



HAL
open science

Validation de mesures de dépôt d'aérosols dans des gaines rectangulaires de réseau de ventilation de grande taille

Delphine Costa, Jeanne Malet, Evelyne Géhin

► To cite this version:

Delphine Costa, Jeanne Malet, Evelyne Géhin. Validation de mesures de dépôt d'aérosols dans des gaines rectangulaires de réseau de ventilation de grande taille. Congrès Français sur les Aérosols 2022, ASFERA, May 2022, Paris, France. 10.25576/ASFERA-CFA2022-28818 . irsn-04098789

HAL Id: irsn-04098789

<https://irsn.hal.science/irsn-04098789v1>

Submitted on 16 May 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

VALIDATION DE MESURES DE DEPOT D'AEROSOLS DANS DES GAINES RECTANGULAIRES DE RESEAU DE VENTILATION DE GRANDE TAILLE

D. Costa*¹, J. Malet² et E. Géhin²

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

²Univ Paris Est Creteil, , CERTES, F-94000 Creteil, France

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

TITLE

Validation of aerosol deposition measurements in rectangular ducts of an industrial-size ventilation network

RESUME

Suite à la construction de l'installation DIESE, réseau de ventilation de taille industrielle et de section rectangulaire à l'IRSN de Saclay, des premières campagnes de mesures de dépôt d'aérosols ont été réalisées. Dans ce cadre, des vitesses de dépôt ont été obtenues en amont et en aval du premier coude de cette installation, sur les parois inférieure, supérieure et verticales de la gaine. D'un point de vue numérique, le modèle de dépôt d'aérosols développé par Ben Othmane *et al* (2010) pour des gaines de ventilation a été appliqué à l'installation DIESE dans le but d'obtenir des premières prédictions de vitesses de dépôt. Les vitesses de dépôt mesurées dans l'installation DIESE sont ainsi présentées et comparées aux travaux expérimentaux menés par Sippola et Nazaroff (2004) et aux prédictions issues du modèle de Ben Othmane *et al* (2010).

ABSTRACT

Aerosol deposition measurement campaigns were performed after the installation of DIESE, an industrial-size ventilation network with rectangular section at the IRSN, Saclay, France. Deposition velocities were measured upstream and downstream of DIESE first bend on floor wall, vertical walls and ceiling wall of the bend. From a numerical perspective, the aerosol deposition model developed by Ben Othmane *et al* (2010) for ventilation ducts was applied to DIESE configuration in order to obtain first deposition velocity predictions. Deposition velocities measured in DIESE are presented and compared to the experimental results of Sippola and Nazaroff (2004) and to the predictions from the model of Ben Othmane *et al* (2010).

MOTS-CLES : dépôt d'aérosol, ventilation, expérience, modèle / **KEYWORDS**: aerosol deposition, ventilation, experiment, model

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Un des objectifs de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) est d'améliorer la caractérisation des transferts de contaminants particulaires dans les installations nucléaires. Pour cela, des travaux de recherche sont en cours et portent sur l'identification et la quantification du dépôt d'aérosols dans les réseaux de ventilation des installations industrielles. En effet, en cas d'accident (incendie par exemple), une meilleure estimation de la quantité de particules parvenant jusqu'aux filtres barrières permettrait de mieux prédire un éventuel colmatage de ces filtres, ainsi que les rejets à l'environnement. De plus, l'accumulation de particules radioactives dans les réseaux de ventilation peut conduire à un risque pour le personnel travaillant à proximité dans l'installation, dû à un niveau de radiation trop élevé.

Jusqu'à maintenant, la recherche s'est essentiellement focalisée sur le dépôt de particules dans les tubes de petits diamètres, dont le diamètre est d'environ 1 cm et la section circulaire. Les travaux portant plus particulièrement sur les réseaux de ventilation ont été menés sur des gaines droites de rayon hydraulique entre 15 et 25 cm et de section circulaire ou carrée (Sippola et Nazaroff 2004; Ben Othmane 2011; Barth *et al* 2013; You et Wan 2014).

