

# VALIDATION DU PROTOCOLE DE MESURE DE DEPOT D'AEROSOLS DANS UNE GAINES DE RESEAU DE VENTILATION DE TAILLE INDUSTRIELLE

D. Costa\*<sup>1,2</sup>, J. Malet<sup>1</sup> et E. Géhin<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 Creteil, , CERTES, F-94000 Creteil, France

\*Courriel de l'orateur : delphine.costa-upec@irsn.fr

## TITLE

**Validation of aerosol deposition measurement protocol in a duct of an industrial ventilation network**

## RESUME

Le dépôt d'aérosols dans les gaines des réseaux de ventilation joue un rôle important dans les transferts de pollution particulaire. Jusqu'à présent, les études de dépôt portaient majoritairement sur des lignes de prélèvement d'aérosols (de dimension de l'ordre du cm) ou des gaines droites de réseaux de taille réduite (diamètre hydraulique  $D_h$  d'environ 15 cm) et le plus souvent circulaires. Aujourd'hui, il est important d'obtenir des résultats sur des gaines de taille industrielle ( $D_h = 50$  cm) rectangulaires, pour s'assurer qu'un effet d'échelle ne biaise pas les résultats des calculs prospectifs obtenus par application de modèles développés pour des gaines circulaires de petites dimensions. De plus, les études de singularités, comme les coudes, restent rares à ces dimensions. Une étude expérimentale est donc en cours sur un banc d'essais de l'IRSN composé d'un réseau de ventilation de grande échelle. Des premières expériences en amont et en aval d'un coude ont permis de valider le protocole de mesure de dépôt.

## ABSTRACT

Aerosol deposition in ventilation networks plays an important role in particulate pollution transfers. Deposition studies have been mostly focused on aerosol sampling lines so far (being around one-cm-diameter tubes) and on small size ventilation ducts (hydraulic diameter  $D_h$  around 15 cm), which generally have circular cross-section. Today, it is a priority to gather results from larger rectangular ducts ( $D_h = 50$  cm), to verify that a scale effect does not affect prospective results, when using models based on small dimensions and circular ducts. An experimental study is thus in progress on a test bench composed of a large scale ventilation network at IRSN. First experiments were focused on a bend and enabled the aerosol deposition measurement protocol to be validated.

**MOTS-CLES** : gaine de ventilation, dépôt d'aérosols, aéraulique / **KEYWORDS**: ventilation duct, aerosol deposition, aerualics

## 1. CONTEXTE & OBJECTIFS

La caractérisation des transferts de contaminants particuliers à l'intérieur des installations industrielles ou des établissements recevant du public est une problématique d'intérêt croissant. Ainsi, l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) mène actuellement des travaux de recherche sur le dépôt des aérosols dans les réseaux de ventilation des installations nucléaires, avec pour principales applications une meilleure estimation de la quantité de particules impactant les filtres barrières en cas d'accident (incendie notamment), ainsi que l'évaluation des dépôts localisés pouvant entraîner des accumulations de particules radioactives.

Dans la littérature, de nombreux travaux portent sur le dépôt particulaire dans des tubes de petits diamètres, tels que les études sur les lignes de prélèvement d'aérosols, qui sont, dans la grande majorité des cas, des tubes de section circulaire. Concernant les réseaux de ventilation, quelques travaux portent sur des gaines droites d'environ 15 cm de diamètre (Sippola et Nazaroff, 2004; Ben Othmane, 2011; Barth *et al*, 2013; You et Wan, 2014). Si l'on s'intéresse plus particulièrement aux singularités, les coudes, par exemple, ont été quelque peu étudiés dans les mêmes dimensions (Sippola et Nazaroff, 2005; Kuan *et al*, 2007; Da *et al*, 2015), mais toujours pour des gaines circulaires ou carrées, donc symétriques. Or, travailler sur une singularité de grande échelle et à section rectangulaire soulève des problématiques liées à un potentiel effet d'échelle, aux effets des écoulements secondaires (liés au coude et aux sections rectangulaires - Gaci et Nemouchi, 2016) et à la mesure du dépôt. De plus, les débits importants entraînent une forte dilution des aérosols dans les conduits, rendant le dépôt plus difficilement détectable.

