



HAL
open science

Caractérisation expérimentale de la rétention d'aérosols dans un coude de réseau de ventilation

Delphine Costa

► **To cite this version:**

Delphine Costa. Caractérisation expérimentale de la rétention d'aérosols dans un coude de réseau de ventilation. Autre. Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12, 2022. Français. NNT : 2022PA120034 . tel-04284879

HAL Id: tel-04284879

<https://theses.hal.science/tel-04284879>

Submitted on 14 Nov 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.

Caractérisation expérimentale de la rétention d'aérosols dans un coude de réseau de ventilation

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est Créteil

École doctorale n° 531, Sciences, Ingénierie et Environnement (SIE)
Spécialité de doctorat : Sciences pour l'ingénieur

Thèse présentée et soutenue à Saclay,
Le 22/07/2022, par :

Delphine COSTA

Composition du Jury

Michel HAVET

Professeur, GPEA — ONIRIS

Président et Rapporteur

Christophe JOSSERAND

Directeur de recherche CNRS, LadHyx — École Polytechnique

Rapporteur

Francis ALLARD

Professeur émérite, LaSIE — Université de La Rochelle

Examineur

Jeroen VAN BEECK

Professeur, von Karman Institute for Fluid Dynamics

Examineur

Emmanuel VANOLI

Ingénieur, Dassault Systèmes

Invité

Evelyne GEHIN

Professeure, CERTES — Université Paris-Est Créteil

Directrice de thèse

Jeanne MALET

Docteure-ingénieure HDR, LEMAC — Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire

Directrice de thèse

Thèse préparée au :

Laboratoire d'Expérimentations et de Modélisation en Aérodispersion et Confinement (LEMAC)
Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
CEA Saclay
91192 Gif-sur-Yvette

et au :

Centre d'Études et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes
Université Paris-Est Créteil
IUT de Créteil-Vitry
Bâtiment L5
61, Avenue du Général de Gaulle
94000 Créteil

Résumé

La caractérisation des transferts de contamination est une problématique majeure dans les installations nucléaires. Dans ce contexte, les dépôts des contaminants en suspension, les aérosols, dans les réseaux de ventilation constituent un point d'attention particulier.

De nombreux travaux ont porté sur l'étude et la prédiction du dépôt dans les tubes de petits diamètres à section circulaire. Pour poursuivre cette démarche et s'approcher d'un cas réel, l'IRSN s'intéresse aux réseaux de ventilation de taille industrielle à section rectangulaire, présentant différentes singularités, par le biais de la boucle aéraulique DIESE.

Cette recherche se focalise sur la quantification expérimentale locale du dépôt des aérosols dans une singularité, le coude, afin de valider les modèles de prédiction de dépôt. Pour ce faire, un protocole expérimental a été développé spécifiquement. Des mesures de grandeurs aérauliques ont été réalisées par vélocimétrie par image de particules pour appréhender les écoulements dans les coudes et constituer une base de données de validation des codes de mécanique des fluides numérique. Des mesures par anémométrie à fil chaud ont fourni expérimentalement les grandeurs nécessaires à l'utilisation des outils de simulations et des modèles semi-empirique et empirique. Des mesures locales de dépôt ont été conduites avec des aérosols inertiels de différents diamètres et à des vitesses d'écoulement d'air variables. Les mesures ont été comparées à d'autres mesures expérimentales de la littérature et avec les prédictions de modèles semi-empirique et empirique. Cette comparaison a montré que les dépôts étaient prédits dans certains cas, lorsque les valeurs des coefficients empiriques dont les modèles dépendent étaient modifiées. Cela a mis en lumière la nécessité d'améliorer ces modèles afin de recouper avec les mesures réalisées dans des gaines de taille industrielle à section rectangulaire. L'analyse des mesures de dépôt obtenues dans des coudes de géométrie différente dans DIESE a souligné l'influence des paramètres géométriques.

Mots clés : Dépôt, aérosol, coude, ventilation

Abstract**Experimental characterization of aerosol retention in a ventilation network bend**

The characterization of contamination transfers is a major issue in nuclear facilities. In this context, the deposition of airborne contaminants, i.e. aerosols, in ventilation networks is a particular point of attention.

Numerous works have focused on the study and prediction of deposition in small diameter tubes with circular cross-section. To continue this research and to approach a real case, the IRSN is interested in industrial size ventilation networks with rectangular cross-section, presenting various singularities, by means of the DIESE aeraulic facility.

This research focuses on the local experimental quantification of aerosol deposition in a singularity, the bend, in order to validate the deposition prediction models. For this purpose, an experimental protocol was specifically developed. Measurements of aeraulic quantities were carried out by particle image velocimetry in order to understand the flows in the bends and to constitute a database for the validation of computational fluid dynamics codes. Measurements by hot-wire anemometry provided experimentally the necessary quantities for the use of simulation tools and semi-empirical and empirical models. Local deposition measurements were conducted with inertial aerosols of different diameters and at varying airflow velocities. The measurements were compared with other experimental measurements from the literature and with the predictions of semi-empirical and empirical models. This comparison showed that deposition was predicted in some cases when the values of the empirical coefficients on which the models depend were changed. This revealed the need to improve these models in order to cross-check with measurements made in industrial size ducts with rectangular cross-section. The analysis of deposition measurements obtained in bends of different geometry in DIESE highlighted the influence of geometrical parameters.

Keywords : Deposition, aerosol, bend, ventilation

Remerciements

Cette thèse a été réalisée à l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), au sein du Laboratoire d'Expérimentations et de Modélisation en Aérodispersion et Confinement (LEMAC), et à l'Université Paris-Est Créteil (UPEC), au sein du Centre d'Études et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes (CERTES), respectivement dirigés par Monsieur Richard et Madame Géhin, à qui je souhaite témoigner tout mon respect et toute ma gratitude.

J'adresse toute ma reconnaissance à Monsieur Bouilloux pour m'avoir accueillie au sein du Service du Confinement et de l'Aérodispersion des polluants (SCA).

Je remercie particulièrement Madame Malet et Madame Géhin pour avoir dirigé cette thèse, pour leur patience, leurs encouragements, pour m'avoir accompagnée tout au long de ces travaux et su nourrir mes réflexions.

Que Monsieur Havet trouve ici l'expression de ma reconnaissance pour avoir accepté de rapporter cette thèse et d'en avoir présidé le jury. Je remercie également Monsieur Josserand pour avoir accepté de rapporter ce travail.

J'ai le plaisir de remercier Monsieur Allard et Monsieur Van Beeck pour avoir bien voulu examiner ce travail, et Monsieur Vanoli pour sa participation au jury.

J'adresse mes plus sincères remerciements à Madame Hare et Monsieur Wiese pour leur accompagnement technique et leurs conseils, et comme à Madame Liatimi, Monsieur Mbaye, Monsieur Ploix, Monsieur Radosavljevic et Monsieur Rossignol, pour leur sympathie, leur aide précieuse dans la résolution des diverses difficultés rencontrées et leur huile de coude lors de la réalisation des expériences.

Je sais gré à Monsieur Mocho, pour m'avoir conseillée pour les calculs d'incertitude.

Je tiens à remercier Monsieur Perin, les secrétaires, les techniciens et les techniciennes, les doctorants et les doctorantes, et les stagiaires du CERTES et du SCA pour leur accueil, leur soutien, et l'ambiance chaleureuse de chaque jour.

Enfin, que toutes les personnes de mon entourage qui m'ont soutenue durant ces travaux trouvent ici le témoignage de ma reconnaissance et de mon affection.

Table des matières

Acronymes	xiii
Nomenclature	xv
Table des figures	xxi
Liste des tableaux	xxvii
Introduction	1
1 État de l'art	5
1.1 Caractérisation globale et locale du dépôt	6
1.1.1 Théorie	6
1.1.2 Choix de l'approche	10
1.2 Techniques de mesure de dépôt existantes	12
1.2.1 Mesure massique de dépôt surfacique	13
1.2.2 Mesure en nombre de dépôt surfacique	22
1.3 Le dépôt d'aérosol dans les conduits	26
1.3.1 Études expérimentales	26
1.3.2 Modélisation	34
1.4 Les écoulements	43
1.4.1 Dans les conduits droits	43
1.4.2 Dans les coudes	44
1.5 Conclusion	48
2 Matériels et méthodes	51
2.1 Installation DIESE	51
2.2 Aéraulique	54
2.2.1 Particle Image Velocimetry (PIV)	54
2.2.2 Anémométrie à fil chaud	64
2.3 Aérosol	67
2.3.1 Choix de la technique de mesure de dépôt surfacique	67
2.3.2 Type d'aérosol et génération	68
2.3.3 Caractérisation du LIXEA	70
2.3.4 Distribution de taille des aérosols générés	72
2.3.5 Système d'injection des aérosols en gaine	74
2.3.6 Concentration volumique en gaine C_{bulk}	76
3 Développement du protocole de mesure de dépôt par frottis	79
3.1 Développement et validation	79
3.2 Protocole expérimental de mesure du dépôt d'aérosol dans des gaines de ventilation de taille industrielle	80

3.2.1	Résumé	80
3.2.2	Introduction et état de l'art	80
3.2.3	Grandeurs mesurées	82
3.2.4	Développement d'un protocole expérimental de mesure de dépôt dans des gaines droites	83
3.2.5	Application sur une installation dédiée	89
3.2.6	Validation et perspectives	94
3.2.7	Conclusion	96
4	Mesures des grandeurs aérauliques	99
4.1	Écoulement pariétal	99
4.1.1	Estimation de la vitesse de frottement par la mesure de perte de charge	99
4.1.2	Profil de vitesse en proche paroi	102
4.2	Écoulement en gaine — PIV	107
4.2.1	Résultats — Visualisation	107
4.2.2	Résultats à 45° dans le coude CD1-1	112
4.2.3	Résultats à 0,47 D_h en aval du coude CD1-1	115
4.3	Conclusion	121
5	Mesures locales de dépôt	123
5.1	Grille d'essais	123
5.2	Dépôt dans les conduits amont et aval du module coude	126
5.2.1	Résultats	126
5.2.2	Comparaison avec la littérature	132
5.3	Dépôt à l'intérieur de différents coudes	146
5.3.1	Résultats	146
5.3.2	Mise en relation des résultats de dépôt des coudes avec l'aéraulique	156
5.4	Synthèse	159
	Conclusion et perspectives	161
	Bibliographie	165
A	Base de données PIV	183
A.1	Image brute et champ post-traité	183
A.2	Obtention des profils moyennés et profils bruts	185
A.3	Comparaison des profils à différentes hauteurs	194
A.3.1	25 et 50% de la hauteur du coude	194
A.3.2	25 et 50% de la hauteur du tronçon droit	195
A.3.3	25 et 50% de la largeur du tronçon droit	196
A.4	Comparaison des profils à différents débits	197
	Annexes	183
B	Mesures brutes de dépôt dans les coudes	199

Acronymes

IRSN Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire	1
DIESE Dépôt dans les Installations, les Equipements et les Sondes d'Echantillonnage	2
CTA Centrale de Traitement d'Air / Constant Temperature Anemometry	51
PIV Particle Image Velocimetry	xxi
PMMA Poly(methyl methacrylate)	54
LDA Laser Doppler Anemometry	xxiii
CFD Computational Fluid Dynamics	xxiii
MEMS Micro-Electro-Mechanical Systems	17
NEMS Nano-Electro-Mechanical Systems	17
FBAR Film Bulk Acoustic Resonator	16
SAW Surface Acoustic Wave	15
DPF Diesel Particulate Filter	18
APS Aerodynamic Particle Sizer	xxii
MPE Maximum Permissible Error	88
THE Très Haute Efficacité	1

Nomenclature

Lettres grecques

β_d	Taux de dépôt des particules	1/s
β_v	Taux de décroissance lié à la ventilation	1/s
χ	Facteur de forme	
ΔL	Longueur entre deux points	m
ΔP	Différence de pression	Pa
ΔT	Différence de température (entre la fin de la couche limite et la paroi)	K
Δt	Durée	s
κ	Constante de von Kàrmàn	
λ	Libre parcours moyen de l'air	m
μ	Viscosité dynamique de l'air	Pa s
ν	Viscosité cinématique de l'air	m ² /s
ν_t	Viscosité turbulente	m ² /s
ρ_a	Masse volumique de l'air	kg/m ³
ρ_p	Masse volumique des particules	kg/m ³
σ	Écart-type, dont l'unité dépend de la grandeur à laquelle il se rapporte	
σ_G	Écart-type géométrique	
τ	Contrainte de cisaillement à la paroi	Pa
τ_f	Échelle lagrangienne temporelle de turbulence	s
τ_p	Temps de relaxation des particules $\left(= \frac{C_c \rho_p d_p^2}{18\mu} \right)$	s
τ_p^+	Temps de relaxation adimensionné des particules $\left(= \tau_p \frac{u_*^2}{\nu} \right)$	
θ_C	Angle de courbure d'un coude	°
ξ_a	Diffusivité turbulente de l'air	m ² /s
ξ_p	Diffusivité turbulente des particules	m ² /s

Lettres latines

$\overline{C^v}$	Concentration volumique moyenne	kg/m ³
Att	Atténuation	
B	Mobilité dynamique $\left(= \frac{C_c}{6\pi \frac{d_p}{2} \mu} \right)$	s/kg
C^s	Concentration surfacique	kg/m ²
$C^v(t)$	Concentration volumique à l'instant t	kg/m ³
C_c	Facteur correctif de Cunningham $\left(= 1 + \left(1,257 + 0,4 \exp \left(\frac{-0,55d_p}{\lambda} \right) \right) \frac{2\lambda}{d_p} \right)$	
C_d	Concentration déposée d'aérosols	kg/m ²
C_d^v	aussi notée C_v , Concentration volumique du traceur dans la solution	kg/m ³
C_m	Concentration massique générée	kg/m ³
C_p	Capacité électrique dans Costa et al. (2022a)	F
C_{bulk}	Concentration volumique d'aérosols dans la gaine	kg/m ³
C_{in}^v	Concentration volumique d'aérosols en amont	kg/m ³
C_{out}^v	Concentration volumique d'aérosols en aval	kg/m ³
C_{th}	Capacité spécifique thermique de l'air	J/(K kg)
$C_{v_{corrected}}$	Concentration volumique C_v corrigée par l'erreur de justesse	kg/m ³
C_v	Concentration volumique en fluorescéine	kg/m ³
CR	Rapport de courbure $\left(= \frac{R_C}{D_h/2} \right)$	
D_B	Coefficient de diffusion brownienne $(= k_B \times B \times T)$	m ² /s
D_h	Diamètre hydraulique	m
d_p	Diamètre des particules	m
D_t	Coefficient de diffusion turbulente dans Costa et al. (2022a)	m ² /s
D_{max}	Diamètre minimal de l'aérosol observable	m
D_{pix}	Taille d'un pixel	m
$DAMM$	Diamètre aérodynamique médian en masse	m
De	Nombre de Dean $\left(= \frac{Re}{CR^{0,5}} \right)$	
dt	Intervalle de temps	s
E	Efficacité de dépôt	
e	Rugosité « effective »	m
E_j	Erreur de justesse, dont l'unité est celle de la grandeur à laquelle E_j se rapporte	

