

SUIVI 3D DE PARTICULES AU MOMENT DE LEUR REMISE EN SUSPENSION DEPUIS LA PAROI D'UNE CONDUITE DE VENTILATION PAR UN ÉCOULEMENT D'AIR ACCÉLÉRÉ

M. Baptiste^{*1,2}, F. Theron², L. Fiabane¹, L. Blondel¹, P. Georgeault¹, G. Nesen¹, D. Heitz¹, L. Le Coq²

¹INRAE, OPAALE, F-35044, Rennes, France

²IMT Atlantique, CNRS, GEPEA, F-44307, Nantes, France

*Courriel de l'orateur : melanie.baptiste@imt-atlantique.fr

TITLE

3D tracking of particles at the moment of resuspension from the wall of a ventilation duct by an accelerated airflow

RESUME

La remise en suspension de microparticules de verre est étudiée expérimentalement par PTV (Particle Tracking Velocimetry). Cette méthode permet la reconstruction de la trajectoire des particules au moment de leur décollement de la paroi sur laquelle elles sont initialement déposées. L'acquisition simultanée des paramètres de l'écoulement au voisinage des particules permet d'établir un lien entre structures de l'écoulement et comportement des particules. Le traitement PTV de particules permet notamment d'obtenir des informations sur la vitesse et l'accélération des particules au moment de leur décollage permettant ainsi de déterminer le type de décollage de la particule.

ABSTRACT

Particle Tracking Velocimetry is used to study the resuspension of glass microparticles. This method provides the trajectories of the particles when they detached from the surface they are initially at rest on. Simultaneous acquisition of the properties of the flow in the surrounding of the particles deposit enables a correlation between the behavior of the particles and the properties of the flow. PTV gives information about velocity and acceleration of the particles at the moment of their detachment which enables to determine the type of detachment.

MOTS-CLÉS : remise en suspension, microparticule, trajectoire, écoulement accéléré / **KEYWORDS**: resuspension, microparticle, trajectory, accelerated flow

1. INTRODUCTION

La remise en suspension de particules initialement posées sur une surface, ou plus précisément le détachement suivi de leur réentrainement dans l'écoulement sous l'effet d'une perturbation extérieure, est un sujet d'étude qui trouve son importance dans de nombreux secteurs d'études. On peut citer les études sur la qualité de l'air extérieur qui s'intéressent par exemple aux particules émises par roulement des pneumatiques de voitures sur un revêtement routier (Kim et al., 2025), le secteur du nucléaire qui souhaite maîtriser les effets de réentrainement de dépôts particuliers afin d'éviter la contamination des installations et garantir le confinement des particules radioactives ou encore la qualité de l'air intérieur avec notamment l'étude de la remise en suspension de particules déposées sur une surface tel que le sol d'une pièce (Goldasteh et al., 2013). Nombreux sont les paramètres ayant un effet sur la prédisposition d'une particule déposée sur une surface à être remise en suspension. On peut citer les paramètres liés à la particule tels que sa morphologie (Wu et al., 1992), sa taille (Barth et al., 2014), sa rugosité de surface, mais également des paramètres propres à la surface sur laquelle les particules sont déposées comme la composition du matériau ou encore sa rugosité. Les perturbations dans l'environnement immédiat de la particule déposée joue aussi un rôle clé dans ce processus, on peut citer notamment des perturbations aérauliques, mécaniques, de fluctuations de pression ou climatiques. Dans la présente étude, on s'intéresse à la remise en suspension de particules sous l'effet d'un écoulement accéléré d'air au voisinage de la paroi afin de se placer dans le cas de la remise en suspension de particules dans les conduites de systèmes HVAC. De précédentes études ont montré que le processus de remise en suspension des particules commençait pendant la phase d'accélération de l'écoulement (Theron et al., 2020, 2022). Afin de comprendre comment l'écoulement interagit avec les particules pendant cette phase d'accélération de l'écoulement, phase caractéristique du redémarrage d'un système de ventilation, des acquisitions simultanées de suivi de particules et de vitesse de frottement ont été réalisées. Un suivi des trajectoires 3D des particules au moment de leur mise en mouvement par rapport à leur position initiale est réalisé. Ce suivi permet notamment d'évaluer la vitesse et l'accélération des particules lorsqu'elles se mettent en mouvement, ce qui peut être dû à différents types d'interactions. L'étude de ces trajectoires permet de répondre aux questions suivantes: Quel est le type de mouvement de la particule (roulement, détachement avec la paroi) ? Quelle est l'origine de cette mise en mouvement (collision avec une particule précédemment mise en mouvement, interaction avec l'écoulement) ? Quelle est l'énergie

