INFLUENCE DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES SUR LA REPONSE DE COMPTEURS DE PARTICULES FINES PORTATIFS

J. Malet^{*1}, K. Bucar², J. Wiese¹, U. Winkler³, A. Wiedensohler³, P.B. Pedersen^{4,5}, L. Stabile⁶, F.J. Gómez-Moreno⁷, S. Koust⁵

¹Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), PSN-RES/SCA/LEMAC, 91192 Gif-sur-Yvette, France

² Jozef Stefan Institute, Jamova 39, 1000 Ljubljana, Slovenia

³ Tropos, Leibniz Institute for Tropospheric Research e.V., Permoserstraße 15, 04318 Leipzig, Germany

⁴ Department of Biological and Chemical Engineering, Aarhus University, Inge Lehmanns Gade 10, DK-8000

Aarhus C, Denmark

⁵ Danish Technological Institute, Kongsvang Alle 29, DK-8000 Aarhus, Denmark

⁶ University of Cassino and Southern Lazio, Department of Civil and Mechanical Engineering, Cassino (FR), Italy

⁷ CIEMAT, Department of Environment, CIEMAT, Av. Complutense 40, Madrid 28040, Spain *Courriel de l'orateur : jeanne.malet@irsn.fr

TITLE

Influence of environmental conditions on the response of portable particle counters

RESUME

La pollution de l'air a un impact bien connu sur les effets sur la santé, tant dans l'environnement extérieur atmosphérique qu'en air intérieur. Elle concerne également les ambiances de travail en termes d'hygiène et certains process industriels en termes de qualité de production. Dans ce cadre, la mesure des particules fines fait l'objet d'un intérêt croissant. Depuis quelques années, on voit apparaître sur le marché des appareils portatifs de comptage des particules fines rendus très attractifs par leur maniabilité et leur faible coût, en comparaison aux appareils utilisés en laboratoire, encombrants et coûteux (CPC, Condensation Particle Counter). L'objectif de ce travail est d'étudier la réponse de ces appareils portatifs dans différents environnements, en s'intéressant plus particulièrement aux conditions de l'environnement extérieur : vent, température et humidité. Un banc expérimental (DIESE) permettant la maîtrise de ces conditions environnementales a été utilisé pour intercomparer dix appareils de mesure sur une large gamme de concentration d'aérosols atmosphériques.

ABSTRACT

Air pollution has a well-known impact on health effects, in the atmospheric outdoor environment, as well as in indoor air. It also concerns working environments concerning occupational health and some industrial processes in terms of production quality. In this context, the measurement of ultra-fine particles is a subject of growing interest. In recent years, portable fine particle counters have been made available on the market at a much lower cost making them attractive compared to standard laboratory devices (Condensation Particle Counters), which are bulky and expensive. The objective of this work is to study the response of some of these portable devices in different environments, focusing more particularly on the conditions of the external environment: wind, temperature, and humidity. An experimental facility (DIESE) allowing the control of these environmental conditions has been used for an intercomparison of ten measuring devices over a wide concentration range of atmospheric aerosols.

MOTS-CLES : aérosol, compteur de particules, température, humidité, appareils portables **KEYWORDS**: aerosol, particle counters, temperature, humidity, portable devices

1. INTRODUCTION

La mesure de la concentration en nombre des particules fines (PM1.0) et ultrafines (PM0.1) fait l'objet d'un intérêt croissant dans le domaine de la qualité de l'air, que ce soit pour la pollution atmosphérique ou pour l'air intérieur. Notamment, si les particules ultrafines sont négligeables en masse, elle représente la grande majorité de l'aérosol urbain en nombre. Les appareils de mesure de la concentration en nombre, les compteurs à noyaux de condensation (CPC Condensation Particle Counter), sont des appareils de laboratoire, de taille conséquente et au prix élevé. Ces dernières années ont vu apparaître sur le marché des appareils de mesure portables et de moindre coût. Ces appareils, faciles d'utilisation, sont utilisés dans de nombreuses applications (Hovorka *et al.* 2016; Sajgalik *et al.* 2021). Ils ont fait l'objet de questionnements divers quant à leur précision et des campagnes d'intercomparaison existent dans la littérature ouverte (Zhu et al. 2006; Matson, Ekberg et Afshari 2004; Piotrowicz et Polednik 2019; Todea et al. 2015), portant généralement sur un nombre limité d'appareils de mesure ou de campagnes.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet européen AEROMET 2 visant à développer des standards d'étalonnage de métrologie de la pollution particulaire atmosphérique. Dans ce cadre, une partie du travail

