

# ANALYSE DE L'ACCÉLÉRATION D'UN ÉCOULEMENT DE CANAL EN VUE D'Étudier LA REMISE EN SUSPENSION DE PARTICULES

M. Baptiste<sup>\*1,2</sup>, L. Fiabane<sup>1</sup>, F. Theron<sup>2</sup>, L. Blondel<sup>1</sup>, P. Georgeault<sup>1</sup>, D. Heitz<sup>1</sup>, L. Le Coq<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INRAE OPAAL, CS 64427, 35044 Rennes, France

<sup>2</sup>IMT Atlantique, CNRS, GEPEA, CS 20722, Nantes Cedex 3 44307, France

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

## TITLE

**Analysis of the acceleration of a channel flow to study particle resuspension**

## RESUME

Un écoulement en canal a été caractérisé pour étudier la remise en suspension de particules par des flux d'air accélérés. Les profils de vitesse obtenus ont une forme classique d'écoulement en canal turbulent, avec une vitesse maximale à mi-hauteur et des fluctuations de vitesse plus importantes près des parois qu'au cœur de l'écoulement. Bien qu'une accélération constante soit requise de la part du ventilateur, le flux présente différentes phases d'accélération. Des mesures au fil chaud et au film chaud seront effectuées pour obtenir des valeurs de vitesse dans la sous-couche visqueuse, ce qui permettra d'estimer les forces aérodynamiques exercées sur les particules déposées sur la paroi.

## ABSTRACT

A channel flow was characterized to study the resuspension of particles by accelerated air flows. The velocity profiles obtained have a classic turbulent channel flow shape, with a maximum velocity at mid-height and larger velocity fluctuations near the walls than at the flow core. Although constant acceleration is required from the fan, the flow exhibits different acceleration phases. Hot-wire and hot-film measurements will be carried out to obtain velocity values in the viscous sublayer, making it possible to estimate the aerodynamic forces exerted on the particles deposited there.

**MOTS-CLÉS** : remise en suspension, particules, écoulement de canal, turbulence / **KEYWORDS**: resuspension, particles, channel flow, turbulence

## 1. INTRODUCTION

La remise en suspension (RES) de particules par des écoulements est un phénomène largement étudié depuis des décennies du fait de ses nombreuses applications, notamment dans les domaines de l'environnement, de la qualité de l'air ou encore de la santé et du nucléaire. Ce phénomène consiste en le réentraînement de particules initialement déposées sur une paroi sous l'effet de l'écoulement d'un fluide. Afin de décrire et quantifier ce phénomène on utilise généralement la fraction de particules remises en suspension, c'est-à-dire le rapport entre le nombre de particules ayant été emportées par l'écoulement et le nombre de particules initialement présentes à la paroi. De précédentes études ont montré que plusieurs paramètres jouent sur le décollement des particules comme leur taille (Barth et al., 2014), leur morphologie (Wu et al., 1992), leur rugosité ou encore leur nature. D'autres études s'intéressent à l'effet de la vitesse moyenne au centre de l'écoulement sur la RES (Mukai et al., 2009). Une vitesse d'écoulement plus élevée implique une force aérodynamique plus importante sur les particules et est donc plus propice à leur décollement.

Cependant avant de soumettre expérimentalement un dépôt de particules à un écoulement constant, il existe inévitablement une période d'accélération de l'air jusqu'à la vitesse voulue. Cette phase d'accélération est rarement évoquée dans les études sur le phénomène. En réalisant une quantification de la fraction remise en suspension en fonction du temps dès la phase d'accélération, Debba (2018) et Cazes (2023) ont mis en évidence que la RES commence pendant la phase d'accélération et qu'une grande partie des particules resuspendues l'est avant l'atteinte du régime permanent. Il a notamment été démontré que le phénomène, lorsqu'il se produit, démarre après l'apparition de la turbulence en proche paroi.

La présente étude a pour but de comprendre quels phénomènes aérodynamiques liés à l'écoulement en proche paroi sont responsables de la RES pendant la phase d'accélération. Y a-t-il une notion de vitesse de frottement seuil pour que le phénomène se produise ? Comment la turbulence influence t-elle la RES ?

