

NOAA LCS : UN PROJET DE RECHERCHE PRENORMATIVE SUR L'APPLICATION DES MICRO-CAPTEURS D'AEROSOLS POUR LA MESURE DES NOAA SUR LES LIEUX DE TRAVAIL

B. Sutter*¹, S. Bau¹, X. Simon¹, R. Payet¹, A. Boivin¹, O. Witschger¹, A. Bescond², F. Gaie-Levrel²

¹ Laboratoire de Métrologie des Aérosols, Institut National de Recherche et Sécurité, 54519 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex, France

² Laboratoire National de Métrologie et des Essais, 1 Rue Gaston Boissier, 75724 Paris Cedex 15, France

*Courriel de l'orateur : benjamin.sutter@inrs.fr

TITLE

NOAA LCS: a prenormative project to evaluate the application of low-cost aerosol sensors for measuring NOAA in the workplace

RESUME

Ce travail a pour objectif de présenter le travail de recherche prénormative qui ont été engagés par le CEN/TC137 afin d'étudier l'application des micro-capteurs d'aérosols pour l'évaluation de l'exposition professionnelle aux nano-objets, leurs agrégats et agglomérats (NOAA). Le projet « NOAA LCS » mobilise plusieurs partenaires européens (DGUV, INRS, IUTA, LNE et TNO). Six micro-capteurs différents, présélectionnés suite à une revue de littérature, sont actuellement en cours d'étude dans les laboratoires et leurs performances seront évaluées sur des lieux de travail où sont manipulés des NOAA. Les résultats permettront d'établir une stratégie d'évaluation des expositions professionnelles qui prendra la forme d'un rapport technique (TS) dont la publication est prévue en 2023.

ABSTRACT

The objective of this work is to present the prenormative research work that has been undertaken by CEN / TC137 in order to study the application of low-cost aerosol sensors for the assessment of occupational exposure to nano-objects, their aggregates and agglomerates (NOAA). The "NOAA LCS" project mobilizes several European partners (DGUV, INRS, IUTA, LNE and TNO). Six different low-cost sensors, preselected following a literature review, are currently being studied in laboratories and their performance will be evaluated in workplaces where NOAA is handled. The results will make it possible to establish an occupational exposure assessment strategy that will take the form of a technical specification (TS) scheduled for publication in 2023.

MOTS-CLES : micro-capteur aérosol, NOAA, exposition / **KEYWORDS** : low-cost aerosol sensor, NOAA, exposure

1. OBJECTIFS DU PROJET CEN

Les micro-capteurs d'aérosols dits « à bas coût » (en anglais low-cost aerosol sensors, LCS) sont en plein essor au niveau national et international et l'offre commerciale est de plus en plus grande (Manikonda et al., 2016; Sousan et al., 2016; Soysal et al., 2017; Zamora et al., 2020). Cela est dû principalement à leur faible coût et leur petit format, en comparaison avec des instruments de mesure en temps réel plus classiques tels que, par exemple, des photomètres ou des compteurs de particules. Ces capteurs, qui fournissent un résultat de mesure (concentration en masse, en nombre, taille des particules) en temps réel, présentent de multiples intérêts en prévention du risque chimique. Il convient néanmoins d'être prudent quant à leur utilisation car à ce jour la connaissance de leur qualité métrologique demeure très peu documentée dans la littérature. Au-delà de leurs performances de mesure, se pose aussi la question de leur mise en œuvre, notamment à des fins d'évaluation des expositions individuelles en atmosphères de travail où sont émis des aérosols constitués en tout ou partie de NOAA. Dans ce contexte et en réponse au mandat M/461 de la Commission Européenne aux organismes de normalisation (dont le CEN) portant sur le développement de méthodes pour la « caractérisation des nanomatériaux et des expositions aux nanomatériaux » (CE-DGEI, 2010), un projet de recherche prénormative a été mis en place dans l'objectif de produire de nouvelles connaissances techniques indispensables au développement d'un document normatif de type spécification technique (TS) portant sur la mesure de l'exposition aux NOAA à l'aide de LCS.

2. ORGANISATION ET PARTENAIRES

Ce projet « NOAA LCS » est porté par le Comité Européen de Normalisation CEN TC 137 (Evaluation de l'exposition aux agents chimiques et biologiques sur le lieu de travail) et plus particulièrement le groupe de travail WG3 (Matières particulaires).

