapport à la mesure de référence).

Certains capteurs permettent également de donner des indications sur la distribution granulométrique de l'aérosol [10]. Ces données ont été comparées à la granulométrie mesurée par l'instrument de référence (compteur optique de particules). Les capteurs possédant des classes de tailles de particules différentes de l'instrument de référence, les fréquences cumulées des granulométries ont été calculées, puis les écarts δf (%) entre ces fréquences, déterminés. La Figure 6 présente, pour quatre types de capteurs différents, l'évolution de l'écart δf en fonction du diamètre optique supérieur de chaque classe de taille de particule et pour chaque nature de poudre de NOAA générée. Idéalement, lorsqu'il n'y a aucune différence entre la granulométrie relative mesurée par le capteur et celle déterminée par l'appareil de référence, δf est égal à 0 %.

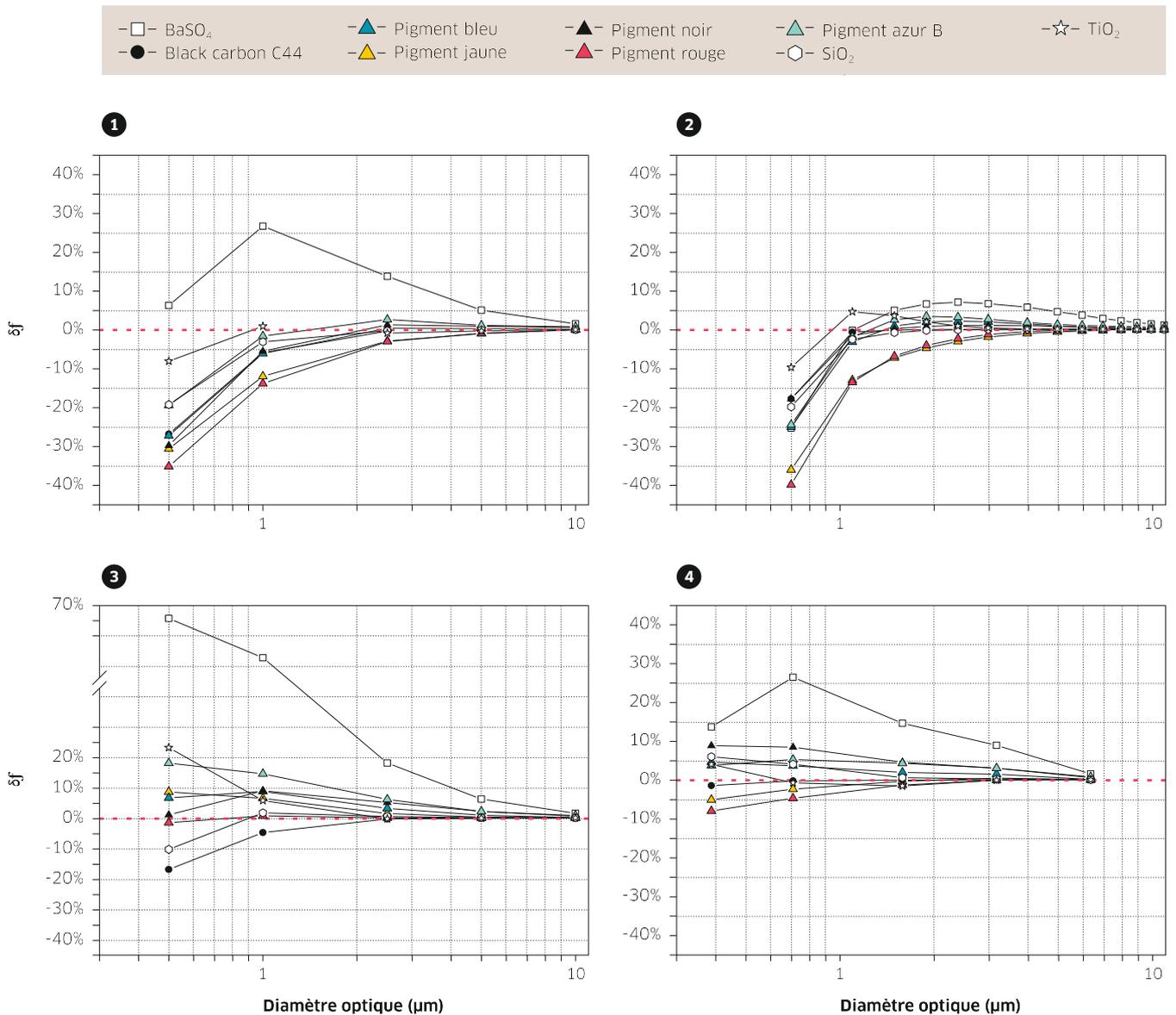
La Figure 6 montre que, pour les particules dont le diamètre optique est inférieur ou égal à $1 \mu m$, l'écart δf est généralement important (supérieur