L'IRSN a donc décidé de mener des travaux sur le banc d'essai DIESE (Dépôt dans les Installations, les Equipements et les Sondes d'Echantillonnage). Il s'agit d'un réseau de ventilation de taille industrielle dont le diamètre hydraulique est de 48 cm et de section rectangulaire, section fréquemment retrouvée sur les installations industrielles. Ces travaux consistent en des mesures de dépôt d'aérosols dont la validation du protocole a été présentée lors du Congrès Français sur les Aérosols en 2021 (Costa *et al* 2021).

Pour compléter cette approche expérimentale, des modèles peuvent être utilisés. Dans la littérature, les mêmes tendances que pour les travaux de recherche expérimentaux sont notables : les modèles développés pour des gaines de grande taille sont peu nombreux. Le modèle retenu pour comparaison est celui développé

par Ben Othmane *et al* (2010). En effet, l'objectif de l'auteur était de prédire des vitesses de dépôt en accord avec ses mesures expérimentales réalisées dans une gaine circulaire de 25 cm de diamètre. L'objectif de cet article est donc de comparer les mesures de dépôt d'aérosols réalisées dans DIESE dans deux conduits droits, en amont et en aval d'un coude, avec les prédictions obtenues avec le modèle de Ben Othmane *et al* (2010).

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Expérience

Les gaines du banc DIESE ont une section rectangulaire de 400 mm x 600 mm et mesurent 60 m de long. La Figure 1 présente les entrées et sortie d'air, ainsi que quelques dimensions.

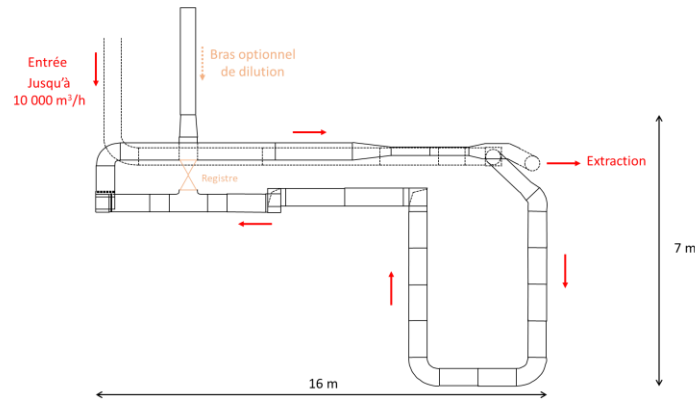


Figure 1. Schéma de DIESE

La vitesse de dépôt adimensionnée V_d^+ est la grandeur utilisée pour quantifier le dépôt :

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

avec J le flux massique de dépôt ($\text{kg/m}^2/\text{s}$), C_m la concentration massique en gaine (kg/m^3) et u^* la vitesse de frottement (m/s).

Pour quantifier toutes ces grandeurs, le protocole est le suivant :

- un aérosol de NaCl tracé à la fluorescéine sodée ou de fluorescéine sodée pure est généré avec un LIXEA atomizer série BA – 500 kHz, SinapTec. La stabilité du diamètre aérodynamique médian en masse (d_p en μm) et de l'écart-type géométrique (σ) a été vérifiée avec un APS (TSI) sur la durée de l'expérience (30 min) ; l'écart-type géométrique se situe autour de 1,3 à 1,4 ;
- la collecte du dépôt d'aérosols sur des surfaces de $100 \times 100 \text{ mm}^2$ se fait par utilisation de la technique par frottis, selon un protocole éprouvé comportant des critères, afin d'assurer la répétabilité de la collecte et de s'assurer que l'ensemble des particules déposées a bien été collecté (Costa *et al* 2021) ;
- le flux de dépôt J est obtenu par mesure de spectroscopie de fluorescence (FLUO LOG, ESE) du dépôt collecté ;
- la concentration en gaine C_m est également obtenue par spectroscopie de fluorescence après un prélèvement sur filtre en centre de gaine, par prélèvement isocinétique et en incluant le dépôt des aérosols dans l'ensemble de la ligne de prélèvement ;
- la vitesse de frottement u^* est estimée à partir de la relation suivante :