cinétique d'une particule lors de sa mise en mouvement ? Cette énergie dépend-elle du type de déplacement ? Par la suite on parlera de mise en mouvement pour évoquer une particule dont la position varie par rapport à sa position initiale, et de décollage/détachement pour évoquer une particule qui n'a plus de contact avec la paroi.

2. MATERIEL ET METHODES

L'étude simultanée de la remise en suspension et de l'écoulement est réalisée sur le banc expérimental représenté sur la figure 1 ci-dessous. La veine de mesure est rectangulaire, de section $2l \times 2h = 20 \times 4 \text{ cm}^2$ et de longueur $L = 200 \text{ cm}$. La zone de mesure est positionnée à 170 cm de l'entrée du canal soit $x/h = 85$ et à $4,7 \text{ cm}$ de la paroi latérale du conduit. L'air est mis en mouvement par aspiration par un ventilateur situé en aval de la veine d'essai. À l'exception de la surface où les particules sont déposées qui est en verre (représentée en rouge sur la figure 1), toutes les autres parois de la conduite sont en polycarbonate antistatique. Les particules étudiées sont des particules de verre sphériques calibrées de diamètre moyen $d = 30,2 \pm 1,1 \mu\text{m}$. Elles sont déposées sur une zone de $20 \times 10 \text{ mm}^2$, sous forme d'un dépôt épars et monocouche. Leur comportement est suivi par deux caméras Phantom VEO 440L positionnées sous la conduite. Le dépôt est éclairé par un panneau LED par le dessus, c'est donc l'ombre des particules qui est captée par les caméras. Leur fréquence d'acquisition est de 1 kHz . Les caméras sont décalées d'une vingtaine de degrés par rapport à la verticale de la paroi à observer. À partir des images 2D obtenues par chacune des caméras il est possible de reconstruire une information 3D sur la position des particules. Un capteur film chaud est positionné en aval du dépôt, à 2 cm de l'extrémité de ce dernier. Il assure la mesure de la vitesse de frottement à une fréquence d'acquisition de 10 kHz simultanément au suivi des particules.

