

UNE REVUE SUR LES TECHNIQUES DE CARACTERISATION DES EMISSIONS OROPHARYNGEES

K. Mahjoub Mohammed Merghani¹, B. Sagot², E. Géhin¹, and C. Motzkus³

¹Univ Paris Est Creteil, CERTES, F-94000 Creteil, France

²ESTACA, 12 Avenue Paul Delouvrier, 78180 Montigny-le-Bretonneux, France

³CSTB, 84 Avenue Jean Jaurès, Champs-sur-Marne, 77447 Marne-la-Vallée Cedex 2, France

*Courriel de l'orateur : khansa.mahjoub-mohammed-merghani@u-pec.fr

TITLE

A review on the measurement techniques of respiratory emissions

RESUME

Cet article présente une revue bibliographique des techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation des gouttelettes générées lors des différentes activités respiratoires. Ces techniques sont classées en deux catégories : les techniques intrusives et les techniques non intrusives. L'impact du choix de la métrologie sur les paramètres mesurés sera discuté.

ABSTRACT

This article is a review on the experimental techniques used for the characterization of the exhaled droplets generated during different respiratory activities. In this study, these techniques are classified into two categories; intrusive and non-intrusive techniques. The impact of the choice of these measurement techniques on the measured parameters will be discussed.

MOTS-CLES : techniques de mesure, gouttelettes respiratoires, résidus secs, caractérisation des gouttelettes.

KEYWORDS: measurement techniques, respiratory droplets, dry residues, droplet characterization.

1. INTRODUCTION

Les études sur les caractéristiques des gouttelettes expirées se concentrent principalement sur la détermination de la taille initiale (à la sortie de la bouche, ou du nez) des gouttelettes qui est un paramètre déterminant : elles peuvent se déposer sur une surface ou rester en suspension dans l'air puis être dispersées sous forme de résidus secs. La taille des gouttelettes est également associée à la probabilité qu'elles soient porteuses d'agents pathogènes. Les gouttelettes respiratoires sont formées par la force de cisaillement provoquée par le passage du flux d'air dans les voies respiratoires lors de la toux, des éternuements, de la respiration, de la parole, du chant ou de la pratique d'instruments à vent. La taille et la composition de ces gouttelettes varient en fonction de leur origine dans les voies respiratoires (Johnson *et al.*, 2011). Après émission, les gouttelettes passent par un processus d'évaporation très rapide et se transforment en résidus secs. Ces derniers sont principalement composés de sel (NaCl) et de composants organiques (protéine, glycoprotéine, ions organiques). La Figure 1 montre ce processus d'évaporation des gouttelette oropharyngées.

Dans notre étude, toutes les techniques de mesure impliquant l'extraction/collecte d'un flux d'air échantillonné avec des particules sont appelées techniques intrusives. Les mesures non intrusives sont effectuées directement dans le flux d'air sans échantillonnage.