$$u^* = U \sqrt{\frac{f}{2}}$$

avec U la vitesse d'air moyenne (m/s) de l'écoulement en gaine obtenue par des mesures au fil chaud qui ont montré une bonne répétabilité des écoulements dans l'installation, et f le coefficient de frottement déduit de la mesure de la différence de pression. Ce dernier est déduit d'une mesure de perte de charge ΔP sur une longueur droite de DIESE ΔL (9,5 m de gaine) pour chaque vitesse d'air.

Par ailleurs, une analyse des écoulements est possible grâce à de nombreux profils de vitesse réalisés au fil chaud et avec la PIV.

2.2. Modèle

Le modèle développé par Ben Othmane *et al* (2010) est un modèle de prédiction de vitesses de dépôt. Il tient compte des mécanismes de dépôt suivant :

1. le dépôt par sédimentation, caractérisé par la vitesse de sédimentation, v_g (m/s), qui dépend du diamètre des particules :

$$v_g = \tau_p \times g$$

avec τ_p le temps de relaxation des particules (s) calculé à partir du diamètre de particule mesuré à chaque expérience et g l'accélération de la pesanteur ($m \cdot s^{-2}$) ;

2. le dépôt par diffusion Brownienne, qui dépend du diamètre des particules, et par diffusion turbulente. Ce dépôt est caractérisé par le coefficient suivant:

$$\frac{D_B + \xi_p}{\nu}$$

avec D_B la diffusivité Brownienne ($m^2 \cdot s^{-1}$), ν la viscosité cinématique du fluide ($m^2 \cdot s^{-1}$) et ξ_p la diffusivité turbulente ($m^2 \cdot s^{-1}$) considérée comme égale à la diffusivité turbulente de l'air et dont l'expression est donnée par Davies (1966). Cette expression dépend de la vitesse de frottement et du nombre de Reynolds, soit de trois paramètres expérimentaux : rugosité moyenne, vitesse d'air moyenne et taille de gaine, mais également d'une modélisation spécifique de la rugosité adimensionnée k^+ (avec $k^+ = k \frac{u_*'}{\nu}$ où k est la rugosité) incluant la notion d'origine virtuelle en paroi, pouvant représenter soit une rugosité dite « apparente », soit des effets locaux de perturbations de la surface par les aspérités inhérentes aux gaines de grande dimension ;

3. le dépôt par turbophorèse, qui dépend de la rugosité et de la vitesse d'air :

$$v_{tp} = -\tau_p \left(\frac{d(u'_{py})^2}{dy} \right)$$

avec v_{tp} la vitesse de turbophorèse (m/s), u'_{py} l'intensité de fluctuation de la vitesse de la particule selon la direction normale à la paroi et y la distance à la paroi selon cette direction. Cette intensité dépend de celle de l'air, ajustée à l'aide de constantes empiriques. Pour les résultats présentés par la suite, les constantes utilisées sont celles du modèle théorique d'écoulement établi de Ben Othmane (2011) dans une gaine de 16 cm de diamètre ;

4. le dépôt par thermophorèse (v_{ther} la vitesse de thermophorèse, m/s), qui dépend de l'écart entre la température de l'air et de la paroi ; non détaillé ici car les expériences ont été menées en condition isotherme.

