

ETUDE AU LABORATOIRE DES PERFORMANCES D'INSTRUMENTS DE MESURE EN TEMPS REEL DE LA CONCENTRATION MASSIQUE DES AEROSOLS : APPLICATION A UN AEROSOL MONODISPERSE DE SILICE

S. Bau¹, V. Koehler¹ et X. Simon¹

¹Laboratoire de Métrologie des Aérosols, Institut National de Recherche et de Sécurité, 54500 Vandoeuvre, France

*Courriel de l'orateur : sebastien.bau@inrs.fr

TITLE

Laboratory study of the performances of direct-reading instruments for the measurement of aerosol mass concentration: application to a monodisperse silica aerosol

RESUME

La métrologie en temps réel (MTR) des polluants particulaires dans les atmosphères de travail s'est démocratisée ces dernières années et permet de répondre à de nombreux enjeux de prévention. Parmi les différentes familles d'instruments de MTR, les compteurs optiques de particules (COP) et les photomètres sont les seuls à mesurer la concentration massique des aérosols. Il existe aujourd'hui de nombreux appareils sur le marché, pour lesquels il demeure un déficit de connaissances concernant leurs performances. Ces travaux présentent les résultats obtenus pour deux photomètres et un COP vis-à-vis d'un aérosol d'essai monodispersé de silice. In fine, les connaissances acquises permettront d'élaborer des préconisations en matière de mise en œuvre de la MTR pour la mesure de la concentration massique des aérosols au poste de travail.

ABSTRACT

The use of real-time metrology (RTM) of particulate pollutants in work atmospheres has increased in recent years and allows multiple prevention issues to be addressed. Among the different families of RTM instruments, optical particle counters (OPC) and photometers are the only ones to measure the mass concentration of aerosols. If there are many devices on the market, their performances still need to be investigated. This work presents the results obtained for two photometers and an OPC using a monodisperse silica test aerosol. Ultimately, the knowledge acquired in this study will help develop recommendations for the implementation of RTM to measure aerosol mass concentration at workplaces.

MOTS-CLÉS : métrologie temps réel, compteur optique de particules, photomètre / **KEYWORDS**: real-time metrology, optical particle counter, photometer

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Les situations potentiellement exposantes aux polluants atmosphériques sous forme particulaire sont nombreuses et diversifiées. L'émission de particules dans l'air dépend notamment du secteur ou de l'activité professionnelle considérée, des outils ou procédés utilisés, du geste professionnel, des matériaux manipulés ou mis en œuvre. Ces particules émises vont évoluer dans l'atmosphère de travail, dans le temps et dans l'espace, et potentiellement être inhalées par les travailleurs. Sur un même poste de travail, les concentrations et les tailles de particules peuvent être parfois grandement modifiées au cours d'une journée.

Les mesures d'expositions professionnelles aux agents chimiques particulaires sont quasi-exclusivement basées sur un prélèvement actif de l'aérosol dans la zone respiratoire du salarié, pendant une période représentative de la durée de travail. L'analyse de l'échantillon prélevé se fait de manière différée, et la concentration massique moyenne du polluant est calculée sur la période de prélèvement, voire pondérée sur 8 heures. Pour des raisons d'interprétation, la valeur mesurée est généralement comparée à la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) du polluant considéré, fondée sur des relations dose-effet établies par rapport à une dose massique, et rassemblées dans un guide technique (INRS, 2021).

En complément aux prélèvements effectués de manière conventionnelle, qui renseignent sur l'exposition moyenne des salariés, la métrologie en temps réel (MTR) de polluants gazeux ou particulaires dans les atmosphères de travail s'est démocratisée ces dernières années et permet de répondre à de nombreux enjeux de prévention des risques chimiques (Bau et al., 2015). Certaines des techniques ne sont pas récentes, mais elles bénéficient de développements grandissants et d'une offre commerciale qui correspond désormais à une demande et à des besoins de la part des utilisateurs. De nombreux apports en termes de prévention peuvent être cités, parmi lesquels :

- réaliser des études de postes, objectiver la dynamique des expositions et l'existence de pics d'exposition/émission, identifier les phases exposantes ou les procédés émissifs (Mohr et al., 2005) ;
- caractériser les sources d'aérosols dans le temps et dans l'espace (Peters et al., 2006) ;
- valider des dispositifs de protection collective et en détecter les dysfonctionnements (alarmes) ;

- mettre en place une stratégie de prélèvement adaptée (Bau et al., 2015) ;
- estimer l'exposition des salariés en temps réel (CEN, 2009; Görner et al., 2012).

