

MODELE EXPERIMENTAL DE LA TOUX – PROJET COVID-SPRAY

M. Messan¹, R. Bourlet de la Vallée¹, F. Lespinasse², J.B. Blaisot² et M.C. Renoult^{*2}

¹INSA Rouen Normandie, 76800, Saint-Etienne-du-Rouvray, France

²CNRS UMR 6614 CORIA, 76800, Saint-Etienne-du-Rouvray, France

*Courriel de l'orateur : renoulm@coria.fr

TITLE

EXPERIMENTAL MODEL OF COUGHING – COVID-SPRAY PROJECT

RESUME

Cet article présente une étude sur la modélisation expérimentale de la phase expiratoire d'un phénomène de toux. Les expériences ont été réalisées à partir d'un fluide viscoélastique synthétisé. Le champ de vitesses du spray de gouttelettes expulsées lors de l'expérience de toux a été caractérisé par vélocimétrie par images de particules (PIV). L'influence de différents paramètres expérimentaux a également été étudiée. Les résultats montrent une évolution au cours de la toux de la morphologie du spray passant d'un front laminaire à un écoulement tourbillonnaire. L'ordre de grandeur des vitesses moyennées obtenues concorde avec certaines études précédentes, notamment celle de Zhu *et al* (2005).

ABSTRACT

This article presents a study on the experimental modelling of the expiratory phase of coughing. The experiments were carried out using a synthesized viscoelastic fluid. The velocity field of the spray of droplets expelled during the coughing experiment was characterized by Particle Image Velocimetry (PIV). The influence of several experimental parameters was also studied. The results show an evolution during the cough of the spray morphology from a laminar front to a vortex flow. The order of magnitude of the obtained averaged velocities agrees with previous studies including that of Zhu *et al* (2005).

MOTS-CLÉS : aérosol, Covid-19, dispositif expérimental / **KEYWORDS**: aerosol, Covid-19, experimental set-up

1. INTRODUCTION

Ce projet a été pensé à une période où les données disponibles indiquaient une transmission du Covid-19 essentiellement par voie aérienne, par le biais de gouttelettes expiratoires. Pour autant, le mécanisme de formation et d'expulsion des gouttelettes lors d'un évènement expiratoire n'est toujours pas bien compris. Des études ont été entreprises à ce sujet, mais la plupart d'entre elles sont basées sur des simulations numériques et il existe donc peu de données expérimentales.

Les précédents travaux expérimentaux concernent la visualisation et la mesure des caractéristiques de sprays de fluide muco-salivaire lors d'évènements expiratoires, essentiellement la toux, l'éternuement et la parole, issus d'individus sains (Zhu *et al*, 2005 ; Xie *et al*, 2009 ; Han *et al*, 2013 ; Nishimura *et al*, 2013 ; Bourouiba *et al*, 2014 ; Abkarian et Stone, 2020). Le lecteur pourra aussi consulter les revues bibliographiques du CFA 2021 de Merghani *et al* (2021) et de Cottier *et al* (2021), respectivement, sur les techniques de caractérisation et sur l'évolution des émissions oropharyngées. Les données recueillies par Zhu *et al* (2005) et Han *et al* (2013) permettent de connaître un premier ordre de grandeur des vitesses atteintes en sortie de bouche dans le cas d'une toux. La morphologie du nuage de gouttelettes a, quant à elle, été déterminée par Nishimura *et al* (2013) et Bourouiba *et al* (2014). Dans ce projet, nous avons cherché à reproduire expérimentalement le phénomène de toux, plus particulièrement sa phase expiratoire, à l'aide d'un dispositif expérimental modélisant les voies respiratoires, les fluides en présence et le mécanisme de toux.

Dans cette synthèse, nous rapportons la conception et la réalisation du modèle expérimental de toux, ainsi que le protocole de l'expérience de toux avant de présenter les résultats et les perspectives de ce projet.

2. CONCEPTION ET REALISATION DU MODELE EXPERIMENTAL

2.1. Modèle anatomique

Notre modèle expérimental de toux est basé sur des hypothèses simplificatrices formulées pour certaines à la suite de discussions avec des pneumologues et pour d'autres pour des raisons de faisabilité technique.

Le phénomène de toux est assimilé à un mécanisme à trois phases : inspiration, compression et expiration. Seule la phase expiratoire a été modélisée pour mieux comprendre l'expulsion des gouttelettes et leur comportement en sortie de bouche.