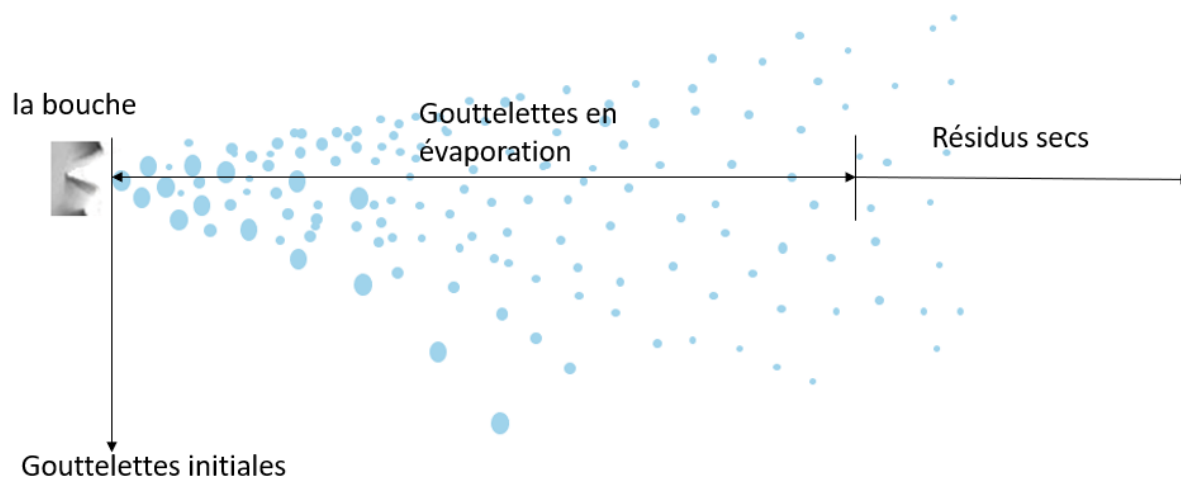


Figure 1. Évaporation des gouttelette oropharyngées

2. LES TECHNIQUES INTRUSIVE

Les premières études se sont appuyées sur la collecte sur substrat pour quantifier la distribution en taille des gouttelettes expulsées lors de la toux, de l'éternuement, de la respiration et de la parole. Il faut pour cela établir une corrélation entre le diamètre des taches observées au microscope et résultant de l'évaporation des gouttelettes déposées sur une surface et le diamètre initial de ces gouttelettes. Duguid (1946) a développé une procédure de calibration pour déterminer le diamètre des gouttelettes initiales, et a pu étudier la distribution en taille des gouttelettes initiales produites pendant la parole, l'éternuement et la toux en utilisant des plaques d'impact placées devant la bouche des sujets, à respectivement 7.6 cm et 15 cm dans les cas de la parole et de la toux/éternuement. Pour une meilleure visualisation des gouttelettes, Duguid a appliqué du colorant sur les surfaces de la bouche des sujets. La gamme observée de taille des gouttelettes initiales est comprise entre 5 μm et 2000 μm , et Duguid estime probable que les gouttelettes d'un diamètre inférieur à 5 μm s'évaporent rapidement ou soient entraînées par le flux d'air autour de la plaque d'impact. Pour pouvoir recueillir toutes les émissions, Loudon et Roberts (1967) ont placé la bouche du sujet devant une ouverture dans la paroi d'une boîte rectangulaire (37 cm x 50 cm x 30 cm), afin de mesurer les taches sur toutes les parois de la boîte. Des boîtes similaires ont été utilisées par Xie *et al.* (2009) pour mesurer la taille des gouttelettes produites pendant la toux et la parole. Pour éviter d'utiliser un colorant, dont ils ont observé qu'il entraîne une augmentation de la génération de gouttelettes, Xie *et al.* ont utilisé du papier sensible qui change de couleur lorsqu'il entre en contact avec l'eau.

Les compteurs optiques de particules (COP) permettent de déterminer le diamètre optique équivalent d'une particule, par la quantification de la lumière diffusée par celle-ci lorsqu'elle traverse un volume de mesure éclairé par un faisceau lumineux. L'air est extrait de la zone de respiration du sujet à travers un embout buccal qui est un dispositif de collecte qui délivre l'air expiré de la bouche du sujet à l'entrée du COP. Les COP sont utilisés pour mesurer la taille et la concentration en nombre des particules (Wurie *et al.* 2013, 2016) dans la gamme de taille 0,3 μm - 20 μm . Dans ce type de mesure du COP, il y a généralement un temps de résidence entre le point de collecte et la cellule de mesure (Papineni *et al.*, 1997) pendant lequel l'évaporation et/ou la condensation peuvent se produire. L'un des avantages de cette technique extractive est qu'elle permet d'effectuer des mesures parallèles en utilisant d'autres techniques telles que les impacteurs ou les filtres.

L'APS (Aerodynamic Particle Sizer) évalue le diamètre aérodynamique de particules par la mesure du temps de vol d'une particule accélérée dans un écoulement. Le temps de vol est le temps entre deux impulsions de lumière diffusées par la particule lorsqu'elle passe à travers deux faisceaux de lumière et dépend de la capacité de la particule à s'accélérer, ce qui permet d'estimer le diamètre aérodynamique de la particule. La particule accélérée est donc soumise à une différence de température avec un coefficient de transfert de chaleur par convection élevé, ce qui produit généralement une évaporation des particules volatiles. Par conséquent, l'APS est adaptée à l'analyse des résidus secs de gouttelettes respiratoires après leur évaporation. La gamme de taille typique des APS (TSI) utilisés pour la caractérisation des particules est de 0,5 μm - 20 μm . Pour garantir que seulement l'air expiré par le sujet est échantillonné on utilise soit un embout buccal pour collecter et transporter les particules de la bouche/du nez du sujet à l'entrée de APS (Asadi *et al.* 2019), soit le sujet est placé dans un environnement propre (Morawska *et al.* 2009). En outre, d'autres instruments de mesure sont moins fréquemment utilisés pour mesurer uniquement les particules fines comme le ELPI -0,007 μm 10 μm - (Hersen *et al.*, 2008) et le SMPS -0,02 μm à 0,6 μm - (Yang *et al.*, 2007).

