

Le Bio-E-RATEs (Bioaerosols Emission Rates Analysis Through Experiments) : UN BANC EXPERIMENTAL POUR LA MESURE DU TAUX D'ÉMISSION DE BIOAÉROSOLS : APPLICATION AUX PARTICULES RESPIRATOIRES HUMAINES

L. Ait Ali Yahia^{*1}, I.Harbelot, T.Perin et E. Géhin¹

¹Univ Paris-Est Creteil, CERTES, F-94010 Creteil, France

*Courriel de l'orateur : lyes.ait-ali-yahia@u-pec.fr

TITLE

The Bio-E-RATEs, an experimental bench for bio-aerosols emission rate measurements : an application to human respiratory particles

MOTS-CLÉS: Bioaérosols, taux d'émission, aérocontaminants/ **KEYWORDS:** Bioaerosols, emission rate, aero-contaminants.

Résumé

Le Bio-E-RATEs est un banc expérimental conçu pour la mesure du taux d'émission de bioaérosols de sources variables. Une des applications dans ce banc pour la mesure du taux d'émission de particules respiratoires humaines est présentée dans cette étude. Un protocole expérimental permettant d'isoler et de caractériser physiquement des particules émises par la respiration humaine est présenté. Dans cette étude, le suivi des cinétiques de concentration en particules générées par deux volontaires dans le Bio-E-RATEs est réalisé avec un APS (TSI 3321) et un Biotrak (TSI). Ces cinétiques ont été utilisées pour estimer le taux d'émission particulaire de chaque volontaire. Les résultats préliminaires de cette étude sont présentés dans cet article.

Abstract

The Bio-E-RATEs is an experimental bench designed for measuring the emission rate of bioaerosols from variable sources. One of the applications in this bench for the measurement of the emission rate of human respiratory particles is presented in this study. An experimental protocol allowing to isolate and physically characterize the particles emitted by human respiration is presented. In this study, the monitoring of the particle concentration kinetics generated by two volunteers in the Bio-E-RATEs is carried out with an APS (TSI 3321) and a Biotrak (TSI). These concentrations measurements were used to estimate the particulate emission rate of each volunteer. The preliminary results of this study are presented in this article.

1. Introduction

L'étude de la transmission des bioaérosols (bactéries, champignons, pollens, virus...) en environnement intérieur est un sujet croissant dans la littérature. Les activités humaines génératrices de bioaérosols sont la respiration, la parole, le chant ou la musique, l'éternuement ou la toux (Bourouiba et al., 2014; Scharfman et al., 2016). L'émission des gouttelettes, appelées exhalaisons humaines, est considérée comme une des principales voies de transmission des maladies infectieuses aéroportées en milieu intérieur. Il apparaît très important de caractériser physiquement les sources d'émission des bioaérosols, afin de pouvoir prédire leur transmission en milieu intérieur.

Parmi les nombreuses études portant sur l'émission de bioaérosols exhalés, Mahjoub et al., (2021) ont publié une revue bibliographique sur des études expérimentales pour la caractérisation des gouttelettes issues des exhalaisons humaines. Dans cette étude, l'importance de la distribution granulométrique des gouttelettes initiales dans la caractérisation du transport des aérosols a été mise en évidence. D'autres études récentes se concentrent sur la mesure du taux d'émission de bioaérosols provenant des différentes activités humaines génératrices de bioaérosols. Asadi et al., (2019, 2020) ont étudié l'impact de l'intensité de la voix ainsi que la manière de s'exprimer et d'articuler (Asadi et al., 2020) sur le taux d'émission d'aérosol de personnes qui parlent, montrant que le taux d'émission de particules augmente avec l'intensité de la voix. Alsved et al., (2020) ont mesuré le taux d'émission d'aérosols pendant le chant et la conversation de personnes installées dans une chambre expérimentale hermétique, montrant qu'une personne qui chante à voix haute génère plus de particules aéroportées qu'une personne qui chante ou qui parle à voix basse. Dans ces différentes études (Alsved et al., 2020; Asadi et al., 2019, 2020), un entonnoir adapté au visage d'une personne et connecté à un APS (Aerosol Particle sizer) a été utilisé pour collecter et mesurer la distribution de la taille des gouttelettes émises. L'utilisation d'un entonnoir permet une mesure de la distribution granulométrique des résidus secs des gouttelettes émises directement à la source. Cependant, l'entonnoir ne peut pas être utilisé dans des études expérimentales liées à d'autres activités telles que manger, pratiquer du sport ou danser.

De ce fait, à notre connaissance, il n'existe aucune méthode universelle permettant la caractérisation des émissions respiratoires humaines générées lors des activités quotidiennes en milieu intérieur (pratiquer du sport, se nourrir, danser...etc).