L'expression de la vitesse de dépôt adimensionnée V_d^+ est la suivante et est résolue avec Mathcad (v.15).

$$V_d^+ = \frac{F(200)}{\int_{y_0^+}^{200} F(y^+) \times \left(\frac{D_B + \xi_p}{\nu} \right)^{-1} dy^+}$$

avec $F(y^+) = \exp \left(\int_{y_0^+}^{y^+} (v_{ther}^+ - i \cdot v_g^+ + v_{tp}^+) \times \left(\frac{D_B + \xi_p}{\nu} \right)^{-1} dy^+ \right)$, les vitesses de dépôt portant un « + » étant des

vitesses adimensionnées par la vitesse de frottement, $y_0^+ = \frac{d_p^+}{2} + k^+$, d_p^+ le diamètre des particules adimensionné et i caractérise l'orientation de la surface ($i = 1$ pour le sol et 0 pour une paroi verticale).

3. RESULTATS

Le dépôt a été collecté en amont et en aval (en rouge sur la Figure 2) du premier coude (en gras sur la Figure 2) du banc d'essai DIESE, soit dans des zones de régime d'écoulement non établi (à $7,2D_h$ d'une singularité pour l'amont du coude et $2,8D_h$ pour l'aval du coude). Les entrées et sorties d'air sont signalées par des flèches rouges.

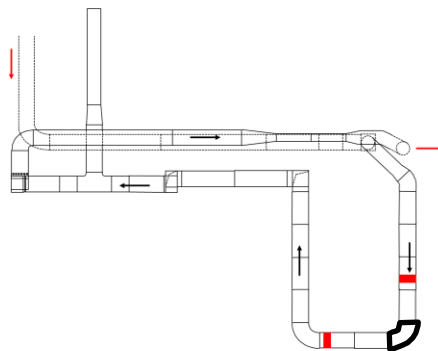


Figure 2. Schéma du banc d'essai DIESE avec indication du premier coude et des zones de collecte de dépôt

Les vitesses de dépôt adimensionnées par la vitesse de frottement sont tracées en fonction du temps de relaxation adimensionné des particules sur la Figure 3. Les mesures sont réalisées sur les quatre orientations de paroi, pour quatre vitesses d'écoulement (entre 3,5 et 11 m/s environ) et pour trois diamètres de particule (entre 2 et 10 μm). Les mesures en parois inférieure (sol) et verticales sont présentées ici pour une vitesse d'air d'environ 10 m/s. Les barres d'erreur correspondent aux incertitudes avec un coefficient d'élargissement de 2 pour les barres verticales et de 1 pour les barres horizontales. Le nombre de Reynolds varie de 9×10^4 à 3×10^5 . Les mesures sont comparées à celles de Sippola et Nazaroff (2004) pour une vitesse d'air d'environ 9 m/s. Dans leur cas, la vitesse de dépôt a été mesurée expérimentalement dans un conduit de section carrée, mesurant 15,2 cm de côté. Les résultats obtenus sur le banc d'essai DIESE sont cohérents avec ceux de Sippola et Nazaroff (2004), la sédimentation étant dominante pour la paroi inférieure. La validation du protocole et des résultats permet de mettre en place des campagnes de mesure à l'intérieur d'un coude.

Les résultats sont également comparés aux prédictions fournies par le modèle de Ben Othmane *et al* (2010). Trois courbes obtenues avec des rugosités adimensionnées k^+ différentes sont tracées. On remarque dans un premier temps que les résultats sont en bon accord avec les résultats de Sippola and Nazaroff (2004) et que les tendances de la modélisation sont retrouvées dans nos expériences, que ce soit pour les parois horizontales (sol) ou verticales. On propose aussi de tracer la modélisation pour différents paramètres de k^+ . Ce paramètre intervient dans y_0^+ et la modélisation y est très sensible, en particulier quand la sédimentation n'est pas dominante. k^+ ne tient pas seulement compte de la rugosité réelle de la gaine mais aussi de « l'origine virtuelle » de couche limite dont l'expression ne fait pas consensus (Dou 1980; Wood 1981; Zhao et Wu 2006). En première approche, on peut interpréter cette modélisation comme représentative des aspérités ponctuelles qui peuvent se trouver en surface de la gaine (jonction de tronçons, piquages, trappes de visite), induisant une augmentation globale de la diffusivité turbulente, sans pour autant modifier le coefficient de frottement moyen et les pertes de charge mesurées en gaine. Un travail d'analyse et de modélisation reste nécessaire pour cibler les bonnes valeurs de k^+ à utiliser.