à $\pm 10 \%$) et peut atteindre +70 % pour un cas particulier. Au-delà d'un diamètre optique de $1 \mu m$, l'écart δf est alors inférieur à $\pm 10 \%$, ce qui traduit une concordance entre les valeurs mesurées par les capteurs et l'appareil de référence.

Ces résultats démontrent que les micro-capteurs étudiés semblent majoritairement inadaptés pour correctement caractériser les particules de tailles submicroniques et pour rendre compte de manière fiable de la distribution granulométrique d'un aérosol de NOAA.

Enfin, le temps de réponse des capteurs a été évalué dans le cadre d'essais expérimentaux menés par l'IUTA. Le Tableau présente les temps de réponse (en secondes) de quatre types de capteurs et d'un instrument de référence de laboratoire (WELAS, Palas). Les valeurs rapportées représentent le temps mis par l'instrument pour passer de 10 % à 90 % de la concentration finale (t_{10-90} , croissance) et inversement (t_{90-10} , décroissance). Les résultats du Tableau permettent de dresser les constats suivants :

- tous les capteurs ont des temps de réponse significativement plus importants que l'instrument de référence. L'analyse des données tend à démontrer que les capteurs sont équipés d'algorithmes



↑ FIGURE 6 Écarts spectraux entre les distributions granulométriques cumulées mesurées par quatre types de capteurs et par l'instrument de référence.

de lissage des variations afin de réduire le bruit des mesures, mais ces algorithmes contribuent à augmenter leur temps de réponse ;

- les temps de réponse sont équivalents en croissance ou en décroissance de concentration, à l'exception du capteur de type 3 dont le temps de réponse en phase de décroissance est trois fois plus long qu'en

