

# ETUDE DES PHENOMENES LOCAUX SUR LE DEPOT DES AEROSOLS DANS LES CONDUITS DE VENTILATION

R. Ploix\*<sup>2</sup>, J. Malet<sup>1</sup> et E. Gehin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), PSN-RES, SCA, LEMAC, Gif-sur-Yvette, 91192, France

<sup>2</sup>Univ Paris Est Créteil, CERTES, F-94000 Créteil, France

\*Courriel de l'orateur : remy.ploix-upec@irsn.fr

## TITLE

Effects of local phenomena on aerosol deposition in ventilation ducts

## RESUME

Le dépôt d'aérosols joue un rôle important dans les transferts des pollutions particulières, notamment dans les installations industrielles. Dans la littérature, les études traitant du dépôt des aérosols utilisent généralement la notion de vitesse de dépôt d'aérosols, adimensionnée à l'aide d'une vitesse de frottement dépendant des conditions de l'expérience (matériaux de la paroi du dépôt, nombre de Reynolds). Cette vitesse de frottement peut être obtenue à l'aide de différentes méthodes. Une campagne de mesure de vitesses de frottement a été réalisée sur l'installation DIESE de l'IRSN (gaine rectangulaire). Elle a mis en évidence la sensibilité du modèle de Clauser à des perturbations dans l'écoulement mais également au positionnement du capteur par rapport au centre de la zone de mesure. Ces résultats mettent en cause l'utilisation d'une vitesse de dépôt adimensionnée par une vitesse de frottement moyenne pour analyser des résultats de dépôt local dans des zones où l'écoulement est non établi ou perturbé (singularité). En conséquence, pour étudier le dépôt dans des singularités, telles que des bifurcations (embranchement de trois conduits de ventilation), il est préférable de s'intéresser directement à la masse déposée. Trois essais de dépôt dans des bifurcations ont été réalisés, deux essais dans les mêmes conditions et dans la même bifurcation pour tester la reproductibilité de la mesure, et le troisième sur une bifurcation avec une géométrie plus abrupte.

## ABSTRACT

Aerosol deposition plays an important role in particulate pollution transfers, in particular in industrial facilities. Deposition studies often use the non-dimensional deposition velocity using friction velocity which depends on experimental conditions (Reynolds number, deposition wall material). Different methods allow to calculate friction velocity from experimental measurements. A friction velocity measurements campaign has been conducted on the DIESE facility at IRSN (rectangular duct). The sensitivity of the Clauser model against flow perturbations and sensor position from the centre of measurement zone has been demonstrated. These results are questioning the use of a non-dimensional deposition velocity based on a mean friction velocity to analyse local deposition measurements in non-established flow or perturbed flow (singularity). Therefore, the use of deposited mass seems better to study aerosol deposition in specific ventilation modules (singularity) like T-junctions (junction between 3 ventilations ducts). Three aerosol deposition measurements on T-junction have been conducted, two of them are same conditions and same singularity to test the repeatability of the experimental protocol, and the third one has been conducted on a more abrupt angle of a T-junction.

**MOTS-CLES** : aérosol, dépôt, singularités, vitesse de frottement

**KEYWORDS**: aerosol, deposition, singularity, friction velocity

## 1. CONTEXTE ET OBJECTIF

Dans certaines installations nucléaires, des aérosols radioactifs sont susceptibles d'être mis en suspension (plus particulièrement en situation accidentelle), puis d'être transportés dans les réseaux de ventilation jusqu'aux filtres destinés à limiter les rejets dans l'environnement. Le dépôt de ces aérosols dans les réseaux de ventilation peut induire des accumulations locales représentant un risque pour les opérateurs en cas de maintenance ou d'intervention post-accidentelle. Il est donc important de pouvoir prédire les zones de dépôt préférentiel. Dans la littérature, on trouve de nombreuses études traitant du dépôt d'aérosol en conduit sur différents matériaux et dans différentes conditions (Sippola et Nazaroff (2004), Sun *et al.* (2012), Lu et Lu (2015)). Pour pouvoir comparer les résultats de ces études, le paramètre le plus utilisé est la vitesse de dépôt adimensionnée  $V_D^+$  (Kallio et Reeks (1989), Zhang et Chen (2009), Roupsard *et al.* (2013), Xu *et al.* (2020)).

$$V_D^+ = \frac{V_D}{u^*} = \frac{J}{c_m} \times \frac{1}{u^*} = \left( \frac{m_{déposée}}{\Delta T \times S} \right) \times \frac{1}{c_m \times u^*} \quad (\text{Eq 1})$$

Où  $V_D$  est la vitesse de dépôt,  $J$  le flux massique d'aérosol se déposant sur une surface  $S$ ,  $c_m$  la concentration massique en gaine,  $m_{déposée}$  la masse déposée pendant une durée  $\Delta T$ , et  $u^*$  la vitesse de frottement.