Ainsi, l'objectif de cet article est de présenter la vérification de la détection et la répétabilité de mesures de dépôt d'aérosols de l'ordre du micron obtenues directement en paroi en amont et en aval d'un coude sur un réseau de ventilation de taille industrielle et à section rectangulaire.

## 2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

### 2.1. Installation

Le banc d'essai DIESE (Dépôt dans les Installations, les Equipements et les Sondes d'Echantillonnage) est un réseau de ventilation de section rectangulaire de grande taille (400 mm x 600 mm) et d'une longueur d'environ 40 m. Il est présenté avec ses entrées et sortie d'air à gauche sur la Figure 1. DIESE est une installation modulaire composée de nombreux tronçons raccordés entre eux et interchangeables selon les besoins.

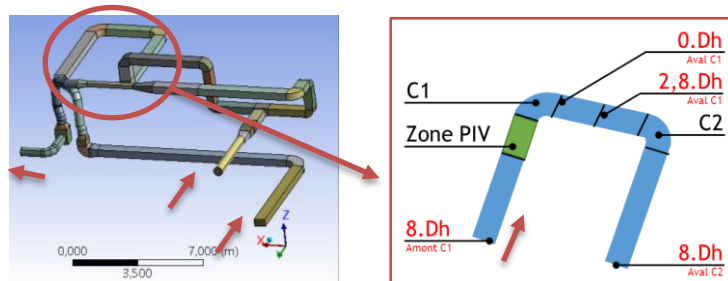


Figure 1. Schéma de DIESE, indication des premiers coudes et lieux des mesures liées à la vitesse de dépôt

### 2.2. Instrumentation

DIESE dispose d'une instrumentation globale comprenant des mesures de pression, température, humidité et débit, échantillonnées à 1 Hz. Les mesures de débit sont vérifiées par spectrométrie à l'hélium (ASM 100 HDS, Alcatel). Localement, DIESE est équipé de dispositifs de déplacement transverse pour réaliser des profils grâce à des sondes intrusives, comme les fils chauds, tubes de Pitot, thermocouples, préleveurs d'aérosol, ou par aspiration, tels que la spectrométrie à l'hélium, le compteur optique (WELAS 2100, PALAS), le spectromètre « Aerodynamic Particle Sizer » (TSI). DIESE dispose également de sondes de prélèvement d'aérosols sur filtre pour la mesure par fluorescence. Pour des mesures non intrusives par PIV (Particle Image Velocimetry), des hublots et tronçons transparents sont disponibles. Des trappes sont utilisables sur les gaines pour réaliser des mesures de dépôt. Les mesures locales sont indiquées en rouge, à droite sur la Figure 1. Pour la mesure de fluorescéine, un spectromètre de fluorescence est utilisé (FLUO LOG, ESE).

### 2.3. Génération d'aérosols

L'installation dispose d'un générateur d'aérosols à nébulisation ultrasonore (LIXEA atomizer série BA – 500 kHz, SinapTec). La canne d'injection est verticale et centrée à l'intérieur de la gaine. Son dimensionnement a été optimisé pour minimiser les pertes par dépôt par impaction et sédimentation. Celle-ci est installée sur un tronçon de gaine circulaire, deux mètres en amont du premier point de mesure « 8.Dh ». La solution nébulisée est une solution à 25 g/L de fluorescéine, avec ajout de sel dans de l'eau déminéralisée. A partir de celle-ci sont générés des aérosols, entraînés par un flux d'air, puis séchés par un flux d'air à co-courant. On obtient alors un aérosol sec fluorescent en sortie du générateur, avec un débit de 10 m<sup>3</sup>/h.

