

COMPARAISON DES DIAMETRES OPTIQUES ET AERODYNAMIQUES D'AEROSOLS DANS UN CONTEXTE DE SANTE ET SECURITE DU TRAVAIL

L. Wingert^{*1}, O. Carrivain^{**2}, M. Bourguiba¹, et M. Debia³

¹Institut de Robert-Sauvé de recherche en Santé et Sécurité du Travail, H3A 3C2 Montréal, Québec, Canada

²Institut National de Recherche et Sécurité, 54000 Vandœuvre-lès-Nancy, France

³Département de Santé environnementale et de Santé au Travail, École de Santé Publique de l'Université de Montréal, Université de Montréal, H3T 1A8 Montréal, Québec, Canada

*Courriel de l'orateur : loiwin@irsst.qc.ca

**Courriel de l'orateur : olivier.carrivain@inrs.fr

TITLE

Comparison of optical and aerodynamic diameters of aerosols in the context of occupational health and safety

ABSTRACT

Workers may be exposed to harmful aerosols. Aerodynamic diameter is essential to understand their behavior. Mass-based exposure measurements require time integration, limiting aerosol dynamic insights. Optical particle counters (OPCs) provide real-time data, are potentially inexpensive and miniaturizable (Low-Cost Sensor, LCS), but they measure optical diameters (d_o), influenced by particle nature and not convertible to aerodynamic diameters (d_{ae}). For a common OPC (OPS 3330, TSI Inc.), d_o vs d_{ae} relationships were established for aerosols representative of workplaces.

RESUME

Les travailleurs peuvent être exposés à des aérosols nocifs. Le diamètre aérodynamique est essentiel pour l'étude de leur comportement en milieux de travail. Les mesures massiques d'exposition requièrent une intégration temporelle limitant l'information sur la dynamique des aérosols. Les compteurs optiques de particules (COP) fournissent des données en temps réel et sont potentiellement peu coûteux et miniaturisables (capteurs à bas coût). Toutefois, ils mesurent un diamètre optique (d_o) influencé par la nature des particules et non-convertible en diamètre aérodynamique (d_{ae}). Pour un COP usité (OPS 3330, TSI Inc.), des relations entre d_o et d_{ae} ont été obtenues pour des aérosols représentatifs des milieux de travail.

KEYWORDS: Aerosols exposure, Optical diameter, Aerodynamic diameter, Opticle particle counter / **MOTS-CLÉS:** Exposition aux aérosols, Diamètre optique, Diamètre aérodynamique, Compteur optique de particules

1. INTRODUCTION

De nombreuses études ont mis en évidence un lien significatif entre l'exposition professionnelle aux aérosols et divers effets sur la santé respiratoire et systémique. Pour évaluer l'exposition professionnelle et la comparer aux valeurs limites d'exposition (VLEP), les professionnels en santé et sécurité au travail (SST) réalisent des prélèvements conventionnels des fractions granulométriques normées des aérosols fournissant des concentrations massiques moyennes dans le temps. Ce type de mesures ne permet pas de suivre la dynamique des aérosols dans l'air des lieux de travail, or la connaissance des capacités de dispersion des particules et de leur cinétique locale d'épuration dans les zones proximales et distales des postes de travail est importante pour évaluer l'exposition des travailleurs et l'efficacité des équipements de protection collective. Pour étudier la dynamique des aérosols, des instruments à lecture directe (ILD) mesurant leur distribution granulométrique seraient nécessaires.

Les compteurs optiques de particules (COP) sont de plus en plus utilisés en SST car miniaturisables et potentiellement à faible coût (LCS), en faisant ainsi des ILD intéressants pour ce type d'application. Les COP fournissent un diamètre optique (d_o) et la concentration en nombre de particules. Les COP sont généralement calibrés avec des microsphères monodispersées en latex de polystyrène (PSL) de diamètre géométrique et d'indice de réfraction connu ($m=1,59$). Les aérosols rencontrés dans les environnements professionnels sont très éloignés de ceux de calibration en termes de morphologie et d'indices de réfraction, des propriétés impactant fortement la diffusion de la lumière par les particules. Ainsi, un même d_o peut correspondre à des particules morphologiquement ou chimiquement différentes et présentant des comportements dans l'air et donc des diamètres aérodynamiques (d_{ae}) variables. Les VLEP étant fixées pour des fractions granulométriques (alvéolaire, thoracique, inhalable) caractérisées par le d_{ae} des particules (RSST, c. S-2.1, r. 13), ce dernier constitue le diamètre de référence en SST (AFNOR, 1993). De ce fait, la conversion entre d_o et d_{ae} est importante pour l'analyse et l'interprétation des données issues des COP dans un contexte d'hygiène du travail.