Dans la phase expiratoire, du liquide (mucus) est expulsé du poumon vers la bouche (qui contient de la salive) en passant par la trachée, le larynx et le pharynx, sous l'effet d'un flux d'air et sous une forme atomisée (gouttelettes). Les différents organes mis en jeu ont été modélisés en se basant sur les caractéristiques

anatomiques d'un homme sain d'âge moyen. Plusieurs simplifications anatomiques ont été réalisées pour aboutir au modèle final. Celles-ci sont décrites en figure 1.

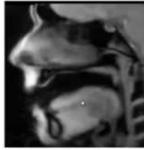
Organes	Visualisation anatomique	Modélisation sous Catia	Modèle expérimental	Hypothèses	Dimensions caractéristiques
La bouche et la cavité orale				Bouche : ouverture de forme conique Cavité orale : diamètre constant	Diamètre final de l'ouverture : 5.6 cm
Le larynx et le pharynx				Forme simplifiée et diamètre constant	Diamètre : 2.5 cm Longueur : 10 cm
La trachée				Forme simplifiée et diamètre constant	Diamètre : 3 cm Longueur : 12 cm
Les poumons				Un seul réservoir pour deux poumons	Volume : 3 L

Figure 1 : Modélisation des organes mis en jeu lors de la toux.

2.2. Modèle des gouttelettes de mucus

Lors de la toux, du mucus se détache des bronches et est expulsé sous forme de fines gouttelettes. Le mucus est un fluide viscoélastique ayant des caractéristiques de viscosité de l'ordre de $0,1$ à $4 Pa \cdot s$ (Jory *et al*, 2019) et une masse volumique de l'ordre de 1001 à $1013 kg/m^3$ (Lafforgue *et al*, 2017). Afin de s'approcher du mucus, une solution de polymères a été réalisée à partir de deux polymères, le Poly Ethylène Glycol (PEG) de masse molaire $20 kg/mol$ et le Poly Oxyde d'Ethylène (PEO) de masse molaire $6000 kg/mol$, d'isopropanol (ISO) et d'eau. Le PEG est utilisé pour sa viscosité et le PEO pour son élasticité. Un ensemble de solutions avec différentes fractions massiques de ces composants a été caractérisé afin de déterminer un modèle de mucus. La solution finale, composée de PEG 25%, PEO 100 ppm, ISO 5% a été introduite dans un ensemencement pour produire des fines gouttelettes de mucus lors de la toux.

2.3. Modèle de la toux

La toux est générée grâce à un jeu de trois vannes (cf. figure 2), actionnées de manière coordonnée, afin de mouiller les voies respiratoires par la phase liquide à l'aide de l'ensemencement, de mettre sous pression le réservoir jouant le rôle des poumons et enfin d'expulser la phase liquide par l'action de l'air sous pression. Le protocole expérimental est le suivant. Dans un premier temps, de fines gouttelettes de liquide sont ensemencées dans les voies respiratoires (poumon, gorge et bouche). Les vannes V_e , reliant l'ensemencement à la cuve, et V_b , reliant la cuve à la bouche, sont alors ouvertes tandis que la vanne V_p , permettant de pressuriser la cuve, reste fermée. Puis, la séquence de toux est déclenchée : la vanne V_b se ferme suivie de la vanne V_e . La vanne V_p s'ouvre pour pressuriser la cuve à une pression régulée en amont à l'aide d'un détendeur. Une fois cette pression atteinte la vanne se ferme. Enfin, la vanne V_b s'ouvre ce qui permet d'expulser le nuage de gouttelettes par la bouche.

Un dispositif électronique a été conçu afin de piloter les vannes et de réaliser le protocole de toux de manière automatique. Le dispositif est composé d'une carte Arduino pour alimenter les électrovannes sous $24 V$ par l'intermédiaire d'interrupteurs de type Mosfets, en fonction des signaux reçus. Un interrupteur a également été ajouté à ce dispositif pour réaliser le contrôle des électrovannes à distance.