Pour cette étude sur les émissions respiratoires, nous utilisons notre nouveau banc expérimental Bio-E-RATEs (Bio Aerosol Emission Rates Analysis Through Experiments), destiné à la caractérisation physique des émissions de bioaérosols de source variable. Il est composé d'une chambre expérimentale à atmosphère contrôlée de taille suffisante pour permettre l'entrée d'une ou plusieurs personnes. L'évaluation du taux d'émission dans le Bio-E-RATEs est réalisée en suivant la méthode développée par Géhin et al., (2008) permettant d'obtenir les taux d'émissions moyens par analyse des cinétiques de concentration en particules (voir courbe figure 1 (b)) dans une enceinte à atmosphère contrôlée. La partie décroissante de la courbe est utilisée pour déterminer le taux d'épuration qui prend en compte le débit de ventilation et les dépôts sur la paroi interne de l'enceinte. La partie croissante de la courbe est utilisée pour calculer le taux d'émission moyen durant la génération. Cette méthode a déjà été éprouvée (Géhin et al., 2008; Ait Ali Yahia et al., 2022) et semble être applicable même si l'activité étudiée génère des aérosols de manière variable ou discontinue, ce qui est le cas des exhalaisons humaines. Dans cette étude, nous proposons une première application du Bio-E-RATEs pour la mesure des taux d'émissions de particules respiratoires humaines.

2. Le Bio-E-RATEs :

2.1. Description et dimensionnement

Le Bio-E-RATEs est constitué d'une chambre expérimentale (Securotec) comprenant 2 volumes étanches (fabriqués en PVC souple antistatique) de tailles différentes, montés sur une structure métallique (2,5m x 1,8m x 2,1m) permettant le maintien des deux volumes souples (Figure 1(a)). Les volumes sont respectivement un espace pouvant servir de SAS d'environ 1m² (1mx1m) et une pièce de vie d'une surface au sol de 4,5 m² (2,5m x 1,8m). L'ensemble est mis en surpression grâce à de l'air propre (filtre H14) généré par une pompe à débit réglable. Le volume SAS est composé de deux portes étanches qui se ferment à l'aide d'un système de fermeture à glissière. La première porte sépare le SAS de l'environnement extérieur, et la seconde porte sépare le SAS et la pièce de vie. Un bouchon ouvert est installé sur une des parois du SAS pour permettre la sortie de l'air. La sortie d'air dans l'espace de vie se fait par une ouverture circulaire dans la partie basse d'une paroi se trouvant à l'opposé de l'injection d'air propre. Cette ouverture est connectée de manière étanche à un système de filtration (filtre H14). Le caractère souple du matériau utilisé permet l'ajout sur les parois de la chambre de manchettes avec gants permettant une intervention à l'intérieur de la chambre sans y pénétrer. Le dimensionnement des paramètres opératoires ainsi qu'une caractérisation physique du banc a été réalisé préalablement (Ait Ali Yahia et al., 2022).

Dans le cadre de cette étude, la mesure en continu de la concentration en particules dans le Bio-E-RATEs est réalisée en employant conjointement un APS (TSI 3321) et un Biotrak (TSI) 9510-BD. Ce dernier est un compteur de particules « totales » (particules viables et non viables de diamètre optique compris entre 0,5 µm et 10 µm) et viables, un des rares appareils proposant de discriminer les particules totales et celles d'origine biologique dans l'atmosphère en temps réel (Harbelot et al., 2022). Ce dispositif aspire l'air ambiant avec un débit de 28 L/min et est installé à l'intérieur de la chambre expérimentale proche des gants. Un passe câble étanche installé sur une paroi permet l'alimentation électrique du Biotrak. Un autre passe câble étanche est utilisé pour connecter l'APS, installé à l'extérieur de la chambre, avec un tube de diamètre équivalent à l'entrée de l'APS. L'humidité et la température dans la salle sont mesurées en continu avec un thermohygromètre.

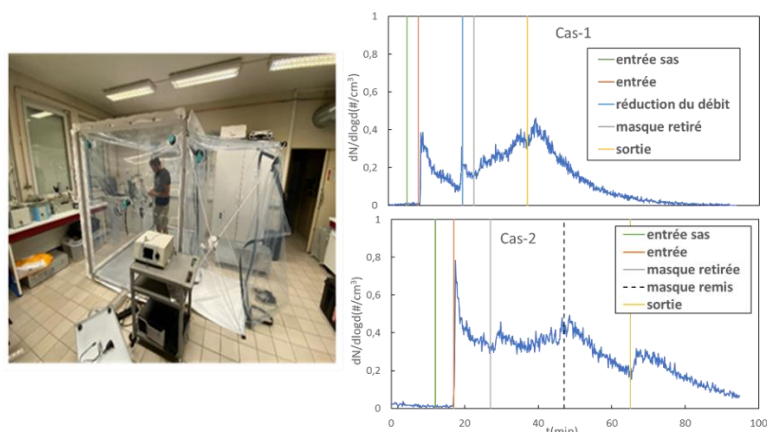


Figure 1 : (a) Image représentative du Bio-E-RATES. (b) Exemples de l'évolution dans le temps de la concentration en particules « totale » (Biotrak) dans la chambre obtenues pour une même personne sur deux journée différente suivant deux protocoles expérimentaux différents.