F	Fraction déposée	
f	Fréquence de résonance dans Costa et al. (2022a)	1/s
f_F	Coefficient de frottement de Fanning	
f_{ref}	Fréquence de référence du LIXEA	1/s
FL	Distance focale	
G	Conductance électrique	S
g	Accélération de pesanteur	m/s ²
H_{ther}	Coefficient de thermophorèse	
I_f	aussi notée I , Intensité de fluorescence	
J	Flux de dépôt	kg/(m ² s)
k	Rugosité	m
k^+	Rugosité adimensionnée ($= k \frac{u^*}{\nu}$)	
k_a	Conductivité thermique de l'air	W/(m K)
k_B	Constante de Boltzmann	J/K
k_p	Conductivité thermique des particules	W/(m K)
k_{eff}	Constante élastique effective	kg/s ²
Kn	Nombre de Knudsen ($= 2 \frac{\lambda}{d_p}$)	
L	Largeur du masque	m
l	Longueur du masque	m
L_C	Longueur du conduit	m
M	Agrandissement	
M_D	Agrandissement numérique	
m_d	Masse déposée d'aérosols	kg
M_O	Agrandissement optique	
M_t	Agrandissement total	
m_{d_0}	Masse d'aérosols mesurée liée au frottis de bruit de fond	kg
$m_{d_{0max}}$	Masse d'aérosols à ne pas dépasser lors de la mesure liée au frottis de bruit de fond	kg
m_{eff}	Masse effective du résonateur	kg
m_f	Masse déposée sur le filtre	kg
m_{min}	Limite de détection en masse	kg
m_{sl}	Masse déposée dans la ligne de prélèvement	kg

N_d	Nombre de particules déposées	
N_{use}	Nombre d'utilisation du dispenser	
P	Précision du dispenser	
Pr	Nombre de Prandtl $\left(= \frac{\nu}{\frac{k_a}{\rho_a C_p}} \right)$	
Q	Débit d'air dans la ligne de prélèvement	m ³ /s
QF	Facteur de qualité	
R_C	Rayon de courbure	m
Re	Nombre de Reynolds	
S	Surface de dépôt	m ²
Sc	Nombre de Schmidt	
Sc_B	Nombre de Schmidt brownien $\left(\frac{\mu}{\rho_a DB} \right)$	
Sc_t	Nombre de Schmidt turbulent $\left(\frac{\nu_t}{\xi_a} \right)$	
SO_e	Taille de l'objet agrandie	m
SO_i	Taille de l'objet réelle	m
St	Nombre de Stokes $\left(= \frac{\rho_p C_c U d_p^2}{18 \mu D_h} \right)$	
T	Température	K
t	Temps	s
TC	Taux de corrélation	
U	Vitesse moyenne débitante	m/s
u	Moyenne statistique de la vitesse, selon la décomposition de Reynolds	m/s
u'	Fluctuation de la vitesse longitudinale de l'air selon l'axe perpendiculaire à la paroi	m/s
u^*	Vitesse de frottement	m/s
u'_{py}	Fluctuation de la vitesse des particules selon l'axe perpendiculaire à la paroi	m/s
u_{sp}	Incertitude absolue liée au fluorimètre	
V	Volume de dissolution	m ³
V_a	Volume d'air	m ³
v_d	Vitesse de dépôt	m/s
v_d^+	Vitesse de dépôt adimensionnée par la vitesse de frottement	
v_g	Vitesse de sédimentation	m/s
$V_{a_{corrected}}$	Volume d'air V_a corrigé par l'erreur de justesse	m ³

V_{max}	Volume maximal délivré par le dispenser	m^3
v_{ther}	Vitesse de thermophorèse	m/s
v_{tp}	Vitesse de turbophorèse	m/s
$V_{standard_Q}$	Volume d'air prélevé par le compteur volumétrique d'air étalon	m^3
w	Vitesse instantanée verticale du vent (mesure atmosphérique)	m/s
WD	Distance de travail	m
y	Distance à la paroi	m
y^+	Distance à la paroi adimensionnée ($= y \frac{u_*^*}{\nu}$)	
$y_{0_{log}}^+$	Borne inférieure de la zone logarithmique de la couche limite adimensionnée	
y_0^+	Borne inférieure d'intégration de la couche limite adimensionnée	
$y_{0_{log}}$	Borne inférieure de la zone logarithmique de la couche limite	
z	Hauteur par rapport à la surface dans Costa et al. (2022a)	m

Table des figures

1.1	Global deposition in a channel with flux conservation	7
1.2	Global deposition in a room with flux conservation	8
1.3	Schématisation du flux de dépôt et de la concentration en gaine, grandeurs intervenant dans la vitesse de dépôt dans une gaine de ventilation	11
1.4	Fluorescence spectroscopy — stages	14
1.5	Operation of a Surface Acoustic Wave (SAW) sensor	16
1.6	Operation of a Film Bulk Acoustic Resonator (FBAR)	17
1.7	Operation of a cantilever Micro-Electro-Mechanical System (MEMS)	17
1.8	Operation of a resistive sensor	19
1.9	Operation of a capacitive sensor	20
1.10	Operation of microscope and camera counting	22
1.11	Exemple d'application de corrélations développées pour des coudes de petite taille en régime turbulent	35
1.12	Exemple d'application des corrélations développées pour des gaines droites de petite taille (v_d^+ globale) en régime turbulent	39
1.13	Exemple d'application, sur une paroi verticale, des corrélations développées pour des gaines droites de moyenne taille en régime turbulent	39
1.14	Écoulement secondaire de second type dans un conduit droit rectangulaire en régime turbulent (Speziale, 1982)	44
1.15	Écoulement secondaire de premier type dans un coude circulaire en régime turbulent (Zhang et al., 2010)	46
2.1	Schéma de présentation de l'installation DIESE – En haut : vue de face; en bas : vue de dessus	52
2.2	Paramètres géométriques des quatre coudes d'étude	53
2.3	Photographie et dimensions d'une gaine de DIESE (en haut) et des accès à la gaine (en bas)	53
2.4	Photographie et dimensions du coude et du tronçon droit transparents	55
2.5	Schéma et photographie du montage pour la PIV en champ horizontal (en haut) et en champ vertical (en bas)	56
2.6	De gauche à droite, photographie d'une mire, de son image de calibration et d'un réglage de nappe en gaine	57
2.7	Profils de vitesse (A) longitudinale et (B) transverse obtenus par Particle Image Velocimetry (PIV) pour différentes valeurs d'atténuation — Champ horizontal à 75% de la hauteur de gaine à $0,47D_h$ en aval du coude, au débit Q3	59
2.8	Profils de vitesse longitudinale (en haut) et transverse (en bas) obtenus par PIV pour différents nombres d'images — Champ horizontal à 50% de la hauteur de gaine à $0,47D_h$ en aval du coude, au débit Q1	60
2.9	Profils de vitesse longitudinale (en haut) et transverse (en bas) obtenus pour les quatre tests de post-traitement — Champ vertical à 50% de la largeur de gaine à $0,47D_h$ en aval du coude, au débit Q3	63

2.10	Schéma et dimensions a) du fil chaud proche paroi et b) du support utilisés (dimensions en mm) – Source : Dantec Dynamics	65
2.11	Photographies d'un fil chaud proche paroi face à la station de calibration	65
2.12	Installation du fil chaud proche paroi dans une gaine de DIESE	66
2.13	Schéma de l'installation du fil chaud dans une gaine de DIESE	66
2.14	a) Photographie du boîtier électronique du LIXEA, b) Photographie et schéma de la colonne de génération et c) Photographie de la nébulisation	69
2.15	Distributions granulométriques en masse pour trois valeurs de fréquence — valeur de référence f_{ref} en rouge (560 kHz), $f_{ref} + 10$ (570 kHz) en violet et $f_{ref} - 10$ en jaune (550 kHz)	71
2.16	Distributions granulométriques en masse pour deux valeurs de puissance — valeur de référence en rouge (60 W) et valeur diminuée en jaune (50 W)	72
2.17	Distributions de taille des aérosols générés avec le LIXEA sur trente minutes	73
2.18	Mesure à l'Aerodynamic Particle Sizer (APS) sur trente minutes (30×60 s) du diamètre des particules générées avec le LIXEA (<i>DAMM</i>), de leur écart-type géométrique (σ_G) et de la concentration massique (C_m)	74
2.19	Photographie de la ligne d'injection	75
2.20	Schéma de la ligne d'injection	76
2.21	Évolution du diamètre et de l'écart-type géométrique de l'aérosol en amont et en aval de la ligne d'injection	76
2.22	Photographie d'une ligne de prélèvement	77
3.1	Presentation diagram of deposition flux	82
3.2	3D-printed blank mask (left) and deposition mask (right)	84
3.3	Example of a mask and its stamp (left) and a curved mask fixed on a curved duct (right)	84
3.4	Photograph of an operator performing a wiping	85
3.5	Aerosol collection with each wiping on a galvanized steel surface with deposition around 8 ng/cm^2	85
3.6	Aerosol collection with each wiping on a galvanized steel surface with deposition around 0.5 ng/cm^2	86
3.7	Fluorescence measurement evolution over time	87
3.8	Lateral view of the test facility	89
3.9	Photograph of a section of rectangular ducts of the test facility	90
3.10	Presentation diagram of the test facility aerosol injection line	90
3.11	Collection of deposition in sampling lines by washing with a) 5 mL washing and b) 10 mL washing	92
3.12	a) Mean MMAD and GSD over 30 minutes and b) example of measured size distributions over 30 minutes	93
3.13	Air speed profiles at different flow rates and their reproduction (a) and nondimensionalized profiles (b)	94
3.14	Repeatability of deposition velocities at $5D_h$ after a flow disturbance on duct floor for a $2.7 \mu\text{m}$ mean MMAD, around 1.4 GSD and air speed around 11 m/s	94
3.15	Deposition velocity comparison between this study, Ben Othmane (2011) and Sippola et Nazaroff (2004) for 2 particle sizes on duct floor	96

4.1	Configuration de DIESE pour la mesure de perte de charge et emplacements des mesures de pression, température et débit	101
4.2	De haut en bas : profils de vitesse longitudinale, de vitesse fluctuante et d'intensité turbulente en proche paroi	103
4.3	Profils de vitesse adimensionnée et lois logarithmiques obtenus pour chaque débit à partir des Équations 4.3 (à gauche) et 4.4 (à droite)	105
4.4	Profils de vitesse fluctuante adimensionnée expérimentaux et modélisés	106
4.5	Visualisation des champs moyens de vitesse longitudinale (m/s) obtenus par PIV dans le coude et en aval du coude	108
4.6	Localisation des profils horizontaux en haut (DIESE vu du dessus) et verticaux en bas (DIESE vu de face) — Mesures par PIV et fil chaud industriel	108
4.7	Profils horizontaux de vitesse longitudinale d'amont en aval du coude au débit Q1, mesurés par PIV et fil chaud industriel (Malet <i>et al.</i> , 2022)	109
4.8	Profils horizontaux de vitesse transverse d'amont en aval du coude au débit Q1	110
4.9	Profils de vitesses longitudinale (en haut) et transverse (en bas) mesurés par Kuan <i>et al.</i> (2007) par Laser Doppler Anemometry (LDA) et par Computational Fluid Dynamics (CFD) dans un coude de section carrée de 15 cm de côté, $Re = 10^5$ — d'après Kuan <i>et al.</i> (2007)	111
4.10	Profils de vitesse longitudinale mesurés par Sudo <i>et al.</i> (2001) au fil chaud dans un coude de section carrée de 8 cm de côté, $Re = 4 \times 10^4$ — d'après Sudo <i>et al.</i> (2001)	111
4.11	Profils horizontaux de vitesse longitudinale pour les quatre débits d'étude à mi-hauteur du coude à 45° et simulations de CFD (Rossignol, 2021)	113
4.12	Profils horizontaux de vitesse transverse pour les quatre débits d'étude à mi-hauteur du coude à 45° et simulations de CFD (Rossignol, 2021)	113
4.13	Profils horizontaux de vitesse longitudinale à 45°, à 25, 50 et 75% de la hauteur du coude au débit Q3	114
4.14	Profils horizontaux de vitesse transverse à 45°, à 25, 50 et 75% de la hauteur du coude au débit Q3	114
4.15	Profils horizontaux de vitesse longitudinale pour les quatre débits d'étude à mi-hauteur à $0,47D_h$ en aval du coude et simulations CFD (Rossignol, 2021)	116
4.16	Profils horizontaux de vitesse transverse pour les quatre débits d'étude à mi-hauteur à $0,47D_h$ en aval du coude et simulations CFD (Rossignol, 2021)	116
4.17	Profils horizontaux de vitesse longitudinale à 25, 50 et 75% de la hauteur de gaine à $0,47D_h$ en aval du coude au débit Q3	117
4.18	Profils horizontaux de vitesse transverse à 25, 50 et 75% de la hauteur de gaine à $0,47D_h$ en aval du coude au débit Q3	117
4.19	Profils verticaux de vitesse longitudinale pour les quatre débits d'étude à mi-largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude	119
4.20	Profils verticaux de vitesse transverse pour les quatre débits d'étude à mi-largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude	119
4.21	Profils verticaux de vitesse longitudinale pour les quatre débits d'étude à 25% de la paroi intérieure à $0,47D_h$ en aval du coude	120
4.22	Profils verticaux de vitesse transverse pour les quatre débits d'étude à 25% de la paroi intérieure à $0,47D_h$ en aval du coude	120
5.1	Zone d'injection, de prélèvement et de mesures de dépôt dans DIESE	124

5.2	Schéma de présentation des zones de mesure de dépôt dans les différents coudes . . .	125
5.3	Appellations des surfaces d'étude dans un coude	125
5.4	Vitesses de dépôt adimensionnées, mesurées en amont ($-3,1D_h$ — LD1-3) et en aval ($4,7D_h$ — LD2-2) du coude, sur la paroi du sol de la gaine pour différents débits — Intervalle de confiance de 95%	127
5.5	Vitesses de dépôt adimensionnées, mesurées en amont ($-3,1D_h$ — LD1-3) et en aval ($4,7D_h$ — LD2-2) du coude, sur les parois verticales de la gaine pour différents débits — Intervalle de confiance de 95%	128
5.6	Vitesses de dépôt adimensionnées, mesurées en amont ($-3,1D_h$ — LD1-3) et en aval ($4,7D_h$ — LD2-2) du coude, sur la paroi du plafond de la gaine pour différents débits — Intervalle de confiance de 95%	129
5.7	Vitesses de dépôt adimensionnées mesurées aux quatre débits d'étude, en fonction du diamètre des particules et de l'orientation de la paroi — Intervalle de confiance de 95%	130
5.8	Moyennes des vitesses de dépôt adimensionnées mesurées à Q3 et Q4, en fonction du diamètre des particules et de l'orientation de la paroi — Intervalle de confiance de 95%	131
5.9	Comparaison avec des travaux de la littérature des vitesses de dépôt mesurées dans DIESE sur la paroi du sol de la gaine — de haut en bas : aérosol de 3, 6 et 10 μm	133
5.10	Comparaison avec Sippola et Nazaroff (2004) des vitesses de dépôt mesurées dans DIESE sur les parois verticales de la gaine — de haut en bas : aérosol de 3, 6 et 10 μm	134
5.11	Comparaison avec Sippola et Nazaroff (2004) des vitesses de dépôt mesurées dans DIESE sur la paroi du plafond de la gaine — de haut en bas : aérosol de 3, 6 et 10 μm	135
5.12	Comparaison des vitesses de dépôt obtenues pour différentes valeurs de k^+ avec le modèle de Ben Othmane et al. (2010) au débit Q3 pour la paroi du sol (à gauche) et les parois verticales (à droite)	137
5.13	Comparaison des vitesses de dépôt obtenues pour différentes valeurs de k^+ avec le modèle de Ben Othmane et al. (2010) en utilisant le profil de vitesse fluctuante mesuré sur DIESE au débit Q3 pour la paroi du sol (à gauche) et les parois verticales (à droite)	138
5.14	Comparaison des vitesses de dépôt expérimentales avec celles prédites par le modèle de Ben Othmane et al. (2010) au débit Q3 — Influence des coefficients A , B , C et D intervenant dans la modélisation semi-empirique de la diffusivité turbulente de l'air	139
5.15	Comparaison des vitesses de dépôt obtenues avec la corrélation de Nerisson (2009) au débit Q3 — Valeurs des paramètres : $n=1$; $\omega=1700$; $\lambda_0=13,7$; $\lambda_1=2/3$; $S_{c_t}=1$ et $y^+=30$	140
5.16	Influence des paramètres n , ω , λ_0 et λ_1 de la corrélation de Nerisson (2009) au débit Q3	141
5.17	Influence des grandeurs S_{c_t} et $y_{0_{log}}^+$ de la corrélation de Nerisson (2009) au débit Q3	142
5.18	Meilleur compromis obtenu avec la corrélation de Nerisson (2009) au débit Q3 — Valeurs des paramètres : $n=0,5$; $\omega=350$; $\lambda_0=13,7$; $\lambda_1=2/3$; $S_{c_t}=1$ et $y_{0_{log}}^+=30$	142
5.19	Application aux autres débits du meilleur compromis obtenu avec la corrélation de Nerisson (2009) au débit Q3 — Valeurs des paramètres : $n=0,5$; $\omega=350$; $\lambda_0=13,7$; $\lambda_1=2/3$; $S_{c_t}=1$ et $y_{0_{log}}^+=30$	143
5.20	Influence des grandeurs k_4 et k_5 de la corrélation de Sippola (2002) au débit Q3	144
5.21	Meilleur compromis obtenu avec la corrélation de Sippola (2002) — Valeurs des paramètres : $k_4=2,0 \times 10^{-3}$ et $k_5=1,7$	145
5.22	Rapport des concentrations d'aérosol déposées par rapport à la masse d'aérosols injectée (en ppb) dans les quatre coudes d'étude pour les parois du sol et du plafond	149