En raison de la nature de leurs propriétés équivalentes respectives, d_o et d_{ae} peuvent différer, et l'établissement d'une relation théorique entre ces diamètres pour des particules provenant de milieux de travail réels est pratiquement impossible.

La relation entre d_o et d_{ae} n'a fait l'objet que de quelques études empiriques (Marple et Rubow, 1976, Binnig et al., 2007, Chien et al. 2016). Des méthodes inertielles à l'aide d'impacteurs ou de cyclones (Marple et Rubow, 1976) ont été employées en amont de COP et reposent sur la génération d'un aérosol polydispersé. La génération de particules monodispersées (à l'aide d'un générateur à orifice vibrant ou Sinclair-Lamer) permet également de déduire des relations entre d_o et d_{ae} en comparant les réponses d'un COP avec celle d'un spectromètre aérodynamique (Chien et al, 2016). La mise sur le marché du Classificateur Aérodynamique d'Aérosols (AAC, Cambustion Ltd, Royaume-Uni) permet de s'affranchir des limitations de certaines techniques précédentes, comme la durée des expériences et la diversité des aérosols pouvant être produits. L'AAC couplé à n'importe quelle source d'aérosols permet de générer des particules monodispersées en d_{ae} entre environ 0,025 μm et 5 μm . Une seule étude propose l'utilisation de ce dispositif pour calibrer des COP et améliorer la connaissance et la pertinence des diamètres mesurés (Sang-Nourpour et Olfert, 2019).

Du fait de certaines limitations méthodologiques pour la génération d'aérosols aérodynamiquement monodispersés ou de l'aspect chronophage des méthodes inertielles, la plupart des études passées ont exploré la relation entre d_o et d_{ae} en se concentrant sur des particules idéales de forme et d'indice de réfraction connus. Cependant, compte tenu de l'hétérogénéité des propriétés physico-chimiques des particules présentes en milieux de travail, il est important d'élargir ces investigations pour inclure des matériaux reflétant fidèlement les environnements de travail (Chien et al., 2016). Par conséquent, l'objectif de cette étude est d'examiner la relation entre d_o et d_{ae} pour un type de COP et différents aérosols pouvant être rencontrés dans les milieux de travail.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Cette étude a été réalisée conjointement par les équipes de l'IRSST/UdeM et de l'INRS/Laboratoire de Métrologie des Aérosols dans leurs installations respectives. Certaines expériences ont servi de validation inter-laboratoire pour pouvoir répartir le travail ultérieur.

2.1. Instrumentation

Le COP sélectionné pour cette étude est l'Optical Particle Sizer (OPS) modèle 3330 (TSI Inc., USA), capable de mesurer des distributions granulométriques de particules allant de 0,3 à 10 μm sur un maximum de 16 canaux (angle de diffusion $90^\circ \pm 60^\circ$). Afin de comparer le d_o mesuré par l'OPS 3330 avec le d_{ae} de divers aérosols, ce dernier a été obtenu simultanément à l'aide d'un Aerodynamic Particle Sizer (APS) modèle 3321 (TSI Inc., USA) mesurant la distribution granulométrique des particules sur 52 canaux entre 0,5 μm et 20 μm . Les deux instruments ont été calibrés par le fabricant avant les expériences avec des sphères en latex de polystyrène (PSL).