2.2. Protocole expérimental et résultats préliminaires

Nous proposons ici une étude préliminaire de caractérisation physique de particules émises par la respiration humaine dans le Bio-E-RATES. Le protocole expérimental est comme suit : un blanc est réalisé dans la chambre en injectant un débit de ventilation de $1,9 \times 10^3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ jusqu'à ce que la concentration mesurée à l'APS devienne nulle. Ensuite, la personne volontaire entre dans le SAS et revêt une tenue spéciale salle propre afin de minimiser les sources de contamination particulaire (issue des vêtements, de la peau ou des cheveux). Cette tenue est constituée d'une combinaison jetable avec capuche intégrée qui recouvre les cheveux, des sur-chaussures, des gants ainsi qu'un masque FFP2. Après 5 minutes dans le SAS, la personne pénètre dans la chambre et reste au centre immobile (debout ou assise) jusqu'à épuration des particules qui pénètrent dans la chambre à l'ouverture du SAS. Lorsque l'épuration est réalisée le débit dans la chambre est réduit de moitié afin de réduire le taux de dilution des particules. 5 minutes après la réduction du débit, la personne enlève son masque pendant 20 min. A partir de ce moment deux cas de figures ont été testés : dans le premier (Cas-1) la personne sort de la chambre, dans le deuxième (Cas-2) la personne remet son masque pendant 15 min avant de sortir. Une épuration de la chambre est ainsi réalisée pendant 30 min avec un débit de $0,715 \times 10^3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. Chaque cas de figure a été testé une fois par deux volontaires : un avec une corpulence importante (Volontaire-1) et un avec une corpulence moyenne (Volontaire-2). Nous présentons dans la figure 1 (b), un exemple de l'évolution dans le temps de la concentration totale mesurée avec le Biotrak dans la chambre pour les deux cas de figures, obtenue avec le Volontaire-1.

Les résultats présentés figure 1 (b) montrent que dans les deux cas de figure l'entrée dans la chambre engendre une pénétration de particules provenant du SAS. Une diminution exponentielle de la concentration est ensuite observée. Lorsque la personne retire son masque une augmentation de la concentration est observée dans le cas-1 durant toute la durée de la mesure, indiquant que la chambre se charge en particules respiratoires. Dans le Cas-2, lorsque le masque est retiré, une légère augmentation de la concentration est observée. Cette augmentation est moins importante que le Cas-1 car on est déjà sur un plateau correspondant à un équilibre entre les particules émises et celles épurées. Dans le Cas-1, lorsque la personne sort de la chambre une diminution exponentielle de la concentration est observée. Cette même diminution est obtenue dans le Cas-2 lorsque la personne remet son masque, et reprend lorsque la personne est sortie de la chambre. Dans les deux cas on observe une légère augmentation de la concentration lors de la sortie de la chambre, en raison de l'ouverture de la porte du SAS.

Tableau-1 : Tableau récapitulatif des valeurs des taux d'épurations et d'émission moyen en particules ($0,5 \mu\text{m} < d_{\text{optique}} < 5 \mu\text{m}$) obtenues dans cette étude

		Volontaire-1 (HR 55%)		Volontaire-2 (HR 45%)	
Evènement		Cas-1	Cas-2	Cas-1	Cas-2
$k(\times 10^{-3}) (\text{s}^{-1})$ Pour $d_{\text{optique}}=0,5\mu\text{m}$	Entrée avec masque	0,68	0,78	0,51	1,43
	Masque remis		0,44		0,95
	Sortie	1,09	1,14	1,75	0,90
$q_{\text{tot}} (\text{part} \cdot \text{s}^{-1})$	Entrée	2800	3180	850	1860

La méthode développée par Géhin et al., (2008) a été utilisée pour estimer deux taux d'épuration moyen sur 5 gammes de tailles entre 0,5 μm et 5 μm : un taux obtenu avec présence de la personne masquée et un taux obtenu lorsque la personne sort de la chambre. Ces taux sont obtenus en réalisant un fit exponentiel pour chaque classe de taille sur les courbes décroissantes et sont présentés dans le tableau 1. Ces taux d'épurations ont été utilisés pour estimer des taux d'émissions moyen q_{tot} obtenus en sommant les taux d'émission obtenus pour chaque gamme de tailles considérée.

