

# ETUDE DE L'INFLUENCE DES COLLISIONS SUR LA REMISE EN SUSPENSION DE DEPOTS DENSES DE PARTICULES

A. Abad<sup>1\*</sup>, S. Peillon<sup>1</sup>, F. Gensdarmes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection (ASNR), PSN-RES/SCA/LPMA, F-91400, Saclay, France

\*alexis.abad@asn.fr

## TITLE

### STUDY OF THE INFLUENCE OF COLLISIONS ON THE RESUSPENSION OF DENSE PARTICLE DEPOSITS

## RESUME

La présente étude expérimentale a pour but de comprendre comment les collisions influencent la remise en suspension de particules soumises à un écoulement turbulent. Le banc expérimental est constitué d'une veine aéraulique et d'un système d'imagerie haute fréquence permettant de suivre chaque particule ainsi que ses interactions. Trois expériences, réalisées dans les mêmes conditions, sont présentées pour trois concentrations initiales différentes. La fraction de particules remise en suspension à la fin de chaque essai est d'autant plus importante que la densité initiale est grande. On montre qu'il y a trois phases : atteinte de la vitesse seuil, forte remise en suspension et remise en suspension à long terme.

## ABSTRACT

The present experimental study aims to understand how collisions influence the resuspension of particles subjected to a turbulent flow. The experimental bench consists of an airflow duct and a high-frequency imaging system allowing each particle and its interactions to be monitored. Three experiences are present for three different initial densities carried out under the same conditions. The fraction of particles resuspended at the end of each test is all three more important as the initial density if high. It is shown that there are three phases: reaching the threshold velocity, strong resuspension and long-term resuspension.

Mots clés : Remise en suspension, poly-dispersion, particules, analyse d'images, collisions

## 1. INTRODUCTION

L'ASNR conduit depuis plusieurs années des recherches expérimentales et numériques afin de développer des modèles phénoménologiques capables de décrire la mise en suspension de contaminants pour différentes situations d'accident et de fonctionnement nominal chez les exploitants nucléaires [1, 2]. En particulier, la mise en suspension (MeS) de radionucléides dans les installations de type LUDD (Laboratoires, Usines, Déchets et Démantèlement) par des écoulements d'air peut intervenir dans de nombreuses situations (opérations de démantèlement, marche d'opérateurs sur un sol contaminé, entrée d'air brutale dans une enceinte suite à une rupture de confinement...) et dans de nombreuses configurations (géométriques, équipements concernés). De fait, et quoique relativement bien documentée dans la littérature, la description de la mise en suspension de particules par des écoulements d'air demeure incomplète et les verrous scientifiques actuels portent sur l'amélioration de la caractérisation des forces d'adhésion et des forces aérauliques, ainsi que sur les conditions de détachement des particules. La condition de détachement repose classiquement sur trois mécanismes qui peuvent conduire à la mise en suspension d'une particule [3] : le décollement direct, le glissement et le roulement de la particule sur la surface avant sa mise en suspension. Lorsque la concentration surfacique des dépôts de particules augmente, plusieurs études ont montré qu'un quatrième mécanisme, identifié comme un régime de collision inter-particules, peut participer de manière significative à la mise en suspension [1, 2, 4]. Dans ce travail, on étudie l'influence de la concentration surfacique des dépôts sur les fractions de particules remises en suspension à l'aide d'un système optique équipé d'une caméra rapide afin de visualiser les collisions et déterminer les vitesses, les trajectoires et la taille des particules mises en mouvement.

## 2. METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

Les particules utilisées sont des billes de verre borosilicate polydispersées. La figure 1a présente une image d'une particule sphérique de diamètre  $76 \mu\text{m}$  observée au microscope électronique à balayage (MEB). Les

expériences réalisées comportent trois étapes : la préparation des dépôts de poudre, les essais en soufflerie et le traitement des données.

Pour réaliser les dépôts de particules, une cloche de dispersion associée à une chambre de sédimentation sont utilisées. Une étude paramétrique préalable a été réalisée afin de déterminer la pression d'injection et le nombre de dispersions nécessaires pour un volume de poudre donnée, afin d'obtenir un dépôt homogène et une concentration surfacique maîtrisée. L'air utilisé est sec, filtré et déshumidifié.