3. LES TECHNIQUES NON-INTRUSIVE

Les techniques de mesure non intrusives ont été développées au cours des deux dernières décennies pour estimer la distribution de la taille des gouttelettes expirées et/ou étudier leur dispersion. L'utilisation d'une technique non intrusive permet de s'affranchir de phénomènes physiques tels que l'évaporation et la condensation pendant le processus d'échantillonnage. Cela rend ces techniques non intrusives particulièrement adaptées à la mesure de la distribution initiale de la taille des gouttelettes et à l'étude du processus d'évaporation. De plus, certaines techniques non intrusives sont utilisées pour mesurer la vitesse et la taille des gouttelettes, et ce à différentes positions dans le jet expiré.

La photographie à haute vitesse est une technique qui est utilisée par Nishimura *et al.* (2013) pour capturer le mouvement des gouttelettes expulsées lors d'une toux ou d'un éternuement. Ils ont développé une technique de traitement d'images proche d'une analyse PIV, pour construire les champs de vitesse des gouttelettes expulsées. Grâce à cette technique, ils ont constaté que la vitesse moyenne initiale des gouttelettes de toux de deux sujets était de 5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ et de 6 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans le cas d'éternuement. Bourouiba *et al.* (2014) ont utilisé la photographie à haute vitesse pour produire une image de la trajectoire des gouttelettes, montrant que les grosses gouttelettes suivent une trajectoire balistique en fonction de leur taille tandis que les petites gouttelettes suivent le flux d'air turbulent.

Pour caractériser la distribution en taille et la concentration des gouttelettes expirées pendant la toux et la parole, Chao *et al.* (2009) ont développé un dispositif basé sur l'interférométrie, Interferometric Mie Imaging (IMI). Cette technique IMI s'appuie sur l'analyse d'images défocalisées des gouttelettes, obtenues en utilisant la combinaison d'une caméra à haute vitesse et d'une nappe laser. Le diamètre géométrique des gouttelettes est obtenu à partir de la fréquence spatiale des réseaux de franges dans l'image. Chao *et al.* ont constaté que

les diamètres géométriques moyens des gouttelettes initiales pour la toux et la parole sont respectivement de 13,5 μm et 16,0 μm , après avoir estimé l'évaporation en mesurant les gouttelettes à 1 cm et à 6 cm de la bouche.

Le granulomètre à diffraction laser est une autre technique de mesure non intrusive, dans laquelle un faisceau laser est utilisé pour éclairer le volume de mesure qui peut contenir plusieurs gouttelettes, et la variation angulaire de l'intensité de la lumière diffusée est liée au diamètre des gouttelettes. Zayas *et al.* (2012) ont étudié la distribution de taille et la concentration des gouttelettes générées lors de la toux de 54 sujets sains à 17 cm de la bouche. Il faut noter que cette distance entre la bouche du sujet et le point de mesure permet un processus d'évaporation qui a probablement un impact sur la mesure, justifiant que 97% des particules mesurées soient submicroniques. Avec la même technique d'analyse, l'étude de Han *et al.* (2013) s'intéresse à la distribution granulométrique des gouttelettes émises lors de l'éternuement à une distance de 5 cm de la bouche, avec un diamètre géométrique moyen évalué à 360 μm .