Les résultats présentés dans le tableau-1 montrent des valeurs similaires des taux d'émissions obtenu avec le volontaire-1 sur deux journées différentes (3050 particules.s⁻¹ en moyenne). Pour le volontaire-2, une variation est observée entre les taux d'émissions obtenus sur deux journées différentes. On observe aussi que le volontaire-1 émet plus de particules que le volontaire-2 (1260 particules.s⁻¹ en moyenne) ce qui peut s'expliquer par la différence de corpulence entre les deux personnes. Les valeurs du taux d'émission obtenus dans cette étude sont en bon accord avec les valeurs proposées par Alsved et al., (2020). Il faut noter que dans le cadre de cette étude, la fréquence respiratoire des volontaires n'a pas été normalisée.

Conclusion et perspectives :

Dans cette étude nous avons utilisé le Bio-E-RATEs pour la mesure du taux d'émission d'aérosols respiratoires. Dans ce banc, la mesure du taux d'émission se fait en suivant la méthode développée par Géhin et al., (2008). Cette méthode permet d'obtenir les taux d'émissions moyens par analyse des cinétiques de concentration en particules dans une enceinte propre à atmosphère contrôlée. Nous avons proposé dans cette étude un protocole expérimental permettant d'isoler et de caractériser les émissions respiratoires humaines. Ce protocole a permis une mesure de la concentration en particules respiratoires émises dans la chambre expérimentale par deux volontaires. Les mesures de la concentration ont été réalisées avec un APS et un Biotrak. Une estimation des taux d'émissions obtenus avec ces deux personnes a été réalisée. Les résultats obtenus dans cette étude montrent que le Bio-E-RATEs permet d'isoler et de caractériser des émissions respiratoires humaines. Des améliorations du protocole expérimental sont en cours afin d'éliminer les particules qui pénètrent dans la chambre lors de l'ouverture de la porte du SAS. Des mesures étendues sur un nombre de volontaires plus important seront aussi réalisées.

Références :

- Adams, R. I., Bhangar, S., Pasut, W., Arens, E. A., Taylor, J. W., Lindow, S. E., Nazaroff, W. W., & Bruns, T. D. (2015). Chamber Bioaerosol Study: Outdoor Air and Human Occupants as Sources of Indoor Airborne Microbes. *PLOS ONE*, 10(5), e0128022. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128022>
- Ait Ali Yahia, L., JEAUX, H., & Géhin, E. (2022). *Development and calibration of the mini-E-RATEs (Emission Rates Analysis Through Experiments): An experimental bench for bio-aerosols emission rate measurements*. International Aerosols Conference (IAC2022), Athens.
- Alsved, M., Matamis, A., Bohlin, R., Richter, M., Bengtsson, P.-E., Fraenkel, C.-J., Medstrand, P., & Löndahl, J. (2020). Exhaled respiratory particles during singing and talking. *Aerosol Science and Technology*, 54(11), 1245–1248. <https://doi.org/10.1080/02786826.2020.1812502>
- Asadi, S., Wexler, A. S., Cappa, C. D., Barreda, S., Bouvier, N. M., & Ristenpart, W. D. (2019). Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Scientific Reports*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38808-z>
- Asadi, S., Wexler, A. S., Cappa, C. D., Barreda, S., Bouvier, N. M., & Ristenpart, W. D. (2020). Effect of voicing and articulation manner on aerosol particle emission during human speech. *PLOS ONE*, 15(1), e0227699. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227699>
- Bourouiba, L., Dehandschoewercker, E., & Bush, J. W. M. (2014). Violent expiratory events: On coughing and sneezing. *Journal of Fluid Mechanics*, 745, 537–563. <https://doi.org/10.1017/jfm.2014.88>
- Colbeck, I., & Whitby, C. (2019). Biological Particles in the Indoor Environment. In *Indoor Air Pollution* (pp. 127–157). <https://doi.org/10.1039/9781788016179-00127>
- Géhin, E., Ramalho, O., & Kirchner, S. (2008). Size distribution and emission rate measurement of fine and ultrafine particle from indoor human activities. *Atmospheric Environment*, 42(35), 8341–8352. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.021>
- Harbelot, I., Ait-Ali-Yahia, L., Gehin, E. (2022) Measures of bioaerosols in classrooms with a Biotrak particle counter, CFA 2022.
- Mahjoub Mohammed Merghani, K., Sagot, B., Gehin, E., Da, G., & Motzkus, C. (2021). A review on the applied techniques of exhaled airflow and droplets characterization. *Indoor Air*, 31(1), 7–25. <https://doi.org/10.1111/ina.12770>
- Scharfman, B. E., Techet, A. H., Bush, J. W. M., & Bourouiba, L. (2016). Visualization of sneeze ejecta: Steps of fluid fragmentation leading to respiratory droplets. *Experiments in Fluids*, 57(2), 24. <https://doi.org/10.1007/s00348-015-2078-4>