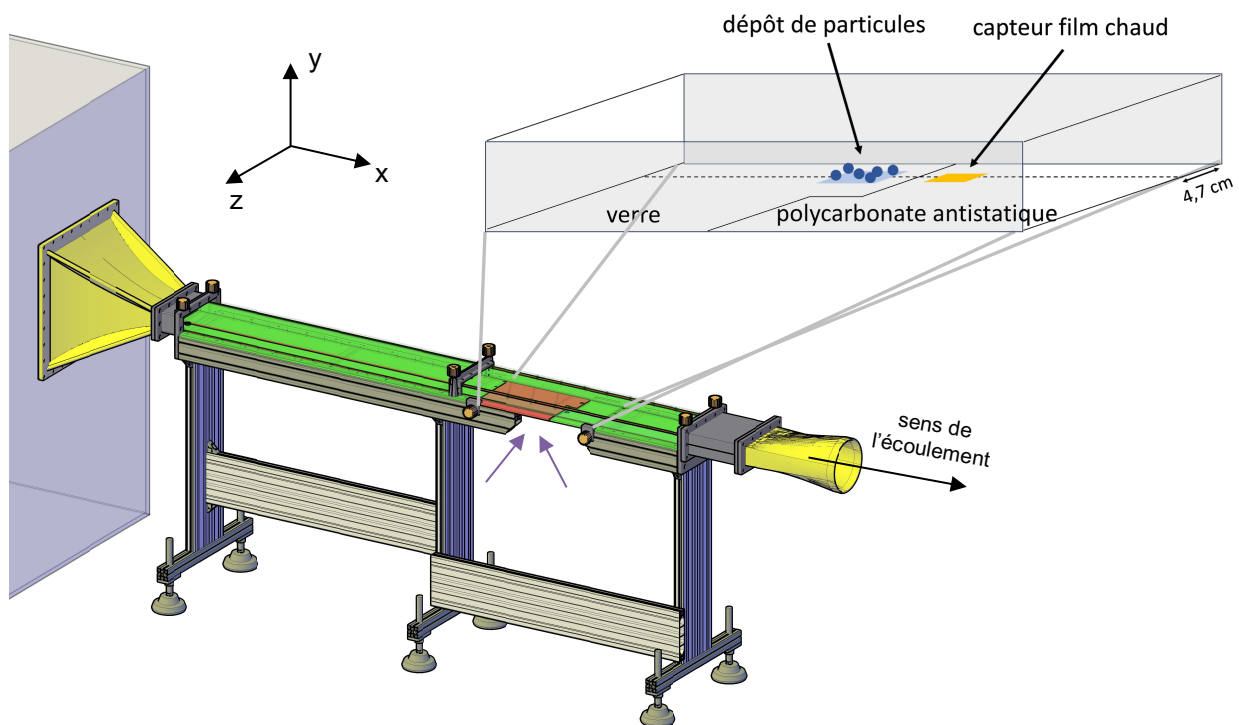


Figure 1: Banc expérimental et visualisation de la zone de mesure. Les caméras sont représentées par les flèches violettes sous la conduite.

Les particules, initialement au repos et en contact avec la paroi, sont soumises à un profil temporel de vitesse correspondant à une phase d'accélération liée à la mise en route du ventilateur, (accélération moyenne de $3,0 \text{ m/s}^2$), jusqu'à l'atteinte d'un régime permanent avec une vitesse finale au centre de $8,6 \text{ m/s}$. Une fois les acquisitions réalisées, les images sont prétraitées afin de s'acquitter du bruit de fond. Les trajectoires 3D sont extraites par le logiciel DaVis de LaVision, à l'aide du module Shake-the-box permettant le traitement PTV, à partir des positions successives des particules sur les images.

3. RESULTATS PRÉLIMINAIRES ET PERSPECTIVES

Les résultats présentés dans cette partie sont des résultats préliminaires d'essais en cours, obtenus lors de l'ajustement des traitements PTV afin de trouver les paramètres optimaux pour la bonne détection des particules par le logiciel. Ils représentent donc une bonne base phénoménologique qui permet de soulever plusieurs questions et proposent des manières d'y répondre.

La figure 2 montre certaines trajectoires de particules obtenues par la PTV sur la zone de dépôt. Seules les trajectoires y sont visibles, les particules immobiles ne sont pas affichées. Chaque trajectoire est affichée avec les positions successives de la particule correspondante le long de cette trajectoire. La visualisation de ces trajectoires permet de visualiser différents types de mécanismes responsables de la mise en mouvement d'une particule. L'écoulement va de gauche à droite, sur toutes les trajectoires la position initiale d'une particule est celle la plus à gauche. On remarque que toutes les particules se déplacent dans le sens de l'écoulement, avec des trajectoires majoritairement orientées dans la direction x. Certaines vont plus vite que d'autres, la trajectoire A en haut à droite montre des positions successives de la particule plus espacées que la trajectoire B en bas à gauche. On peut supposer que la trajectoire B représente un roulement sur la paroi tandis que la trajectoire A montre une particule décollée de la paroi et emportée par l'écoulement ayant donc une vitesse supérieure.

