

REMISE EN SUSPENSION DE MICROPARTICULES LORS DE PHASES D'ACCELERATIONS : ANALYSE DIMENSIONNELLE DES PROPRIETES DE L'ÉCOULEMENT

Corentin Cazes^{1,2*}, Félicie Théron¹, Lionel Fiabane², Dominique Heitz², Laurence Le Coq¹

¹ IMT Atlantique, GEPEA-CNRS UMR 6144, CS 20722, 44307 Nantes Cedex 3, France

² INRAE – UR 1466 OPAALE, CS 64427, 35044 Rennes Cedex, France

*Courriel de l'orateur : corentin.cazes@imt-atlantique.fr

TITLE

Microparticle resuspension during phases of flow acceleration: dimensional analysis of the flow properties

RESUME

L'on étudie la remise en suspension de microparticules isolées, déposées en monocouche et soumises à des accélérations d'air suivies de régime permanent. Différents profils temporels de vitesses sont appliqués dans une gaine de ventilation, et le suivi eulérien des particules résolu dans le temps est réalisé. Les données sont traitées à l'aide d'un algorithme de détection de particules. En parallèle, la vitesse de l'écoulement au centre de la veine et la vitesse de frottement à la paroi sont enregistrées par anémométrie à fil et film chaud. Nous mettons en exergue l'influence du régime transitoire dans le phénomène de remise en suspension, puis réalisons des analyses dimensionnelles permettant de prendre en compte les caractéristiques de l'écoulement dans la remise en suspension.

ABSTRACT

The resuspension of microparticles deposited as a monolayer of isolated particles and subjected to airflow acceleration followed by steady-state is studied. Different temporal velocity profiles are applied in a ventilation duct, and the time-resolved Eulerian tracking of the particles is monitored. Data are then processed using a particle detection algorithm. In parallel, the flow velocity at the centre of the channel and the friction velocity at the wall are recorded by hot wire and hot film anemometry. We highlight the influence of the transient regime in the resuspension phenomenon, and then carry out dimensional analyses to take into account the characteristics of the flow in the resuspension.

MOTS-CLÉS : Remise en suspension de microparticules, écoulement accéléré, modèle adimensionnel /

KEYWORDS: Microparticle resuspension, accelerated airflow, dimensionless model.

1. INTRODUCTION

Nous nous intéressons à des microparticules déposées sur une surface dans une gaine de ventilation et soumises à des accélérations d'air suivies d'un régime permanent. Lors de cette phase transitoire, les particules vont être remises en suspension lorsque les forces aérodynamiques qui s'appliquent aux particules surpassent les forces d'adhésion. La particule va alors se détacher de la paroi et être aéroportée par le fluide. L'on retrouve ce phénomène dans de nombreuses applications industrielles comme la micro-électronique (Tardif et al., 2015), le nucléaire (Evangelidou *et al*, 2016), ou encore pour l'étude de la pollution de l'air liée aux activités humaines (Rienda and Alves, 2022). Comprendre les mécanismes de remise en suspension, c'est prévoir la contamination particulaire aéroportée, notamment dans un contexte de contrôle de particules en environnement clos comme les systèmes de ventilation (Zhou *et al*, 2011). Cette étude porte sur la remise en suspension de microparticules dans une gaine de ventilation soumise à des accélérations d'air, situations que l'on retrouve après une maintenance ou une reprise de régime après des périodes de faibles activités (nuit ou week-end). Les particules sont initialement déposées par des phénomènes naturels, subissent un temps de séjour sur la surface, puis vont être remise en suspension (Yao *et al*, 2022). Les dépôts sont généralement multicouches et les particules de géométries variables (Brambilla *et al*, 2021). Dans cette étude, par soucis de simplification et d'hypothèses, nous nous concentrons sur des dépôts monocouches de particules isolées sphériques.