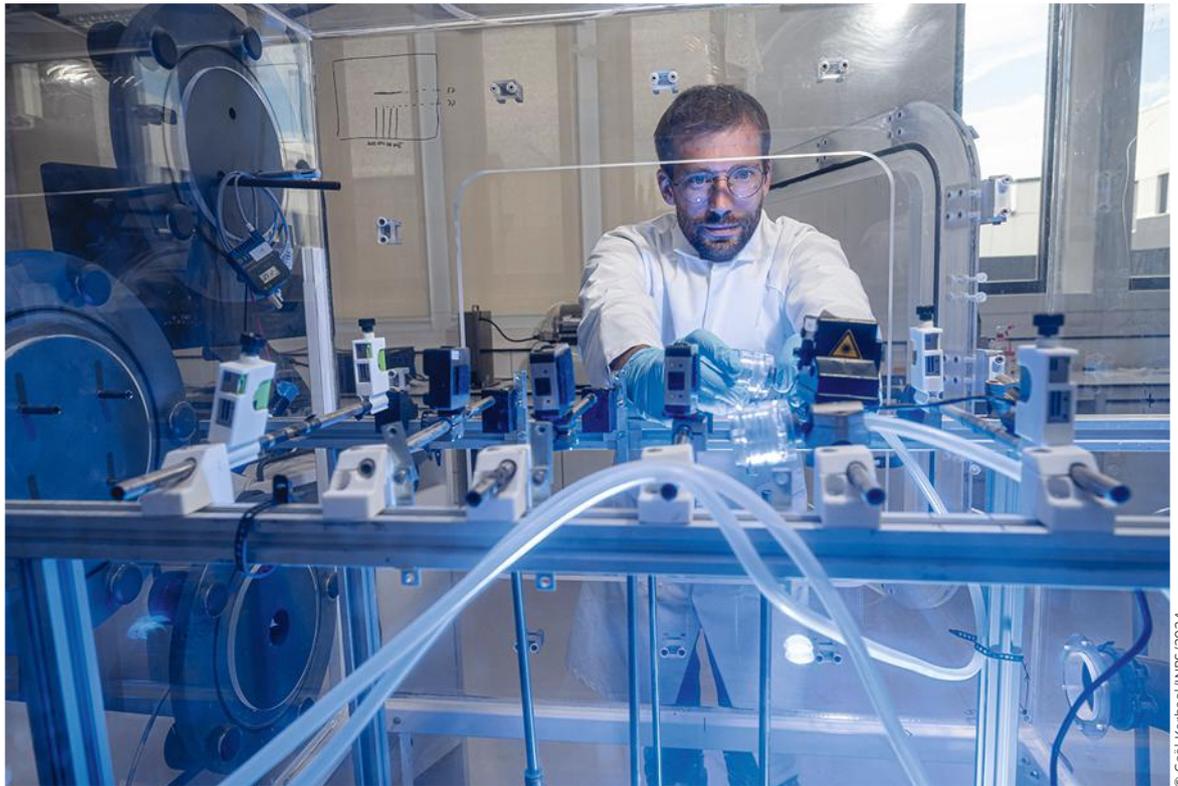
phase de croissance. L'algorithme interne est probablement à l'origine de ce comportement ;

- globalement, les temps de réponse sont inférieurs à dix secondes, ce qui *a priori* permet néanmoins aux capteurs étudiés de détecter et rendre compte de la majorité des pics de concentration en particules qui peuvent survenir dans les situations de travail.

✓ TABLEAU
Temps de réponse (secondes) d'un instrument de référence et de quatre types de capteurs soumis à des variations soudaines de concentrations montantes (de 10 % à 90 % de la concentration finale) et descendantes (de 90 % à 10 % de la concentration finale).
Références de types de capteurs :
1 : Next PM ;
2 : SPS30 ;
3 : SDS011 ;
4 : OPC-R1.

INSTRUMENTS	WELAS (RÉFÉRENCE)	CAPTEUR DE TYPE 1	CAPTEUR DE TYPE 2	CAPTEUR DE TYPE 3	CAPTEUR DE TYPE 4
t_{10-90} (s) – croissance	0,78	8,1	4,5	8,7	1,5
t_{90-10} (s) – décroissance	0,69	8,2	5,0	24,6	1,5

Mesures des performances de micro-capteurs d'aérosols en laboratoire à l'INRS.



© Gaël Kerbaol/INRS/2024

Discussion et bilan

Les expérimentations menées dans le cadre de ces travaux démontrent les points forts et les limites d'utilisation des capteurs d'aérosols à bas coût dans les atmosphères professionnelles. Il est important de noter que ces capteurs sont principalement conçus pour mesurer les concentrations en particules dans l'air environnemental, et non dans des atmosphères professionnelles. En effet, les capteurs possèdent des algorithmes qui ont été optimisés pour produire des valeurs de concentrations comparables aux instruments de référence mesurant les aérosols environnementaux. Or, les aérosols qui peuvent être émis par diverses activités professionnelles présentent des propriétés souvent très différentes de celles des aérosols environnementaux typiques telles que la densité des particules, leur morphologie, leur distribution granulométrique, et leur indice de réfraction. Les résultats présentés dans cet article montrent que les concentrations fournies par les micro-capteurs peuvent être erronées en valeur absolue et présenter des biais, variables en fonction du couple capteur /aérosol.