5.23	Rapport des concentrations d'aérosol déposées par rapport à la masse d'aérosols injectée (en ppb) dans les quatre coudes d'étude pour les parois verticales	150
5.24	Répartition du dépôt dans les quatre coudes d'étude pour les parois du sol et du plafond	152
5.25	Répartition du dépôt dans les quatre coudes d'étude pour les parois verticales — Paroi intérieure (intradós) à gauche et paroi extérieure (extradós) à droite	153
5.26	Répartition du dépôt par rapport au dépôt maximal mesuré sur la surface du plafond et sur les parois verticales dans les quatre coudes d'étude	155
5.27	À gauche : Illustration des pressions obtenues par CFD dans un coude à 180° de section rectangulaire, d'après <i>Li et al. (2013)</i> — À droite : Profil simulé de pression en sortie du coude, d'après <i>Mbaye (2019)</i>	157
5.28	À gauche : Schéma du coude segmenté étudié par (et d'après) <i>Arun et al. (2020)</i> — Au milieu : Illustration des écoulements secondaires par CFD dans un coude segmenté, à 90° et de section circulaire, d'après <i>Arun et al. (2020)</i> — À droite : Illustration de deux cellules rotatives développées à 45° dans un coude de section circulaire et de grand rayon de courbure, d'après <i>Wang et al. (2015)</i>	158
5.29	Illustration de la norme de vitesse par CFD dans des coudes abrupts de section carrée, d'après <i>Venters et al. (2019)</i> et <i>Bluestein et al. (2019)</i> et dans CD1-1 de DIESE, d'après <i>Mbaye (2019)</i>	158
A.1	Image brute (à gauche) et à laquelle le filtre de soustraction du minimum du signal local a été appliqué (à droite) obtenues à 45° dans le coude à 50% de la hauteur au débit Q3	183
A.2	Valeurs des taux de corrélation sur le champ observé à 45° dans le coude à 50% de la hauteur au débit Q3	184
A.3	Champ post-traité de la norme de la vitesse d'air avec les vecteurs vitesse, observé à 45° dans le coude à 50% de la hauteur au débit Q3	184
A.4	Profils horizontaux de vitesse longitudinale aux quatre débits d'étude à 45° dans le coude à 50% de la hauteur de la gaine	185
A.5	Profils horizontaux de vitesse transverse aux quatre débits d'étude à 45° dans le coude à 50% de la hauteur de la gaine	186
A.6	Profils horizontaux de vitesse longitudinale aux quatre débits d'étude, obtenus à 50% de la hauteur du coude à 45°, après traitement sur l'écart-type ($\sigma < 10\%$)	186
A.7	Profils horizontaux de vitesse transverse aux quatre débits d'étude, obtenus à 50% de la hauteur du coude à 45°, après traitement sur l'écart-type ($\sigma < 10\%$)	187
A.8	Profils horizontaux de vitesse longitudinale aux quatre débits d'étude, obtenus à 25% de la hauteur du coude à 45°	188
A.9	Profils horizontaux de vitesse transverse aux quatre débits d'étude, obtenus à 25% de la hauteur du coude à 45°	188
A.10	Profils horizontaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) à Q3, obtenus à 75% de la hauteur du coude à 45°	189
A.11	Profils horizontaux de vitesse longitudinale aux quatre débits d'étude, obtenus à 25% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude	189
A.12	Profils horizontaux de vitesse transverse aux quatre débits d'étude, obtenus à 25% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude	190
A.13	Profils horizontaux de vitesse longitudinale aux quatre débits d'étude, obtenus à 50% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude	190

A.14	Profils horizontaux de vitesse transverse aux quatre débits d'étude, obtenus à 50% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude	191
A.15	Profils horizontaux de vitesses longitudinale et transverse à Q3, obtenus à 75% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude	191
A.16	Profils verticaux de vitesse longitudinale aux quatre débits d'étude, obtenus à 25% de la largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude	192
A.17	Profils verticaux de vitesse transverse aux quatre débits d'étude, obtenus à 25% de la largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude	192
A.18	Profils verticaux de vitesse longitudinale aux quatre débits d'étude, obtenus à 50% de la largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude	193
A.19	Profils verticaux de vitesse transverse aux quatre débits d'étude, obtenus à 50% de la largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude	193
A.20	Profils horizontaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q1 à 25 et 50% de la hauteur du coude à 45° ($\sigma < 10\%$)	194
A.21	Profils horizontaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q2 à 25 et 50% de la hauteur du coude à 45° ($\sigma < 10\%$)	194
A.22	Profils horizontaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q4 à 25 et 50% de la hauteur du coude à 45° ($\sigma < 10\%$)	194
A.23	Profils horizontaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q1 à 25 et 50% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude	195
A.24	Profils horizontaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q2 à 25 et 50% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude	195
A.25	Profils horizontaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q4 à 25 et 50% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude	195
A.26	Profils verticaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q1 à 25 et 50% de la largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude	196
A.27	Profils verticaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q2 à 25 et 50% de la largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude	196
A.28	Profils verticaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q3 à 25 et 50% de la largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude	196
A.29	Profils verticaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q4 à 25 et 50% de la largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude	197
A.30	Profils horizontaux de vitesse longitudinale obtenus aux quatre débits d'étude à 25% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude ($\sigma < 10\%$ pour Q4 et 20% pour Q3)	197
A.31	Profils horizontaux de vitesse longitudinale obtenus aux quatre débits d'étude à 25% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude ($\sigma < 10\%$ pour Q4 et 20% pour Q3)	198
B.1	Mesures des concentrations d'aérosol déposées (ng/cm^2) dans les quatre coudes d'étude pour les parois du sol et du plafond	200
B.2	Mesures des concentrations d'aérosol déposées (ng/cm^2) dans les quatre coudes d'étude pour les parois verticales	201

Liste des tableaux

1.1	Synthesis of deposition parameters	10
1.2	Measurement techniques of mass surface deposition	21
1.3	Measurement techniques of number surface deposition	25
1.4	Études expérimentales portant sur le dépôt d'aérosols dans les tubes de petits diamètres en régime turbulent	27
1.5	Études expérimentales portant sur le dépôt d'aérosols dans les coudes de petits diamètres en régime turbulent	29
1.6	Études expérimentales portant sur le dépôt d'aérosols dans les gaines droites de moyenne taille en régime turbulent	31
1.7	Études expérimentales portant sur le dépôt d'aérosols dans les coudes de moyenne taille en régime turbulent	33
1.8	Études ayant mené au développement d'une corrélation entre le dépôt et certains paramètres en régime turbulent pour des conduits droits	36
1.9	Expression des corrélations pour les conduits droits selon les travaux cités dans le Tableau 1.8	37
1.10	Études ayant mené au développement d'une corrélation entre le dépôt et certains paramètres en régime turbulent pour des coudes	40
1.11	Expressions des différents flux intervenant dans la résolution du modèle de Ben Othmane et al. (2010)	41
1.12	Travaux expérimentaux sur l'aéraulique dans les conduits droits de section non circulaire en régime turbulent	45
1.13	Travaux expérimentaux aérauliques sur les coudes de section non circulaire en régime turbulent	47
2.1	Débits de référence sur DIESE	54
2.2	Caractéristiques des différents traitements PIV testés	62
2.3	Caractéristiques des calibrations et profils proche paroi	64
2.4	Récapitulatif des techniques de mesure de dépôt d'aérosol en fonction des critères d'application	68
2.5	Caractéristiques des solutions et valeurs de réglage du LIXEA	70
2.6	Débits isocinétiques dans les lignes de prélèvement	77
3.1	Number of wipings for aerosol deposition collection	87
3.2	Bias errors and absolute uncertainties for each parameter involved in the deposition velocity expression	88
3.3	Usual number of wipings performed for blank measurement in the facility	92
3.4	Values of uncertainty parameters	93
4.1	Estimation de la vitesse de frottement — Mesures de pression, température et débit pour les quatre débits d'étude	101

4.2	Coefficients et vitesses de frottement obtenues expérimentalement pour les quatre débits d'étude	101
4.3	Valeurs des vitesses de frottement et des coefficients de régression liées aux quatre modélisations du profil de vitesse en proche paroi	105
4.4	Écarts relatifs entre les vitesses de frottement basées sur la mesure de perte de charge et la mesure de vitesse moyenne en proche paroi	105
4.5	Coefficients obtenus par régression du profil de vitesse fluctuante selon Guha (1997) .	106
4.6	Grille d'essais des mesures PIV	107
5.1	Grille d'essais des mesures de dépôt dans les tronçons en amont et en aval du coude .	125
5.2	Grille d'essais des mesures de dépôt dans le coude	125
5.3	Caractéristiques des travaux utilisés pour une comparaison des résultats expérimentaux	132

Introduction

Dans les installations nucléaires, les réseaux de ventilation sont primordiaux pour renouveler et diminuer la pollution de l'air intérieur. L'air est acheminé vers des filtres Très Haute Efficacité (THE) grâce aux gaines de ventilation, puis atteint l'environnement : la caractérisation des transferts de contamination dans une installation par la ventilation est une problématique de sécurité nucléaire à enjeux, notamment à cause du dépôt de matière qui a lieu dans les conduits de ventilation.

En effet, l'étude du dépôt dans les gaines de ventilation repose sur deux problématiques :

- l'identification des zones de dépôt privilégiées, puisque dans une installation nucléaire, les aérosols se déposant dans les gaines sont radioactifs. L'accumulation de ces aérosols peut induire la présence de « points chauds », conduisant à un risque d'exposition radiologique pour le personnel travaillant sur l'installation ou amené à intervenir sur le réseau ;
- la quantification du dépôt entre l'extraction d'un local et les filtres qui constituent la dernière barrière avant l'environnement. En effet, mieux estimer la fraction déposée d'aérosols dans le réseau de ventilation apporte une meilleure évaluation de la fraction pénétrante, qui atteint les filtres. En cas d'accident, comme un incendie par exemple, la quantification du dépôt permet d'évaluer le niveau de colmatage de ces filtres et la quantité d'aérosols remise en suspension dans les conduits. Le risque d'endommagement des filtres (rupture) est alors mieux maîtrisé, évitant un rejet radioactif dans l'environnement.

Outre le dépôt dans les conduits de ventilation, une problématique particulière existe, liée à la présence de singularités sur les réseaux de ventilation. Il s'agit de coudes, de réductions ou encore de registres ou de clapets. Pour le même type de singularité, la géométrie peut différer : par exemple, les rayons de courbure peuvent varier dans les coudes et les bifurcations, les singularités peuvent être symétriques ou non.

Le dépôt d'aérosols dans les réseaux de ventilation de taille industrielle, notamment dans les singularités, a été peu étudié jusqu'à présent. La majorité des travaux portant sur l'étude du dépôt d'aérosols dans les gaines s'est intéressée aux tubes de petits diamètres, notamment pour la problématique du dépôt dans les lignes de prélèvement, comme nous pourrions le voir par la suite.

La mise en relation de cette caractérisation expérimentale du dépôt avec les modèles existants permet de procéder à la validation de ces modèles. Si la validation est fructueuse, ces modèles peuvent être intégrés dans les outils de mécanique des fluides numériques (Computational Fluid Dynamics — CFD) et des calculs prospectifs peuvent être réalisés : en utilisant ces codes ainsi validés, les simulations prédisent alors le dépôt d'aérosols dans des singularités de géométrie différente, sans requérir les expériences correspondantes. Ainsi, des abaques ou nouvelles corrélations empiriques peuvent être développés à partir des simulations de CFD, mettant en lien le dépôt, les paramètres géométriques et les grandeurs aérodynamiques. Ces corrélations peuvent améliorer la prédiction du dépôt dans des codes d'engineering, tels que le logiciel SYLVIA¹ de l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) par exemple (SYLVIA v11).

1. Système de logiciels pour l'étude de la ventilation de l'incendie et de l'aérocontamination.

Ce travail s'inscrit dans la résolution de la première partie de cette problématique, avec l'objectif de localiser et quantifier **localement** le dépôt d'aérosols dans une **singularité** spécifique, le coude, installé sur un réseau de ventilation représentatif des réseaux de ventilation industriels, c'est-à-dire constitué de gaines de grande taille et de section non-circulaire.

La première partie de ce travail est la réalisation et l'analyse de l'état des lieux de deux volets. Le premier volet traite des techniques de mesure du dépôt d'aérosols, point qui a fait l'objet d'une publication (Costa *et al.*, 2022a) insérée dans ce document. Le deuxième volet détaille les travaux expérimentaux existants portant sur la mesure de dépôt d'aérosols, dans des gaines de petite taille et de moyenne taille, et analyse également les corrélations existantes pour prédire le dépôt. Les corrélations existantes prédisant des dépôts sont comparées (Friedlander et Johnstone, 1957 ; Davies, 1966 ; Liu et Agarwal, 1974 ; Sippola, 2002 ; Nerisson, 2009). Un modèle semi-empirique (Ben Othmane *et al.*, 2010) développé pour un cas similaire à celui abordé dans ce travail est également détaillé. Enfin, le dernier volet bibliographique couvre une revue des mesures expérimentales aérauliques réalisées dans des gaines dont la taille est la plus grande possible. Ce volet montre que peu d'études des écoulements dans des coudes de grande dimension existent.