L'holographie numérique DIH (Digital Inline Holography) est une technique basée sur l'enregistrement d'images holographiques à l'aide d'un appareil photo numérique, qui permettent la reconstruction numérique des images. Shao *et al.* (2020) ont utilisé cette technique, limitée dans leur étude à une gamme de 0,5 μm à 50 μm . Shao *et al.* (2020) ont observé qu'en plus des gouttelettes sphériques, des formes de particules irrégulières apparaissaient également sur les images DIH. Cela signifie que les gouttelettes et des particules non sphériques coexistent dans cette plage de détection et à une distance de 1,5 cm. En définissant un seuil de sphéricité, les auteurs ont estimé que à cette distance, 33% des particules émises ne sont pas des gouttelettes.

4. CONCLUSION

Certaines techniques de mesure impliquent l'échantillonnage et le déplacement des gouttelettes du point d'échantillonnage au lieu de mesure. Au cours de ce transfert, les mécanismes d'évaporation et/ou de dépôt des gouttelettes peuvent induire un changement de la granulométrie mesurée. Ainsi, ces techniques sont bien adaptées pour mesurer la taille des résidus secs après l'évaporation complète des gouttelettes, mais elles peuvent également être utilisées pour prédire la distribution initiale de la taille des gouttelettes en appliquant un processus de calibrage ou un modèle d'évaporation. D'autre part, les techniques non intrusives permettent de mesurer directement la taille des gouttelettes initiales ainsi que les gouttelettes en évaporation à différents endroits du flux du jet expiré, ce qui permet d'évaluer l'évaporation et la dispersion des gouttelettes. Cependant, le volume de mesure des techniques non intrusives examinées est relativement faible par rapport au volume total émis, ce qui rend difficile l'estimation du taux d'émission total.

Asadi S, Wexler AS, Cappa CD, Barreda S, Bouvier NM, Ristenpart WD. (2019) Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Scientific Reports*.

Bourouiba L, Dehandschoewercker E, Bush JWM. (2014) Violent expiratory events: on coughing and sneezing. *J Fluid Mech*.

Chao CYH, Wan MP, Morawska L. (2009) Characterization of expiration air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening. *Journal of Aerosol Science* 40.

Duguid JP. (1946) The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei. *Journal of Hygiene*.

Han ZY, Weng WG, Huang QY. (2013) Characterizations of particle size distribution of the droplets exhaled by sneeze. *Journal of The Royal Society Interface*.

Hersen G, Moularat S, Robine E, et al. (2008) Impact of Health on Particle Size of Exhaled Respiratory Aerosols: Case-control Study. *CLEAN - Soil Air Water*.

Johnson GR, Morawska L, Ristovski ZD (2011) Modality of human expired aerosol size distributions. *Journal of Aerosol Science*

Loudon RG, Roberts RM. (1967) Droplet Expulsion from the Respiratory TRACT. *American Review of Respiratory Disease*.

Morawska L, Johnson GR, Ristovski ZD, et al. (2009) Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities. *Journal of Aerosol Science*. 2009;40:256–269.

Nishimura H, Sakata S, Kaga A. (2013) A New Methodology for Studying Dynamics of Aerosol Particles in Sneeze and Cough Using a Digital High-Vision, High-Speed Video System and Vector Analyses. Harrod K, ed. *PLoS ONE*.

Papineni RS, Rosenthal FS. (1997) The Size Distribution of Droplets in the Exhaled Breath of Healthy Human Subjects. *Journal of Aerosol Medicine*.

Shao S, Zhou D, He R, (2020) Risk assessment of airborne transmission of COVID-19 by asymptomatic individuals under different practical settings.

Wurie F, Le Polain de Waroux O, Brande M, et al. (2013) Characteristics of exhaled particle production in healthy volunteers: possible implications for infectious disease transmission. *F1000Research*. 2:14.

Wurie FB, Lawn SD, Booth H, Sonnenberg P, Hayward AC. (2016) Bioaerosol production by patients with tuberculosis during normal tidal breathing: implications for transmission risk. *Thorax*. 71:549–554.

Xie X, Li Y, Sun H, Liu L. (2009) Exhaled droplets due to talking and coughing. *J R Soc Interface*.

Yang S, Lee GWM, Chen C-M, Wu C-C, Yu K-P. (2007) The Size and Concentration of Droplets Generated by Coughing in Human Subjects. *J Aerosol Med*.

Zayas G, Chiang MC, Wong E, (2012) Cough aerosol in healthy participants: fundamental knowledge to optimize droplet-spread infectious respiratory disease management. *BMC Pulmonary Medicine*. 2012;12