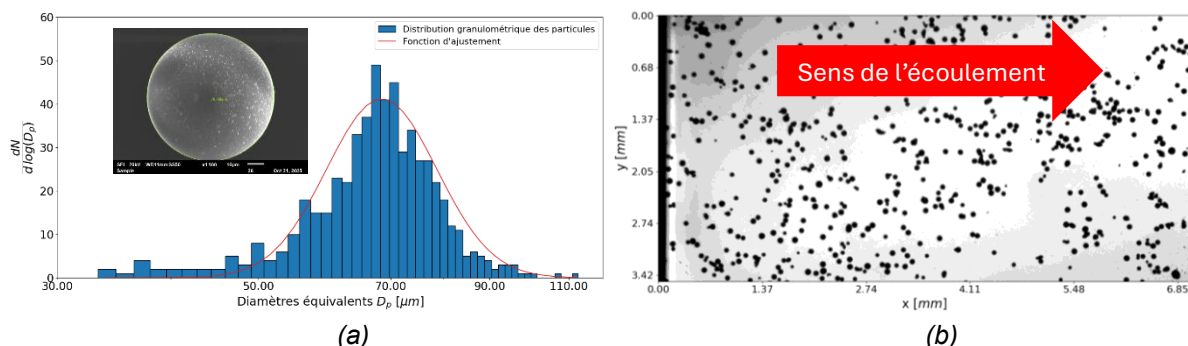


Figure 1 : en (a) la distribution granulométrique en nombre avec une image MEB d'une des particules et en (b) une image du dépôt de particules

Les expériences de mise en suspension ont été réalisées à l'aide du banc BISE du LPMA qui est composé d'une veine aéraulique et d'un système d'acquisition vidéo à haute fréquence. La technique optique utilisée repose sur l'ombroscopie, permettant la visualisation des particules et le suivi de leurs trajectoires au cours du temps.

Pour chaque expérience, la caméra enregistre 21 837 images à une fréquence de 4000 Hz, correspondant à une durée totale d'acquisition d'environ 5,46 s. Le champ de vue couvert par la caméra est de  $24,6 \text{ mm}^2$ .

La figure 1a présente la distribution granulométrique des particules déposées, dont le diamètre médian équivalent en surface projetée est évalué à  $68,9 \mu\text{m}$  et l'écart-type géométrique à 1,7. Toutefois, on remarque que l'ajustement d'une fonction log normale ne représente pas parfaitement les données expérimentales, probablement en raison de la faible statistique de l'échantillon. La figure 1b montre un dépôt monocouche de particules (en noir) vu par la caméra. La bande sombre observée sur la partie gauche de l'image correspond au bord de la lame de verre sur laquelle on effectue le dépôt. Dans cet exemple, la concentration surfacique en particules est estimée à  $23,04 \text{ mm}^{-2}$ , soit approximativement 570 particules.

Lors des essais, le dépôt est soumis à un écoulement d'air dont la vitesse moyenne au centre de la veine aéraulique augmente linéairement de  $3 \text{ m/s}$  à  $16 \text{ m/s}$ , soit une accélération de  $2,38 \text{ m.s}^{-2}$ . Ces vitesses correspondent à des vitesses de frottement comprises entre  $0,16 \text{ m.s}^{-1}$  et  $0,71 \text{ m.s}^{-1}$ . Les conditions expérimentales ainsi définies induisent un régime d'écoulement turbulent dans la veine aéraulique, caractérisé par un nombre de Reynolds compris entre 19400 et 36400, et une intensité de turbulence d'environ 11 % caractéristique de ces types d'expériences [2, 5].

Le système vidéo haute cadence mis en place permet d'observer l'évolution des dépôts de particules avec une résolution temporelle de  $250 \mu\text{s}$  pour le champ visuel choisi. Des algorithmes de traitement d'images sont appliqués a posteriori afin de suivre les trajectoires des particules ainsi que les interactions écoulement-particules et particule-particule au cours du temps. L'algorithme utilisé a été développé au sein du LPMA en langage Python 3.12.3 et permet de traiter de façon synchronisée les 21 837 images enregistrées par la caméra et les valeurs de vitesse fournies par l'anémomètre à fil chaud. Le programme se décompose en quatre étapes principales : (i) détection de la position des particules et de leurs propriétés géométriques telles que le diamètre, la surface projetée et la circularité suivant la méthode proposée dans la littérature [6] ; (ii) labellisation des particules, consistant à attribuer un identifiant unique afin de suivre l'évolution temporelle de chaque particule ; (iii) calcul des grandeurs cinématiques de chaque particule à chaque instant, incluant la vitesse, l'accélération et l'énergie cinétique ; (iv) détection des collisions entre les particules.

### 3. RESULTATS

La figure 2 présente l'évolution temporelle de la fraction de particules mises en suspension pour trois concentrations surfaciques différentes (axe de gauche), ainsi que l'évolution de la vitesse au centre de la veine aéraulique représentée en gris (axe de droite). Les concentrations surfaciques initiales de chacun des trois dépôts sont de  $5,29 \text{ mm}^{-2}$ ,  $14,43 \text{ mm}^{-2}$  et  $23,05 \text{ mm}^{-2}$ , représentées respectivement en bleu, orange et vert.