Des travaux antérieurs (Debba, 2017; Theron *et al*, 2020) ont permis l'élaboration et la construction d'un banc d'essais pour les acquisitions de remise en suspension de microparticules à partir d'une méthode optique. Dans notre étude, le banc d'essais a été amélioré, permettant de mesurer simultanément et résolu dans le temps le nombre de particules, la vitesse au centre de la veine et la vitesse de frottement à la paroi. Les études précédentes ne rendent pas compte de la dynamique de la remise en suspension couplée aux caractéristiques locales de l'écoulement. Les résultats concernant la mise en relation de ces grandeurs sont présentés et discutés.

2. MÉTHODOLOGIE

Le banc d'essais est une conduite de section rectangulaire ($L \times l \times h = 200 \times 20 \times 4 \text{ cm}^3$) en PMMA antistatique avec un insert en verre situé à $x = 130 \text{ cm}$ de l'entrée de la conduite, où l'on réalise les mesures. Le ventilateur, piloté en vitesse et accélération, se situe à la fin de la boucle ouverte et génère donc l'écoulement par aspiration. Des filtres sont placés en entrée et en sortie de veine d'essai pour éviter toute contamination, de l'écoulement comme de l'ambiance.

Les particules utilisées, fournies par la société ECKA Granules (Allemagne), sont en bronze et se présentent sous forme d'une poudre polydispersée. Un travail préalable de tamisage a été réalisé pour obtenir différentes distributions de tailles resserrées ; nous utilisons dans cette étude des particules de taille $[20-30] \mu\text{m}$.

La vitesse au centre de la veine et la vitesse de frottement à la paroi sont enregistrées respectivement avec un capteur fil chaud et un capteur film chaud (Dantec Dynamics). Le capteur fil chaud est étalonné à l'aide du système d'étalonnage de Dantec en utilisant 50 points répartis sur une large gamme de vitesses (de 0.2 à 13 m.s^{-1}). Le capteur film chaud est étalonné pour 12 valeurs de vitesse (même gamme que pour le fil chaud) par rapport à un gradient de pression mesuré à la paroi. Les fréquences d'acquisition sont de $1,0 \text{ kHz}$.

Les acquisitions optiques du dépôt sont réalisées à l'aide d'une caméra CCD (Dantec) couplée à un zoom optique $\times 12$ (LaVision). La zone de mesure est de $2,0 \times 1,5 \text{ mm}^2$, correspondant à une taille de capteur CCD de $2320 \times 1728 \text{ pixels}^2$, soit une résolution de $0,86 \mu\text{m/pixel}$. La fréquence d'acquisition est de 30 Hz . Les mesures sont faites par ombroscopie : la caméra est située sous le dépôt de particules, et une plaque LED (puissance de 50 W) est positionnée au-dessus de la veine d'essais.

Pour tester l'influence de la vitesse et de l'accélération nous utilisons 12 profils temporels de vitesse :

- 4 valeurs de vitesse moyenne au centre au régime permanent : $7,6$; $9,0$; $10,0$ et $11,0 \text{ m.s}^{-1}$;
- 3 valeurs d'accélération moyenne (pour atteindre le régime permanent) : $0,3$; $1,0$; $2,1 \text{ m.s}^{-2}$.

Ces valeurs sont représentatives de celles retrouvées dans les systèmes de ventilation de bâtiments. L'influence de la taille des particules est étudiée en réalisant les mêmes expériences pour les différentes fractions obtenues après tamisage. L'humidité et la température de l'environnement ne sont pas contrôlable mais sont enregistrées pour chaque acquisition. Pour s'affranchir de l'humidité des particules, celles-ci sont placées pendant une nuit précédant les journées de campagne d'acquisition à l'étuve à 105°C .

Le protocole pour une acquisition est le suivant :

- i. nettoyage de la plaque en verre à l'aide d'une solution d'éthanol diluée et séchage ;
- ii. dépôt de microparticules sur la surface à l'aide d'un générateur de particules à anneaux tournant et d'une chambre de sédimentation ;
- iii. fermeture du capot, mise en place de la plaque LED et focus de la caméra ;
- iv. déclenchement simultané du ventilateur, de la caméra et du système d'acquisition fil/film chaud ;
- v. suivi optique de la remise en suspension.