Pour tenter de répondre à ces questions, une caractérisation préalable de l'écoulement a été réalisée, à plusieurs vitesses débitantes au régime permanent puis à plusieurs accélérations moyennes. Dans un second temps nous étudieront le comportement des particules initialement déposées à la paroi et identifierons les propriétés instantanées de l'écoulement dans la sous-couche visqueuse responsables de la RES de particules pendant l'accélération de l'air.

## 2. MATERIEL ET METHODES

Afin d'étudier l'impact de l'accélération sur la RES, des particules sont soumises à des écoulements d'air accélérés. Elles sont déposées sur la paroi inférieure d'un banc expérimental, de section rectangulaire, sur une paroi en verre (en jaune, à droite sur la figure 1) afin de minimiser l'influence de la rugosité du support sur la RES. Les particules choisies sont des particules en verre, de morphologie sphérique afin de simplifier les modèles. Une caractérisation de l'écoulement est réalisée dans cette conduite afin de connaître l'écoulement auquel les particules sont exposées. Cette caractérisation a été réalisée par Vélocimétrie par images de particules (PIV) à l'endroit où les particules sont déposées.

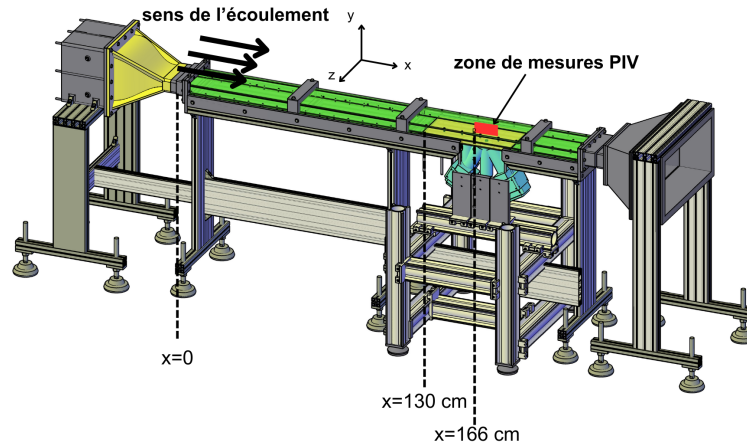


Figure 1: Schéma du banc expérimental utilisé pour les expériences de remise en suspension

Le banc est représenté sur la figure 1. La veine de mesure a une section rectangulaire de dimensions  $2l \times 2h = 20 \times 4 \text{ cm}^2$  et une longueur  $L = 200 \text{ cm}$ . Elle est précédée d'une boîte de mélange (non représentée sur la figure) permettant l'homogénéisation de la fumée utilisée comme traceur pour la PIV et d'un convergent (à gauche en jaune sur la figure 1). En amont de la veine d'essai, une mousse et un nid d'abeille permettent de casser les potentielles structures présentes dans l'air aspiré par la veine. L'écoulement est mis en mouvement par aspiration par un ventilateur situé en aval de la veine d'essai.

Les acquisitions PIV sont réalisées sur le plan médian de la conduite dans une zone de mesure entre  $x = 166 \text{ cm}$  et  $173,5 \text{ cm}$  soit  $83 < x/h < 87$ ,  $x$  étant la distance de l'entrée de la veine. La caméra utilisée pour la PIV a une fréquence d'acquisition de  $6 \text{ kHz}$  et un buffer de  $40000$  images ce qui correspond à une durée d'acquisition d'environ  $6,6 \text{ s}$ . Sa résolution est de  $11,86 \text{ px/mm}$  soit  $84 \text{ } \mu\text{m/px}$ . Les traitements PIV sont réalisés avec le logiciel DaVis de LaVision. Ces traitements sont réalisés afin d'obtenir des champs de vitesse instantanée sur toute la durée de l'acquisition. De ces champs sont extraits les profils verticaux de vitesses moyennes, lors de l'étude d'écoulements permanents, et les évolutions temporelles de la vitesse, à différentes positions verticales de la veine, lors de l'étude des régimes accélérés. L'acquisition est synchronisée avec le démarrage du ventilateur qui met en route l'écoulement.