La deuxième partie consiste en la présentation de l'installation Dépôt dans les Installations, les Equipements et les Sondes d'Echantillonnage (DIESE) de l'IRSN à Saclay, sur laquelle les expériences sont menées. Il s'agit d'une installation de grande dimension représentative d'un réseau de ventilation industriel. Cette installation, livrée au début de ce travail de thèse et dont les tests de réception ont été finalisée en 2019 (Hare *et al.*, 2019), permet, dans ce travail, d'étudier le dépôt et les écoulements dans les coudes. Sont également listés et détaillés les instruments métrologiques mis en place et utilisés pour l'étude des écoulements (volet aéraulique) et du dépôt d'aérosols (volet aérosol) dans l'installation. Le volet aéraulique consiste en l'explication de la mise en œuvre des techniques de vélocimétrie par imagerie de particules et d'anémométrie par fil chaud. Le volet aérosol détaille le cheminement ayant conduit au choix de la technique de mesure de dépôt, ainsi que la méthode suivie de la génération aux mesures aérosols.

Pour mesurer le dépôt d'aérosols dans les conduits de l'installation, un protocole de mesure adéquat a été développé spécifiquement dans ce travail et a fait l'objet d'une publication (Costa *et al.*, 2022b), reprise dans ce document dans la troisième partie. Ce protocole est adapté d'un protocole de mesure existant pour des gaines de moyenne taille circulaire pour une application à des gaines industrielles et en y ajoutant des critères de validation. La validation du protocole repose sur une première comparaison des résultats avec d'autres travaux de la littérature.

Les mesures réalisées dans le cadre du volet aéraulique sont exposées dans une quatrième partie. Cette partie comprend les mesures expérimentales de vitesses de frottement réalisées par anémométrie à fil chaud et mesures de pression. Sont également détaillées les mesures obtenues par vélocimétrie par image de particules (PIV) dans la singularité de référence. Les résultats expérimentaux sont comparés à des données de la littérature et constituent, à notre connaissance, les premiers résultats de PIV dans un coude de grande taille. Ces mesures forment une importante base de données, utile notamment pour la validation de simulations numériques.

Enfin, les mesures de dépôt, conduites en amont et en aval d'un coude puis dans des coudes, sont

présentées dans le volet expérimental, détaillé dans la cinquième partie. Les résultats des mesures de vitesses de dépôt en amont et en aval du coude sont analysés par comparaison avec la littérature, avec le modèle semi-empirique de prédiction de dépôt de [Ben Othmane et al. \(2010\)](#) et les modèles empiriques développés par [Nerisson \(2009\)](#) et [Sippola \(2002\)](#). Les mesures des masses déposées localement dans quatre coudes de géométrie différente sont également présentées et analysées afin de dégager des tendances entre le dépôt et les grandeurs aérauliques. Ces mesures locales sont, à notre connaissance, les premières mesures existantes dans la littérature ouverte sur le dépôt dans un coude de grande taille.

Sommaire

1.1	Caractérisation globale et locale du dépôt	6
1.1.1	Théorie	6
1.1.1.1	Mesure de dépôt globale	6
1.1.1.2	Mesure de dépôt locale	8
1.1.1.3	Synthèse	9
1.1.2	Choix de l'approche	10
1.2	Techniques de mesure de dépôt existantes	12
1.2.1	Mesure massique de dépôt surfacique	13
1.2.1.1	Pesée	13
1.2.1.2	Fluorimétrie	13
1.2.1.3	Signal photovoltaïque	15
1.2.1.4	Capteur massique à onde acoustique	15
1.2.1.5	Capteurs massiques résonants	17
1.2.1.6	Capteurs de suie	18
1.2.1.7	Synthèse	19
1.2.2	Mesure en nombre de dépôt surfacique	22
1.2.2.1	Comptage optique surfacique — techniques développées en laboratoire	22
1.2.2.2	Techniques optiques commercialisées	23
1.2.2.3	Synthèse	24
1.3	Le dépôt d'aérosol dans les conduits	26
1.3.1	Études expérimentales	26
1.3.1.1	Tubes de petite taille — diamètre d'environ 1 cm	26
1.3.1.2	Gaines de moyenne taille — diamètre supérieur au cm	30
1.3.2	Modélisation	34
1.3.2.1	Modélisation empirique - Corrélations	34
1.3.2.2	Modélisation semi-empirique	41
1.4	Les écoulements	43
1.4.1	Dans les conduits droits	43
1.4.2	Dans les coudes	44
1.5	Conclusion	48

Pour mieux maîtriser la problématique liée à la mesure locale du dépôt d'aérosols dans des conduits de ventilation de taille industrielle, ce chapitre dresse l'état de l'art du dépôt des aérosols dans les gaines de ventilation. L'objectif est double et consiste en :

- la détermination des paramètres qui caractérisent le dépôt local et les techniques de mesure associées ;
- la détermination des grandeurs à enjeux pour le dépôt d'aérosols et pour les écoulements dans les singularités.

Ce chapitre comprend deux sections issues d'un article en anglais.

1.1 Caractérisation globale et locale du dépôt

Dans ce travail, c'est le dépôt d'aérosols qui nous intéresse. Il existe plusieurs paramètres permettant de représenter ce dépôt. Le détail de ces paramètres a fait l'objet d'une partie d'un article publié dans un journal scientifique¹. Il s'agit de la Partie 2 de cet article (« Theory »), présentée ci-après.

Partie 2 de Costa et al. (2022a)



1.1.1 Theory

In order to qualify and monitor aerosol deposition measurement, the first question to be asked is if the deposition is observed on a specific place or on the whole system. Two measurements are classified: a) the global deposition measurement integrates all the variations over a surface: no matter the local variations, the measurement will give a “mean” value without information on the homogeneity of the deposition on the surface; b) the local deposition measurement enables to measure deposition in specific places. The size of the surface does not define if we are working with a local or a global technique. For example, in nuclear context, a local measurement technique can be useful to know the quantity of deposited radioactive particles, which is essential to detect hotspots. In food industry, global deposition measurement can help to determine if the system is unclean.

1.1.1.1 Global deposition measurement

Global deposition measurement is intensively used in many different applications, such as sampling tubes (Pui *et al.*, 1987) and chambers or rooms (Thatcher *et al.*, 2002). Two ways exist to qualify deposition with a global approach. It consists on the determination of the deposited fraction F_d ² or the

1. Costa *et al.* (2022a)

2. Les notations de l'article ont été conservées telles quelles. Elles sont toutefois inscrites dans la Nomenclature.

determination of the particle concentration decay throughout a particle deposition rate β_d (s^{-1}). Figure 1.1 and Figure 1.2 illustrate these two relations. Figure 1.1 shows the deposited fraction including the deposited particles, regarding the initial concentration at an upstream sampling point and final concentration got in a downstream sampling point. Here, the measured volume concentration upstream and downstream of the channel allows the determination of the deposited fraction. In the case of a constant volume flow the deposited fraction F_d is expressed as:

$$F_d = 1 - \frac{C_{out}^v}{C_{in}^v} \quad (1.1)$$

with C_{in}^v the inlet (or initial or upstream) and C_{out}^v the outlet (or final or downstream) volume concentration (particles. m^{-3} or kg. m^{-3}) for all the surface contained between the two sampling points. In that case, the measurement of the inlet and outlet concentrations is representative of the concentration on the tube section if the aerosol concentration over the tube section is homogeneous, which is generally the case for sampling tubes, since the concentration profile has had time to fully develop. Measuring F_d does not provide a local deposition measurement, as deposition is integrated over the whole length of the tube between the two points.

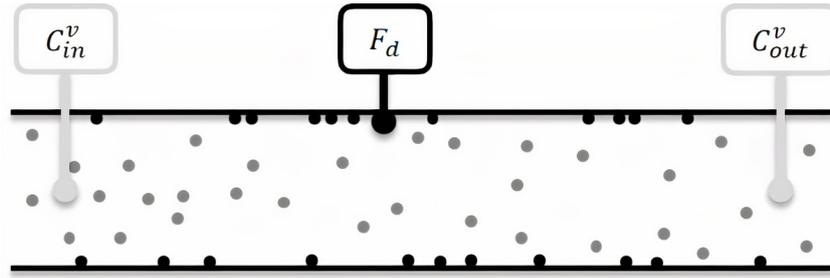


Figure 1.1 - Global deposition in a channel with flux conservation

Figure 1.2 represents the second way to get the global deposition by determining the particle deposition decay rate β_d (s^{-1}) only considering aerosol deposition and ventilation as sink terms and constant source terms. The decrease of aerosol volume concentration over time (Xu *et al.*, 1994; Lai *et al.*, 2002) is:

$$\frac{dC^v(t)}{dt} = -(\beta_d + \beta_v) C^v(t) + \sum_i Source_i \quad (1.2)$$

with $C^v(t)$ volume concentration at time t ; Source represents all the possible source terms, such as aerosol injection, and β_v the particle decay rate (s^{-1}) related to ventilation. The concentration in the considered volume (generally a room or a chamber) must be homogeneous to apply this relation, which is a first drawback of this technique. When solving this differential equation considering the concentration decrease (namely no particle injection and no source term; with $C^v(0)$ the initial volume concentration), the concentration over time is:

$$C^v(t) = C^v(0) \exp^{-(\beta_d + \beta_v)t} \quad (1.3)$$

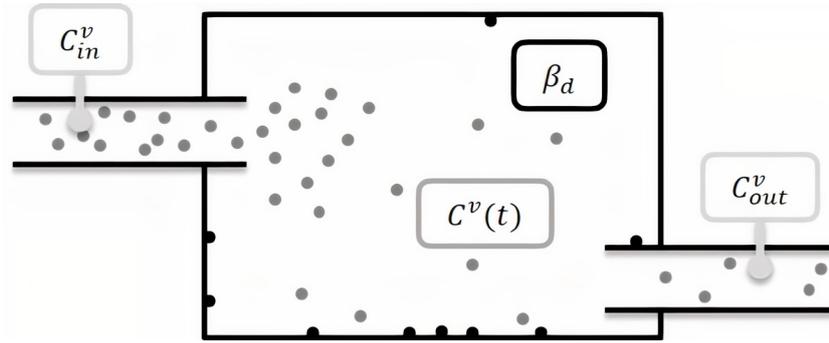


Figure 1.2 – Global deposition in a room with flux conservation

with the second and main drawback of this technique being that the influence of the orientation of the surface on deposition can generally not be evaluated, although the effect of gravity is noticeable on largest particles by increasing deposition on floor surface, in opposition to ceiling surface. Some authors (Abadie *et al.*, 2001) introduce a specific modeling, so that a decay rate of each surface (vertical, oriented, horizontal, etc.) can be deduced. As a conclusion, the major drawback of deposition rate is the requirement of a homogeneous concentration and steady flow, and the difficulty to conclude on the deposition on the different oriented surfaces.

These two methods of determination of a deposited fraction or the deposition rate are based on volume concentration measurements, which can be performed with conventional techniques of aerosol concentration measurement. As a result, the associated measurement techniques will not be detailed in this paper and the reader should refer to standard aerosol concentration measurement, well described in some reviews (Prévost, 1997; Baron et Willeke, 2001; Wilson *et al.*, 2002; Amaral *et al.*, 2015; Soysal *et al.*, 2017).

1.1.1.2 Local deposition measurement

Local deposition is characterized by J the deposition flux on the surface (particles.m⁻².s⁻¹ or kg.m⁻².s⁻¹). J depends on many different mechanisms: sedimentation, turbulent and Brownian diffusion, inertia, interception, turbophoresis, electrophoresis and thermophoresis.

J can be measured, either by counting deposited particles or by measuring a mass on a surface S :

$$J = \frac{C^s}{\Delta t} = \frac{m_d}{S \times \Delta t} \quad (1.4)$$

where C^s (particles.m⁻² or kg.m⁻²) is the surface concentration, m_d is the number or the mass of particle on the surface and Δt is the time of exposition to the deposition (s).

The deposition flux can also be obtained by measuring concentration gradient. The concentration gradient measurement is generally used for outdoor quantification of aerosol deposition, as measuring concentration gradient is easily done in atmospheric constant flux layer (Garland et Cox, 1982; Phillips, 2004; Matsuda *et al.*, 2010). To compare, the atmospheric constant flux layer can reach several hundreds of meters, whereas in a ventilation duct, the boundary layer is in the order of a few millimeters (Ben Othmane, 2011; Taheri *et al.*, 2020). For atmospheric measurements the flux in the boundary layer is usually expressed as (Phillips, 2004; Matsuda *et al.*, 2010):

$$J = - (D_B + D_t) \frac{d\overline{C^v}}{dz} \quad (1.5)$$

with $\partial J/\partial z = 0$ as the flux is assumed constant. D_B and D_t are respectively the Brownian and turbulent diffusion coefficient ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$), $\overline{C^v}$ the mean volume concentration in the boundary layer (particles. m^{-3} or $\text{kg}.\text{m}^{-3}$), z the height regarding the surface.

The deposition flux can also be expressed by eddy correlation, based on the covariance between the instantaneous aerosol volume concentration (C^v) and the instantaneous vertical velocity (w - $\text{m}.\text{s}^{-1}$) (Roupsard, 2013):

$$J = \text{Covariance}(wC^v) - v_g \overline{C^v} \quad (1.6)$$

with v_g the sedimentation velocity (m/s). This method is also greatly used in outdoor studies: to get a flux value, the vertical wind velocity and the concentration need to be measured. The devices used for these measurements shall have a quick enough measurement frequency in order to catch all the variations. This implies that the devices do not have to disturb the flow. Many other assumptions are made to apply the formula (1.6), which are detailed by Burba (2013).

In this review, we will focus on techniques providing deposited particle mass or deposited particle number measurements, which will be presented in details, respectively in Sections 1.2.1 and 1.2.2. A drawback of local measurement is also the representativeness of this measurement: if the aerosol deposition is not uniform over the whole considered surface, the extrapolation of a local deposition flux over the whole surface is questionable. For example, in large ventilation ducts with variation of curvature (bend) or section (reduction), several local deposition measurements should be performed in order to extrapolate the results over the whole singularity.

1.1.1.3 Synthesis

Table 1.1 summarizes the information about global and local parameters used to characterize the aerosol deposition.

As we can see from this table, most of the methods to determine local or a global deposition are based on aerosol volume concentration. Many devices and techniques can be used to measure aerosol volume concentration, as described in the book of Baron and Willeke (2001). The major part of these devices are necessary used with aerosol sampling, which raises its own constraints (deposition in sampling lines, necessity of isokinetic sampling for polydisperse aerosols, etc.).

The measurement of a decay rate is also concerned by sampling considerations. It is a simple parameter, commonly used in indoor environments, but the homogeneity of the concentration inside the chamber needs to be checked and the deposition does not distinguish the different surfaces of the chamber, except if some semi-empirical modeling is introduced to the mass balance equation.

The local deposition flux can be extrapolated over a whole surface if the flow conditions do not change and should be used carefully under specific flow with geometrical variations of the deposited surface.

