



**HAL**  
open science

## Analyse d'images pour l'étude de la remise en suspension de particules

Corentin Cazes, Lionel Fiabane, Félicie Theron, Dominique Heitz, Laurence Le Coq

► **To cite this version:**

Corentin Cazes, Lionel Fiabane, Félicie Theron, Dominique Heitz, Laurence Le Coq. Analyse d'images pour l'étude de la remise en suspension de particules. CFA2022 - 35ème Congrès Français sur les Aérosols, ASFERA, May 2022, Paris, France. 4 p., 10.25576/ASFERA-CFA2022-27959 . hal-03861599

**HAL Id: hal-03861599**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03861599v1>**

Submitted on 19 Jul 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# ANALYSE D'IMAGES POUR L'ÉTUDE DE LA REMISE EN SUSPENSION DE PARTICULES

Corentin Cazes<sup>1, 2\*</sup>, Lionel Fiabane<sup>2</sup>, Félicie Théron<sup>1</sup>, Dominique Heitz<sup>2</sup>, Laurence Le Coq<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> INRAE – UR 1466 OPAALE, CS 64427, 35044 Rennes Cedex, France

\*Courriel de l'orateur : [corentin.cazes@imt-atlantique.fr](mailto:corentin.cazes@imt-atlantique.fr)

## TITLE

Image analysis for the study of particle resuspension

## RÉSUMÉ

L'on s'intéresse à la remise en suspension de microparticules isolées déposées en monocouche sur une paroi d'un système de ventilation. Ces particules sont soumises à des accélérations d'air et le comportement des dépôts est enregistré par méthodes optiques. Les résultats sont analysés à l'aide d'un nouvel algorithme de traitement d'images ; cet algorithme retourne la cinétique de remise en suspension – l'évolution du nombre de particules remises en suspension ou restant à la paroi en fonction du temps – et permet de catégoriser les particules suivant leur taille, ainsi que les agglomérats de particules présents sur le dépôt.

## ABSTRACT

The focus is on resuspension of isolated microparticles deposited in a monolayer on a wall. These particles are subject to air flow acceleration and the deposit behaviour is monitored by optical method. Results are analysed using a new image processing algorithm; this algorithm returns the resuspension kinetics – the particle number evolution with respect to time - and allows for the categorisation of particles in terms of size, as well as particle clusters in the deposit.

**Mots clés :** Remise en suspension de particule, Traitement d'image.

**Keywords:** Particle resuspension, Image processing.

## 1. INTRODUCTION

La remise en suspension de microparticules (l'on parle aussi de réentraînement ou de resuspension) désigne le phénomène de rupture du contact entre la particule et la surface sur laquelle elle était déposée. Ce phénomène s'accompagne ensuite du mouvement de la particule dans le fluide où elle est ensuite aéroportée. Le phénomène de remise en suspension de particules intervient dans de nombreuses applications industrielles, telles que l'aérospatial, la fabrication et les traitements de matériaux, la micro-électronique (Tardif *et al.*, 2005), l'industrie pharmaceutique (Gradoń, 2009) ou encore le nucléaire (Evangelidou *et al.*, 2016).

Comprendre le phénomène, c'est prévoir la contamination particulaire aéroportée, notamment dans un contexte de contrôle des particules en environnement clos comme les systèmes de ventilation (Zhou *et al.*, 2011) correspondant aux conditions aérauliques de l'étude. Dans les conduites de ventilation, les particules préalablement déposées soumises à des flux d'air vont être remise en suspension, notamment lors d'accélération d'air (jusqu'à atteindre un débit normal) intervenant à la suite de maintenances ou après une période de vitesse plus faible (nuit ou week-end). Ces particules sont normalement déposées par des phénomènes naturels et sont donc généralement multicouches (Barth *et al.*, 2013). Pour faciliter nos acquisitions, nous effectuerons des dépôts monocouches de microparticules isolées.

Des travaux antérieurs (Debba, 2017; Theron *et al.*, 2020) ont permis de mettre en place un banc d'essais expérimental permettant d'enregistrer la cinétique de remise en suspension de microparticules (l'évolution du nombre de particules remises en suspension ou restant à la paroi en fonction du temps) à partir d'une méthode optique. Pour obtenir les résultats de cinétique de remise en suspension à partir des acquisitions optiques, un algorithme de traitement d'images doit être mis en point. Il doit détecter « objectivement » les particules de chaque image de façon automatisée et retourner leurs propriétés selon des critères spécifiés.