Piloté par l'institut IUTA (Allemagne), ce projet mobilise quatre autres partenaires européens : en France l'INRS et le LNE ; en Allemagne l'IFA ; au Pays-bas le TNO. Il se déroule sur quatre ans et s'articule autour de six actions (WP) complémentaires qui sont :

1. revue exhaustive de la littérature traitant des performances des capteurs vis-à-vis de tous types d'aérosols et de leur utilisation sur les lieux de travail à des fins de prévention ;
2. analyse approfondie de l'offre technique pour identifier des LCS d'intérêt en vue de l'étude de leurs performances ;
3. action expérimentale en laboratoire visant à étudier en laboratoire les performances des LCS choisis : répétabilité comparabilité, impact du vieillissement et de l'encrassement, influence des caractéristiques de l'aérosol (composition, taille, concentration, indice de réfraction, etc.) ;
4. action expérimentale de terrain visant à étudier la réponse des LCS vis-à-vis des caractéristiques des aérosols et des conditions environnementales réelles, dans l'air de dix entreprises produisant ou utilisant des NOAA ;
5. développement de la stratégie qui pourrait être adoptée pour l'utilisation de ces capteurs dans le but d'une évaluation de l'exposition des travailleurs ;
6. phase d'élaboration du document normatif visé (TS).

La figure 1 illustre les liens entre les différentes actions du projet.

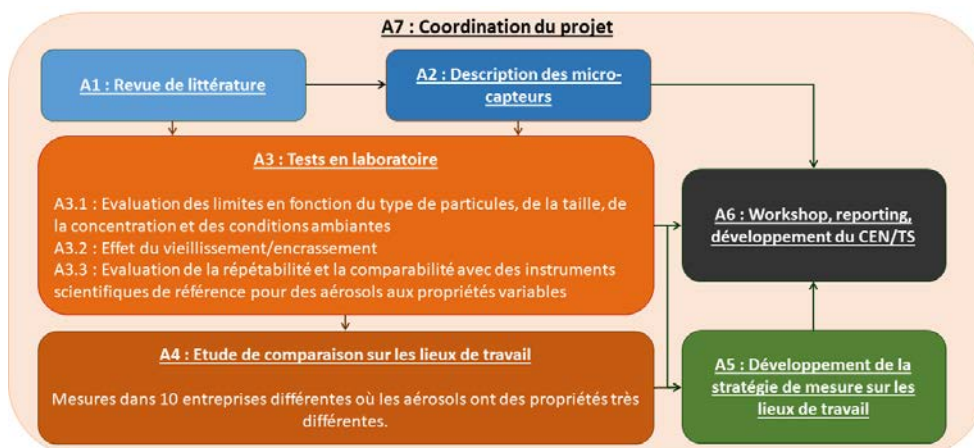


Figure 1: Actions du projet NOAA LCS

3. LES MICRO-CAPTEURS RETENUS DANS LE PROJET

Sur la base de la revue de littérature et de l'étude de marché réalisées, six capteurs en version OEM (capteur seul sans connectique, en anglais *Original Equipment Manufacturer*) ont été sélectionnés pour effectuer l'étude expérimentale prévue dans les tâches n°3 et 4 (Tableau 1). Les données mesurées par ces capteurs sont variables d'un dispositif à l'autre mais essentiellement focalisées sur les fractions particulières environnementales (PMx). Aucun de ces capteurs ne renvoie de fraction particulière liée à la santé au travail (fractions inhalable, thoracique et alvéolaire, définies par la norme EN 481).

Tableau 1: Micro-capteurs retenus pour les essais en laboratoire , données mesurées et coût en version OEM (HT)

<p>Alphasense OPC-R1</p>  <p>113 € Distribution granulométrique de 0,35 à 12,4 µm PM1, PM2.5, PM10</p>	<p>Nova Fitness SDS011</p>  <p>30 € PM2.5, PM10</p>	<p>Sensirion SPS30</p>  <p>30 € PN0.5, PN2.5, PN4, PN10 PM1, PM2.5, PM4, PM10</p>
<p>Plantower PMS7003</p>  <p>25 € PM1, PM2.5, PM10</p>	<p>Next-PM (Groupe Tera)</p>  <p>60 € PN1, PN2.5, PN10 PM1, PM2.5, PM10</p>	<p>Next-PM CR (Groupe Tera)</p>  <p>250 € PN>0.3, PN>1, PN>2.5, PN>5</p>

4. FOCUS SUR LES ACTIONS EXPERIMENTALES DE LABORATOIRE MENEES EN FRANCE

Le LNE et l'INRS sont les deux acteurs français impliqués dans ce projet. Ces deux instituts vont déployer chacun des installations particulières associées à une métrologie de référence en vue d'étudier de manière complémentaire les performances des LCS retenus.