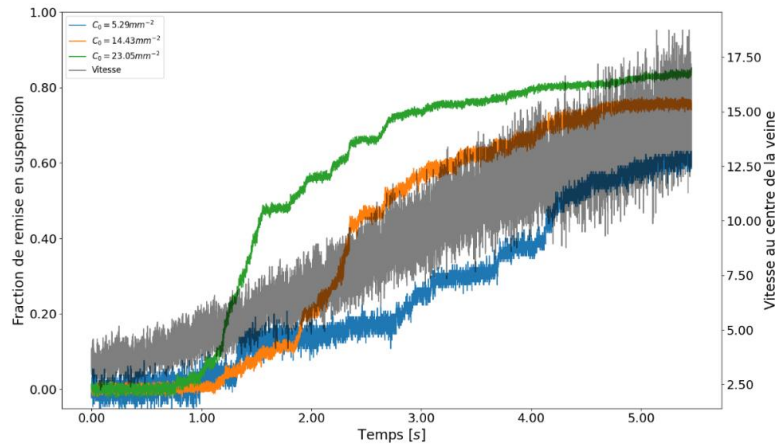


Figure 2 : Fractions mises en suspension pour trois essais avec des concentrations surfaciques initiales différentes.

Il apparait clairement que l'augmentation de la concentration surfacique initiale du dépôt entraîne une remise en suspension plus rapide et une fraction remise en suspension finale plus élevée. A la fin de l'acquisition, soit pour  $t_{max} = 5,46 \text{ s}$ , les fractions remises en suspension atteignent respectivement 61%, 76% et 85% pour les essais de faible, moyenne et forte concentration surfacique initiale. L'analyse des courbes met en évidence trois phases successives dans le processus de remise en suspension : (1) une première phase correspondant à l'atteinte de la vitesse seuil (comprise entre  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) nécessaire au détachement des particules les plus grosses ; (2) une phase de forte remise en suspension, située entre  $U = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $U = 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  pour la courbe verte,  $U = 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  pour la courbe orange et  $U = 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  pour la courbe bleue ; (3) enfin, une phase de remise en suspension lente, au-delà de  $U = 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

C'est au cours de la seconde phase que les collisions entre les particules jouent un rôle déterminant. Les observations issues des séquences vidéo montrent que plus la densité initiale du dépôt est élevée, plus la fréquence des collisions augmente, conformément à la probabilité de contact croissante avec la densité de particules. Cette fréquence de collision,  $\nu$ , varie au cours du temps, car elle dépend de la concentration surfacique  $C_{moy}(t)$  et du diamètre moyen  $D_{moy}(t)$  des particules. Elle est calculée comme proposée par [2] :

$\nu = \frac{u^*}{\lambda_m}$ , avec  $u^*$  la vitesse de frottement et  $\lambda_m$  le libre parcours moyen d'une particule avant une collision tel

que  $\lambda_m D_{moy}(t) C_{moy}(t) = 1$  soit  $\lambda_m = \frac{1}{D_{moy}(t) C_{moy}(t)}$ .

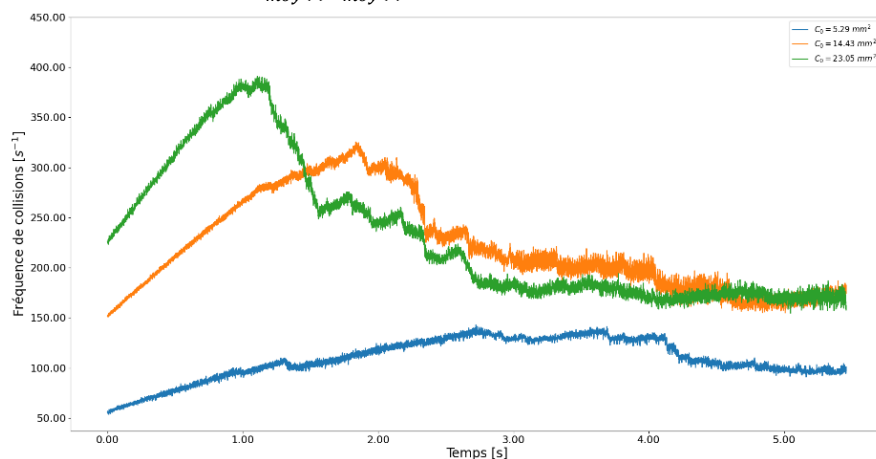


Figure 3 : Fréquences de collisions en fonction du temps pour les trois essais.