L'étude présentée ici permet de discuter d'une version améliorée de l'algorithme de traitement d'images, avec un focus particulier concernant sa sensibilité à la taille des particules et aux agglomérats de particules.

## 2. MÉTHODOLOGIE

L'algorithme est développé dans le cadre d'une thèse en cours, en s'appuyant sur un jeu de données issu d'un travail de thèse antérieur (Debba, 2017). Ces travaux visaient à développer une méthode expérimentale permet-

tant de suivre en parallèle la cinétique de remise en suspension et les propriétés de l'écoulement responsables de la remise en suspension de microparticules pour des accélérations d'air. Les expériences impliquaient d'une part une mesure de la cinétique de remise en suspension par méthode optique, et d'autre part une acquisition du signal de vitesse dans la gaine de ventilation en utilisant l'anémométrie à fil chaud (Theron *et al.*, 2020).

## 2. Matériel expérimental

Le banc d'essais utilisé est de section rectangulaire ( $L \times l \times h = 200 \times 20 \times 4 \text{ cm}^3$ ), en PMMA antistatique (avec une rugosité de l'ordre de 10 nm) pour faciliter les accès optiques et diminuer les interactions électrostatiques entre particules et paroi. Le ventilateur se situe en sortie de boucle ouverte : l'écoulement est donc réalisé par aspiration.

Les particules utilisées sont des particules de bronze, choisies pour leur sphéricité, fournies par la société ECKA Granules Germany sous forme de poudre. Les particules ont été tamisées afin de resserrer leur granulométrie autour de la plage 11 - 30  $\mu\text{m}$  (avec un diamètre moyen de 16  $\mu\text{m}$ ).

Le protocole de remise en suspension se déroule en 2 étapes :

- i. Génération du dépôt monocouche de particules isolées sur la surface ;
- ii. Acquisition de la cinétique de remise en suspension par méthode optique.

La vitesse de départ est nulle, et l'air est accéléré jusqu'à une vitesse finale suivie d'une courte période de régime permanent. Les deux accélérations testées, 0,3 et 2,1  $\text{m.s}^{-2}$ , sont représentatives de celle que l'on retrouve dans les systèmes de ventilation. Il en est de même pour les vitesses au régime permanent, qui sont comprises entre 3 et 9  $\text{m.s}^{-1}$ .

Les propriétés de l'air (température et humidité relative) ne sont pas contrôlées lors de ces expériences mais sont enregistrées.

Les dépôts de particules sont réalisés à la distance  $x = 1300 \text{ mm}$  de l'entrée de la conduite pour avoir un écoulement établi. La caméra se situe sous le dépôt de particules et les enregistre par ombroscopie, l'éclairage étant réalisé par une plaque LED de puissance 50 W située au-dessus de la veine. Le montage optique est constitué de la caméra SpeedSense 1020 de chez Dantec Dynamics de résolution 2320 x 1728 pixels, et d'une lentille grossissante x12 de chez LaVision. La taille de la fenêtre d'observation est de 2,0 x 1,5  $\text{mm}^2$  (avec une résolution de 1,2  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ) pour un nombre moyen de 300 particules par image.

## 2. Algorithme de traitement d'images

Les acquisitions lors des essais fournissent des films du comportement des particules. Les images de ces films (2560 images pour chaque film) sont successivement traitées afin de pouvoir réaliser des mesures sur celles-ci. L'algorithme traite toutes les images et retourne un vecteur contenant le nombre de microparticules correspondant à chaque image. Cependant, nous allons nous concentrer ici sur le traitement d'une seule image, et les étapes de cet algorithme seront répétées  $N$  fois pour les  $N$  images sélectionnées.

L'algorithme prend en entrée une image brute, la traite selon plusieurs étapes et retourne l'image traitée ainsi que plusieurs paramètres relatifs au dépôt de particules ainsi qu'aux particules elles-mêmes (*cf.* le logigramme présenté en Figure 1). L'algorithme implémenté sous Matlab suit les étapes classiques d'un algorithme de suivi de particules colloïdales qui sont (Crocker and Grier, 1996) :

- i. Restauration de l'image (filtrage) et binarisation ;
- ii. Localisation des positions des particules ;
- iii. Affinement de la position et suppression des 'fausses' particules (bruit).