Les publications traitant du dépôt d'aérosol détaillent rarement leur façon d'obtenir la vitesse de frottement. De plus, l'origine de l'utilisation de la vitesse de frottement pour adimensionner une vitesse de dépôt provient d'études dans des conduits de petits diamètres où le dépôt global est regardé, ce qui justifie l'utilisation de cette adimensionnalisation. Néanmoins, les études sur le dépôt d'aérosols à échelle réelle permettent de

s'intéresser à la localisation du dépôt (dépôt dit local). Il convient alors de vérifier la pertinence de l'adimensionnalisation de la vitesse de dépôt local par une vitesse de frottement moyenne. Cette vitesse de frottement peut être obtenue à l'aide de différentes méthodes, notamment à l'aide du modèle de la zone logarithmique ( $y^+ > 30$ ) d'une couche limite, proposé initialement par Clauser (1954) puis déclinée sous de nombreuses variantes dans la littérature (Betterman (1966), Weber (1999), Zhao et Wu (2005)). L'objectif de ce travail est d'évaluer les variations de la vitesse de frottement dans une gaine de ventilation pour évaluer son impact sur l'analyse du dépôt local dans un écoulement perturbé, comme il peut l'être dans une bifurcation.

## 2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

### 2.1. Installation DIESE

Le banc d'essai utilisé à l'IRSN est appelé DIESE (Dépôt dans les Installations, les Equipements et les Sondes d'Échantillonnage). C'est un conduit de ventilation de section rectangulaire de grande taille (400 x 600 mm), long d'environ 40 m et présentant différentes singularités que l'on retrouve communément dans les installations de ventilation industrielles (coudes, rétrécissement, bifurcation). Sur la Figure 1, une vue de l'installation DIESE en trois dimensions est présentée, avec sur la droite une bifurcation et sur la gauche une vue de l'intérieur de la gaine.

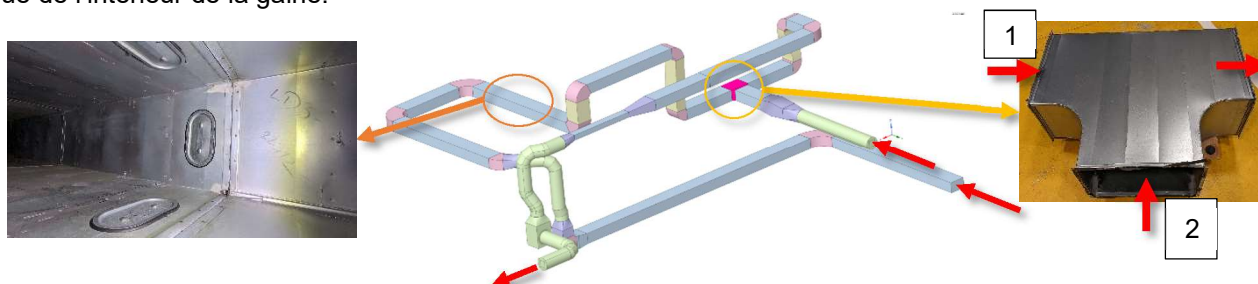


Figure 1 Schéma de l'installation DIESE ; à gauche, une vue de l'intérieur de la gaine avec une trappe d'intervention et une bride de jonction entre deux tronçons ; à droite, une bifurcation démontée

### 2.2. Mesure de la vitesse de frottement

La vitesse de frottement s'obtient par la mesure du profil de vitesse en proche paroi qui a été réalisé à l'aide d'une sonde à fil chaud haute fréquence (1 kHz) Dantec Dynamics 55P14. Cette sonde était montée sur un rail de déplacement micrométrique automatique OWIS. Les deux instruments étaient automatisés et surveillés par un opérateur pour éviter la casse du fil chaud.

La vitesse de frottement est ensuite obtenue par régression du modèle logarithmique de Clauser (Eq 2) sur la zone logarithmique du profil expérimental ( $y^+ > 30$ ).

$$\bar{U} = u^* \times \left( \frac{1}{k} \times \ln \left( \frac{y \times u^*}{\nu} \right) + B \right) \quad (\text{Eq 2})$$

Où  $\bar{U}$  est la vitesse moyenne longitudinale,  $u^*$  la vitesse de frottement,  $k$  la constante de Von Karman,  $y$  la position par rapport à la paroi,  $\nu$  la viscosité cinématique de l'air et  $B$  une constante sans dimension.