concerne la qualification de ces compteurs de particules portatifs. La particularité de ce projet est le nombre important d'appareils testés, d'une part en laboratoire pour déterminer leur efficacité de comptage en fonction de la taille des particules, d'autre part lors de plusieurs campagnes d'intercomparaison. Trois campagnes ont été réalisées dans des environnements extérieurs aux conditions atmosphériques différentes (Suède, Allemagne, Grèce). Une campagne d'une trentaine d'essais, qui fait l'objet de cette présentation, a été réalisée en tunnel aéraulique conditionné en température et en humidité relative. Cette étude présente ce banc d'essai, la qualification de la zone de mesure des appareils, et les conditions d'essai aux différentes températures et humidités, pour une large gamme de concentrations de l'aérosol atmosphérique. Les instruments testés sont ensuite intercomparés aux appareils de référence pour différentes conditions thermiques.

2. MOYENS ET METHODES

2.1. Banc expérimental

Le tunnel aéraulique utilisé ici est l'installation DIESE de l'IRSN (Figure 1), constituée de conduits en acier galvanisé d'environ 60 m de long, de section 400x600 mm². Le tunnel est modulaire et permet des mesures en différents points et sur des sections entières. Il est isolé thermiquement sur sa zone de mesure principale par 5 cm de laine de verre et chaque piquage ou trappe dispose d'un isolant sur-mesure pour éviter des ponts thermiques. L'installation fonctionne sous aspiration permettant des débits allant de 3 000 à 12 000 m³/h. Trois entrées d'air (Inlet-i) sont disponibles (Figure 1). Par l'entrée Inlet-1, l'air est d'abord filtré, puis peut être refroidi pour condenser la vapeur par l'usage d'une batterie froide, et est ensuite réchauffé par une batterie chaude. L'entrée Inlet-2 est utilisée sans filtre ni déshumidification, mais comporte un nid d'abeille de 50 cm de long en amont de la batterie chaude. Enfin, l'entrée Inlet-3 n'a qu'un filtre H13 sans déshumidification ni chauffage. L'instrumentation standard de l'installation repose sur des mesures de pression, de température (sonde PT100 centrée dans la gaine répartie en différents points, voir TTi sur la Figure 1 gauche) ainsi que des fils chauds et des tubes de Pitot, permettant la mesure de la vitesse moyenne de l'air centrée dans la gaine pour remonter au débit moyen. Des sondes d'humidité sont également disponibles en amont et en différents points de l'installation. L'instrumentation spécifique est constituée de cannes déplaçables sur une vingtaine de zones de l'installation, permettant la mesure de profils de température (thermocouple de type T), de vitesse (fil chaud), d'humidité. Concernant la métrologie des aérosols, l'installation DIESE dispose de possibilités de génération et de mesures d'aérosols divers. Dans le cadre de la présente étude, l'aérosol atmosphérique extérieur est utilisé, aspiré dans l'installation par l'entrée amont (Inlet-1) de la batterie froide, dans laquelle les filtres ont été retirés. L'installation étant modulaire, un tronçon spécifique (Figure 1 droite, en orange) a été installé pour y disposer tous les appareils portables testés dans cette intercomparaison (Figure 3). A ce troncon sont également reliés des appareils de référence positionnés hors de la veine, prélevant l'aérosol en gaine au niveau des appareils portables.