Il est important de noter la présence d'agglomérats de particules sur les images. En effet, certaines particules peuvent être « collées » les unes aux autres à l'issue de l'étape de dépôt sur la paroi. Ces agglomérats peuvent être dus aux forces électrostatiques entre particules. Ils entraînent une source d'erreur pour l'algorithme : il ne va détecter qu'un seul objet (l'agglomérat) alors qu'un comptage manuel permet d'en dénombrer plusieurs (les particules dans cet agglomérat). L'algorithme doit donc prendre en compte cet aspect et traiter ces agglomérats pour détecter le véritable nombre de particules, et éventuellement les éliminer du comptage.

Le choix du filtre pour binariser l'image ainsi que l'étape d'identification des agglomérats constituent les étapes essentielles de l'algorithme. Nous devons noter ici que nous avons pu évaluer les résultats de l'algorithme en comparant le nombre de particules renvoyés par celui-ci avec un comptage manuel sur les images (seules les images de début et de fin ont fait l'objet d'un comptage manuel).

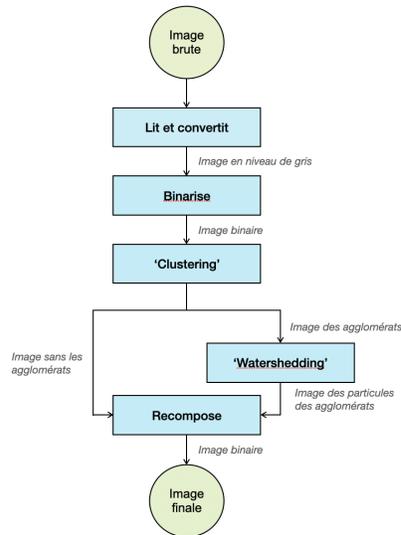


Figure 1. Logigramme de l'algorithme de traitement d'image.

### 3. RÉSULTATS

Dans cette partie, les résultats de l'algorithme concernant les dépôts seuls ainsi que la cinétique de remise en suspension sont discutés.

L'algorithme permet de caractériser les dépôts en termes de concentration et de distribution de taille des micro-particules. Puisque nous pouvons caractériser chaque image, nous obtenons ainsi l'évolution de ces deux paramètres au cours du temps.

Appliqué aux films de remise en suspension, l'algorithme permet de retourner des premières courbes de cinétique de remise en suspension exprimée en fraction de particules restant à la paroi en fonction du temps

$$F(t) = \frac{n(0) - n(t)}{n(0)} \cdot 100.$$
 Nous pouvons distinguer les trois phases propres à la remise en suspension déjà

identifiées dans les conditions utilisées :

- un plateau initial avant le détachement des premières particules durant lequel 100% des particules restent à la paroi ;
- une pente forte de quelques secondes où la plus grande part de particules se détachent correspondant à la phase d'accélération du ventilateur ;
- une pente beaucoup plus douce lorsque l'écoulement est en régime permanent.

D'autre part, l'influence de la taille des particules sur la remise en suspension est étudiée. En sachant qu'un pixel équivaut à 1,2  $\mu\text{m}$ , les propriétés des objets de l'image sont étudiées pour obtenir le diamètre équivalent d'une particule. Il est ainsi possible de présenter des courbes de cinétique de remise en suspension pour des plages de taille de particules plus restreintes que la plage totale correspondant au dépôt initial (cf. Figure 2).

D'après la littérature, pour les mêmes conditions d'écoulement, une grosse particule va se détacher plus rapidement comparée à une plus petite. Cela est dû au fait que la grosse particule est soumise à des vitesses plus importantes et de surcroît, les interactions électrostatiques avec la paroi sont plus faibles (Ibrahim *et al.*, 2004). De ce point de vu, nos résultats sont en accord avec la littérature puisque plus la taille des particules est grande, plus la fraction de particules remises en suspension est importante.

Enfin, l'algorithme est capable de détecter et d'isoler les agglomérats de particules, pour ensuite les traiter et retourner le véritable nombre de particules. Ces agglomérats vont cependant jouer un rôle dans la remise en suspension : leur taille est plus importante qu'une simple particule isolée et sont donc plus sujet aux collisions avec d'autres particules entraînées. Ces collisions peuvent conduire à la séparation des particules de l'agglomérat, et aussi à l'arrêt de particules qui étaient entraînées dans l'écoulement (Rondeau *et al.*, 2021). Notre algorithme peut suivre l'évolution de ces agglomérats en fonction du temps ainsi que l'évolution des particules contenues dans les agglomérats. Néanmoins, après qu'un agglomérat se soit séparé, il est difficile de savoir si la particule s'est remise en suspension ou est venue se déposer sur la surface, dû à la fréquence d'acquisition limitée de la caméra.