De plus, les valeurs de concentration issues de ces capteurs sont exprimées en fractions particulaires PM_x qui ne font pas référence dans le domaine de l'hygiène et la santé au travail. Pour ces raisons, il n'est actuellement pas possible d'utiliser ces capteurs d'aérosols pour l'évaluation réglementaire de l'exposition des travailleurs.

Cependant, les expérimentations réalisées ont montré que ces capteurs pouvaient être utiles à des fins de prévention des risques en milieu professionnel. En effet, pour un aérosol donné, des rapports stables sont observés entre les valeurs des concentrations fournies par des capteurs et celles issues des méthodes et instruments de référence dans les conditions testées. Cela indique qu'il est possible de déterminer le biais de mesure et de corriger les valeurs fournies par ces capteurs pour un aérosol donné. De plus, les temps de réponse de ces capteurs paraissent adaptés pour rendre compte de la dynamique de la concentration des aérosols généralement observée sur les postes de travail.

Conclusion et perspectives

Cette étude a mis en évidence certaines performances et limites des capteurs d'aérosols à bas coût dans un contexte de prévention des risques professionnels. Bien que pratiques et peu coûteux, ils présentent des écarts significatifs par rapport aux instruments de référence pour la mesure des concentrations et celle de la distribution granulométrique des aérosols. Ces écarts dépendent principalement de la nature des particules, ainsi que des caractéristiques propres à chaque type de capteur. Les résultats montrent également que ces dispositifs permettent de détecter les changements de concentration en temps réel, ce qui peut être précieux pour la surveillance des procédés, la gestion de la sécurité des travailleurs ou la priorisation des actions de prévention.

Pour tirer pleinement parti des capteurs d'aérosols à bas coût en contexte de prévention des risques professionnels, plusieurs perspectives de recherche et développement peuvent être envisagées. Tout d'abord, il est essentiel que les développeurs et fabricants de capteurs puissent intégrer dans leurs algorithmes la détermination de concentrations massiques représentatives d'une ou plusieurs fractions particulaires conventionnelles liées à la santé (inhalable, thoracique et/ou alvéolaire). Cette fonctionnalité faciliterait l'intégration de ces capteurs dans les démarches de prévention des expositions et de contrôle des procédés sur les lieux de travail. Il serait également pertinent de poursuivre les efforts pour améliorer les méthodes de calibrage de ces capteurs afin de les adapter spécifiquement aux environnements de travail. L'intégration de techniques avancées de traitement des données, telles que l'apprentissage automatique, pourrait améliorer la corrélation entre les mesures des capteurs et les valeurs de référence. Parallèlement, des études complémentaires de terrain seraient nécessaires pour évaluer la robustesse des capteurs dans divers environnements professionnels, en tenant compte de la complexité des compositions et des propriétés des aérosols présents aux postes de travail. Une meilleure compréhension des biais associés aux mesures des capteurs permettrait ainsi d'optimiser leur utilisation dans un contexte professionnel. Enfin, l'utilisation de ces capteurs en réseau dans les espaces de travail constitue un sujet d'intérêt grandissant, car les avantages en matière de prévention sont nombreux : suivi en temps réel des émissions dans un espace de travail, localisation des sources, estimation des expositions individuelles, diagnostics d'exposition en fonction de la tâche, etc. ●

1. À propos des NOAA, voir notamment : Dossier – Nanomatériaux. Hygiène & sécurité du travail, 2019, 256, DO 26, pp. 26-68. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DO%2026>

2. Les conventions en environnement sont nommées PM_x pour Particulate Matter (matière particulaire en suspension dans l'air) et sont définies par la norme NF EN 12341. Elles correspondent aux particules traversant une tête de prélèvement sélective de fraction granulométrique avec une efficacité de 50 % pour un diamètre aérodynamique de x µm. Les seules actuellement réglementées sont les PM₁₀ et les PM_{2,5}.