### 2.3. Mesure du dépôt d'aérosols

Pour mesurer le dépôt des aérosols, l'IRSN a mis en place un protocole de mesure locale du dépôt (Costa et al. 2022). Ce protocole permet d'obtenir les différentes grandeurs composant l'équation (1), dont la masse déposée ( $m_{\text{déposée}}$ ) qui est prélevée par frottis et la concentration massique ( $C_m$ ) qui est obtenue à l'aide de cannes de prélèvement placées au centre de la gaine.

## 3. CAMPAGNE DE MESURE DE LA VITESSE DE FROTTEMENT

Au cours de cette campagne, des profils de vitesse en proche paroi ont été réalisés en amont et en aval d'une trappe (10 cm) et d'une bride de jonction (vue de gauche sur la Figure 1) et à 50% (20 cm) et 60% (24 cm) de la hauteur de la gaine. Tous les essais ont été réalisés à un nombre Reynolds de  $4,4 \cdot 10^5$ .

Tableau 1 Récapitulatif des vitesses de frottement déterminées expérimentalement ainsi que du coefficient de corrélation entre le modèle de Clauser et le profil expérimental

	Hauteur du capteur	Nombre de Reynolds	$u^*$ expérimental	$R^2$
Amont Trappe et Bride	60 %	$4,4 \cdot 10^5$	0,453	0,991
Aval Trappe et Bride	60 %	$4,4 \cdot 10^5$	0,465	0,947
Hauteur différente*	50 %	$4,4 \cdot 10^5$	0,519	0,991

\*en amont de la trappe et de la bride de jonction

Le Tableau 1 présente les vitesses de frottement calculées à l'aide de l'équation de Clauser, ainsi que la corrélation entre le modèle et les mesures. On constate une bonne corrélation pour les profils sans modification de l'écoulement en amont d'une trappe ( $R^2 > 0,99$ ), ce qui indique que la loi logarithmique de la couche limite est bien retrouvée. Pour le profil en aval de la trappe d'intervention, situé à 10 cm en aval d'une variation de surface de 5 mm de hauteur, le coefficient de corrélation diminue à 0,95 même si la variation de la vitesse de frottement obtenue n'est que de 3%. Cette différence est relativement faible ; or, les zones situées en aval des trappes et jonctions montrent des dépôts surfaciques plus élevés. On peut donc penser que l'allure du profil de la couche limite a un impact au-delà de la vitesse de frottement calculée. Ce résultat se retrouve sur la Figure 2 où sont tracés les profils de vitesses adimensionnées des trois cas étudiés. Le profil de vitesse en aval de la trappe d'intervention (en vert) a une allure très différente des autres profils et n'apparaît pas rectiligne en étant présenté en échelle logarithmique. L'impact de cette trappe en amont du point de mesure est notable sur le profil et remet en cause l'utilisation de la vitesse de frottement calculée.

Le profil réalisé à 50 % de la hauteur permet de calculer une vitesse de frottement avec un bon coefficient de corrélation, mais 15 % plus élevée que la vitesse de frottement à 60 % de la hauteur. On retrouve une nette différence de vitesse entre ces deux profils en Figure 3 (courbes bleu et orange). Cette méthode de mesure de la vitesse de frottement est donc sensible à son environnement et à son positionnement si les surfaces de

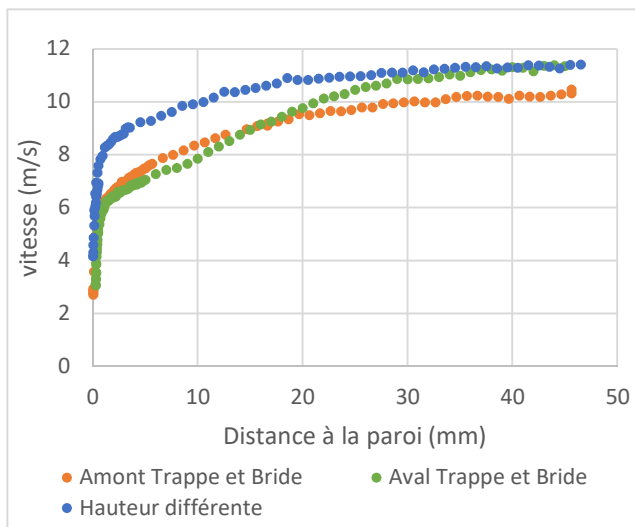


Figure 3 Profils horizontaux des vitesses moyennes longitudinales des trois cas présentés