Toutes les données sont traitées dans l'environnement MATLAB. Les films de remise en suspension sont analysés à l'aide d'un algorithme de traitement d'image que nous avons développé (Cazes *et al*, 2022). Cet algorithme automatique détecte les particules ainsi que les agglomérats de particules (dus aux interactions entre particules) et renvoie pour chaque image le nombre de particules, la distribution granulométrique et l'homogénéité du dépôt. Le nombre de particules est converti en fraction de particules restant à la paroi exprimée en pourcentage du dépôt initial, selon : $F_{res}(t) = \frac{N(t)}{N(t=0)} * 100$, avec $N(t)$ le nombre de particule restant à la paroi à l'instant t .

Pour traiter les vitesses de l'écoulement et les décomposer en tant que somme de la moyenne et des fluctuations, nous utilisons une décomposition en modes empiriques (EMD, voir par exemple Huang *et al*, 1971). Cet algorithme permet de décomposer localement le signal en modes correspondant à différentes fréquences des fluctuations et en un résidu représentant la moyenne du signal. Cette technique ne demande aucun *a priori* pour le traitement.

3. RÉSULTATS

La Figure 1 présente l'évolution temporelle instantanée conjointe de la vitesse au centre U_0 (courbe orangée) et de la fraction de particules restantes à la paroi F_{res} (courbe bleue). L'acquisition démarre dès l'accélération initiale de l'écoulement d'air. L'on distingue la rampe d'accélération, assez linéaire, puis le plateau correspondant au régime permanent. Des fluctuations de vitesse autour de la moyenne apparaissent assez rapidement (à partir de 1 m.s^{-1}) et augmentent en intensité tout au long de la rampe de vitesse. En parallèle on constate que la remise en suspension débute pendant la phase d'accélération avec fluctuations, et se stabilise pendant le régime permanent, avec une légère décroissance négligeable. Autrement dit, il semble que les particules sont essentiellement remises en suspension en fin de rampe d'accélération et au début du régime permanent. Ceci est valable pour tous les profils temporels de vitesse. Ce premier résultat confirme le

besoin de considérer le phénomène de remise en suspension de façon résolue dans le temps, puisque la majeure partie des particules décolle pendant la phase transitoire.

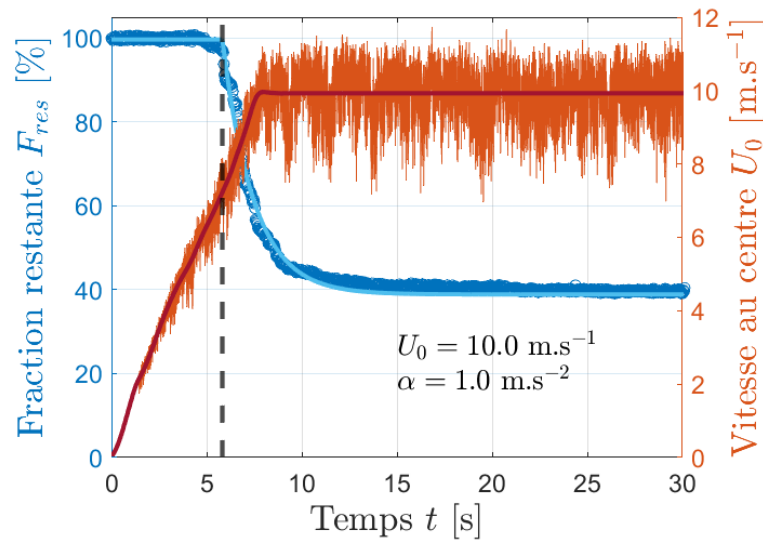


Figure 1. Fraction restante F_{res} en symbole et modèle mathématique en trait plein bleu et vitesse au centre U_0 et sa moyenne en trait plein rouge en fonction du temps t .