2.2. Aérosols tests

Des aérosols couramment utilisés en laboratoire ont d'abord été sélectionnés en raison de leur usage dans le calibrage des instruments ou dans des expériences usuelles (tests de filtration, de ventilation, de mesures de performances de dispositifs...), i.e., dolomite, billes de verre et Di-Ethyl-Hexyl-Sebacate (DEHS). De plus, des aérosols plus pertinents dans un contexte professionnel ont été choisis : des bactéries (*Micrococcus luteus*) et des moisissures (*Cladosporium sp.*) ainsi que des aérosols de type « industriels » représentés par des poussières riche en silice cristalline quartz (sablage au jet), de bois (sciage), de métaux (usinage, soudage), de farine et de charbon de bois.

Le DEHS (IRSST), les billes de verres (INRS), la dolomite (IRSST-INRS), la farine (INRS) et le charbon de bois (INRS) ont été achetés auprès de fournisseurs directs. Les bactéries et les moisissures ont été cultivées au laboratoire de microbiologie de l'IRSST à partir d'une souche interne. Les poussières de sablage au jet (IRSST) ont été prélevées dans un atelier de métallurgie à partir des résidus après travail. Les particules de métal (IRSST) ont été récupérées dans la trémie d'un dépoussiéreur affecté au travail des métaux (soudage, usinage) et celle de bois (IRSST) dans le bac de retenue d'une scie à onglet dans un atelier de menuiserie. Les aérosols de bois ont été générés à partir de deux fractions de la poudre originelle obtenues par tamisage et identifiées comme fine et grossière.

2.3. Banc d'essais

Les bancs d'essais des deux laboratoires (IRSST et INRS) présentent de nombreuses similitudes, à savoir une génération suivie d'une dilution/dispersion de l'aérosol avec un débit contrôlé d'air comprimé filtré. Afin de limiter les pertes électrostatiques, tous les tuyaux étaient conducteurs (acier inoxydable ou silicone conducteur).

L'aérosol ainsi généré et conditionné était réparti entre l'OPS 3330 et l'APS 3321 à l'aide d'un diviseur de débit à 4 voies. Dans le cas d'une génération d'aérosols polydispersés, un AAC était placé entre la section de génération/conditionnement et le diviseur de débit afin de produire un aérosol monodispersé.

Dans ce cas, le débit d'aérosol traversant l'AAC était réglé à sa valeur maximale de 1,5 L.min⁻¹. Pour respecter le débit total requis par l'APS et l'OPS, un débit contrôlé d'air comprimé filtré était ajouté à la sortie de l'AAC. Les principales différences entre les deux bancs de génération étaient, au laboratoire de l'IRSST, (1) la présence d'un neutraliseur radioactif (3012A, TSI Inc. USA) entre la dilution/dispersion de l'aérosol et son prélèvement par les instruments afin de limiter les pertes électrostatiques et d'augmenter la stabilité de l'aérosol et (2) l'utilisation de deux chambres séparées pour la dilution/dispersion de l'aérosol et son prélèvement.

2.4. Génération des aérosols

Divers générateurs ont été utilisés pour aérosoliser les différents types de particules. Les aérosols de DEHS ont été obtenus avec un générateur Sinclair-Lamer (MAG 3000, Palas GmbH, Allemagne) capable de produire des particules monodispersées (IRSST). Les bioaérosols ont été obtenus par nébulisation (AGK 2000, Palas GmbH, Allemagne) de suspensions des microorganismes dans de l'eau stérile d'irrigation.

À l'exception de la poudre métallique et de la fraction fine des poussières de bois qui ont été aérosolisées par un agitateur vortex (VS-1000, Addair, France), les autres aérosols ont été produits au moyen d'un générateur à brosse rotative (RBG 1000, Palas GmbH, Allemagne) (IRSST) ou d'un disperseur à venturi (SAG 410/P, Topas GmbH, Allemagne) (INRS).

Pour toutes les particules, à l'exception du DEHS généré par Sinclair-Lamer et des bioaérosols qui sont monodispersés par principe ou par nature, l'AAC a été utilisé pour générer un aérosol monodispersé.