Trois écoulements permanents sont étudiés, de vitesses moyennes au centre  $U_c = 4,8, 8,6$  et  $14,8 \text{ m/s}$ . Plusieurs écoulements transitoires ont été étudiés, tous démarrant d'une vitesse nulle mais atteignant des vitesses constantes au centre différentes. Ces écoulements ont été soumis à des accélérations voulues constantes, de  $1,5 \text{ m/s}^2$  et  $3,0 \text{ m/s}^2$ .

## 3. RESULTATS

### 3.1. Écoulement permanent

La figure 2 représente les profils verticaux de vitesse moyenne sur le plan médian de la conduite, pour 3 écoulements de vitesses respectives  $4,8, 8,6$  et  $14,8 \text{ m/s}$ , et de nombres de Reynolds  $Re_h = U_c h / \nu = 6100, 11000$  et  $19200$  où  $\nu$  est la viscosité cinématique de l'air. Dans chaque cas, les valeurs de vitesse sont adimensionnées par la vitesse moyenne au centre de la veine afin de pouvoir comparer l'allure des profils entre eux et de vérifier leur autosimilarité. Cet adimensionnement permet également la comparaison avec les écoulements de canal de la littérature. La position verticale dans la veine est adimensionnée par la demi-hauteur  $h$  de la veine pour rester conforme aux notations usuelles des écoulements de canal. La figure 2 montre que la valeur maximale est atteinte à mi hauteur de la conduite en  $y/h = 0$  pour toutes les valeurs de  $U_c$ . On remarque que l'allure des profils pour  $U_c = 8,6$  et  $14,8$  est semblable, ils se chevauchent sur presque toute la hauteur de la veine à l'exception d'une zone entre  $y/h = -0,2$  et  $-0,6$ . De part et d'autre du maximum,

la vitesse décroît jusqu'aux bords où elle atteint sa valeur minimale. On devrait trouver une vitesse nulle aux parois en  $y/h = \pm 1$  pour satisfaire la condition de non glissement, cependant la PIV ne nous permet pas d'obtenir des points si proches des parois dû au peu d'ensemencement en traceur à ces endroits.

Le profil correspondant à  $U_c = 4,8$  m/s n'a pas la même allure que les deux autres. Il a une forme plus aplatie et la vitesse maximale semble être atteinte avant le milieu de la conduite. Cette allure montre qu'à cette vitesse, l'écoulement n'est pas totalement établi à la position de la mesure.

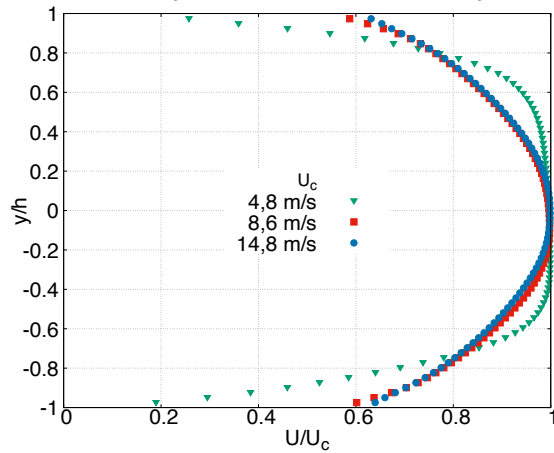


Figure 2: Profils de vitesses pour différentes vitesses moyennes d'écoulement

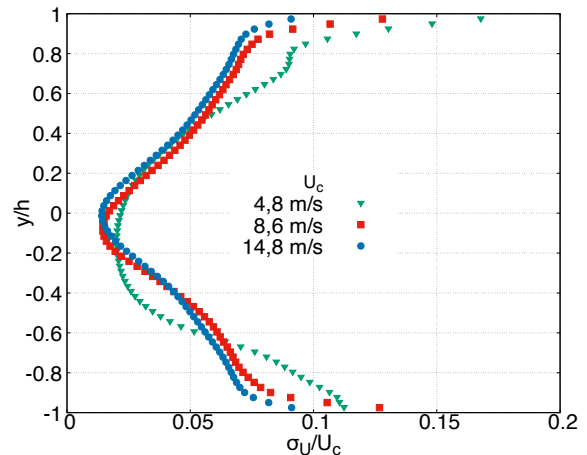


Figure 3: Profils de l'écart-type de la vitesse pour différentes vitesses moyennes d'écoulement