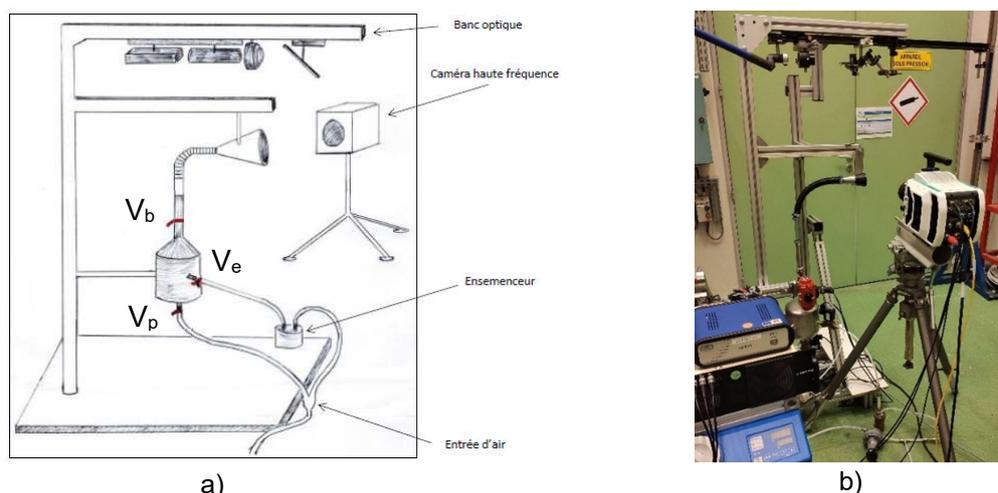


Figure 2 : Dispositif expérimental a) schéma descriptif b) vue globale du montage expérimental.

2.4. Conditions expérimentales

Les expériences ont été réalisées dans des conditions de température ambiante. Lors du phénomène de toux, la cuve est soumise à une surpression de $\Delta P=0,25$ bar correspondant à la suppression habituelle dans le corps humain lors de la phase de compression de la toux. Nous avons choisi de faire varier certains paramètres contrôlés via la synchronisation des électrovannes, à savoir le temps entre la fermeture des vannes V_b et V_e , correspondant à la durée d'ensemencement de la cuve t_e (1 ; 3 s) et le temps entre la fermeture de la vanne V_p et l'ouverture de la vanne V_b , correspondant à la période de relaxation après la mise sous pression de la cuve t_r (0,5 ; 0,1 ; 5 s). Nous avons également fait varier la pression de régularisation en amont de la cuve pour la fixer à une surpression de $\Delta P=0,5$ bar.

2.5. Technique de visualisation

Une étude du champ de vitesses du spray expulsé lors de l'expérience de toux a été réalisée par mesure PIV. Pour cela, le dispositif expérimental est composé d'une caméra haute cadence Phantom V2010 équipée d'un objectif Nikkor 105 mm f/2, d'un laser Nd:YAG haute énergie Photonics DM60-532-DH doublé à 532 nm ainsi qu'une unité de synchronisation LaVision PTU X. L'acquisition et le traitement PIV a été réalisé via le logiciel LaVision DaVis 10. Les acquisitions de champs ont été faites à une cadence de 11,3 kHz avec un temps inter-pulse de 80 μ s. La résolution spatiale des images est de 9,5 pixels/mm. Concernant les paramètres PIV, la taille finale des fenêtres d'intercorrélation utilisée est de 16x16 pix^2 avec un recouvrement de 75 %.

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.1. Morphologie du spray

Les prises de vue à la sortie de la bouche, lors des expériences de toux, montrent que le phénomène d'expulsion des gouttelettes est initialement caractérisé par un front laminaire qui évolue au cours du temps en un écoulement tourbillonnaire asymétrique. La figure 3 illustre l'évolution temporelle de la morphologie du spray de mucus dans les conditions de référence ($\Delta P=0,25$ bar, $t_e=1$ s ; $t_r=0,5$ s).

3.2. Mesures de vitesse

Les mesures PIV résolues en temps permettent de déterminer l'évolution temporelle du champ de vitesses du spray liquide. A partir de ces champs de vitesses, trois fenêtres d'analyses sont positionnées et une vitesse moyennée spatialement est déterminée dans chacune d'elle. Ces fenêtres, d'une taille de 2.5 mm par 60 mm, sont situées à la sortie immédiate de la bouche (d_0), à une distance de 25 mm (d_{25}) et à une distance de 55 mm (d_{55}). L'évolution temporelle de ces vitesses moyennées est tracée sur la figure 4. A la sortie immédiate de la bouche, la vitesse moyennée croît jusqu'à un premier maximum qui signe l'apparition des premiers tourbillons, puis évolue de manière oscillante autour d'une valeur proche de 1,5 m/s. A mesure que l'on s'éloigne de la bouche, l'évolution de la vitesse moyenne est plus fluctuante et sa valeur est légèrement plus faible.