3. La fraction thoracique d'un aérosol correspond à la probabilité moyenne d'inhalation et de pénétration de particules dans les voies respiratoires au-delà du larynx pour une personne adulte. Voir : INRS – MétroPol. Prélèvement des aérosols – Généralités [6]. Les conventions en hygiène du travail sont définies en relation avec la probabilité de pénétration des particules en suspension dans l'air dans les voies respiratoires, par les normes NF ISO 7708 et NF EN 481. Elles proviennent de données expérimentales moyennées pour une respiration par la bouche et/ou par le nez. Les trois conventions couramment utilisées sont :

- la convention inhalable visant à échantillonner la fraction des particules en suspension autour du nez et de la bouche

et qui est inhalée : il s'agit de la fraction dite inhalable ;

- la convention thoracique visant à échantillonner la fraction des particules inhalées qui pénètre au-delà du larynx, appelée fraction thoracique ;

- la convention alvéolaire visant à échantillonner la fraction des particules inhalées qui pénètre dans les voies respiratoires non ciliées. Cette fraction est appelée fraction alvéolaire.

4. IUTA : Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik, Institut pour l'environnement et l'énergie, la technologie et l'analyse, Allemagne.

BAuA : Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Institut fédéral pour la sécurité et la santé au travail, Allemagne.

IFA : Institut für Arbeitsschutz der deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Institut pour la sécurité et la santé au travail de l'Assurance accidents du travail, Allemagne.

TNO : Nederlandse organisatie voor toegepaste natuurwetenschappelijk onderzoek, Organisation néerlandaise de recherche appliquée, Pays-Bas.

LNE : Laboratoire national de métrologie et d'essais, France.

5. Document XP CEN/TS 18086:2024 – Exposition sur les lieux de travail – Capteurs de matière particulaire à lecture directe et à faible coût pour le mesurage des NOAA en suspension dans l'air. Lignes directrices pour l'application. Afnor.

BIBLIOGRAPHIE

[1] INRS – Base de données – Valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) : Substances chimiques.

Accessible sur : <https://www.inrs.fr/publications/bdd/vlep.html>

[2] BAU S., WITSCHGER O., GALLAND B., MARTIN P. – Métrologie en temps réel de substances chimiques au poste de travail : intérêts et limites. *Hygiène & sécurité du travail*, 2015, 239, DC 9, pp. 6-10.

Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DC%209>

[3] NORME NF EN 12341 – Air ambiant. Méthode normalisée de mesurage gravimétrique pour la détermination de la concentration massique MP₁₀ ou MP_{2,5} de matière particulaire en suspension. Afnor, 2023.

[4] NORME NF EN 481 – Atmosphères des lieux de travail. Définition des fractions de taille pour le mesurage des particules en suspension dans l'air. Afnor, 1993.

[5] SIMON X. ET AL. – Analyse des fractions granulométriques utilisées pour l'évaluation des expositions par inhalation d'aérosols. Pertinence et comparaison des fractions environnementales – PM₁₀, PM_{2,5} – et professionnelles – inhalable, thoracique, alvéolaire. Anses, 2023, Rapport.

Accessible sur : <https://anses.hal.science/anses-04170323>

[6] INRS – Guide méthodologique : prélèvement des aérosols. Généralités.

2015. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-generalite-aerosol/metropol-prelevement-generalite-aerosol.pdf>

[7] QUIMETTE J. ET AL. – Fundamentals of low-cost aerosol sensor design and operation. *Aerosol Sci. Technol.*, 2024, 58, 1, pp. 1-15. Accessible sur : doi:10.1080/02786826.2023.2285935

[8] FABRIÈS J.F., CARTON B. – Realization of a dust tunnel. Response of some air sampling instruments used in industrial hygiene. *Stud. Environ. Sci.*, 1980, pp. 279-283. Accessible sur : doi:S0166-1116(08)71668-6

[9] INRS – Guide méthodologique. Prélèvement des aérosols par cyclone. 2019. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-cyclone/metropol-prelevement-cyclone.pdf>

[10] MATERA V., GAUDEL N., BAU S. – Intérêts et optimisation des prélèvements d'aérosols par impacteurs en cascade. *Hygiène & sécurité du travail*, 2022, 269, NT 104, pp. 34-41.

Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=NT%20104>