### 2.4. Démarche expérimentale

Pour quantifier le dépôt, la vitesse de dépôt adimensionnée  $V_d^+$  est la grandeur utilisée :

$$V_d^+ = \frac{J/C_m}{u^*}$$

avec  $J$  le flux massique de dépôt (kg/m<sup>2</sup>/s),  $C_m$  la concentration massique en gaine (kg/m<sup>3</sup>) et  $u^*$  la vitesse de frottement (m/s). La démarche consiste donc à mesurer ces trois grandeurs principales :

- 1) **le flux de dépôt  $J$** , qui dépend directement de la masse déposée et de la surface d'échantillonnage. Pour obtenir la masse déposée, le dépôt est récolté par frottis, directement sur la surface de la gaine, pour éviter tout biais induit par des modifications de couche limite ou de substrats. L'aérosol a été choisi fluorescent pour utiliser la spectroscopie de fluorescence (Kasavan et Doherty, 2000), qui présente une faible limite de détection (choisie parmi d'autres techniques de mesure – Costa *et al.*) ;
- 2) **la concentration massique en gaine  $C_m$** , dont on doit s'assurer qu'elle est représentative du point de mesure de dépôt pour assurer la répétabilité des mesures et que la distribution granulométrique de l'aérosol généré est stable au cours du temps. Pour cela, on mesure par prélèvement sur filtre, via une canne de prélèvement coudée de 55 cm de long et de 8 mm de diamètre intérieur. Celle-ci est associée à un filtre de 47 mm de diamètre et une pompe pour se placer à l'isocinétisme ; le système de prélèvement est lavé après chaque expérience pour prendre en compte le dépôt présent à l'intérieur de celui-ci ;

- 3) la vitesse de frottement  $u^*$ , relative à l'écoulement. Elle peut être calculée théoriquement ou mesurée à l'aide d'une rugosité « effective » basée sur la perte de charge mesurée dans la gaine ou à l'aide de mesures par PIV.

La procédure d'essai commence par une ventilation en balayage de trente minutes (montée lente du débit pour éviter la remise en suspension). Des premiers frottis « blancs » sont réalisés. Ensuite, la génération est lancée pour trente minutes, en même temps que les prélèvements sur filtre. Après l'arrêt de la génération, DIESE est laissé en ventilation en balayage pour trente minutes supplémentaires. Enfin, des frottis sont réalisés sur différentes surfaces (sol, plafond, parois verticales).

Des mesures de vitesse sont faites en amont et en aval de C1 (cf. Figure 1, à droite) pour mieux caractériser les conditions aérauliques particulières du coude. De la même façon, des mesures de dépôt sont réalisées en amont et en aval du coude pour y valider le protocole expérimental. Des essais sont prévus pour des diamètres de particules de 1 à 5  $\mu\text{m}$  et des nombres de Reynolds de  $9 \times 10^4$  à  $3 \times 10^5$ , à température ambiante variant entre 15 et 30°C ; l'humidité restant inférieure à 70% pour ne pas influencer la génération d'aérosols.

### 3. VALIDATION DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL

La validation du protocole expérimental passe par plusieurs étapes :

- 1) on s'assure dans un premier temps de la stabilité du diamètre de l'aérosol généré. La Figure 2 permet de vérifier que le diamètre de l'aérosol est stable, avec l'utilisation d'un compteur optique (WELAS 2100, PALAS) placé en sortie du générateur. Le diamètre optique médian en masse (DOMM) et l'écart-type géométrique ont été mesurés sur 30 minutes. Le calcul du DOMM suppose que les particules sont sphériques, non poreuses et que leur indice de réfraction est celui du latex, leur masse volumique est celle du sel. La répétabilité du diamètre généré est également vérifiée grâce à des mesures au compteur optique.

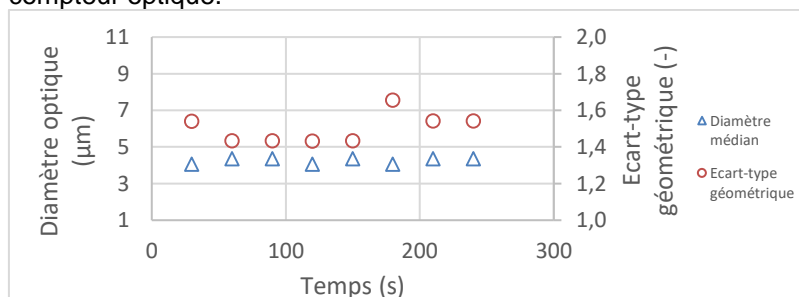


Figure 2. Evolution du diamètre optique médian en masse et de l'écart-type géométrique sur trente minutes, pour un aérosol type