Sur la figure 3 se trouve les profils de l'écart-type moyen de la vitesse en fonction de la hauteur. Cette donnée représente la variation moyenne autour de la valeur de vitesse moyenne. On remarque ici que les profils pour les trois différentes vitesses moyennes  $U_c$  ne se superposent pas. En s'écartant du centre on remarque que la valeur de l'écart-type en chaque point augmente légèrement puis abruptement à partir de  $y/h = \pm 0,8$ . Cela indique que la vitesse ne varie que peu dans le cœur de la veine, avec un taux de turbulence inférieur à 10% et que les fluctuations s'accroissent en se rapprochant des bords. Ici encore la condition de non glissement implique une vitesse nulle à chaque instant à la paroi, cependant la résolution de nos mesures ne permet pas d'observer une baisse des fluctuations en très proche paroi.

Afin de compléter les données PIV et d'améliorer les mesures de vitesse proche des parois, des mesures par fil et film chauds seront réalisées. Grâce à une traverse verticale (ThorLabs) il sera possible de réaliser un grand nombre de mesures très proches de la paroi et ainsi obtenir un profil de vitesse dans la couche visqueuse. Les profils obtenus dans la couche visqueuse seront comparés aux profils habituels introduits par (Schlichting & Gersten, 2017). Ces mesures permettront de qualifier la vitesse de l'écoulement en proche paroi, le taux de turbulence et les fluctuations moyennes auxquelles les particules sont soumises.

### 3.2. Écoulement transitoire

On présente dans cette partie les résultats de l'étude sur un écoulement accéléré d'une vitesse nulle à une vitesse moyenne au centre de 8,6 m/s avec une accélération de 3,0 m/s<sup>2</sup>. La figure 4 représente l'évolution temporelle de la vitesse à différentes hauteurs de la veine, au centre et proche des parois, à 0,4 mm des bords. La première information observable sur cette figure est le fait qu'il existe un délai d'environ 0,5 s entre la mise en route du ventilateur, et la mise en route de l'écoulement. Ce délai est probablement dû au fait qu'au démarrage du ventilateur, l'air autour des pales est d'abord mis en mouvement localement avant qu'un écoulement ne se crée dans le cœur de la veine.

La deuxième information remarquable sur la courbe représentant l'évolution au centre, est que bien qu'une accélération constante de 3,0 m/s<sup>2</sup> soit demandée au ventilateur, l'écoulement passe par différentes phases d'accélération distinctes. Il existe peu de données sur les écoulements de canal accélérés, il ne nous est donc pas possible de dire si ce phénomène est commun et repéré dans d'autres expériences. Cependant dans leurs expériences d'écoulements accélérés dans des conduites, (Kurokawa & Morikawa, 1986) montrent les évolutions de vitesses en fonction du temps et ces dernières semblent également passer par plusieurs phases d'accélération.

En comparant l'évolution de la vitesse à différentes positions de la conduite on remarque que les fluctuations de vitesse sont bien plus importantes proche des parois, ici en  $y/h = \pm 0,98$ , qu'au centre. Cela s'explique par le fort gradient de vitesse proche des parois, ce qui implique un plus fort cisaillement entre les couches du fluide. À une vitesse suffisante, le cisaillement entre les différentes couches crée de la turbulence, qui est représentée par ces grandes variations dans les signaux de vitesse. On remarque également des fluctuations de vitesse sur le signal au centre de la conduite, cependant ces variations semblent apparaître vers 2,8 s tandis que proche des parois les fluctuations apparaissent plus tôt, vers 2,5 s.