Malgré leur existence plus ancienne et le fait qu'ils soient les seuls à fournir la concentration massique, les performances des photomètres et des compteurs optiques de particules (COP) demeurent parcellaires. Ces techniques, assez répandues sur le marché et relativement abordables en termes de budget, reposent sur une méthode optique basée sur l'analyse de la lumière diffusée par les particules (Szymanski et al., 2009; Coffey & Pearce, 2010). Ces appareils sont aujourd'hui largement mis en œuvre, notamment dans le domaine de la surveillance de la qualité de l'air atmosphérique, et font l'objet d'un regain d'intérêt par les préventeurs dans de nombreuses campagnes de mesurage sur le terrain à des fins diverses et variées.

Cette étude vise à élaborer des préconisations en matière de mise en œuvre de la MTR pour la mesure de la concentration massique des aérosols chimiques au poste de travail. Elle repose sur la production de données relatives aux performances des instruments qui viendront compléter les connaissances existantes dans la littérature. Dans cet objectif, un premier travail a été effectué portant sur l'étude des performances de deux photomètres et d'un COP vis-à-vis d'un aérosol d'essai monodispersé de silice est présentée dans ce papier.

2. MATERIELS ET METHODES

L'aérosol d'essai a été produit en voie sèche à partir d'une poudre commerciale de silice monodispersée (Angström Spheres Silica Spheres, Fiber Optic Center, Inc). D'après le fournisseur, ces particules sont parfaitement sphériques, de taille calibrée ($0,5 \mu\text{m}$, écart-type inférieur à 10%), et la masse volumique de la poudre est donnée à $1,8 \text{ g/cm}^3$. Des travaux expérimentaux et théoriques ont par ailleurs été réalisés en vue de déterminer leur indice de réfraction à différentes longueurs d'onde (Herbin et al., 2017 ; Hubert et al., 2017), ce qui permet également de réaliser un travail théorique basé sur la diffusion de la lumière.

Comme le montre la Figure 1, un générateur à brosse tournante (PALAS RGB1000) a été mis en œuvre, associé à une ligne de dilution, et à un volume d'homogénéisation de $\sim 12 \text{ L}$ permettant d'alimenter de manière homogène différentes sondes de prélèvement :

- Deux cassettes fermées de 25 mm (C25 + GS, 2 L/min) équipées de capsules GraviSert (Zefon), pour la détermination de la concentration massique de référence,
- Un photomètre (TSI AM 520, 1 L/min) assurant la mesure en temps réel de la concentration massique totale des aérosols,
- Un photomètre (TSI DRX 8533, 3 L/min), permettant la mesure en temps réel des concentrations massiques (totale, PM_{10} , PM_4 , $\text{PM}_{2.5}$, PM_1), et équipé d'une cassette interne (seuls 2 L/min sont dirigés vers le filtre de collecte) constituée d'une capsule GraviSert 37 mm (Zefon),
- Un compteur optique de particules (TSI OPS 3330, 1 L/min), permettant la mesure en temps réel de la distribution granulométrique en nombre des aérosols selon 16 canaux entre $0,3$ et $10 \mu\text{m}$, et équipé d'une cassette interne constituée d'une capsule GraviSert 37 mm (Zefon). L'instrument utilise ensuite la distribution granulométrique pour estimer la concentration massique des aérosols.