- 2) le débit d'injection n'étant pas stable, il est choisi de mesurer la masse déposée sur la même durée que la mesure de concentration massique, en faisant l'hypothèse que la fluctuation de masse déposée est proportionnelle à la fluctuation massique de l'aérosol généré.
- 3) on s'assure que les conditions aérauliques sont stables, on vérifie : a) la répétabilité de la dilution de l'aérosol dans la gaine, en s'assurant que les débits volumiques dans DIESE sont répétables ; b) pour une section donnée, la répétabilité des profils de vitesse dans la largeur de la gaine. Ces derniers, mesurés à 0.Dh au Pitot et au fil chaud et présentés sur la Figure 3 (intervalle de confiance de 67%, adimensionnés par rapport à la vitesse maximale du profil), sont répétables et auto-semblables aux différents nombres de Reynolds étudiés (vitesses en gaine de 4 à 12 m/s). L'évolution des profils en aval du premier coude, sur deux sections (0.Dh et 2,8.Dh en aval de C1) est également présentée Figure 3.

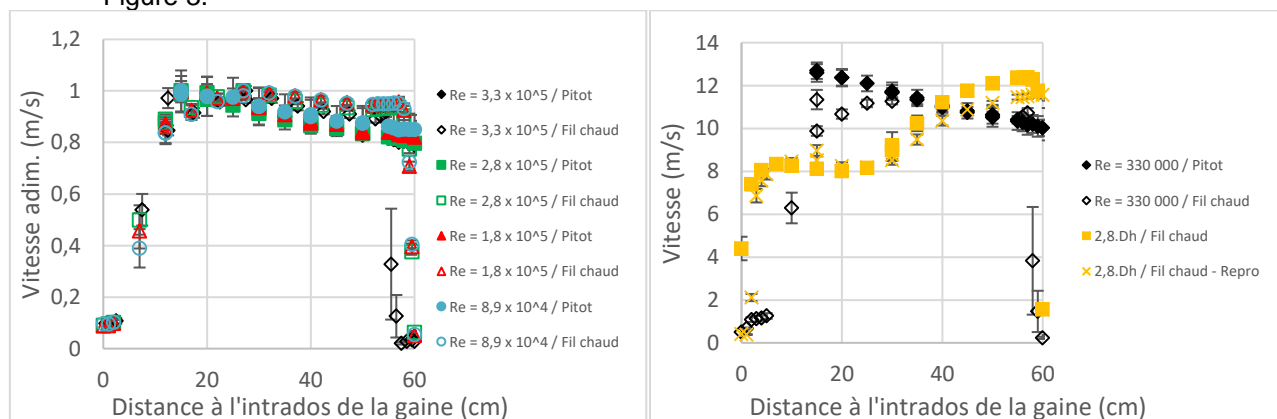


Figure 3. Profils de vitesse mesurés directement en aval de C1 pour les quatre débits d'étude et profils à 0 et 2,8.Dh en aval de C1 pour  $Re = 3,3 \times 10^5$

Les mesures de concentration massiques dans la gaine en amont du coude sont utilisées pour les vitesses de dépôt dans le coude puisqu'expérimentalement, les mesures obtenues en 8.Dh en amont de C1 et en 8.Dh en aval de C2 sont semblables. La répétabilité de la mesure de la vitesse de frottement est assurée grâce à la répétabilité de la mesure des débits et des pressions.

4) la vitesse de dépôt expérimentale doit être stable. Le protocole expérimental doit alors montrer que la récolte du dépôt par frottis est répétable. Si la stabilité et la répétabilité des éléments précédents sont assurées, alors on considère que la répétabilité de la mesure de la vitesse de dépôt valide indirectement la répétabilité de la mesure de la masse déposée et mesurée par frottis. Des résultats obtenus sur cinq essais une surface au sol horizontale de 100 mm x 100 mm à 8.Dh en aval de C2 sont présentés sur la Figure 4. Les écarts à la moyenne des vitesses de dépôt expérimentales obtenues sont calculés et présentés avec leur incertitude respective pour un intervalle de confiance de 67%. Cet écart est compris dans l'incertitude, validant ainsi le protocole expérimental.