On peut également constater la présence de mouvement 3D. Par exemple la trajectoire jaune dans la zone C montre un mouvement de la particule vers le haut. On peut supposer qu'elle commence par rouler sur la paroi avant de s'en détacher complètement et d'être emportée dans le cœur de l'écoulement. L'affinement des traitements permettra l'obtention de trajectoires plus longues mais aussi de réaliser des statistiques sur la part de particules détachées de la paroi (et donc dites remises en suspension) ainsi que sur le type d'origine de détachement majoritaire (collision ou interaction particule/écoulement).

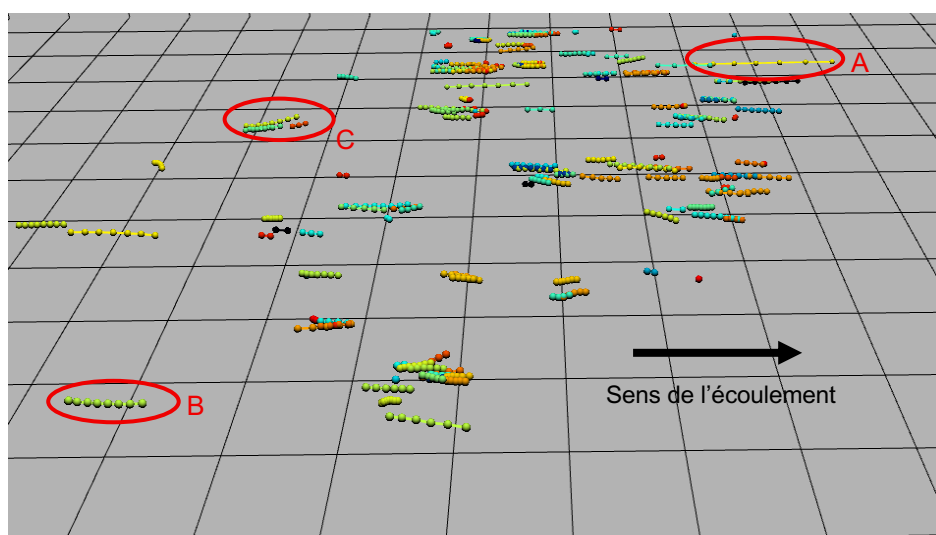


Figure 2: Visualisation de certaines trajectoires de particules après leur détachement sous l'effet de l'accélération de l'écoulement

À partir de ces trajectoires il est possible d'extraire les valeurs de vitesses et d'accélération des particules en mouvement. La figure 3 montre la distribution en norme de la vitesse initiale des trajectoires détectées, c'est-à-dire à l'instant où une particule se mettant en mouvement est détectée. Un filtre sur la durée des trajectoires a été ajouté afin de ne garder que les trajectoires détectées sur 7 pas de temps ou plus réduisant ainsi les fausses trajectoires détectées (habituellement de l'ordre de 2 ou 3 pas de temps). Ici on observe que les valeurs initiales de mise en mouvement des particules sont relativement faibles. La comparaison avec la vitesse de friction simultanée obtenue par l'anémométrie par film chaud pourra apporter une comparaison entre la vitesse de la particule et celle de l'écoulement au même instant.

Les valeurs d'accélération au moment de la mise en mouvement d'une particule pourront également nous informer sur les efforts aérodynamiques subits par la particule mais également sur l'origine du déplacement de la particule. Une particule remise en suspension par l'écoulement aura probablement une vitesse proche de celle du fluide. Une particule subissant un choc d'une autre particule déjà emportée par l'écoulement présentera une vitesse plus importante car cette dernière se trouve plus haut dans la couche limite et a donc

une énergie cinétique plus importante, elle peut ainsi éjecter d'autres particules plus rapidement que l'écoulement à la paroi.