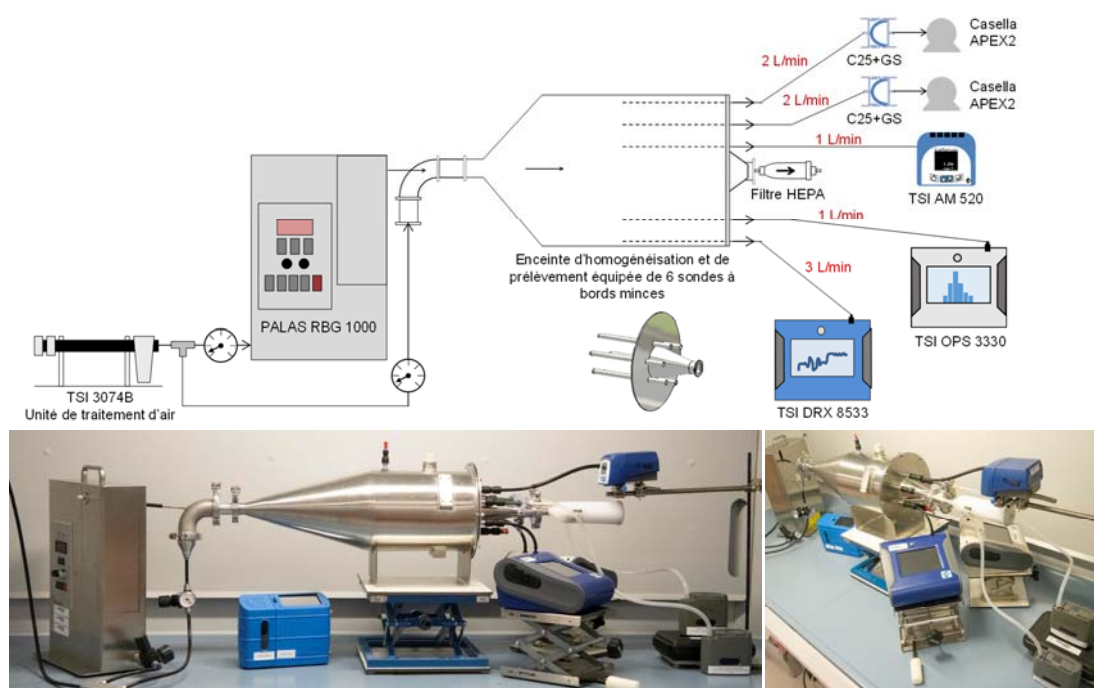


Figure 1. Schéma et photos du montage expérimental

Les dispositifs de MTR impliqués dans ce travail sont destinés à une utilisation de terrain, à point fixe (DRX 8533, OPS 3330) ou en individuel (AM 520). Leurs concentrations massiques maximales mesurables, comprises entre 100 et 275 mg/m³ en fonction du modèle (données fabricant), sont bien supérieures aux concentrations rencontrées dans les atmosphères professionnelles, y compris pour les scénarios les plus exposants. En réalisant des mesures gravimétriques à l'aide de deux appareils (OPS 3330 et DRX 8533), il est par ailleurs possible de déterminer un facteur de calibrage personnalisé (CF) qui corrige la réponse de l'instrument pour un aérosol donné et ce, afin d'obtenir des données de concentrations massiques plus robustes dans une situation spécifique.

Afin de réaliser des paliers permettant de couvrir une gamme de concentration massique entre ~ 0,6 et ~ 20 mg/m³, la vitesse de montée du piston ainsi que le débit d'air de dilution ont été ajustés au cours des expérimentations. Les durées de prélèvement étaient comprises entre 10 et 100 min. Les analyses gravimétriques des supports de collecte ont été effectuées avec une microbalance (Mettler XP6U, résolution 1 µg) ; pour les différents supports, les Limites de Quantification ont été établies selon la norme ISO 15767 (2009).

Une caractérisation préliminaire de la distribution granulométrique de l'aérosol d'essai a été conduite en mobilité électrique (SMPS) ainsi qu'en diamètre aérodynamique (AAC-CPC), comme le montre la Figure 2. Les résultats témoignent de la faible polydispersion des particules de l'aérosol (GSD < 1,15), et permettent également d'en évaluer la masse volumique effective en combinant les diamètres modaux en mobilité électrique et aérodynamique. Les mesures conduisent à une valeur de ρ_{eff} de 1,93 g/cm³, ce qui est en accord avec les spécifications du fabricant.

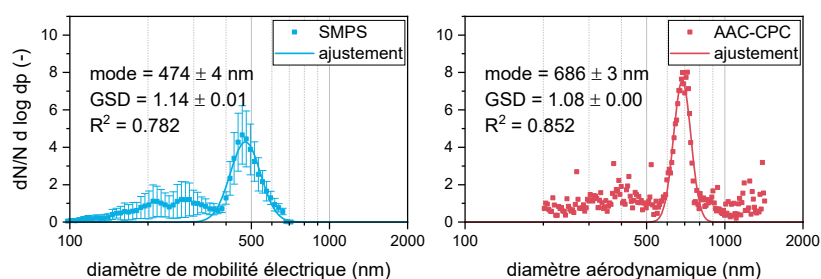


Figure 2. Distributions granulométriques (en mobilité électrique à gauche, en diamètre aérodynamique à droite) de l'aérosol d'essai monodispersé de silice

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

La Figure 3 présente le profil temporel obtenu à partir des trois instruments de MTR, ainsi que les périodes (zones grisées) de prélèvements associées. Ces mêmes périodes ont été utilisées pour déterminer les valeurs moyennes de concentrations massiques pour les instruments de MTR.