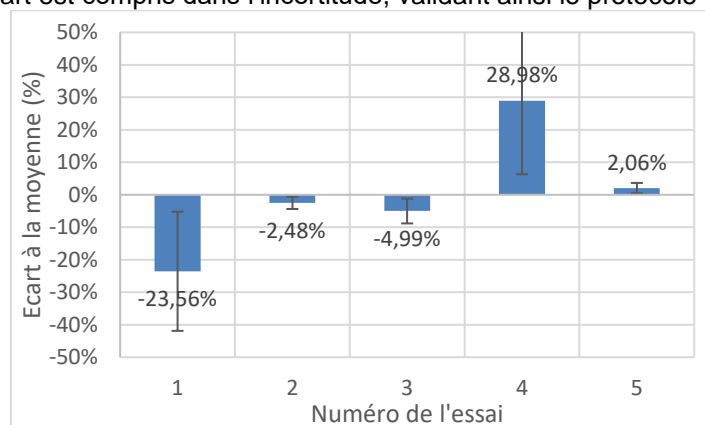


Figure 4. Ecart à la moyenne des vitesses de dépôt expérimentales obtenues à 8.Dh en aval de C2 pour cinq essais – les barres d'erreur correspondent à l'incertitude élargie totale

#### 4. CONCLUSION

Une première campagne de mesures a été réalisée sur l'installation DIESE, réseau de ventilation de taille industrielle. Les expériences ont permis de valider le protocole expérimental utilisé, en vérifiant la stabilité de la génération, la répétabilité du ratio de la concentration massique en gaine et de la concentration déposée et en vérifiant la répétabilité des mesures de dépôt directement sur la surface de la gaine.

Ces travaux permettent d'utiliser un protocole expérimental pertinent pour la caractérisation locale du dépôt dans différentes zones en amont, en aval et dans une singularité, telle que différents coudes.

Barth, T., Lecrivain, G., et Hampel, U. (2013). Particle deposition study in a horizontal turbulent duct flow using optical microscopy and particle size spectrometry. *Journal of Aerosol Science*, 60, 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2013.02.004>

Ben Othmane, M. (2011). *Compréhension Analyse et Maitrise des mécanismes d'encrassement dans les réseaux aérauliques des industries agroalimentaires*.

Costa, D., Malet, J., et Géhin, E. (à soumettre). *Dry aerosol particle deposition on indoor surface: review of direct measurement techniques*.

Da, G., Géhin, E., Ben Othmane, M., Havet, M., Sollic, C., et Motzkus, C. (2015). An experimental approach to measure particle deposition in large circular ventilation ducts. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(7), 4873-4880. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2859-y>

Gaci, F., et Nemouchi, Z. (2016). Etude de l'écoulement turbulent dans une conduite courbe par simulation des grandes échelles - champs statistiques. *Third International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution*. Présenté à Constantine, Algeria. Constantine, Algeria.

Kasavan, J., et Doherty, R. W. (2000). *Use of fluorescein in aerosol studies* (N° ADA384058; p. 25). U.S. Army Edgewood Chemical Biological Center.

Kuan, B., Yang, W., et Schwarz, M. P. (2007). Dilute gas–solid two-phase flows in a curved 90 ° duct bend: CFD simulation with experimental validation. *Chemical Engineering Science*, 62(7), 2068-2088. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.12.054>

Sippola, M. R., et Nazaroff, W. W. (2004). Experiments Measuring Particle Deposition from Fully Developed Turbulent Flow in Ventilation Ducts. *Aerosol Science and Technology*, 38(9), 914-925. <https://doi.org/10.1080/027868290507213>

Sippola, M. R., et Nazaroff, W. W. (2005). Particle Deposition in Ventilation Ducts: Connectors, Bends and Developing Turbulent Flow. *Aerosol Science and Technology*, 39(2), 139-150. <https://doi.org/10.1080/027868290908795>

You, S., et Wan, M. P. (2014). Particle concentration dynamics in the ventilation duct after an artificial release: For countering potential bioterrorist attack. *Journal of Hazardous Materials*, 267, 183-193. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.058>