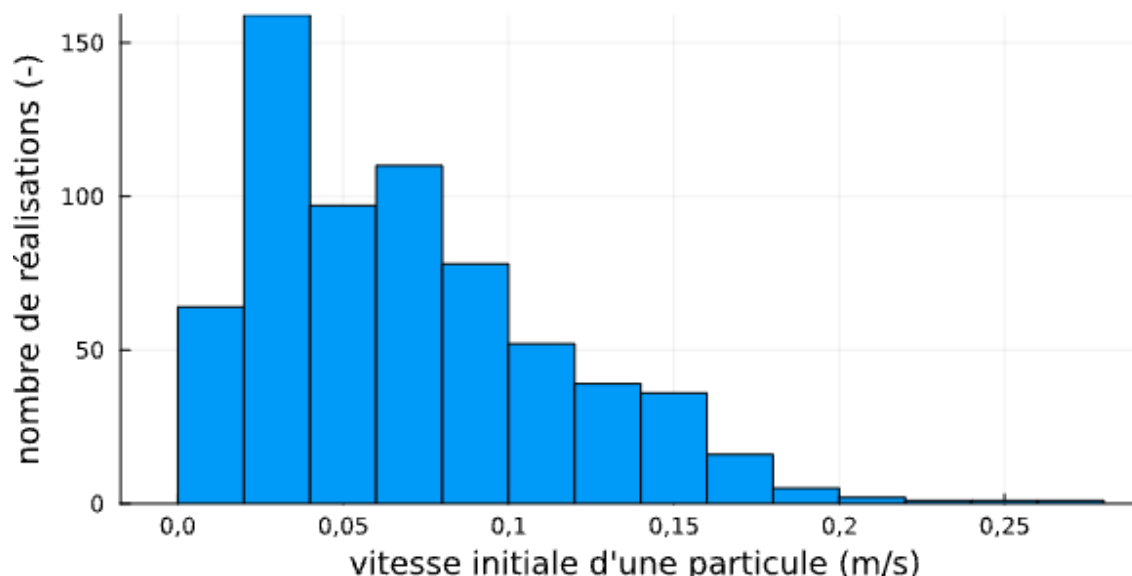


Figure 3 : Distribution en norme de la vitesse des particules dont la trajectoire est détectée par le logiciel

4. CONCLUSION

La mise en place d'un suivi de particule par PTV permet d'obtenir de nombreuses informations sur les valeurs de vitesses et d'accélération des particules mises en mouvement. Cette méthode permettra notamment de déterminer le type de détachement mais aussi le devenir d'une particule une fois détachée de la paroi. En mesurant simultanément la vitesse de frottement de l'écoulement au voisinage des particules, il sera possible de mettre en lien un événement de remise en suspension observé et les propriétés dynamiques de l'air au même instant.

5. RÉFÉRENCES ET REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier l'Agence Innovation Défense de la Direction Générale des Armées et la région Pays de la Loire pour leur financement.

Barth, T., Preuß, J., Müller, G., & Hampel, U. (2014). Single particle resuspension experiments in turbulent channel flows. *Journal of Aerosol Science*, 71, 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2014.01.006>

Goldasteh, I., Ahmadi, G., & Ferro, A.R. (2013) Wind tunnel study and numerical simulation of dust particle resuspension from indoor surfaces in turbulent flows. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24:14, 1563-1579. <https://doi.org/10.1080/01694243.2012.747729>

Kim, M., Pak, M., Chung, W., Hyun, M., Lee, S. H., Hur, J., Kim, Y-M., Oh, S., Kim, M-S., Kwon, J-T., Lee, J., Kim, Y. (2025). Evaluation of emission factors for resuspended tire-wear particles in urban road dust using empirical model-based methods. *Science of the Total Environment*, 975. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.17932>

Wu, Y.-L., Davidson, C. I., & Russell, A. G. (1992). Controlled Wind Tunnel Experiments for Particle Bounceoff and Resuspension. *Aerosol Science and Technology*, 17(4), 245–262. <https://doi.org/10.1080/02786829208959574>

Theron, F., Djihad, D., Le Coq, L. (2020). Local experimental methodology for the study of microparticles resuspension in ventilated duct during fan acceleration. *Journal of Aerosol Science*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2019.105477>

Theron, F., Djihad, D., Le Coq, L. (2022). Influence of the transient airflow pattern on the temporal evolution of microparticle resuspension: Application to ventilated duct during fan acceleration. *Journal of Aerosol Science*, 56(11), 1033-1046. <https://doi.org/10.1080/02786826.2022.2120793>