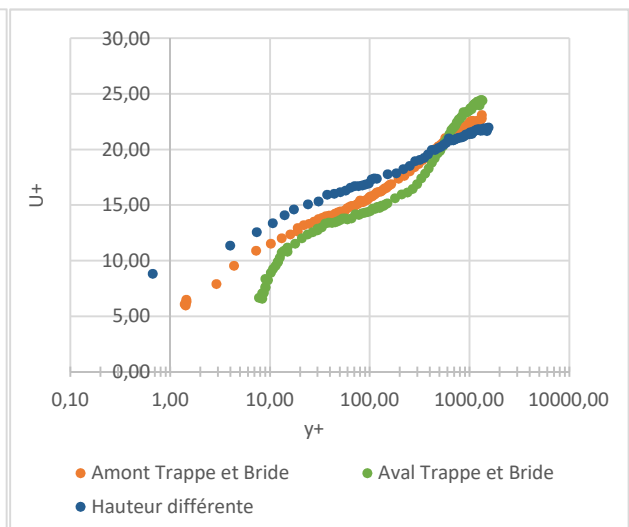


Figure 2 Profils de vitesses adimensionnées par la vitesse de frottement pour les trois cas étudiés

## 4. APPLICATION À LA BIFURCATION EN T

### 4.1. Aéraulique

Pour étudier le dépôt dans une bifurcation, on s'intéresse d'abord à l'allure du profil de vitesse afin d'évaluer les perturbations de l'écoulement justifiant ou non de l'utilisation de la vitesse de dépôt adimensionnée. La bifurcation étudiée est présentée en Figure 1 ; elle comporte deux entrées et une sortie (entrées et sortie horizontales). Des profils des vitesses moyennes longitudinales dans les trois branches ont été réalisés et sont présentés en Figure 4.

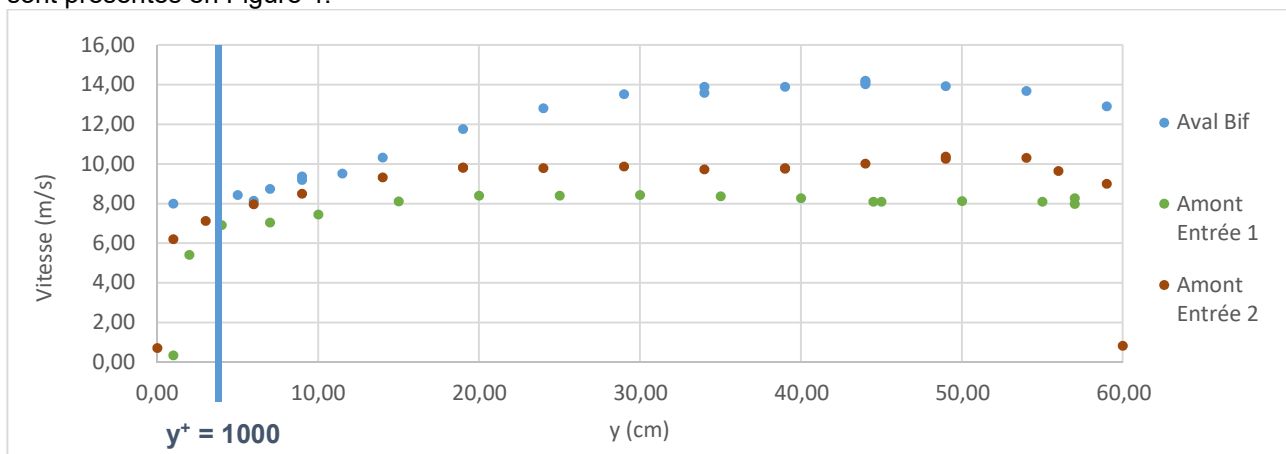


Figure 4 Profils horizontaux des vitesses moyennes longitudinales dans les trois branches de la bifurcation

On constate que les profils de vitesse dans les trois branches sont très différents. Les profils au niveau des deux entrées d'air sont plutôt plats, mais ce n'est pas le cas pour le profil en sortie qui est fortement perturbé et ceci également dans la zone de la couche limite (matérialisée par la ligne verticale bleue). Comme attendu, l'écoulement dans la bifurcation n'est pas établi et il paraît alors préférable de s'intéresser aux masses déposées plutôt qu'à une vitesse de dépôt.

#### 4.2. Zones de prélèvement

Le protocole d'essai prévoit de déposer un aérosol tracé à l'uranine dans le circuit de ventilation puis de venir prélever l'aérosols sur des zones de 100 cm<sup>2</sup> parfaitement délimitées selon un protocole établi, afin de déterminer la quantité d'aérosol déposé sur chacune d'entre elles. Des zones de prélèvement dans des bifurcations ont donc été proposées pour des essais de dépôt et sont présentées en Figure 5.