Table 1.1 – Synthesis of deposition parameters

	Deposition parameter	Measure value	Measured value	Difficulties related to the measurement of the deposition parameter
Global deposition	F_d	$F_d = 1 - \frac{C_{out}^v}{C_{in}^v}$	Volume concentration at the inlet and at the outlet	—
	β_d	$C^v(t) = C^v(0) \exp^{-(\beta_d + \beta_v)t}$	Volume concentration over time	—
Local deposition		C^s	Surface concentration	—
	J	$\frac{dC^v}{dz}$	Volume concentration gradient in boundary layer	Difficulties of measuring in thin boundary layer (adapted to atmospheric boundary layer)
		$wC^v, \overline{C^v}$	Volume concentration and velocity in boundary layer	Difficulties of measuring in thin boundary layer (adapted to atmospheric boundary layer)

However, the local measurement of surface concentration is the only method which considers a direct measurement of the aerosol deposited over a surface. This method will therefore be explored in details in this paper ³, by focusing on two ways to determine the concentration collected on a surface:

- mass of aerosol deposited on a surface (surface mass concentration, kg.m^{-2}),
- number of aerosol particles deposited on a surface (surface number concentration, particles.m^{-2}).

These two variables can be measured with different techniques, which will be described in the two next sections.

1.1.2 Choix de l'approche

Dans la Section 1.1.1, nous avons détaillé les différents paramètres et expressions permettant de mesurer le dépôt. Dans ce travail, l'objectif est de mesurer localement le dépôt. Pour cela, l'expression la plus adaptée est celle du flux de dépôt J :

$$J = \frac{m_d}{S \times \Delta t} \text{ ou } \frac{N_d}{S \times \Delta t} \quad (1.7)$$

3. Voir page 13.

qui fait directement intervenir m_d la masse ou N_d le nombre de particules déposées, sur la surface S pendant un temps Δt .

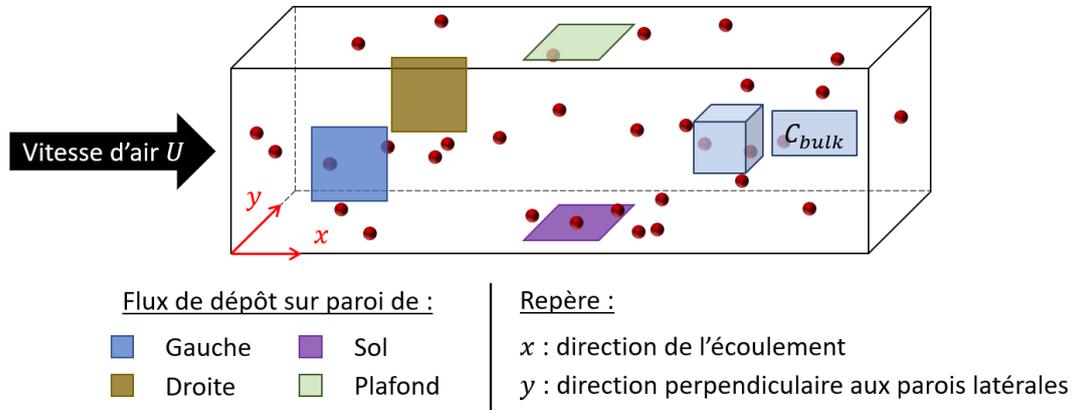


Figure 1.3 – Schématisation du flux de dépôt et de la concentration en gaine, grandeurs intervenant dans la vitesse de dépôt dans une gaine de ventilation

La mesure de m_d pouvant se faire localement, m_d peut donc être mesurée sur des surfaces d'orientations différentes. De plus, la surface et le temps d'exposition au dépôt de particules sont définis par l'opérateur. Les techniques de mesure existantes pour mesurer m_d sont présentées dans la section suivante. Une des grandeurs souvent utilisées pour représenter les mesures de dépôt est la vitesse de dépôt v_d , exprimée en m/s. La vitesse de dépôt repose sur le rapport du flux de dépôt J et de la concentration d'aérosols dans la gaine C_{bulk} (Figure 1.3).

$$v_d = \frac{J}{C_{bulk}} \quad (1.8)$$

Cette vitesse de dépôt est souvent adimensionnée (v_d^+) pour pouvoir comparer les différents travaux :

$$v_d^+ = \frac{v_d}{u^*} \quad (1.9)$$

où u^* est la vitesse de frottement. La vitesse de frottement s'exprime comme suit :

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_a}} \quad (1.10)$$

avec τ la contrainte de cisaillement à la paroi et ρ_a la masse volumique de l'air. Or τ peut s'exprimer en fonction du coefficient de frottement (de Fanning f_F) :

$$\tau = f_F \times \rho_a \times \frac{U^2}{2} \quad (1.11)$$

avec U la vitesse moyenne de l'écoulement ; ce qui donne finalement :

$$u^* = U \sqrt{\frac{f_F}{2}} \quad (1.12)$$

La valeur de u^* peut être caractérisée de plusieurs manières, par exemple :

1. en mesurant expérimentalement une perte de charge. Ensuite, en utilisant des lois comme celle de Darcy-Weisbach (Schlichting et Kestin, 1979), on obtient le coefficient de frottement et on remonte à la vitesse de frottement ;
2. en estimant la rugosité du matériau qui constitue la paroi. Ensuite, en utilisant par exemple le diagramme de Moody (Moody, 1944), on remonte à une valeur du coefficient de frottement et donc de la vitesse de frottement ;
3. en mesurant un profil de vitesse en proche paroi. Ensuite, des lois, comme celle de Clauser (1956) par exemple, permettent de s'approcher du profil expérimental et de déduire une vitesse de frottement.

D'après les équations précédentes, les grandeurs qu'il va nous falloir mesurer lors des expériences pour obtenir, in fine, une vitesse de dépôt sont :

- m_d la masse ou N_d le nombre de particules déposées sur la surface d'étude ;
- d_p le diamètre des particules, nécessaire pour le calcul du temps de relaxation des particules τ_p ⁴ ;
- S la surface d'étude ;
- Δt le temps d'exposition de la surface aux aérosols ;
- C_{bulk} la concentration volumique d'aérosols dans la gaine ;
- u^* la vitesse de frottement.

Toutes ces grandeurs peuvent être mesurées relativement facilement, exceptée m_d (ou N_d) pour laquelle de nombreuses techniques existent. Ces techniques font l'objet de la section suivante.

1.2 Techniques de mesure de dépôt existantes

La recherche des techniques de mesure de masse déposée m_d (ou nombre de particules déposées N_d) existantes a fait l'objet de la suite de l'article cité dans la section précédente. Cet article fait la revue de toutes les techniques de mesure directes de dépôt sec sur les surfaces intérieures, en détaillant les avantages, inconvénients et spécificités de chacune d'entre elles (Parties 3 et 4 : « Mass surface deposition measurement » et « Number surface deposition measurement »).

**Parties 3 et 4 de
Costa et al. (2022a)**



4. $\tau_p = \frac{C_c \rho_p d_p^2}{18\mu}$, avec C_c le facteur correctif de Cunningham, ρ_p la masse volumique des particules et μ la viscosité dynamique de l'air.

1.2.1 Mass surface deposition measurement

In this part are presented measurement techniques, which provide a mass concentration of deposited aerosol particles over a surface by collecting these particles. As it will be seen, different techniques can be found, each of them being generally laboratory based and not “ready-to-use” techniques. A description of the principle of each technique is given hereafter. To be able to interpret the measured deposited mass surface concentration, the aerosol size distribution should be monodisperse for all these techniques.

Other techniques require sampling particles to analyze deposited particles on a surface (Holopainen *et al.*, 2002; Lavoie *et al.*, 2007; Peillon *et al.*, 2020) and others showed an interest in estimating deposition by studying the darkening of a surface due to deposited particles (Landis *et al.*, 1996; Schneider *et al.*, 1996) The techniques requiring sampling particles and those studying surface darkening will not be detailed as the first ones modify the deposition (particles are sampled, not collected) and the second ones only studied the surface darkening by the deposited particles and do not give a mass measurement.

1.2.1.1 Weighing

The most basic technique for measuring a mass concentration is to weigh the surface of deposition before and after aerosol deposition. The weighing technique is essentially used to weigh filters or material on which the deposition takes place (Lai *et al.*, 2017; Licina et Nazaroff, 2018).

Weighing samples entails that the deposited mass (namely the deposited concentration) is weighty enough, as the most precise ones reach a precision of 0.1 μg . The most precise weighing scales are the electronic ones. The ISO 15767:2009 standard recommends some practices to avoid bias and minimize measurement uncertainty, regarding workplace atmospheres.

To conclude, the advantage of this technique is its user-friendliness. This technique is well known and commonly used; however, it provides neither an *in situ* (the sample containing collected deposited particles needs to be retrieved and brought to the weighing) nor a real-time measurement and is not suitable for low mass deposition. For example, to get a mass of 10 μg on a filter of 47 mm diameter, the deposited mass concentration should at least be 6 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$.

1.2.1.2 Fluorometry

Fluorometry, also called fluorescence spectroscopy, is used in many different applications, such as environmental particles deposition (Maro *et al.*, 2014), in resuspension phenomenon (Wu *et al.*, 1992) or ventilation systems (Da *et al.*, 2015). Fluorometry method requires a fluorescent tracer and a fluorescent spectrometer.

Fluorescence spectroscopy is based on excitation of fluorescent molecules, which consequently emit fluorescent light – corresponding to a specific wavelength – caught by a detector. By using a simplified version of the Beer-Lambert law, the tracer volume concentration C_d^v ($\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$) in a solution is linked to the fluorescence emission intensity I_f .

Different fluorescent particles are used in scientific community depending on the led experiments. All forms of fluorescent molecules are useable, such as fluorescein solved in oil or aqueous solutions. For example, Okazaki et Willeke (1987) use a uranine oleic acid solution to generate their fluorescent aerosol, whereas Sato *et al.* (2002) use an aqueous solution of ammonium fluorescein. Different fluorescent molecules are used indiscriminately, as ammonium fluorescein (Sippola et Nazaroff, 2004; Lai et Nazaroff, 2005) or sodium fluorescein, also called uranine (Okazaki et Willeke, 1987; Wu *et al.*, 1992;

Sato *et al.*, 2002; Maro *et al.*, 2014; Da *et al.*, 2015; Sow *et al.*, 2019). Other researchers use vitamin E (Wilson *et al.*, 2002) to lead deposition measurements in ninety-degree pipe bend; or vitamin B2 (riboflavin) (Cohen Hubal *et al.*, 2005). Riboflavin is used to play the role of pesticide and allows to quantify residues and pesticide exposure.

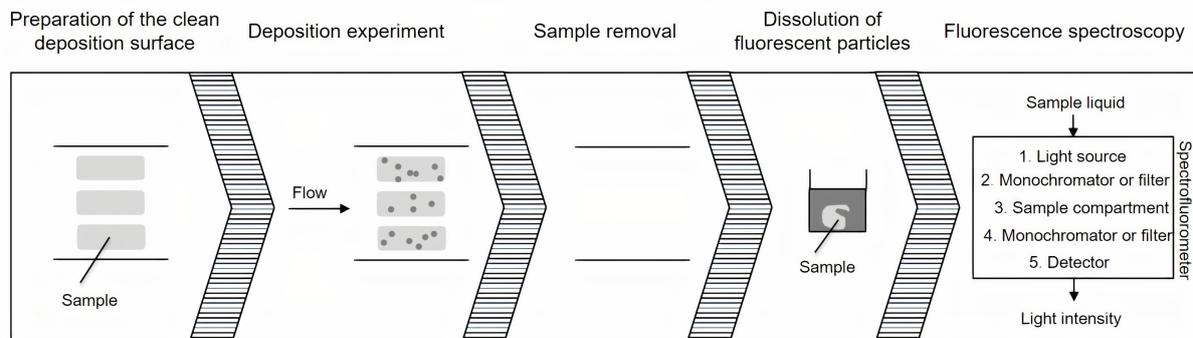


Figure 1.4 – Fluorescence spectroscopy — stages

To obtain the particle deposition concentration with fluorometry, the different steps are presented chronologically on Figure 1.4. The first step is to choose a deposition surface. Sometimes the sample is fixed to the wall and then removed after the deposition of aerosols on this sample (case presented on Figure 1.4), e.g. Wu *et Young* (2012) coat their bend with transparent film to collect particles on the bend surfaces. In most experiments performed with the use of fluorometry, the surface is a filter (Chen *et Pui*, 1995; Thatcher *et al.*, 2002; Sow *et al.*, 2019). However, using a removable sample induces a change of the surface wall in a hydrodynamic sense (i.e. a change of the roughness, boundary layer, and flow), hence a change of the aerosol deposition. On the contrary, the deposition surface can be delimited by a sort of stencil installed after deposition then wiped, as used by Da *et al.* (2015), or the surface itself can be removable (wall panel) and washed after the particles have deposit (Sippola *et Nazaroff*, 2004). In these cases (wiping or washing) no hydraulic boundary layer differences are induced. As in the third part of Figure 1.4, the substratum, if removable (like filter), is put in a specific volume to dissolve all fluorescent particles. If the deposition surface is irremovable, the same treatment is applied for wipes used for cleaning the delimited surface. Attention needs to be paid to the whole dissolving of fluorescein (Kasavan *et Doherty*, 2000) and to the nature of the dissolving solution (for example, the use of uranine requires an alkaline solution). The deposited mass surface concentration can be simply obtained by multiplying C_d^v by the dissolving volume, divided by the surface of deposition collection. Fluorescence spectroscopy is not an *in situ* technique, as the deposited mass is not measured directly at the deposition location. The accuracy is really high as the minimum concentration measurements are low (Sow *et al.*, 2019) present a limit of detection for C_d^v of 10 ng/L) but to our knowledge, no limit of detection of deposited mass were presented in studies in the literature. The impossibility of real-time measurement is restrictive and the technique is time-consuming (Lai, 2002).

A similar technique, providing a volume concentration, is used for bioaerosols deposition measurement. The deposited particles traced with fluorescent molecules are treated in solution according to a specific protocol, generally to isolate bioaerosols from aerosols (Araya *et al.*, 2019). The volume concentration is then measured by flow cytometry: particles pass one by one through a laser beam and are counted using light scattering (Brussaard, 2004). Some experimenters use this technique to measure dry deposition of viruses and bacteria (Morales-Baquero *et Pérez-Martínez*, 2016; Reche *et al.*, 2018).

To conclude, fluorometry presents a high sensitivity and adaptability. This technique is well known and commonly used. Fluorometry also enables to choose the size of the deposition surface. Depending on the chosen protocol, the surface deposition is not necessarily modified by the deposition measurement protocol. However, this technique provides neither an *in situ* nor a real-time measurement.

1.2.1.3 Photovoltaic signal

Another laboratory-based technique for the determination of the particles mass collected on a surface is based on a current intensity delivered by a photovoltaic cell, which plays the role of the deposition surface.

Rondeau (2015) chooses to correlate the power produced by a photovoltaic cell to the deposited concentration, based on the principle that the power produced by the photovoltaic cell is sensitive to light obscuration due to particle deposition. The calibration is performed by building a graph with several known quantities of aerosol deposited on the photovoltaic cell according to the intensity crossing the solar cell. The solar cell is weighed with deposition to measure the deposited mass. The surface concentration is therefore known beforehand. The corresponding fit curve is the calibration curve, which is then used during the experiment to deduce the surface concentration from a current intensity measurement.

Extinction with photovoltaic cell allows an *in situ* measurement. It can be adapted to a “sequential” real-time measurement as soon as the deposited mass allows a significant variation of the light and before the cell is saturated. However, the technique is harder to set up on a large surface due to the difficulty of having homogeneous light flux over the whole surface. The measured concentration on the photovoltaic cell is the most precise for surface concentration lower than 2 mg.cm^{-2} according to El-Shobokshy et Hussein (1993), as photovoltaic cells are more sensitive to deposited mass variations when surface concentration is below this value. To our knowledge, no limit of the detection was presented in the open literature. However, this limit depends on the capacity of the cell to detect a change of light resulting of deposited particles. Besides, the experimenters should verify that particles deposit in only one layer over the surface to increase the sensitivity of photovoltaic signal technique.