4.1. Actions menées au LNE

L'objectif est principalement d'évaluer l'impact des conditions environnementales sur les réponses des micro-capteurs, notamment l'humidité relative. Pour ce faire, une chambre d'exposition contrôlée en température et humidité relative a été conçue et validée. Celle-ci est constituée d'une enceinte en acier inoxydable et équipée de modules d'injection pour l'introduction d'aérosols et de gaz et le prélèvement associé à une instrumentation de référence est insérée au sein d'une enceinte climatique permettant une régulation en température. Quatre ventilateurs y sont installés afin de garantir une homogénéité spatiale dans la chambre d'exposition en termes de concentration et d'humidité relative. Cette chambre a été caractérisée en température entre 5 °C et 40 °C avec une humidité relative comprise entre 15 %HR et 90 %HR. La stabilité et la reproductibilité de ces deux paramètres ont été évaluées en termes d'homogénéité spatiale. L'enceinte climatique permet la régulation en température. La génération d'humidité est réalisée au sein de la chambre d'exposition à l'aide d'un système d'humidification composé d'un régulateur de débit massique liquide et d'un régulateur de débit massique d'air propre afin de contrôler de manière précise les niveaux d'humidité relative.

En termes d'instrumentation de référence, un spectromètre à mobilité électrique SMPS (TSI, DMA 3081 + CPC 3775) et un spectromètre aérodynamique (TSI, APS 3321) permettent la mesure de distributions granulométriques en nombre entre 10 nm et 20 µm. Les concentrations particulières en nombre et en masse sont également respectivement caractérisées grâce à un compteur à noyaux de condensation (TSI, CNC 3375) et une microbalance à élément oscillant (TEOM Series 1400A, Rupprecht & Patashnick) permettant un prélèvement avec des diamètres de coupures de 2,5 µm et 10 µm.

Deux aérosols de type Arizona Road Dust (ISO12103-1) et Sulfate d'ammonium ont été atomisés en voie liquide avec un nébuliseur (PALAS, AGF 10). Des concentrations particulières en masse ont été obtenues pour les PM_{2,5} et PM₁₀. Les concentrations obtenues couvrent une gamme comprise entre $\sim 1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ et $250 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 1,8\%$.

4.2. Actions menées à l'INRS

L'objectif est principalement d'évaluer l'impact sur les réponses des micro-capteurs de plusieurs paramètres liés aux aérosols, parmi lesquels les concentrations numérique et massique, la distribution granulométrique des particules, leur morphologie, ou encore leur indice de réfraction.

Pour ce faire, des aérosols issus de poudres de différentes natures (BaSO₄, pigments, billes de verres, silices, noir de carbone, etc.) sont générés par voie sèche (Topas, SAG 410U) au sein d'un tunnel aéraulique à basse vitesse (Fabriès et al., 1984; Fabriès & Carton, 1980). Les concentrations massiques visées dans les expériences sont celles habituellement rencontrées sur les lieux de travail ($\sim 10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ à $\sim 2 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Les conditions aérauliques dans le tunnel sont représentatives des conditions dites « d'air calme », fréquemment rencontrées dans les lieux de travail.

Les micro-capteurs sélectionnés étant vendus en version OEM (capteur seul, sans câble de connexion, ni écran d'affichage, etc.), il a donc été nécessaire de développer un logiciel Labview® ou une connexion sur un microcontrôleur Arduino pour procéder à l'acquisition des données mesurées par les micro-capteurs.

Les réponses des micro-capteurs sont de plusieurs types (Tableau 1) : concentrations numériques et/ou massiques correspondant à des fractions environnementales PM_x et, pour certains d'entre eux, distribution granulométrique. Pour comparer ces réponses à des instruments de référence, les fractions PM_x sont déterminées soit de façon intégrée par des prélèvements sur cyclone + porte-filtre pour une analyse gravimétrique, soit en temps réel par la mesure d'un TEOM (Thermo-Fischer Scientific, 1405) associé à des cyclones de type « sharp-cut » pour la sélection des fractions PM₁₀ (BGI, SCC2.354) et PM_{2.5} (BGI, SCC1.197). Les PN_x et la granulométrie sont comparées aux mesures en temps réel d'un SMPS (TSI, DMA 3081 + CPC 3787) et d'un APS (TSI, 3321).

La Figure 2 illustre un exemple de génération pendant laquelle des concentrations stables d'aérosol de BaSO₄, variant de 0,05 à 1,5 mg·m⁻³, sont produites au sein du tunnel aéraulique. Ces concentrations sont déterminées simultanément par un micro-capteur Next-PM et un APS. Lors de cette expérience, l'aérosol était caractérisé par une distribution de type monomodale (DAMN $\sim 0.7 \mu\text{m}$; DAMM $\sim 11.4 \mu\text{m}$).

Cette expérience démontre une grande cohérence entre la concentration PM₁₀ mesurée par le micro-capteur Next PM et l'APS. Néanmoins, le décalage observé pour la concentration massique la plus forte est

probablement due au calcul de conversion de la concentration numérique vers la concentration massique de l'APS qui utilise une densité qui n'est pas parfaitement caractérisée. Par ailleurs, le décalage peut aussi s'expliquer par le fait que l'APS mesure des particules dont la taille est supérieure à 10 μm contrairement au micro-capteur, ce qui contribue à augmenter la concentration massique mesurée par l'APS.