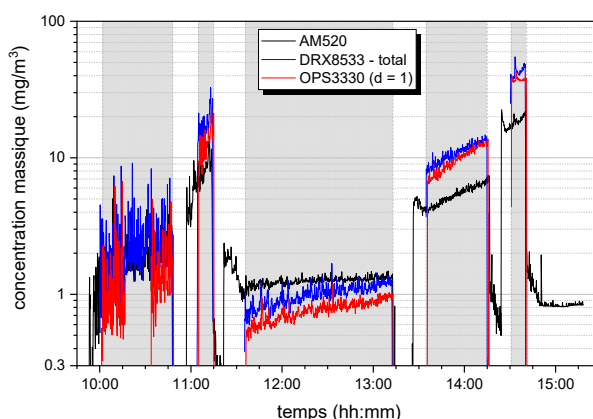


Figure 3. Profils temporels de la concentration massique l'aérosol d'essai en fonction de l'instrument

Les concentrations massiques moyennes pour les différents paliers sont présentées sur la Figure 4 en fonction des concentrations de référence déterminées par gravimétrie et correspondant à la valeur moyenne issue des deux prélèvements réalisés en parallèle.

Hormis pour la plus faible concentration massique, la réponse du photomètre AM 520 (Figure 4A) est en cohérence avec la concentration de référence, malgré des propriétés différentes entre les particules de silice ($n \sim 1,45$, $\rho \sim 1,8$ g/cm³) et celles utilisées pour le calibrage d'usine de l'instrument (ISO 12103-1 A1 Test Dust, mélange de silice et d'oxydes minéraux et métalliques, $\rho = 2,65$ g/cm³).