Even if the measurement of a photovoltaic signal is not often used, studies focused on aging of photovoltaic cells due to dust deposition are abundant (Jiang et al., 2011a; Mani et Pillai, 2010; Darwish et al., 2015; Saidan et al., 2016; Kazem et al., 2020) and should bring some new advances to aerosol deposition measurements in the future.

To conclude, photovoltaic signal measurement technique is not a commonly used technique to measure aerosol deposition. Its sensitivity depends on the quality of the photovoltaic cells. This technique provides an *in situ* measurement and a sequential real-time measurement.

1.2.1.4 Acoustic wave mass sensors

The Surface Acoustic Wave (SAW) sensors are miniaturized devices used in R&D studies, so they are not ready-to-use sensors: the mass deposited on their surface can be correlated to a shift of frequency correlated to a mass load. All acoustic wave mass sensors are composed of a piezoelectric part that produces an acoustic wave. By studying the velocity and amplitude changes of the acoustic wave, deductions can be made on resonance frequency. The frequency is measured with a frequency counter. The precision of the counter depends on its timebase stability. The precision is also enhanced by measuring over a long time. All acoustic wave mass sensors play the role of deposition surface.

SAW sensors are built with two transducers and the SAW propagates in between, as on Figure 1.5. Bowers *et al.* (1991) develop a SAW microbalance for mass measurement to collect monodisperse olive oil particles by impaction on the resonator and reached a 3 pg limit of detection. Hao *et al.* (2014) provide the applying equations of the mass measurement of a SAW focused on PM_{2.5} monitoring. The limit of detection of their sensor is estimated at 0.17 ng. A SAW sensor dedicated to particulate matter detection is developed by Thomas *et al.* (2016). They measure masses lower than 1 ng on experiments performed with five different types of particles for eight different diameters. It should be noticed that SAW sensors are sensitive to ambient conditions, such as temperature and humidity (Liu *et al.*, 2016).

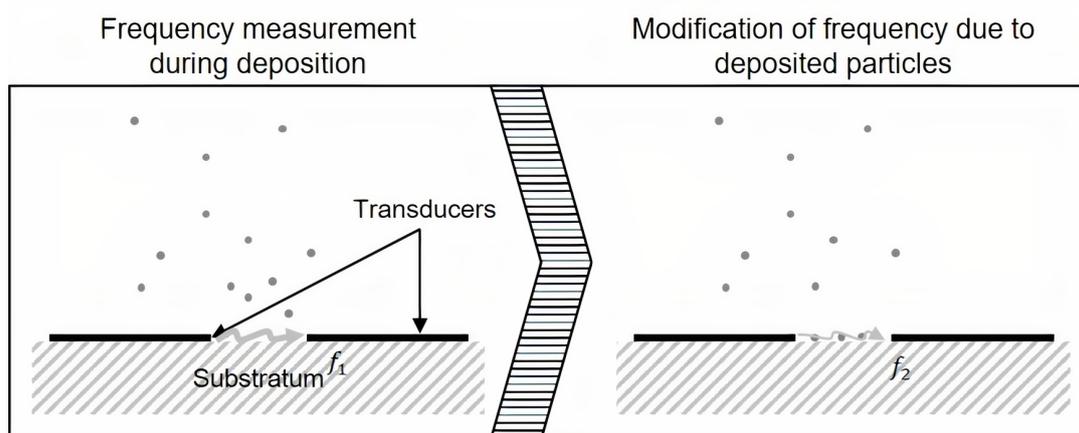


Figure 1.5 – Operation of a Surface Acoustic Wave (SAW) sensor

Another acoustic wave mass sensor is the Film Bulk Acoustic Resonator (FBAR). This resonator is built with two electrodes, a top and a bottom, and a piezoelectric film in between (see Figure 1.6). The structure is suspended over an air gap that maximizes the reflection of the propagated acoustic wave. Campanella *et al.* (2006) present a FBAR for biomolecular applications. They obtain a minimum detectable mass change of 1 pg for a deposition of a distributed loading (magnesium fluoride vapor deposition) and of 7 fg for a localized loading (amorphous compound containing carbon, platinum and gallium). Campanella *et al.* (2008) also reveal an effect of loading location on the sensor response. FBARs are also used by Paprotny *et al.* (2013) who collect particles using thermophoretic precipitation and measured particulate matter from diesel exhaust and tobacco smoke.

To conclude on acoustic wave sensors, which gather SAW sensors and FBARs, it can be said that they are very small sensors with high sensitivity. They imply a modification of the deposition surface since they are placed on the given surface. The thickness of the surface of these sensors is around 1 or 2 mm. These sensors provide an *in situ* measurement and a “sequential” real-time measurement: the real-time measurement is interrupted by saturation.

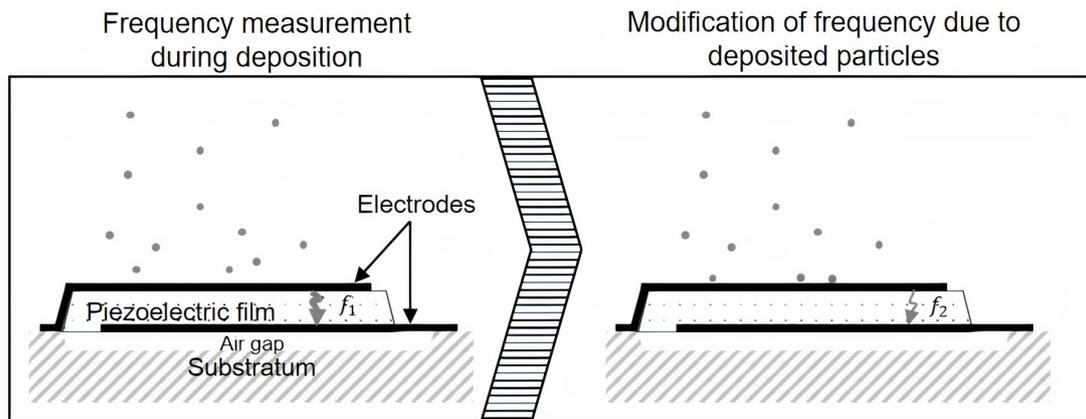


Figure 1.6 – Operation of a Film Bulk Acoustic Resonator (FBAR)

1.2.1.5 Resonant mass sensors

Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) and Nano-Electro-Mechanical Systems (NEMS) are respectively micro and nanoscale small detectors, involved in many research fields, even if they are still being developed and cannot be considered as ready-to-use sensors. An extensive review of aerosol mass concentration measurements (Soysal *et al.*, 2017) presents evolution and progress made these last years on these sensors. These systems have a vibrating structure, where particles can deposit, therefore modifying the vibration frequency, which is related to mass concentration. MEMS/NEMS works as mechanical damped harmonic. For example, a cantilever MEMS is presented on Figure 1.7.

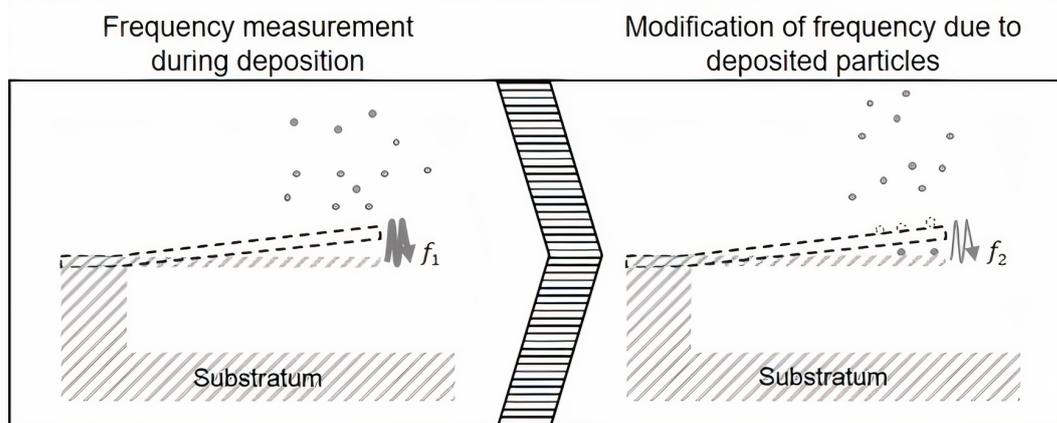


Figure 1.7 – Operation of a cantilever Micro-Electro-Mechanical System (MEMS)

Hajjam *et al.* (2011) define MEMS/NEMS resonance frequency (s^{-1}) as:

$$f = 1/2\pi \sqrt{k_{eff}/m_{eff}} \quad (1.13)$$

where k_{eff} is the effective spring constant ($kg \cdot s^{-2}$) and m_{eff} (kg) is the effective mass of the resonator. The mass MEMS/NEMS limit of detection m_{min} is calculated by:

$$m_{min} = \frac{m_{eff}}{QF} \quad (1.14)$$

where QF is the quality factor of the sensor and is defined as the ratio between the frequency and the resonance width. To perform very sensitive mass measurement, MEMS/NEMS should have high frequency and high QF and be light. For the moment, MEMS/NEMS mass sensors are essentially found in R&D field and are not manufactured.

MEMS and NEMS are used to measure different kinds of aerosols. Bioaerosols are studied with MEMS resonators (Gupta *et al.*, 2004; Nugaeva *et al.*, 2007). Zielinski *et al.* (2016) measure particle mass on a piezoelectric bulk acoustic mode resonator with an impactor to collect aerosols.

NEMS have a lower limit of detection than MEMS due to their smaller size (around a few μm). Yang *et al.* (2006) measure *in situ* and in real-time zeptogram-scale mass with adsorbed gaseous species. A mass resolution of 740 ag has been reached from diffusion to inertial impaction on a nanomechanical resonant fiber (Schmid *et al.*, 2013) to 31.6 fg with electrostatic precipitation of particles on a silicon nanowire NEMS resonator (Wasisto *et al.*, 2013). Hajjam *et al.* (2011) improve the level of frequency and Q-factor value by thermally actuating the MEMS. It allows a more uniform mass sensitivity than other actuation methods. However, as Davila *et al.* (2007) highlight, long cantilever are less sensitive than smaller ones due to irregular sensitivity of MEMS sensors with cantilever (Park *et al.*, 2012). Dohn *et al.* (2007) work on linking the position and the mass of deposited particles and their influence on sensor frequency. MEMS and NEMS are really sensitive to ambient conditions (pressure, temperature, relative humidity, etc.). Also, the active surface of these sensors is really small so it quickly saturates. Consequently, QF decreases and the sensor effectiveness decreases too. Dry and wet cleaning procedures have been developed to fully withdraw particles of the surface. These procedures are efficient but they generally require that the sensors are removed from the experiment to be cleaned, thus interrupting the real-time measurement. New procedures need to be developed to provide a real-time regeneration process. Additionally, the response time of MEMS and NEMS is short, so real-time measurement seems possible to reach. These sensors also have the advantage of presenting a relatively low cost production for the equipped laboratory as the production process is done by batch, and their power consumption is really low.

To conclude, MEMS and NEMS are macro and nanoscale sensors with the lowest limit of detection among the mass surface deposition measurement techniques. Due to their very small size, they are very sensitive to ambient conditions. These sensors imply a modification of the deposition surface. These sensors provide an *in situ* measurement and a "sequential" real-time measurement (interruption by the sensor saturation). MEMS and NEMS are laboratory techniques but are rapidly developing.

1.2.1.6 Soot sensors (conductive particles)

Some sensors have been developed in order to quantify soot deposition, more generally conductive particles deposition. It is especially used for on-board diagnosis for car industry, for example applications on Diesel Particulate Filter (DPF). Development of micro and nano-sensors is consequently important, even though they yet remain non-commercial products. Even though all acoustic wave mass sensors can be adapted and/or used to soot deposition measurement, different kinds of sensors for soot measurement applications are developed: resistive sensors and capacitive ones are presented below.

Resistive sensors are made of two electrodes on a substratum. The conductance G measured between the two electrodes is equal to zero before deposition. When particles deposited between the elec-

trodes, bridges are created thanks to the conductive properties of soot particles (mostly carbon-based), as presented on Figure 1.8. The measured conductance increases according to deposited mass. The speed with which conductance increases is linked to soot deposition concentrations, particle size and particle composition (Feulner *et al.*, 2015). The sensor needs to be regenerated by burning soot particles after reaching saturation point, using a resistance that heats and burns the soot particles to about 600°C (Grondin *et al.*, 2016). The orientation of electrodes plays a role in the signal measurement (Hagen *et al.*, 2014). The effect of particle size on the percolation time (the time it takes for bridges to appear) is investigated by Reynaud *et al.* (2019). They notice that small particles increase this percolation time. These sensors are sensitive to ambient conditions, such as relative humidity and the orientation of the sensors is also important (Kort *et al.*, 2019, 2021).

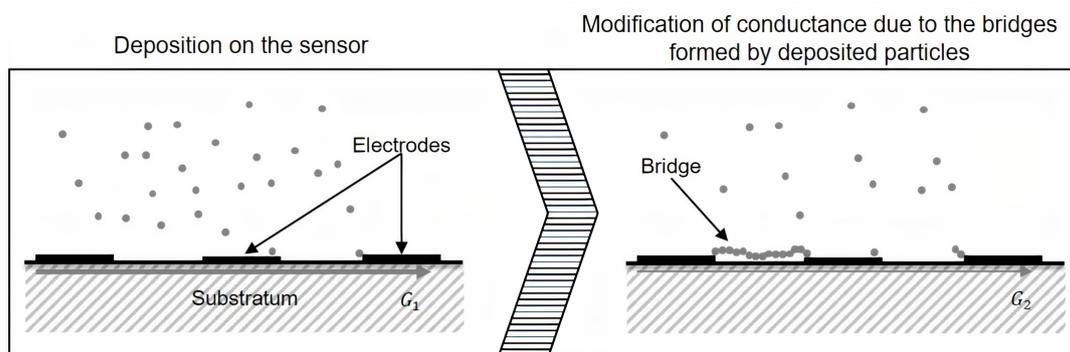


Figure 1.8 – Operation of a resistive sensor

Among soot sensors, capacitive sensors are similar to resistive sensors but their electrodes are covered with an insulating material (see Figure 1.9). Capacitance measurement C_p is performed, and C_p decreases with the mass loading. Kondo *et al.* (2011) work on improving their capacitive sensor by using base metal electrodes, rather than noble metal ones, as commonly used (like platinum for example). Furthermore, the sensor performance can be improved by enhancing the imposed voltage between the two electrodes. However, this voltage imposes a modification of particle collection phenomenon: electrophoresis enhances soot deposition on the sensor. Hagen *et al.* (2018) study the effect of different voltage values imposed between the electrodes. As the voltage is enhanced, soot temperature rises and causes thermophoresis to occur. Comparing capacitive sensors to resistive ones, capacitive sensors are more complex, as measuring small capacitances with high resolution is more difficult than measuring current value (related to conductance).

To conclude, soot sensors gather resistive and capacitive sensors. The size of these sensors (i.e. the size of the deposition surface) is linked to the number of electrodes chosen during the creation process. Soot sensors imply a modification of the deposition surface and are sensitive to ambient conditions. They provide an *in situ* measurement and a “sequential” real-time measurement, as the measurement is interrupted by saturation.