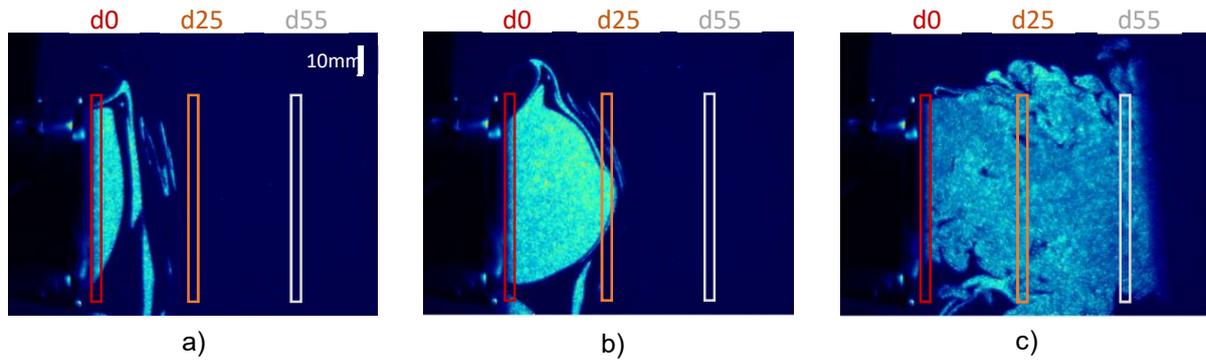


Figure 3 : Morphologies du spray pour les conditions de référence ($\Delta P=0,25$ bar, $t_e=1$ s ; $t_r=0,5$ s) à trois instants différents de la toux a) 0,02 s b) 0,027 s c) 0,122 s. Le temps zéro correspond au moment d'apparition des premières gouttelettes en sortie de bouche.

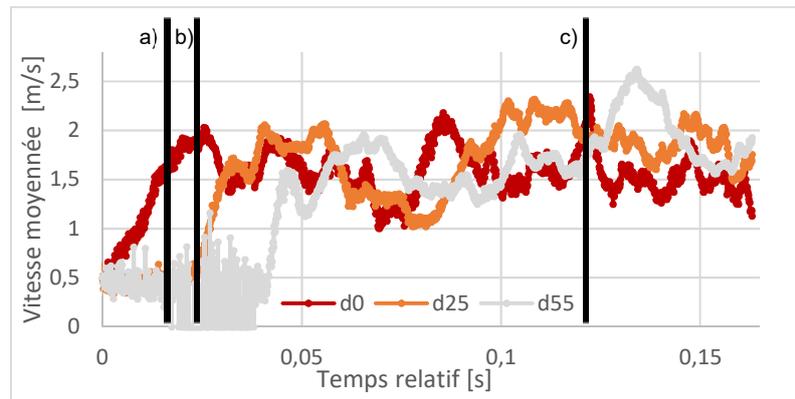


Figure 4 : Evolution temporelle des vitesses moyennées spatialement dans les fenêtres d'analyses définies en figure 3. Les traits verticaux font références aux 3 instants considérés en figure 3.

L'influence des trois paramètres, t_e , t_r et ΔP a été étudiée sur les vitesses moyennées. En ce qui concerne t_e et t_r les allures sont semblables. En revanche, un ΔP plus important de 0,25 bar crée une augmentation globale de la vitesse moyenne de 0,5 m/s.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis de montrer la simulation expérimentale d'un phénomène de toux. Les résultats obtenus et ceux des précédentes expériences concordent en ce qui concerne l'ordre de grandeur de la vitesse de propagation des gouttelettes en sortie de bouche. Cependant ces résultats restent encore assez qualitatifs et nécessitent une recherche plus poussée sur certains paramètres et sur certaines conditions d'expérience. Il est prévu dans la suite de cette étude de mettre en place une thermalisation du dispositif afin de maintenir le fluide à une température proche de celle du corps humain et de modifier le pilotage des électrovannes afin de pouvoir générer une quinte de toux. Un intérêt plus profond sera porté sur la modélisation de la position de la phase liquide dans les voies respiratoires et de sa dynamique lors d'une toux.

RÉFÉRENCES

- Abkarian, M. and Stone, H.A. (2020) *Physical Review Fluids* 5, 102301.
 Bourouiba, L., Dehandschoewercker, E. and Bush, J.W.M. (2014) *J. Fluid Mech.*, 745, 537-563.
 Cottier, L. (2021) CFA 2021.
 Han, Z.Y., Weng, W.G. and Huang Q.Y. (2013) *J R Soc Interface* 10, 20130560.
 Jory, M. (2019) Thèse de doctorat. Université de Montpellier.
 Lafforgue, O., Bouguerra, N., Poncet, S., Seyssiecq, I., Favier, J. and Elkoun, S. (2017) *Journal of biomedical materials research A* 105A (11), 3025-3033.
 Merghani, K.M.M., Sagot B., Gehin E. and Motzkus, C. (2021) CFA 2021.
 Nishimura, H., Sakata, S. and Kaga, A. (2013) *PLoS One* 8(11), e80244.
 Xie, X., Li, Y., Sun, H. and Liu, L. (2009) *J. R. Soc. Interface* 6, S703-S714.
 Zhu, S., Kato, S. and Yang, J.-H. (2005) *Building and Environment* 41, 1691-170