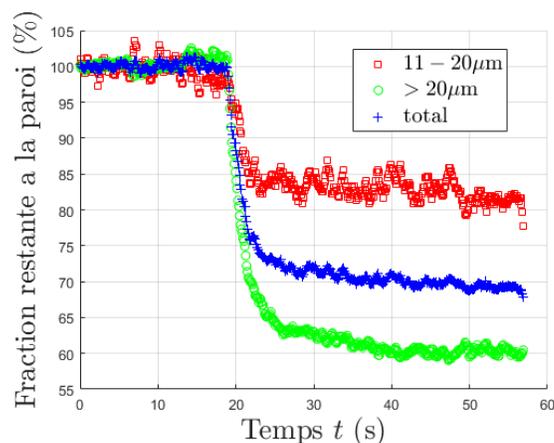


Figure 2. Fraction restante à la paroi en fonction du temps pour la plage totale de tailles de particules, ainsi que pour les fractions 11-20  $\mu\text{m}$  et  $> 20 \mu\text{m}$ .

#### 4. CONCLUSION

L'algorithme de traitement d'images est utilisé pour obtenir les propriétés des dépôts monocouches de microparticules isolées à partir d'images. Il est capable de retourner la cinétique de remise en suspension à partir des films du dépôt pendant l'accélération d'air. De plus, nous pouvons obtenir cette cinétique pour différentes gammes de taille de particules, permettant de lier le phénomène de remise en suspension à la taille des particules observées. Enfin, l'algorithme est capable d'isoler les agglomérats de particules se formant lors du dépôt et de suivre leur évolution en fonction du temps.

Le manque de données analysables constitue une des limites de ce travail : dû à l'éclairage hétérogène, l'étape de filtrage de l'image peut renvoyer des données faussées. Cela crée un manque de données pour évaluer les résultats en termes statistiques. Cependant, de nouvelles expériences vont être conduites en améliorant les conditions opératoires.

#### 5. REFERENCES

- Barth, T., Reiche, M., Banowski, M., Oppermann, M., Hampel, U., 2013. Experimental investigation of multilayer particle deposition and resuspension between periodic steps in turbulent flows. *J. Aerosol Sci.* 64, 111–124. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2013.04.011>
- Crocker, J.C., Grier, D.G., 1996. Methods of Digital Video Microscopy for Colloidal Studies. *J. Colloid Interface Sci.* 179, 298–310. <https://doi.org/10.1006/jcis.1996.0217>
- Debba, D., 2017. Etude locale des mécanismes de réentrainement 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. Resuspension and atmospheric transport of radionuclides due to wildfires near the Chernobyl Nuclear Power Plant in 2015: An impact assessment. *Sci. Rep.* 6, 26062. <https://doi.org/10.1038/srep26062>
- Gradoń, L., 2009. Resuspension of particles from surfaces: Technological, environmental and pharmaceutical aspects. *Adv. Powder Technol.* 20, 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2008.10.009>
- Ibrahim, A.H., Dunn, P.F., Brach, R.M., 2004. Microparticle detachment from surfaces exposed to turbulent air flow: Effects of flow and particle deposition characteristics. *J. Aerosol Sci.* 35, 805–821. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2004.01.002>
- Rondeau, A., Peillon, S., Vidales, A.M., Benito, J., Uñac, R., Sabroux, J.-C., Gensdarmes, F., 2021. Evidence of inter-particles collision effect in airflow resuspension of poly-dispersed non-spherical tungsten particles in monolayer deposits. *J. Aerosol Sci.* 154, 105735. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105735>
- Siegel, J.A., Nazaroff, W.W., 2003. Predicting particle deposition on HVAC heat exchangers. *Atmos. Environ.* 37, 5587–5596. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.09.033>
- Tardif, F., Danel, A., Raccurt, O., 2005. Understanding of wet and alternative particle removal processes in microelectronics: theoretical capabilities and limitations. *J. Telecommun. Inf. Technol.* 1, 11–19.
- Theron, F., Debba, D., Le Coq, L., 2020. Local experimental methodology for the study of microparticles resuspension in ventilated duct during fan acceleration. *J. Aerosol Sci.* 140, 105477. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2019.105477>
- Zhou, B., Zhao, B., Tan, Z., 2011. How Particle Resuspension from Inner Surfaces of Ventilation Ducts Affects Indoor Air Quality—A Modeling Analysis. *Aerosol Sci. Technol.* 45, 996–1009. <https://doi.org/10.1080/02786826.2011.576281>