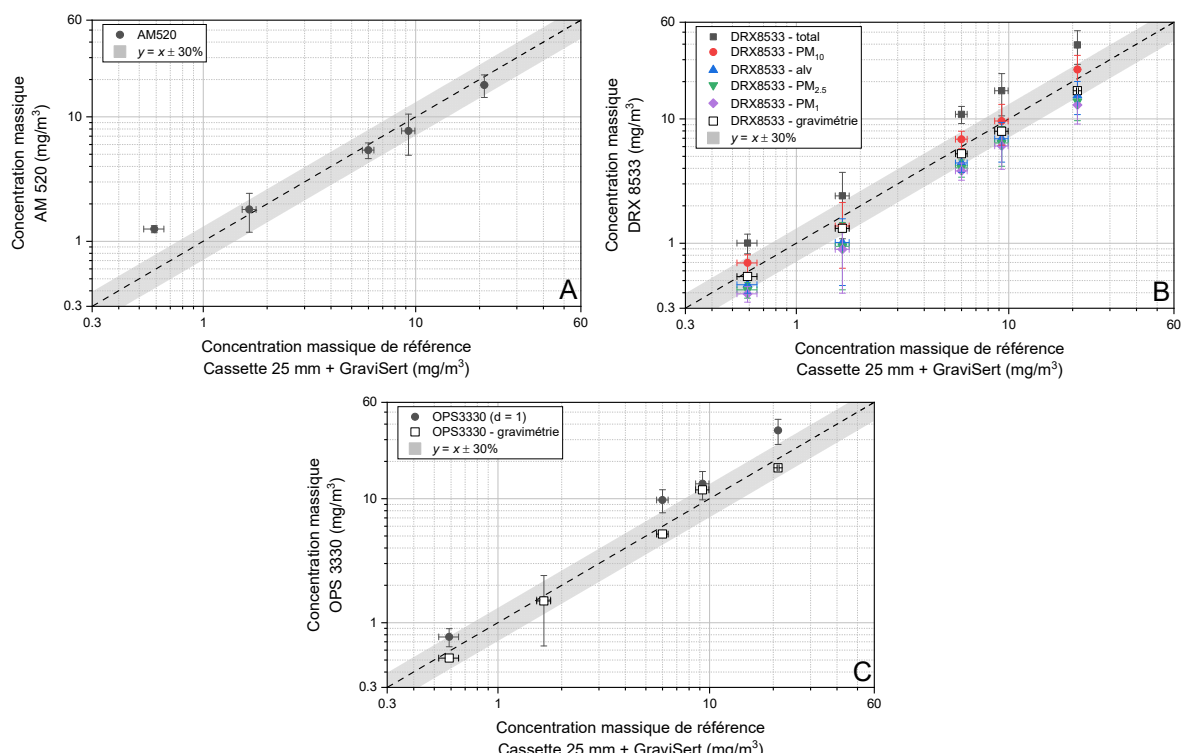


Figure 4. Concentrations massiques mesurées par les différents appareils de MTR en fonction des valeurs de référence. DRX8533 – gravimétrie et OPS3330 – gravimétrie correspondent aux concentrations massiques mesurées par gravimétrie sur la cassette interne des deux instruments.

Les valeurs mesurées par le photomètre DRX 8533 (Figure 4B) selon les différentes fractions suivent une relation linéaire avec les valeurs de concentration de référence ; la valeur de la concentration massique totale obtenue est de l'ordre de 1,5 à 1,9 fois supérieure à la valeur de référence. Ce facteur varie entre 0,9 et 1,7 pour le cas de l'OPS 3330 (Figure 4C). Pour ce dernier, une masse volumique $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ a été prise par défaut pour la conversion de la métrique nombre vers la métrique masse.

Les Figures 4B et 4C montrent un bon accord entre les concentrations massiques issues de l'analyse gravimétrique des cassettes internes du photomètre ($\pm 20\%$) et du COP ($\pm 25\%$) et les valeurs de référence. Compte tenu de la distribution granulométrique submicronique de l'aérosol d'essai, les différences observées dans les concentrations massiques renvoyées par le DRX 8533 (Figure 4B) sont, à ce stade, surprenantes.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Du fait de leur aptitude à mesurer des événements transitoires de courte durée, les compteurs optiques de particules (COP) et les photomètres sont largement utilisés pour la caractérisation des aérosols dans les atmosphères de travail. L'étude de leurs performances (gamme de mesure, niveaux de concentration, incertitudes, répétabilité, reproductibilité, justesse, fidélité) sur une variété d'aérosols d'essais, qu'ils soient mesurés en laboratoire ou sur le terrain, offrira la possibilité d'identifier les facteurs d'influence (humidité relative, masse volumique, indice de réfraction, calibrage, etc) sur leur réponse et, idéalement, de quantifier cette incidence, pour laquelle il n'existe que peu d'éléments dans la littérature. In fine, ces travaux permettront d'établir des cartes de performances des instruments, et de documenter la question de la représentativité de la concentration vis-à-vis des fractions conventionnelles utilisées en hygiène du travail.

Références

- Bau, S., Witschger, O., Galland, B., & Martin, P. (2015). *Hygiène et Sécurité du Travail*, 239, 6-10.
- CEN (2009). TR 16103: Workplace exposure-guide for the use of direct-reading instruments for aerosol monitoring - Part 2: Evaluation of airborne particle concentrations using Optical Particle Counters.
- Coffey, C. C., & Pearce, T. A. (2010). *J Chem Health Safety*, 17 (3)(3), 10-21.
- Görner, P., Simon, X., Bémer, D., & Lidén, G. (2012). *J Environ Monit*, 14, 420-428.
- Herbin, H., Pujol, O., Hubert, P., & Petitprez, D. (2017). *J Quant Spectrosc Radiat Trans*, 200, 311-319.
- Hubert, P., Herbin, H., Visez, N., Pujol, O., & Petitprez, D. (2017). *J Quant Spectrosc Radiat Trans*, 200, 320-327.
- INRS (2021). Les valeurs limites d'exposition professionnelle - ED 6443.
- ISO (2009). 15767 — Workplace atmospheres - Controlling and characterizing uncertainty in weighing collected aerosols.
- Mohr, M., Lehmann, U., & Rütter, J. (2005). *Environ Sci Technol*, 39, 2229-2238.
- Peters, T. M., Heitbrink, W. A., Evans, D. E., Slavin, T. J., & Maynard, A. D. (2006). *Ann Occup Hyg*, 50, 249-257.
- Szymanski, W. W., Nagy, A., & Czitrowszky, A. (2009). *J Quant Spectrosc Radiat Trans*, 110(11), 918-929.