Figure 1 : Installation DIESE avec le positionnement des entrées d'air et des mesures de température "standard" (à gauche) ; conditionnement d'air et section de test pour les appareils (à droite)

2.2. Vérifications des conditions environnementales

L'homogénéité des conditions de température, vitesse et humidité est testée par la mesure de profils horizontaux à mi-hauteur. Compte tenu du type d'écoulement turbulent, de l'isolation thermique et de la zone considérée pour les tests des appareils portables, le profil horizontal est jugé suffisant pour évaluer l'homogénéité, des disparités verticales n'étant pas pertinentes. Les profils horizontaux comportent entre 15 et 20 points de mesure. On présente sur la Figure 2 (gauche) un exemple de ces profils. Les résultats montrent que les températures, les vitesses et l'humidité sont homogènes dans la veine dans la zone de test considérée.



Figure 2 : Exemple d'homogénéité en température dans la veine (à gauche) et conditions d'essais (à droite)

Le conditionnement de l'air permet de piloter une température entre 7°C et plus de 40°C. L'air extérieur étant prélevé, des essais réalisés en hiver permettent d'abaisser la limite basse selon les températures hivernales. Les vitesses de vent dans la veine varient de 2 à 15 m/s, ce qui couvre un large éventail de vents atmosphériques. Enfin, l'humidité, qui n'est pas directement pilotée mais qui est une résultante des choix de refroidissement et de réchauffage selon l'humidité extérieure, peut être montée à la saturation comme diminuée jusqu'à obtenir un air sec sur des plateaux de plusieurs heures. Les conditions des trente essais réalisés dans le cadre de cette campagne sont données sur la Figure 2 de droite.

L'influence du positionnement du prélèvement d'aérosols a été testé en variant l'orientation de la canne de prélèvement. Les résultats ne montrent pas de différence, ce qui peut s'expliquer par la taille des particules (40% des particules sont inférieures à 30 nm sur l'essai considéré).

2.3. Appareils portables et de référence

Les appareils testés (Tableau 1) regroupent des compteurs à noyaux de condensation à l'iso-propanol (P-Trak et CPC 3007), un compteur à noyaux de condensation à l'eau (Magic™ CPC), le DiSCmini et le Nano Tracer reposant sur la mesure de la charge de l'aérosol (électromètre). La Figure 3 présente les vues des appareils portables dans la veine. Les aethalomètres portables, visibles sur la photo de gauche, ont également été testés pour la mesure du Black Carbon mais ne font pas l'objet de cette présentation. Tous les appareils placés en gaine ont été disposés sans tube de prélèvement (limitation des pertes par dépôt à ces faibles débits). Les appareils placés hors gaine sont un compteur à noyau de condensation au butanol, le CPC 3010 étalonné par le réseau ACTRIS sur les bancs de TROPOS, un SMPS doté d'un CPC 3775, et le Magic[™] CPC. Les tubes de prélèvement des appareils placés hors gaine sont tous en matériaux conducteurs et suffisamment courts pour que le dépôt puisse y être négligé aux débits de prélèvements considérés. Les compteurs à noyaux de condensation sont rechargés en iso-propanol à chaque essai. Les filtres en amont du tunnel sont remis avant chaque essai afin de vérifier l'étanchéité de la veine. Les débits des appareils sont remesurés chaque semaine avec un débitmètre étalonné indépendant et les appareils ont été re-réglés régulièrement sur l'horloge mondiale. Les données sont traitées et regroupées à la même fréquence d'échantillonnage. Les essais sont considérés sur la base de plateaux de température et d'humidité stables, variant de 30 min à plusieurs heures. Les concentrations en nombre de particules varient de quelques milliers à plus de 20 000 particules par cm³. Des essais comportent des variations rapides de concentration.

| Tableau 1 : Liste des CPC portables et de référence utilisés | | |
|--|---------------|------------------------|
| Reference | Institut | Instrument |
| N1 | AU | TSI P-Trak 8525 |
| N2 | AU | TSI P-Trak 8525 |
| N4 | DTI | TSI P-Trak 8525 |
| N5 | UNICAS | TSI CPC 3007 |
| N6 | DTI | Testo DiSCmini |
| N7 | DTI | TSI CPC 3007 |
| N8 | UNICAS | Aerasense Nano Tracer |
| N10 | CIEMAT | Magic [™] CPC |
| NREF | TROPOS/ACTRIS | TSI CPC 3010 |
| Granulomètre | IRSN | SMPS (avec CPC 3775) |