La figure 3 présente cette fréquence au cours du temps pour les trois essais présentés précédemment. La phase 1 entre 0 et 1 s, montre une augmentation linéaire de la fréquence de collision, liée à l'évolution de  $u^*$ . En effet, pendant cette phase,  $\lambda_m$  est constant car il n'y a pas de remise en suspension. La phase 2 débute lorsque les particules les plus grosses sont mises en mouvement et que les premières collisions détachent les particules immobiles. La concentration et le diamètre moyen diminuent, ce qui entraîne une augmentation du libre parcours moyen et une diminution de la fréquence de collisions. L'évolution de la fraction remise en suspension durant cette phase se révèle complexe à analyser (figure 2) : d'une part, les courbes présentent une forme en « marches d'escalier », indiquant un détachement par paquets hétérogènes ; d'autre part, plusieurs types de collisions sont identifiées sur les images parmi lesquelles : le détachement des deux particules qui interagissent, le cas où une seule des deux particules est détachée, des collisions sans détachement et des collisions en cascade. Ces dernières, par leur effet multiplicateur, sont responsables des augmentations soudaines du nombre de particules détachées, à l'origine des paliers observés sur les courbes de fractions de remise en suspension. Par exemple, pour l'essai avec une concentration initiale de  $C_0 = 23,05 \text{ mm}^{-2}$ , à  $U = 5,17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  il y a détachement d'une particule par les forces aérauliques qui engendre des collisions en cascade et conduit au détachement de 24 autres particules, jusqu'à  $U = 5,43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , soit en environ 0,11 s. Enfin, pendant la phase 3, la fréquence de collisions se stabilise et semble tendre vers une valeur constante.

#### 4. DISCUSSIONS

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence déterminante de la densité initiale du dépôt sur la dynamique de remise en suspension. Une concentration surfacique plus élevée favorise à la fois une remise en suspension plus rapide et plus importante. Ce comportement peut être attribué à une probabilité accrue de collisions entre les particules lorsque la concentration surfacique augmente, favorisant ainsi le processus de détachement. En effet, les collisions inter-particulaires observées durant la phase de forte remise en suspension jouent un rôle clé dans la propagation du détachement, certaines particules en mouvement pouvant alors transférer une partie de leur énergie cinétique à leurs voisines encore immobiles, provoquant ainsi leur détachement. Ce mécanisme d'entraînement par collision contribue à la formation de cascade de détachement localisées, responsables des variations abruptes - ou « marches » - observées sur les courbes de fraction remise en suspension. Ces observations confirment que la remise en suspension ne résulte pas uniquement de l'action directe des forces aérauliques (cisaillement et fluctuation de pressions), mais également d'interaction collectives entre particules. Ce couplage entre les effets aérauliques et les phénomènes collisionnels rend ce processus fortement non-linéaire et dépendant de la configuration initiale du dépôt. La comparaison des différentes phases de la remise en suspension suggère également une évolution temporelle des mécanismes dominants. La première phase, correspondant à l'atteinte de la mise en mouvement, est gouvernée principalement par l'équilibre entre les forces de cisaillement et les forces d'adhésion. La seconde phase, plus rapide, est dominée par les interactions dynamiques entre particules en mouvement et particules encore fixées. Enfin, la dernière phase, plus lente, traduit un régime d'érosion résiduelle où seules les particules les plus fortement adhérentes subsistent. Ces résultats rejoignent qualitativement plusieurs études antérieures [1, 2, 7] sur la remise en suspension de particules, mais apportent ici pour la première fois une visualisation directe des collisions et une quantification de la fréquence de collision en fonction du temps.

[1] Banari, A., Henry, C., Eidt, R., Lorentz, P., Zimmer, K., Hampel, U. and Lecrivain, G. (2021). Evidence of collision-induced resuspension of microscopic particles from a monolayer deposit. *Physical review of fluids*, **6**, L082301.

[2] Rondeau, A., Peillon, S., Vidales, A., Benito, J. Uñac, R., Sabroux, J.C. and Gensdarmes, F. (2021). Evidence of inter-particles collision effect in airflow resuspension of polydisperse non-spherical tungsten particle in monolayer deposits, *Journal of Aerosol Science*, **154**, 105735.

[3] Henry, C. and Minier, J.P. (2014). Progress in particle resuspension from rough surfaces by turbulent flows, *Progress in energy and Combustion Science*, **45**, 1-53.

[4] Villagrán Olivares, M.C., Uñac, R.O., Vidales, A.M. and Benito, J.G. (2025). The role of particle collisions in enhancing resuspension. *Journal of Aerosol Science*, **190**, 106666.

[5] Matsusaka S. (2015). High resolution analysis of particle deposition and resuspension in turbulent channel flow, *Aerosols Science and Technology*, **49**, 739-746.

[6] Cazes, C., Fiabane, L., Theron, F., Heitz, D. and Le Coq, L. (2023). Image analysis for the real time-resolved description of microparticle resuspension under transient airflow, *Journal of Aerosol Science*, **173**, 106198.

[7] Esders, E., Georgi, C., Babel W. and Thomas C. (2021). Quantitative detection of aerial suspension of particles with a full-frame visual camera for atmospheric wind tunnel studies. *Aerosol Science and Technology*, **6**, 530-544.