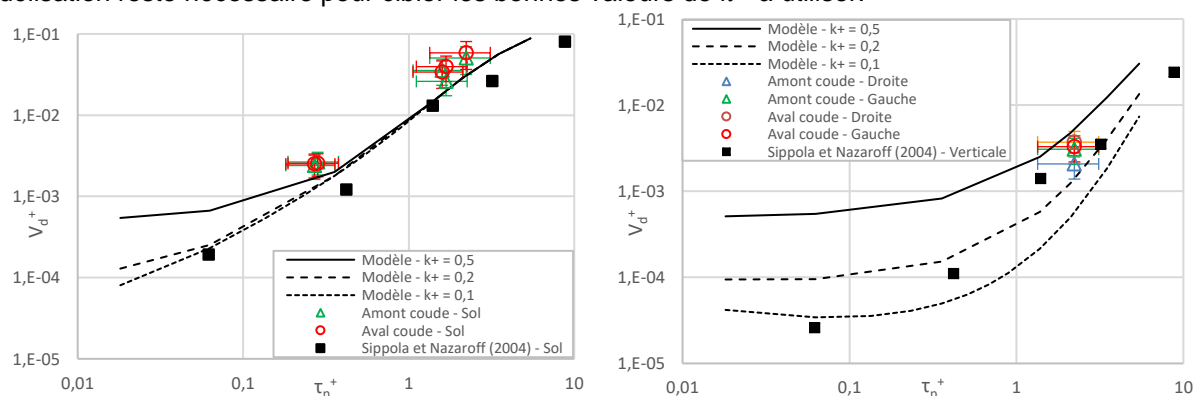


Figure 3. Comparaison des résultats expérimentaux issus du banc d'essai DIESE, de Sippola et Nazaroff (2004) et des résultats numériques issus du modèle de Ben Othmane *et al* (2010) pour les parois inférieures (graphique de gauche) et verticales (graphique de droite)

Barth, T., Lecrivain, G., and 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.

Ben Othmane, M. (2011) Compréhension Analyse et Maitrise des mécanismes d'encrassement dans les réseaux aérauliques des industries agroalimentaires (PhD diss.). Ecole Nationale Vétérinaire Agroalimentaire et de l'Alimentation Nantes Atlantique (Oniris).

Ben Othmane, M., Havet, M., Gehin, E., and Sollicc, C. (2010) Mechanisms of Particle Deposition in Ventilation Ducts for a Food Factory. *Aerosol Science and Technology* 44 (9):775–784.

Costa, D., Malet, J., and Géhin, E. (2021) Validation du protocole de mesure de dépôt d'aérosols dans une gaine de réseau de ventilation de taille industrielle., in Congrès Français sur les Aérosols 2021, Presented at the Congrès Français sur les Aérosols 2021, Association Française d'Etudes et de Recherches sur les Aérosols (ASFERA), Webconference.

Davies, C.N. (1966) Deposition of aerosols from turbulent flow through pipes. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 289 (1417):235–246.

Dou, G.R. (1980) Turbulent structure of ducts and channels. *Science in China* 11:1115–1124.

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

Wood, N.B. (1981) A simple method for the calculation of turbulent deposition to smooth and rough surfaces. *Journal of Aerosol Science* 12 (3):275–290.

You, S. and 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.

Zhao, B. and Wu, J. (2006) Modeling particle deposition onto rough walls in ventilation duct. *Atmospheric Environment* 40 (36):6918–6927.