3. RESULTATS ET DISCUSSION

L'analyse des résultats de suivi temporel des concentrations (Figure 4 gauche) repose sur la détermination de la pente de la droite de régression linéaire réalisée sur les points expérimentaux obtenus par l'appareil de référence et chaque appareil portatif. Pour trente essais et huit appareils, on obtient une base de données de 240 régressions linéaires (Figure 4 milieu).



Figure 3 : Appareils portables dans la veine (aethalometres et Nanotracer à gauche et CPC à droite)

Chaque appareil est ensuite regardé individuellement et sa réponse aux paramètres environnementaux est analysée (Figure 4 droite). Cette dernière figure illustre bien la déviation de la pente de la régression linéaire avec l'augmentation de l'humidité pour un des appareils (Nano Tracer).



Figure 4 : Suivi temporel d'un essai (gauche), régression pour un appareil/un essai (milieu), pente de régression pour les paramètres environnementaux pour un appareil sur tous les essais (droite)

Les données sont analysées en prenant en compte les paramètres suivants : (1) correction du débit réel prélevé dans chaque appareil, (2) correction de la coïncidence de l'appareil de référence, (3) correction des concentrations par l'efficacité de comptage de l'appareil aux différentes tailles de particules, obtenues sur le banc d'étalonnage de référence de TROPOS/ACTRIS dans le cadre du projet AEROMET 2, en croisant les données obtenues avec les résultats du SMPS. L'influence du temps de moyennage est également regardée pour la détermination des pentes de régression. Enfin, la présentation portera sur l'influence des paramètres environnementaux comme présentés sur la Figure 4 de droite pour les différents types d'appareils.

Ce travail a été financé par le projet Européen AEROMET 2, EMPIR/EURAMET 19ENV08. L'équipe remercie Damien Chagneau, stagiaire à l'IRSN, pour sa participation à l'étude.

4. BIBLIOGRAPHIE

Hovorka, Jan; Leoni, Cecilia; Dočekalová, Veronika; Ondráček, Jakub; Zíková, Naděžda (2016) Aerosol Distribution in The Planetary Boundary Layer Aloft a Residential Area. In : IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 44, p. 52017. DOI: 10.1088/1755-1315/44/5/052017.

Matson, U.; Ekberg, L. E.; Afshari, A. (2004) Measurement of Ultrafine Particles: A Comparison of Two Handheld Condensation Particle Counters. In : Aerosol Science and Technology, vol. 38, n° 5, p. 487–495. DOI: 10.1080/02786820490462200.

Piotrowicz, Adam; Polednik, Bernard (2019) Exposure to Aerosols Particles on an Urban Road. In : Journal of Ecological Engineering, vol. 20, n° 5, p. 27–34. DOI: 10.12911/22998993/105329.

Sajgalik, Pavol; Garzona-Navas, Andres; Csécs, Ibolya; Askew, J. Wells; Lopez-Jimenez, Francisco; Niven, Alexander S. et al. (2021) Characterization of Aerosol Generation During Various Intensities of Exercise. In : Chest, vol. 160, n° 4, p. 1377–1387. DOI: 10.1016/j.chest.2021.04.041.

Todea, Ana Maria; Beckmann, Stefanie; Kaminski, Heinz; Asbach, Christof (2015) Accuracy of electrical aerosol sensors measuring lung deposited surface area concentrations. In : Journal of Aerosol Science, vol. 89, p. 96–109. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2015.07.003.

Zhu, Yifang; Yu, Nu; Kuhn, Thomas; Hinds, William C. (2006) Field Comparison of P-Trak and Condensation Particle Counters. In : Aerosol Science and Technology, vol. 40, n° 6, p. 422–430. DOI: 10.1080/02786820600643321.