2.5. Comparaison entre d_o et d_{ae}

Pour chaque aérosol et chaque taille de particules, d_o et d_{ae} ont été comparés en termes de diamètre médian des distributions granulométriques mesurées par l'OPS 3330 et l'APS 3321, respectivement. Les écarts relatifs, des d_o par rapport aux d_{ae} , ont aussi été calculés.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

L'intercomparaison sur la poudre de dolomite entre les laboratoires de l'IRSST et de l'INRS a permis de s'assurer de la similarité des résultats. À l'IRSST, des relations entre d_o et d_{ae} éloignées de moins de 10% ont été obtenues, soit un écart inférieur ou égal à la variation inter-OPS 3330 établie sur 5 spécimens à jour de calibration et pour trois d_{ae} (0,8 μ m, 1,5 μ m et 3 μ m).

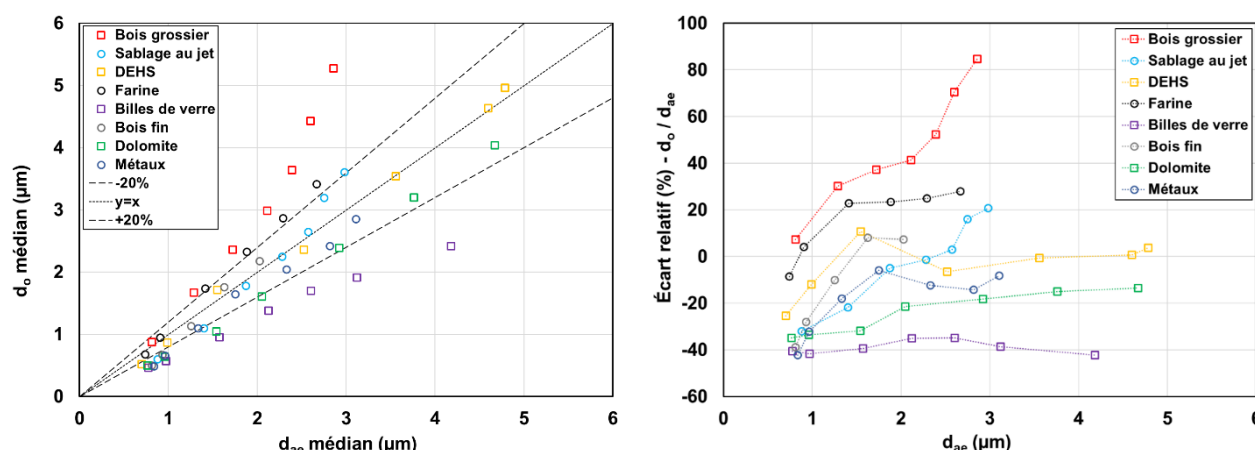
Comme l'illustre la Figure 1 – Gauche, les relations entre d_o et d_{ae} sont fonction de la variété d'aérosols considérée. Une relation 1 : 1 est obtenue pour le DEHS pour des d_{ae} supérieurs à 1 – 1,5 μ m. Les écarts relatifs entre ces deux diamètres sont illustrés en Figure 1 – Droite. À l'exception du bois grossier et des billes de verre, les écarts relatifs s'inscrivent dans une plage de variation d'environ ± 20 %. En ce qui concerne les billes de verre, l'écart relatif reste compris entre -30 % et -40 %, indépendamment du diamètre. Si les écarts relatifs entre d_o et d_{ae} , peuvent varier en valeur absolue, il est intéressant de constater des similitudes dans les tendances. En effet, parmi les trois comportements précédemment décrits, l'écart relatif entre d_o et d_{ae} semble toujours présenter au moins une phase de croissance suivi d'un plateau. Ces deux premières phases sont suivies : (1) pour les billes de verre et le DEHS de géométrie sphérique, d'une re-diminution puis d'une stagnation (courbe convexe, -40% et 0%) et (2) pour le bois grossier et les poussières de sablage, d'une ré-augmentation marquée (courbe sigmoïdale, 20 % et 80 %). Dans le cas de la farine, du bois fin, de la dolomite et des poussières métalliques, l'hypothèse peut être faite qu'un deuxième point d'inflexion apparaisse pour des d_{ae} non-mesurés dans ce travail et donc que les relations entre d_o et d_{ae} soient aussi sigmoïdales.