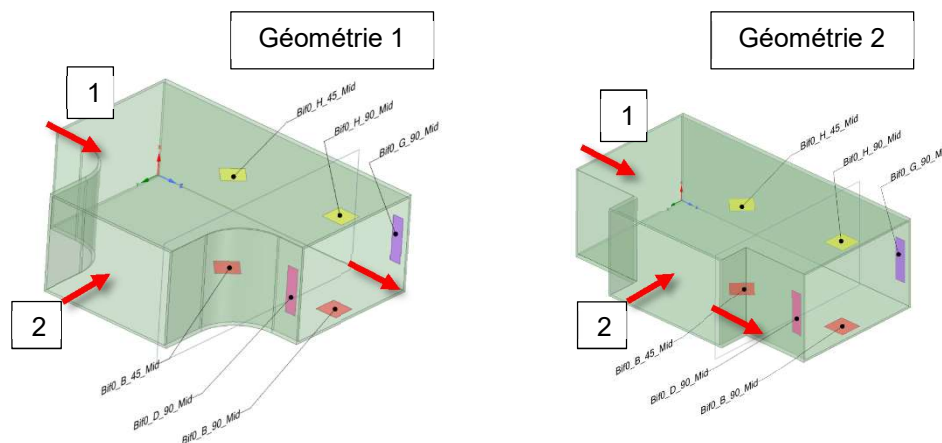


Figure 5 Zones de prélèvement d'aérosols dans les bifurcations

Trois essais ont été réalisés. Les deux premiers dans les mêmes conditions sur la géométrie 1 pour tester la reproductibilité de la mesure, et le troisième a été réalisé sur la géométrie 2 qui est plus abrupte, ce qui influence le dépôt en aval. Ces résultats seront détaillés dans la présentation.

## 5. CONCLUSION

Une campagne de mesures de vitesse en proche paroi a été réalisée et permet de conclure que les variations de la vitesse de frottement dans une gaine de ventilation sont importantes, ce qui a un impact sur la vitesse de dépôt adimensionnée et donc sur l'analyse du dépôt local des aérosols. Des résultats d'essais de dépôt dans deux bifurcations seront présentés et comparés en utilisant les masses déposées, une méthode plus adaptée dans le cas des écoulements non établis ou perturbés.

Costa, D., Malet, J., Gehin, E. An experimental protocol for measuring aerosol deposition in industrial-sized ventilation ducts, *Measurement Science and Technology*, 33(9), 2022.

Sippola, M. R., Nazaroff, W. W. Experiments Measuring Particle Deposition from Fully Developed Turbulent Flow in Ventilation Ducts, *Aerosol Science and Technology*, 38(9), 914-925, 2004.

Sun, K., Lu, L., Jiang, H. A numerical study of bend-induced particle deposition in and behind duct bends, *Building and Environment* 52, 77-87, 2012.

Lu, H., Lu, L. A numerical study of particle deposition in ribbed duct flow with different rib shapes, *Building and Environment* 94, 43-53, 2015.

Kallio, G.A., Reeks, M.W. A numerical simulation of particle deposition in turbulent boundary layers, *International Journal of Multiphase Flow* 15, Issue 3, 433-446, 1989.

Zhang, Z., Chen, Q. Prediction of particle deposition onto indoor surfaces by CFD with a modified Lagrangian method, *Atmospheric Environment* 43, 319-328, 2009.

Roupsard, P., Amielh, M., Maro, D., Coppalle, A., Branger, H., Connan, O., Laguionie, P., Hébert, D., Talbaut, M. Measurement in a wind tunnel of dry deposition velocities of submicron aerosol with associated turbulence onto rough and smooth urban surfaces, *Journal of Aerosol Science* 55, 12-24, 2013.

Xu, Z., Han, Z., Qu, H. Comparison between Lagrangian and Eulerian approaches for prediction of particle deposition in turbulent flows, *Powder Technology* 360, 141-150, 2020.

Bettermann, D., Contribution à l'étude de la convection force turbulente le long de plaques rugueuses, *Int. J. Heat Mass Transfer*. 9, 153-164, 1966.

Weber, R. O. Remarks on the definition and estimation of friction velocity, *Boundary-Layer Meteorology* 93, 197-209, 1999.

Zhao, B., Wu, J. Modeling particle deposition from fully developed turbulent flow in ventilation duct, *Atmospheric Environment* 40, 457-466, 2006.