Afin de déterminer le temps au démarrage de la remise en suspension t_s (trait en pointillé noir), nous utilisons pour la courbe de fraction restante un modèle exponentiel décroissant (Theron *et al*, 2020) donné par :

$$F_{res}(t) = \begin{cases} F_0, & t < t_s \\ F_{eq} + (F_0 - F_{eq}) \exp\left(-\frac{t - t_s}{\tau}\right), & t \geq t_s \end{cases}$$

avec F_0 la fraction restante à $t = 0$, F_{eq} la fraction restante à l'équilibre et τ la constante de temps du phénomène transitoire. Les quatre paramètres F_0 , F_{eq} , t_s et τ sont obtenus en résolvant un problème d'optimisation permettant d'ajuster le modèle aux données.

La Figure 2 représente l'évolution de la fraction de particules restantes à la paroi en fonction du temps pour différentes vitesses au régime permanent pour une valeur d'accélération fixée à $\alpha = 0,3 \text{ m.s}^{-2}$ sur la figure de gauche et à $\alpha = 2,1 \text{ m.s}^{-2}$ sur la figure de droite. En traits pointillés sont représentés les temps respectifs de démarrage de la remise en suspension, avec la vitesse moyenne instantanée associée. Le Tableau 1 répertorie les temps de démarrage t_s pour chaque vitesse et accélération. On peut voir que pour une accélération fixée, le temps de démarrage de la remise en suspension t_s est le même quelle que soit la vitesse. Ce résultat est le même sur les deux figures présentant deux accélérations différentes, et pour toutes les valeurs d'accélération testées.

Tableau 1. Temps de démarrage de la remise en suspension t_s pour les différentes conditions aérauliques

U_0 [m.s ⁻¹]	7,6			9,0			10,0			11,0		
α [m.s ⁻²]	0,3	1,0	2,1	0,3	1,0	2,1	0,3	1,0	2,1	0,3	1,0	2,1
t_s [s]	17,5	5,3	3,5	18,0	5,7	4,2	17,6	5,8	4,0	17,8	5,8	4,0

Il est en outre possible de définir une vitesse seuil, notée V_s , correspondant à la vitesse moyenne instantanée de démarrage de remise en suspension (c'est-à-dire la vitesse moyenne à t_s). On constate que cette vitesse seuil dépend de l'accélération, et que plus la valeur d'accélération moyenne est grande, plus la vitesse seuil est élevée : en d'autres termes, la vitesse moyenne nécessaire au démarrage de la remise en suspension est plus élevée lorsque l'accélération dans le régime transitoire est plus grande.

Nous observons donc (i) que la remise en suspension démarre et a essentiellement lieu lors des phases d'accélération de l'écoulement, (ii) qu'à vitesse moyenne de régime permanent donnée, la remise en suspension n'obéit pas toujours aux mêmes règles en fonction de l'accélération de l'écoulement.