Absentes de la Figure 1 (Gauche et Droite), les d_o et d_{ae} présentent un écart relatif d'environ -14% et 24% dans le cas de la bactérie (*Micrococcus luteus*) et de la moisissure (*Cladosporium sp.*), respectivement.

Également non-présentés sur la Figure 1 (Gauche et Droite), les aérosols aérodynamiquement monodispersés de charbon de bois ont montré des distributions fortement multimodales (jusqu'à 3 modes) en termes de d_o , rendant difficile une comparaison en fonction d'un unique diamètre médian. Cela tend à démontrer l'hétérogénéité de ce type d'aérosols, possiblement composés, pour un d_{ae} donné, de particules ayant des propriétés physico-chimiques variées (forme, indice de réfraction, masse volumique).

Pour certains aérosols de composition et forme variées, l'écart entre d_o et d_{ae} appartient à un intervalle d'environ ± 20 %, sur une plage de d_{ae} allant de 1 μ m – 1,5 μ m à 3 μ m – 5 μ m. Cette plage comprend souvent le d_{ae} massique médian de la fraction alvéolaire en milieux de travail, caractérisée par son diamètre médian de pénétration de 4 μ m.

Ceci constitue donc un résultat intéressant pour l'OPS 3330 ou des COP similaires qui pourraient, de façon simplifiée et moyennant une étape de calibration massique (De Carlo et al. 2004), être utilisés pour estimer en temps réel la fraction alvéolaire des aérosols en plus des distributions granulométriques numériques.



4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans le cadre de cette étude, des relations entre d_o et d_{ae} ont été établies pour un OPS3330, COP, couramment employé en hygiène industrielle. Les écarts relatifs entre d_o et d_{ae} sont, en règle générale, compris entre $\pm 20\%$. L'approche développée dans cette étude sera étendue à d'autres compteurs de particules afin d'objectiver l'impact de l'architecture des compteurs de particules (longueur d'onde laser, gamme angulaire de collection de la lumière) sur ces relations. La forme des particules rencontrées dans les environnements professionnels est dans de très rares cas sphérique. Des prélèvements sur des cassettes fermées équipées de Membrane polycarbonate Nucléopore pour des analyses au compteur Coulter (Multisizer 4e, Beckman Coulter, USA) seront également entrepris pour déterminer des relations empiriques entre le diamètre optique et le diamètre équivalent en volume.

5. FINANCEMENT

Ce travail a été soutenu par le fond de recherche de l'IRSST, subvention 2022-007 et l'INRS.

6. RÉFÉRENCES

- AFNOR, 1993. Atmosphères des lieux de travail - Définition des fractions de taille pour le mesurage des particules en suspension dans l'air. Norme NF EN 481.
- Binnig, J., Meyer, J., & Kasper, G. (2007). Calibration of an optical particle counter to provide mass for well-defined particle materials. *Journal of Aerosol Science*, 38(3), 325–332.
- Chien, C.-H., Theodore, A., Wu, C. Y., Hsu, Y.-M., & Birky, B. (2016). Upon correlating diameters measured by optical particle counters and aerodynamic particle sizers. *Journal of Aerosol Science*, 101, 77-85.
- DeCarlo, P. F., Slowik, J. G., Worsnop, D. R., Davidovits, P., & Jimenez, J. L., 2004. Particle morphology and density characterization by combined mobility and aerodynamic diameter measurements. Part 1: Theory. *Aerosol Sci. Technol.* 38, 1185–1205.
- Gouvernement du Québec, 2024. *Règlement sur la santé et la sécurité du travail* (RLRQ, c. S-2.1, r. 13). Éditeur officiel du Québec.
- Marple, V. A., & Rubow, K. L. (1976). Aerodynamic particle size calibration of optical particle counters. *Journal of Aerosol Science*, 7(5), 425–433.
- Sang-Nourpour, N., & Olfert, J. S. (2019). Calibration of optical particle counters with an aerodynamic aerosol classifier, 138, 105452.