1.2.1.7 Synthesis

The specific characteristics of the different methods found to determine mass concentration on a surface are synthesized in Table 1.2.

Concerning the real-time measurement, acoustic wave mass sensors, resonant mass sensors and soot

sensors present similar characteristics. They do not perform real-time deposition measurement but a kind of sequential real-time measurement: even though the measurement frequency is high, saturation of the sensors interrupts the measurement.

On one hand, all the sensors are intrusive aerosol deposition measurement techniques. As deposition is directly measured on the surface of the sensors, these sensors need to be installed on the surface where deposition will take place, hence changing the nature of the deposition surface. On the other hand, all the sensors provide an *in situ* measurement, unlike the weighing technique and fluorometry, as the experimenters can install the sensors on the surface of the experiment and the measurement is performed where the deposition takes place.

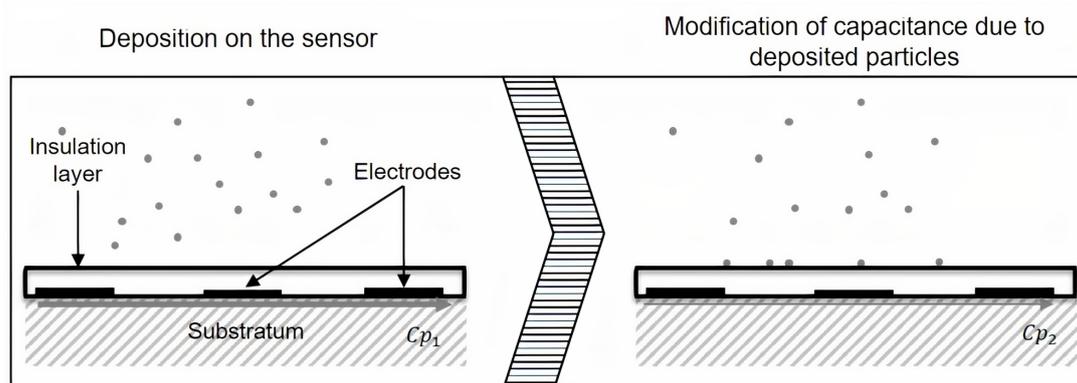


Figure 1.9 - Operation of a capacitive sensor

Concerning the calibration process, the sensors are more difficult to handle than weighing scales: the sensors are not yet marketed (on the contrary, weighing scales are easily found on the market) so the experimenters need to develop them at their laboratory and then qualify the sensors. In general, these sensors also need to be calibrated almost every time an experiment is carried out due to the difficulty of controlling several parameters, such as ambient and intrinsic conditions.

When looking at the size of the deposition surface, weighing scales, photovoltaic signal and fluorometry techniques can provide a deposition measurement on larger surfaces than the ones studied with the small sensors (SAW, MEMS, etc.) and photovoltaic signal technique (difficulties to get a homogeneous light flux over large surfaces).

Concerning the intrusiveness of the techniques, fluorescence spectroscopy associated with wiping or washing the deposition surface is the only technique which provides an aerosol deposition measurement without modifying the deposition surface, as most of the other techniques requires either a specific surface (like a transparent surfaces) or an added surface which is generally the sensor itself.

Concerning the directly measured variable, weighing scales are the only way to directly get a value of deposition measurement; whereas with the other techniques, a first variable is measured (for example frequency), which must then be converted into deposited mass, inducing calibration processes.

Concerning the specificity of the techniques, fluorescence spectroscopy and soot sensors are both techniques that require a specific type of aerosols, respectively a fluorescent aerosol (or an aerosol traced with fluorescent material) and a conductive aerosol. For the other techniques, any type of aerosol can be used.

Table 1.2 – Measurement techniques of mass surface deposition

Techniques	Limit of detection	Size of the deposition surface	In situ measurement	Real-time measurement	Intrusiveness (Surface modification)	Measured value	References
Weighing scale	0.1 µg (depends on the manufacturer)	—	No	No	Yes	Mass	Lai <i>et al.</i> (2017); Licina et Nazaroff (2018)
Fluorometry	Depends on the fluorometer	No matter	No	No	Yes	Fluorescence intensity	Thatcher <i>et al.</i> (2002); Sow <i>et al.</i> (2019) Sippola et Nazaroff (2004); Da <i>et al.</i> (2015)
Photovoltaic signal	Better precision under 2 mg.cm ⁻²	No matter	Yes	Sequential	Yes	Current	El-Shobokshy et Hussein (1993)
Acoustic wave mass sensors							Bowers <i>et al.</i> (1991)
							Campanella <i>et al.</i> (2006)
Resonant mass sensors							Hajjam <i>et al.</i> (2011)
							Schmid <i>et al.</i> (2013)
Soot sensors							Feulher <i>et al.</i> (2015)
							Hagen <i>et al.</i> (2016)

1.2.2 Number surface deposition measurement

For all the techniques described in this part, the studied aerosols can have either a monodisperse or a polydisperse size distribution.

1.2.2.1 Optical counting on surfaces — laboratory-developed techniques

Optical counting is a method that provides deposited particle number concentration measurement. The technique is presented on Figure 1.10. The deposition surface needs to be delimited first and is lighted by a lighting system, which provides contrasted luminosity, helping the differentiation between particles, noises and substrate material. The delimited surface is faced by an optical detector, such as a microscope or a macro-objective connected to a camera. In the past, particle counting was manually performed by the user, as does McCready (1986) by performing particle deposition on a transparent plate and using a microscope. More recently, Wagner et Leith (2001) and Boor et al. (2013) choose to study the deposition on a filter using a microscope equipped with a camera, whose pictures were post-processed with a morphometry program or image analysis software to realize the particle counting. Image analysis has been extensively developed allowing the use of open-source imaging software (Barth et al., 2013) or commercial software (Wagner et Leith, 2001), by programming the imaging analysis (Boor et al., 2013) or by using deep learning-based method for size analysis (Frei et Kruis, 2020).

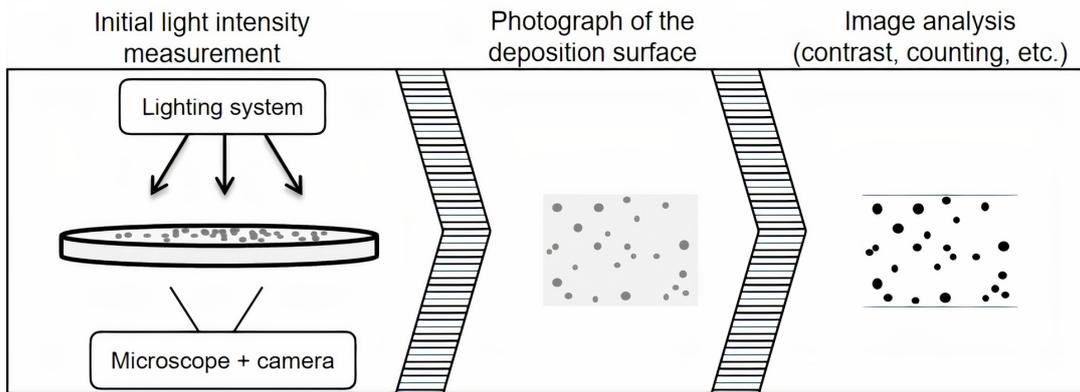


Figure 1.10 – Operation of microscope and camera counting

With this imaging technique, the lighting system is placed in front of the aerosol sample (the need of a transparent surface is necessary here) facing the photodetector (technique also called shadowgraphy). This technique is used by Barth et al. (2013). In some studies, a lighting system is already integrated into the microscope (Wagner et Leith, 2001; Boor et al., 2013) and the observed surface can be a filter for example.

To analyze the image given by the microscope, the magnification gives the enlarged size SO_e of the object of size SO_i , as it is expressed as:

$$M = \frac{SO_e}{SO_i} \quad (1.15)$$

Regarding digital microscope linked to a camera, the total magnification M_{total} can be expressed as:

$$M_{total} = M_O \times M_D \quad (1.16)$$

with M_O the optics magnification, defined as the product of magnification of each optics instrument: $M_O = \prod_i M_{O,i}$; and M_D the digital magnification, defined as the ratio between the monitor screen size and the camera sensor size on the sensor $M_D = (\text{Screen size})/(\text{Sensor size})$. If 4 pixels are considered the minimum to represent one particle in the image and the camera has a pixel size D_{pix} of $7 \mu\text{m}$ and the magnification is 2, the minimum aerosol size D_{max} that can be observed is:

$$D_{max} = \frac{4 \times D_{pix}}{M} = \frac{4 \times 7}{2} = 14 \mu\text{m} \quad (1.17)$$

However, D_{max} is limited by the existence of the Airy disk, due to the diffraction of light, in case of reflection microscopy. Shadowgraphy can be used to avoid this limit, by observing the shadow of the particle thanks to the photodetector facing the lighting system.

As the counting distinguishes the different diameters of particles, the aerosol size distribution can be polydisperse. Besides, in most cases, optical counting methods are not intrusive and therefore does not modify deposition. Optical counting is an *in situ* measurement technique, as the deposited particles are directly observed on the deposition surface; and the uncertainty depends on the optical devices used for the experiment. Barth *et al.* (2013) estimate uncertainty around 20%, whereas Boor *et al.* (2013) presents a 5% uncertainty on particle counting.

Optical counting enables to determine exactly the number of deposited particles, regarding the diameters of these deposited particles. The quality of this technique rests on the quality of a) the utilized optical (objective and camera) instruments, b) the lighting system and c) the accuracy of the image processing. Besides the working distance ($WD - \text{m}$) is dependent on the magnification M . The following empirical formula provides a relationship between WD and the focal length FL (m) and M :

$$WD = FL \left(\frac{1}{M} + 1 \right) \quad (1.18)$$

However, when M is increased, WD decreases, which is challenging as "standard" manufactured systems do not have a great magnification combined with a working distance over 40 cm.

To conclude, optical counting technique is a laboratory-developed technique. The experimental protocol can vary very differently from an experiment to another, as optical instruments and image processing are chosen by the experimenter. Consequently, the optical counting techniques are adaptable to different experiment configurations and to different particle diameters. Optical counting technique induce a modification of the surface, except in the case of using shadowgraphy in an experiment entirely made of transparent surfaces. The minimum size of particles that can be counted and sensitivity of optical counting technique also depends on the choice of instruments and processing. Besides, the choice of instruments and processing must be done related to the possible working distance and the size of the studied particles in the experiment. Optical counting technique provides an *in situ* measurement.

1.2.2.2 Marketed counting techniques

These devices do not allow to measure aerosol deposition on a given surface, but only on their own surface. All their surfaces are transparent. Only the global measuring principle is detailed for each device in this part and the technical characteristics are listed in Table 1.3.

The Cleapart-100 (Bertin Instruments) measures particle deposition by counting and classifying particles by their size. The Cleapart-100 was developed initially by Winlight System to monitor air quality in cleanroom environments. The measuring system is an optical system placed under the surface, based

on a microscope lens and a camera. According to [Tovena Pecault et al. \(2017\)](#), the uncertainty is estimated at 1%.

The Particle Deposition Meter (PDM, [SAC](#)) is close to the Cleupart 100. The PDM also contains an optical system, but the circular deposition surface can be examined after the deposition experiment, by placing the surface on the PDM device.

The Advanced Particle Deposition MONitor (APMON, [Technology of Sense](#)) is based on a holographic method: deposited particles generate interferences in laser beam waves, which are then analyzed using Fourier transformation method to enable the count of particles. The device is composed of a cartridge containing glass plates oriented at 45 degrees. Aerosols deposit on the glass plates and thanks to the holographic method, the size distribution is provided.

The PFO 1000 MONITOR ([XCAM](#)) is constituted of four CMOS sensors associated with an algorithm, which analyzes deposited particles. Alarms can be programmed by the user to be notified when the detection surface is close to be completely obscured.

The Micro-sensor for cleanrooms (CNES) has been developed ([Menant, 2016](#)) to provide a better resolution than the other presented devices for space applications. As this micro-sensor can be used for cleanroom application, the developers supposed that particles larger than 20 μm are removed by the airflow control system. The Micro-sensor for cleanrooms is based on optical detection ([Menant et al., 2015](#)). The deposition surface is transparent and the scanning system is made of two parts, one on each side of the surface: a laser diode and a focusing assembly is placed on one side and the detection system is on the other side.

1.2.2.3 Synthesis

Table 1.3 details the principal features of number surface concentration measured by deposition measurement techniques. These techniques are gathered in two groups: laboratory-developed techniques and marketed counting ones. All these techniques enable to get quite high frequency measurement but do not provide a real-time measurement, as the optical systems need to move to scan the whole surface. Any type of solid aerosols larger than 10 μm , can be used with these techniques. However, the surface of deposition is an integrated part of the devices: the device can only be used for scanning its own deposition surface.

Laboratory-developed techniques have the advantage of being more adaptable. Each experimenter can choose and decide the best fitting equipment. Also, the optical devices can be chosen according to the experimenter's need: optical devices are not necessarily the same between counting small particles (around 4 μm for example) and large particles (around 50 μm). The treatment of the images can be performed with a dedicated software or with an in-house developed code. For example, there are recent developments of image treatment by using deep learning. Besides, the experimenter can choose the size of his or her deposition measurement surface. Consequently, laboratory-developed optical counting techniques require some precise theoretical knowledge to be implemented: the monitoring system, the detection system and the image processing system need to be properly considered and arranged. On the other side, marketed devices are all-in-one and turnkey techniques. A software is provided to monitor deposition, so these devices are more user-friendly. Most of the marketed devices were developed and studied in the framework of cleanrooms, but could be used in other applications, such as contaminant deposition at home or in industries (for example in food-processing industries).

Table 1.3 – Measurement techniques of number surface deposition

Techniques	Particle size	Size of the deposition surface	In situ measurement	Real-time measurement (measure/unit time)	Surface modification
Lab.-developed techniques					
Optical counting	> 2 µm	-	Yes	No	No
Cleapart-100 (Bertin Instruments)	> 5 µm (5 classes of diameter) > 5 µm (90% reliability)	100 × 100 mm ²	Yes	1/7 min.	Yes
PDM (SAC)	or > 10 µm (98% reliability) (9 classes of diameter)	49 cm ² - Circular	Yes	1 / 12 sec. (> 1 / 20 sec.)	Yes
Marketed techniques					
Apmon (Technology of Sense)	> 15 µm	Not available	Yes	1/5 min.	Yes
PFO 1000 Monitor (XCAM)	> 5 µm and < 750 µm	4 cm ²	Yes	10/1 hour	Yes
Micro-sensor for clean rooms (CNES)	> 1 µm and < 20 µm	Not available	Yes	✓ (No data)	Yes

The measurement performed by these devices are all based on an optical system, which provides particle classification in size, except for the PFO 1000 Monitor, which analyzes the obscuration of the deposition surface. Marketed devices are less adaptable than laboratory-developed techniques, especially as the marketed ones have their own deposition surface, so the surface size and type cannot be decided by the experimenter and consequently imposing a surface modification for aerosol deposition and not to being directly applicable in the applications where the objective is to study the deposition over a specific surface (such as deposition in ventilation ducts).

Comme nous venons de le voir, les techniques de mesure de dépôt d'aérosols sont nombreuses et reposent sur la mesure de paramètres très variés. Le choix de la technique la plus adaptée à notre cahier des charges sera présenté en Section 2.3.1.