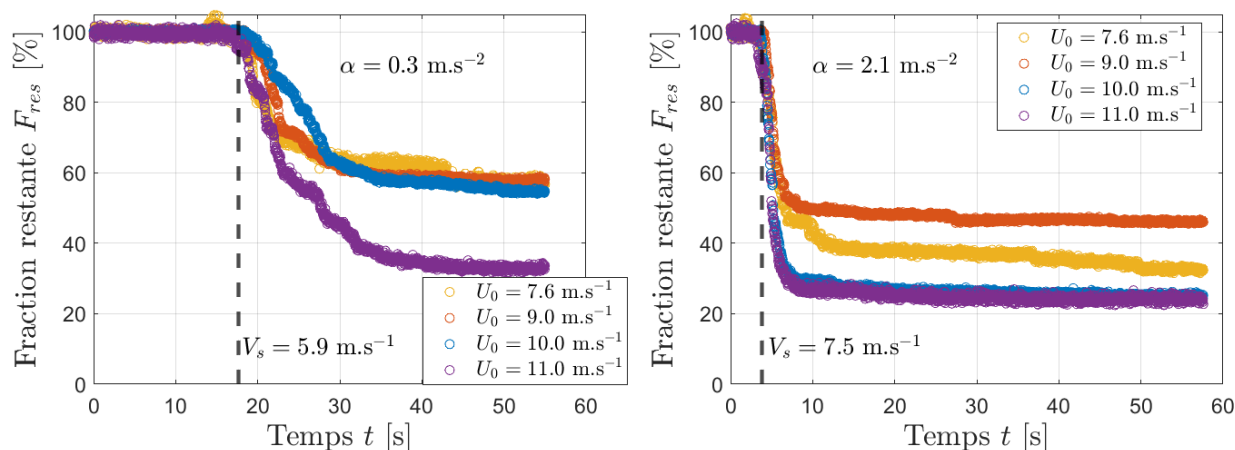


Figure 2. Fraction restante F_{res} en fonction du temps pour différentes vitesses finale U_0 pour une valeur fixe d'accélération de $\alpha = 0,3 \text{ m.s}^{-2}$ à gauche et de $\alpha = 2,1 \text{ m.s}^{-2}$ à droite.

Ces résultats nous amènent à considérer que les modèles de remise en suspension utilisant pour seul critère seuil la vitesse moyenne en régime permanent sont incomplets. D'autres paramètres relatifs à l'écoulement, a priori en lien avec l'accélération, sont à prendre en considération.

De surcroît, en étudiant les caractéristiques de l'écoulement, nous remarquons que l'apparition des fluctuations de vitesses sont elles aussi retardées pour des accélérations croissantes. De ce fait, à l'aide des données de vitesses au centre et de vitesses de frottement, nous proposons d'étudier les phénomènes physiques responsables de la remise en suspension en relation avec l'apparition de la turbulence au sein de l'écoulement et en proche paroi.

4. CONCLUSION

Nous étudions la remise en suspension de microparticules dans une gaine de ventilation. Elles sont déposées en monocouche de particules isolées sur une surface en verre, et soumises à des accélérations d'air suivies d'un régime permanent. Le dépôt de particules est filmé, les images sont analysées à l'aide d'un algorithme de détection de particules, et les caractéristiques de l'écoulement sont enregistrées à l'aide de capteurs fil et film chaud. Ces données mises en parallèles montrent que la majorité des particules se remettent en suspension pendant la phase transitoire de l'écoulement, et ce pour tous les profils temporels de vitesse testés. En outre, un modèle à quatre paramètres est mis en œuvre pour ajuster la fraction de particules restantes à la paroi. Les paramètres de ce modèle permettent d'étudier l'influence de l'évolution temporelle de l'écoulement sur la remise en suspension.

Nous constatons que le démarrage de la remise en suspension est retardé avec l'augmentation de l'accélération. Des études complémentaires sont en cours pour identifier les relations de la remise en suspension avec l'apparition de fluctuations de vitesses liées à la turbulence en proche paroi.

Références et remerciement

Ce travail est soutenu financièrement par le Ministère des Armées – Agence de l'Innovation de Défense et la Région Pays de la Loire.

- Brambilla, S., Speckart, S. and Brown, M. J. (2017) *J. Aerosol Sci.* 112, 52-67.
- Casotti Rienda, I. and Alves, C. A. (2022) *Atmos. Res.* 261, 105740.
- Cazes, C., Fiabane, L., Theron, F., Heitz, D. and Le Coq, L. (2022) CFA Asfera Congrès français sur les aérosols.
- Debba, D. (2017) Etude locale des mécanismes de réentraînement des microparticules en conduite ventilée, IMT Atlantique.
- Evangelidou, N., Zibtsev, S., Myroniuk, V., Zhurba, M., Hamburger, T., Stohl, A., Balkanski, Y., Paugam, R., Mousseau, T.A., Møller, A.P., Kireev, S.I. (2016) *Sci. Rep.* 6, 26062.
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N.-C., Tung, C. C. and Liu, H. H. (1998) *Proc. R. Soc. London A.* 454, 903-995.
- Tardif, F., Danel, A., Raccurt, O. (2005) *J. Telecommun. Inf. Technol.* 1, 11-19.
- Theron, F., Debba, D., Le Coq, L. (2020) *J. Aerosol Sci.* 140, 105477.
- Zhou, B., Zhao, B., Tan, Z. (2011) *Aerosol Sci. Technol.* 45, 996-1009.
- Yao, Y., Huan, X. and Capecehatro, J. (2022) *J. Aerosol Sci.* 166, 1060