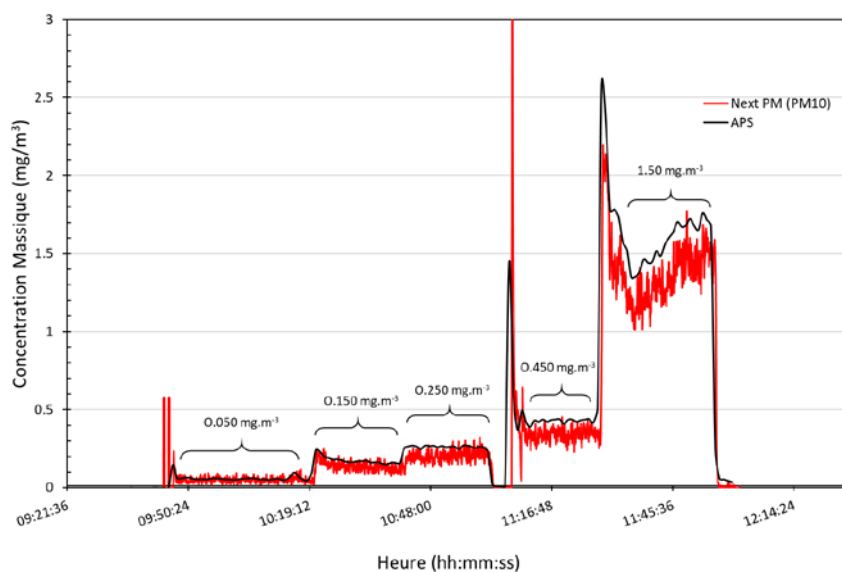


Figure 2: Concentration massique PM10 déterminée par un micro-capteur Next-PM à différents niveaux de concentrations et comparée avec la concentration totale massique déterminée par un APS. Aérosol de BaSO_4 généré en voie sèche (Topas, SAG410U) dans un tunnel dit basse vitesse ($U \sim 0.15 \text{ m.s}^{-1}$)

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Alors que les micro-capteurs à bas coût sont largement utilisés pour évaluer la qualité de l'air environnementale, leur utilisation dans l'air des lieux de travail pose question. Ce projet de recherche prénormative réunit cinq laboratoires européens dans le but de produire des connaissances approfondies sur les performances de ces capteurs et leurs limites pour une utilisation dans le cadre de l'environnement professionnel. Les données produites permettront la création d'un document technique (Technical Specification TS) pour harmoniser les démarches d'évaluation de l'exposition des salariés aux NOAA utilisant les micro-capteurs à bas coût.

6. REFERENCES

- CE-DGEI, Mandat adressé au CEN, au CENELEC et à IETSI relatif aux activités de normalisation concernant les Nanotechnologies et les Nanomatériaux, in M/461FR. 2010: Commission Européenne - Direction Générale des Entreprises et de l'Industrie. p. 7.
- Fabriès, J. F., & Carton, B. (1980). Realization of a Dust Tunnel - Response of Some Air Sampling Instruments Used in Industrial Hygiene. In M. M. Benarie (Ed.), *Studies in Environmental Science* (Vol. 8, pp. 279–283). Elsevier.
- Fabriès, J. F., Carton, B., & Wrobel, R. (1984). Equipment for the study of air sampling instruments with real time measurement of the aerosol concentration. *Equipment for the Study of Air Sampling Instruments with Real Time Measurement of the Aerosol Concentration*, 44(9), 405–409.
- Manikonda, A., Zikova, N., Hopke, P. K., & Ferro, A. R. (2016). Laboratory assessment of low-cost PM monitors. *JOURNAL OF AEROSOL SCIENCE*, 102, 29–40.
- NF EN 481 (1993) Atmosphères des lieux de travail - Définitions des fractions de taille pour le mesurage des particules en suspension dans l'air. Afnor, Novembre 1993. 11p
- Sousan, S., Koehler, K., Thomas, G., Park, J. H., Hillman, M., Halterman, A., & Peters, T. M. (2016). Inter-comparison of low-cost sensors for measuring the mass concentration of occupational aerosols. *Aerosol Science and Technology*, 50(5), 462–473.
- Soysal, U., Géhin, E., Algré, E., Berthelot, B., Da, G., & Robine, E. (2017). Aerosol mass concentration measurements: Recent advancements of real-time nano/micro systems. *Journal of Aerosol Science*, 114, 42–54.
- Zamora, M. L., Rice, J., & Koehler, K. (2020). One year evaluation of three low-cost PM2.5 monitors. *Atmospheric Environment*, 235, 117615.