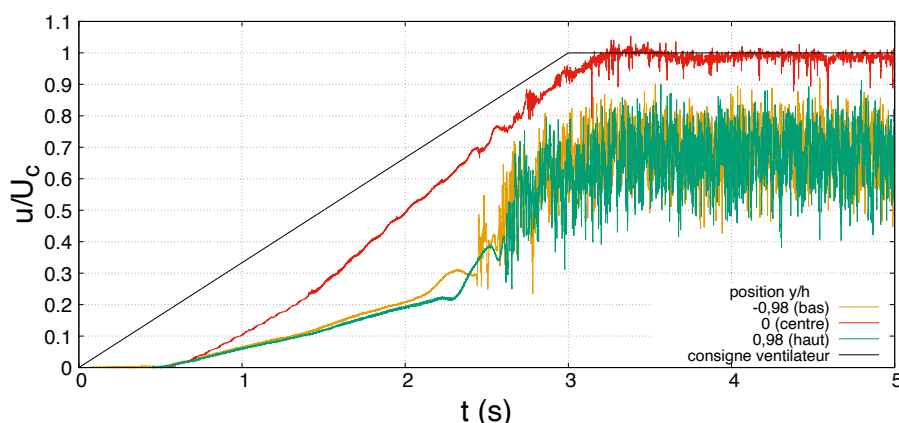


Figure 4: Évolution de la vitesse à différentes hauteurs de la veine, la courbe en noir représente la commande du ventilateur correspondant à une accélération constante de  $3,0 \text{ m/s}^2$

Ces informations indiquent que le comportement de l'écoulement au centre n'est pas le même que celui de l'écoulement proche des parois. Il sera donc impératif d'investiguer plus en détails l'évolution de la vitesse dans la sous-couche visqueuse, endroit où les particules sont déposées. L'évaluation de la vitesse de friction, grâce à l'utilisation d'anémométrie par film chaud par exemple, permettra de relier le cisaillement à la paroi au comportement des particules déposées. Sachant que la RES se fait essentiellement pendant l'accélération de l'air et que l'écoulement présente des phases distinctes, on cherche à savoir si ces différentes phases modifient le comportement des particules et leur resuspension.

#### 4. CONCLUSION

La caractérisation d'un écoulement de canal a été réalisée d'une part lorsqu'une vitesse constante s'y écoule, et d'autre part lorsque l'air y est accéléré à partir d'une vitesse nulle. Les profils de vitesse adimensionnée quand  $U_c = 4,8, 8,6$  et  $14,8 \text{ m/s}$  montrent un comportement différent de l'écoulement à basse vitesse qu'à plus haute vitesse. De même, les profils représentant les fluctuations de vitesses ne se superposent pas. L'étude des écoulements accélérés montre que pendant la phase transitoire, l'écoulement passe par plusieurs phases d'accélération bien qu'une accélération constante soit demandée au ventilateur. De plus, l'écoulement n'est pas accéléré de la même manière au bord qu'en proche paroi. La turbulence apparaît d'abord proche des parois, où le cisaillement est maximal, avant de se propager vers le centre de la conduite. Les mesures réalisées par PIV nous indiquent comment le cœur de l'écoulement se comporte, cependant cette méthode n'a pas permis d'obtenir des mesures assez proches de la paroi. Afin de connaître la vitesse dans la couche limite visqueuse où l'on dépose les particules, des mesures par anémométrie par fil et film chauds seront réalisées très prochainement. Cela permettra de relier directement la vitesse au centre à une vitesse de friction à la paroi d'une part, et de vérifier l'existence d'une relation entre vitesse de friction et RES d'autre part.

#### 5. REFERENCES ET REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier l'Agence Innovation Defense de la Direction Générale des Armées et la région Pays de la Loire pour leur financement. Merci également à Gregory Nesen pour sa disponibilité et son aide pour la mise en place des différents éléments expérimentaux utilisés.

- 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>
- Cazes, C. (2023). Remise en suspension de microparticules dans l'air induite par des événements transitoires dans l'écoulement, approche expérimentale [IMT Atlantique]. <https://theses.fr/2023IMTA0363>
- Debba, D. (2018). Etude locale des mécanismes de réentraînement des microparticules en conduite ventilée. IMT Atlantique.
- Kurokawa, J., & Morikawa, M. (1986). Accelerated and Decelerated Flows in a Circular Pipe: 1st Report, Velocity Profile and Friction Coefficient. *Bulletin of JSME*, 29(249), 758–765. <https://doi.org/10.1299/jsme1958.29.758>
- Mukai, C., Siegel, J. A., & Novoselac, A. (2009). Impact of Airflow Characteristics on Particle Resuspension from Indoor Surfaces. *Aerosol Science and Technology*, 43(10), 1022–1032. <https://doi.org/10.1080/02786820903131073>
- Schlichting, H., & Gersten, K. (2017). *Boundary-Layer Theory*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52919-5>
- 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>