1.3 Le dépôt d'aérosol dans les conduits

Une bibliographie sur le dépôt d'aérosol dans les conduits de ventilation est réalisée pour compléter la bibliographie réalisée au moment de la construction de l'installation DIESE (Malet et Hare, 2018). On s'intéresse donc ici aux études expérimentales et de modélisation sur le dépôt d'aérosol. Ces études portent sur des conduits de diamètre de toute taille, toute forme. Elles s'intéressent également au dépôt d'aérosols de toute taille. Les études analysées se focalisent sur le régime d'écoulement turbulent et sur des conduits droits ou coudés à 90°. Les travaux de simulation réalisés par mécanique des fluides numérique CFD ne sont pas détaillés ici, sont très nombreux et très spécifiques à chaque configuration étudiée (Hossain et Naser, 2004; Phares et Sharma, 2006; Zhao et Wu, 2006; Tian et Ahmadi, 2007; Parker *et al.*, 2008; Zhang et Li, 2008; Gao *et al.*, 2012)

1.3.1 Études expérimentales

1.3.1.1 Tubes de petite taille — diamètre d'environ 1 cm

La plupart des études expérimentales sur le dépôt d'aérosols dans les conduits s'intéresse à des tubes de très petites tailles comparés à des gaines de ventilation. En effet, il s'agit très souvent de conduits dont le diamètre est de l'ordre du centimètre.

Le Tableau 1.4 et le Tableau 1.5 listent les études expérimentales trouvées dans la littérature sur le dépôt dans ces tubes de petits diamètres, en régime turbulent.

Le caractère global ou local de la mesure est précisé à la suite de la grandeur présentée dans les articles (vitesse de dépôt v_d ou fraction déposée F_d généralement). Dans le cas où une fraction déposée est mesurée puis transformée en vitesse de dépôt à l'aide d'une expression, on écrit $F_d \rightarrow v_d$.

Une majorité des études évaluent le dépôt en mesurant des fractions déposées, quelques-unes mesurent directement une vitesse de dépôt.

La section des conduits étudiée est toujours circulaire, sauf pour trois études en régime turbulent. Les tubes circulaires correspondent à ceux utilisés pour les lignes de prélèvement. Pour les études sur conduit rectangulaire, il s'agit de travaux à petite échelle (diamètre hydraulique $D_h = 2; 8,9$ et 11 mm).

Tableau 1.4 – Études expérimentales portant sur le dépôt d'aérosols dans les tubes de petits diamètres en régime turbulent

Référence	Section	Orientation	Matériau	Diamètre des conduits (mm)	Re^i	Nature de l'aérosol	d_p^{ii} (μm)	Grandeur mesurée
Alexander et Coldren (1951)	Circulaire	Horizontale	Acier sans soudure	47,2	115000 à 424000	Goutte d'eau	27	v_d globale
Friedlander et Johnstone (1957)	Circulaire	Verticale	Verre et laiton	5,4 à 25	8000 à 50000	Poudre de fer et poudre d'aluminium	0,8 à 2,63	v_d globale
Wells et Chamberlain (1967)	Circulaire	Verticale	Laiton	12,7	13000 à 47000	Phosphate de tricrosyle tracé au ^{32}P , sphère de polystyrène tracée au ^{51}Cr , noyau d'Aitken tracé au ^{212}Pb	0,17 à 5	v_d globale
Sehmel (1968)	Circulaire	Verticale	Aluminium	5,3 à 71,4	2000 à 60000	Uranine et uranine-bleu de méthylène	1 à 9	v_d globale
Ilori (1971)	Circulaire	Verticale	Verre, aluminium, plastique	3	5000 à 50000	Uranine-bleu de méthylène	6 et 9	v_d globale
El-Shobokshy (1983)	Circulaire	Verticale	Verre et laiton	8	10000	Fluorescéine	1 à 6,2	$F_d \rightarrow v_d$
Liu et Agarwal (1974)	Circulaire	Verticale	Verre	12,7	10000 à 50000	Huile d'olive tracée à l'uranine	1,4 à 21	$F_d \rightarrow v_d$
Charaua (1981)	Circulaire	Horizontale et verticale	Duralinox ⁱⁱⁱ et néoprène	28	1000 à 10000	Sel d'ammonium tracé à la fluorescéine	0,02 à 10,5	$F_d \rightarrow v_d$

ⁱ Nombre de Reynoldsⁱⁱ Diamètre des particulesⁱⁱⁱ Alliage Aluminium-Magnésium 5754 X

Référence	Section	Orientation	Matériau	Diamètre des conduits (mm)	Re	Nature de l'aérosol	d_p (μm)	Grandeur mesurée
Kvasnak et al. (1993)	Rectangulaire	Horizontale	Plaque d'or plate recouverte de Krytox (5 μm)	152,5 \times 25,4 ($D_h = 11$ mm)	15000	Bille de verre	5 à 45 μm	v_d^{+i} locale
Malet et al. (2000)	Circulaire	Horizontale	Papier émeri et acier inoxydable	10	3000 à 9000	^{218}Po	0,0008 à 0,002	F_d
McFarland et al. (1997)	Circulaire	Non précisé	Non précisé	16	12000 à 30000	Acide oléique tracé à la fluorescéine sodée	10	F_d
Ghaffarpassand et al. (2012)	Circulaire	Horizontale	Acier inoxydable	4,8	4500 à 10500	Oxyde de tungstène et nitrate d'ammonium	0,0025 à 0,015	$F_d \rightarrow v_d$
Wu et Young (2012)	Rectangulaire	Horizontale et verticale	Surface recouverte de film transparent	5 \times 40 ($D_h = 8,9$)	4450	Acide oléique tracé à l'uranine	2,2 à 17,1	Flux de dépôt adimensionné ⁱ
Lin et al. (2014)	Circulaire	Horizontale	Plexiglas	8	4426 à 8500	Encens	0,05 à 0,45	F_d
Lu et al. (2015)	Circulaire	Verticale	Alloy-690	16,9	2000	Fe_3O_4	2 à 10	v_d globale

ⁱ Aucune information n'est donnée sur le calcul ou sur la mesure de la vitesse de frottement

Tableau 1.5 – Études expérimentales portant sur le dépôt d'aérosols dans les coudes de petits diamètres en régime turbulent

Référence	Section	Orientation du coude	Matériau	Diamètre des conduits (mm)		Re	Nature de l'aérosol	d_p (μm)	R_C (mm)	CR	Grandeur mesurée
Charuau (1981)	Circulaire	Horizontale et verticale	Duralinox ⁱ	28		1000 à 10000	Sel d'ammonium tracé à la fluorescéine	0,72 à 10,5	224	8	$F_d \rightarrow v_d$
McFarland et al. (1997)	Circulaire	Non précisé	Non précisé	16		12000 à 30000	Acide oléique tracé à la fluorescéine sodée	10	80	5	F_d
Ghaffarpassand et al. (2012)	Circulaire	Horizontale	Acier inoxydable	4,8		4500 à 10500	Oxyde de tungstène et nitrate d'ammonium	0,0025 à 0,015	64 à 260	13 à 54	$F_d \rightarrow v_d$
Wu et Young (2012)	Rectangulaire	Horizontale et verticale	Surface recouverte de film transparent	5×40		4450	Acide oléique tracé à l'uranine	2,2 à 17,1	153	17	Flux de dépôt adimensionné ⁱⁱ
Lu et al. (2015)	Circulaire	Verticale	Alloy-460	16,9		2000	Fe_3O_4	2 à 10	102 à 157	12 à 19	v_d globale

ⁱ Alliage Aluminium-Magnésium 5754 Xⁱⁱ Aucune information n'est donnée sur le calcul ou sur la mesure de la vitesse de frottement

Les nombres de Reynolds étudiés, même si en régime turbulent, sont inférieurs à 10^5 , sauf pour une étude.

Les aérosols sont de nature variable et les diamètres étudiés sont majoritairement supérieurs au micron. On peut constater que quelques études se sont intéressées aux coudes, mais toujours dans le cadre de la problématique du dépôt dans les lignes de prélèvement.

Toutes ces études ont permis de constater que le dépôt d'aérosols a été majoritairement étudié dans des tubes circulaires de petite taille et de manière globale. Ces travaux constituent souvent la base de validation de corrélations entre le dépôt et la géométrie des tubes, comme on le verra en Section 1.3.2 : une grande partie des travaux portant sur le dépôt d'aérosols ne fournissent pas de résultats représentatifs des configurations typiques des réseaux industriels. La section suivante permet d'observer si, dans les conduits de moyenne taille, ces manques sont palliés.

1.3.1.2 Gaines de moyenne taille — diamètre supérieur au cm

Dans cette partie, on s'intéresse aux mesures expérimentales de dépôt d'aérosols dans les tubes de moyenne taille, c'est-à-dire dont le diamètre hydraulique (D_h) est supérieur à quelques centimètres. Le Tableau 1.6 et le Tableau 1.7 listent les études expérimentales correspondantes trouvées dans la littérature, qui s'intéressent aux conduits droits et aux coudes.

On peut constater que, contrairement aux tubes de petites tailles, les sections des gaines de moyenne taille étudiées sont majoritairement carrées. Les diamètres hydrauliques sont essentiellement compris entre 10 et 25 cm. Dans la majorité des travaux, le dépôt est mesuré sur des surfaces horizontales ou alors dans tout un tronçon, grâce à des mesures de concentration en amont et en aval de celui-ci. La technique de mesure par spectroscopie de fluorescence est également régulièrement utilisée. Les diamètres de particules étudiés (d_p) sont essentiellement supermicroniques. Les types de surface étudiés sont variés (aluminium, acier, plastique, verre) et les mesures de dépôt parfois locales.

Les conditions de réalisation de ces mesures restent toutefois éloignées de celles de réseaux de ventilation industriels, avec des diamètres hydrauliques qui restent « faibles » et une seule étude (Roupsard *et al.*, 2013) focalisée sur des conduits rectangulaires dont l'objectif n'est pas la mesure de dépôt local directement en paroi de gaine.

Quelques travaux expérimentaux de mesures de dépôt d'aérosols ont été menés dans des coudes. Les gaines étudiées sont de section circulaire ou carrée. Aucune étude ne porte, à notre connaissance, sur le dépôt dans des coudes de gaines de ventilation de taille industrielle ($D_h > 40$ cm) et de section rectangulaire. Tous les travaux listés montrent des mesures de dépôt d'aérosols supermicroniques de taille variée (donc des aérosols plutôt inertiels).

Les quelques travaux recensés portant sur les coudes de moyenne taille montrent bien qu'il s'agit d'une singularité dont les effets sur le dépôt sont complexes. Pourtant, exceptées les mesures de Ben Othmane (2011) sur une zone dans un coude circulaire de 25 cm de diamètre, les mesures de dépôt dans les coudes ne sont pas locales et englobent donc toute la singularité. Cette spécificité est sûrement due à une volonté de confort ou une impossibilité d'accéder aux parois courbes du coude. Cette contrainte peut, par ailleurs, augmenter la durée des expériences, qui est déjà longue.

Tableau 1.6 – Études expérimentales portant sur le dépôt d'aérosols dans les gaines droites de moyenne taille en régime turbulent

Référence	Section / Orientation des surfaces du conduit	Orientation des surfaces étudiées	Dimension des conduits (cm)	d_p (μm)	Matériau	Technique de mesure	Type d'aérosol	Re	Grandeur mesurée
Montgomery et Corn (1970)	Circulaire / Horizontale	Pas de distinction	15,4	0,44 à 2,16	Aluminium	Mesure de concentration amont/aval et comptage optique	Fluorescéine sodée	5000 à 367000	$F_d \rightarrow v_d^+$
Ball et Mitchell (1992)	Circulaire / Horizontale	Pas de distinction	10	6,48	Acier galvanisé	Spectroscopie de fluorescence	PSL fluorescente	14500	m_d
Verloo et al. (1996)	Circulaire / Horizontale et verticale	2 cas : pas de distinction (mesure globale) / horizontale et verticale	20	1,3 à 8	Acier inoxydable	Spectrométrie d'absorption atomique	Iodure de césium (CsI) et hydroxyde de césium (CsOH)	85000 à 267000	F_d et v_d
Lai et al. (1999)	Carrée / Horizontale	Horizontale	15×15	0,7 à 7,1	Acier galvanisé / feuille d'acétate	Analyse par activation neutronique	Sphère poreuse de silice tracée au dysprosium (^{164}Dy)	44000	v_d locale
Sippola et Nazarov (2004)	Carrée / Horizontale	Horizontale et verticale	15,2×15,2	1 à 16	Acier galvanisé	Spectroscopie de fluorescence	Acide oléique tracé à la fluorescéine d'ammonium	30000 à 135000	v_d locale
Peters et Leith (2004)	Circulaire / Horizontale	Pas de distinction	20,3	5 à 150	Non précisé	Mesure de concentration amont/aval	Bille de verre	368000	F_d

Référence	Section / Orientation du conduit	Orientation des surfaces étudiées	Dimension des conduits (cm)	d_p (μm)	Matériau	Technique de mesure	Type d'aérosol	Re	Grandeur mesurée
Barth <i>et al.</i> (2013)	Carrée / Horizontale	Horizontale	10×10	2,5 à 5,8	Plexiglas	Comptage optique	DEHS sur noyau de chlorure de sodium	8900 à 66000	v_d^+
Roupsard <i>et al.</i> (2013)	Rectangulaire / Horizontale	Horizontale et verticale	28×64 ($D_h = 39$)	0,27	Verre / ciment / herbe synthétique	Spectroscopie de fluorescence	Fluorescéine	50700 à 386100	$v_d \rightarrow v_d^+$ locale
Sun <i>et al.</i> (2013)	Carrée / Horizontale	Pas de distinction de surface (mesure globale)	10×10	1 à 25	Verre acrylique / acier galvanisé	Mesure de concentration amont/aval	Particule Arizona (ISO 12103-1 A2)	17900 à 35600	$F_d \rightarrow v_d^+$
Da <i>et al.</i> (2015)	Circulaire / Horizontale	Horizontale et verticale	16	1 à 6	Acier galvanisé	Spectroscopie de fluorescence	Fluorescéine sodée	80000	$v_d \rightarrow v_d^+$ locale
Ben Othmane (2011)	Circulaire / Horizontale et verticale	Horizontale et verticale	25	1 à 6	Acier inoxydable	Spectroscopie de fluorescence	Fluorescéine sodée	100000 à 250000	$v_d \rightarrow v_d^+$ locale

Tableau 1.7 – Études expérimentales portant sur le dépôt d'aérosols dans les coudes de moyenne taille en régime turbulent

Référence	Section / Orientation du coude	Dimension des conduits (cm)		d_p (μm)	Matériau	Technique de mesure	Type d'aérosol	Re	R_C^j (mm)	Grandeur mesurée
		Orientation des surfaces étudiées	des conduits							
Verloo et al. (1996)	Circulaire / Horizontale et verticale	20	2 cas : pas de distinction (mesure globale) / horizontale et verticale	1,3 à 3,9	Acier inoxydable	Spectrométrie d'absorption atomique	Iodure de césium (CsI) et hydroxyde de césium (CsOH)	85000 à 267000	Non précisé	F_d
Sippola et Nazarov (2005)	Carrée / Horizontale et verticale	15,2 × 15,2	Pas de distinction de surface (mesure globale)	1 à 16	Acier galvanisé	Spectroscopie de fluorescence	Acide oléique tracé à la fluorescéine	30000 à 135000	229	$F_d \rightarrow v_d^+$
Peters et Leith (2004)	Circulaire / Horizontale	20,3	Pas de distinction	5 à 150	Non précisé	Mesure de concentration amont/aval	Bille de verre	368000	305	F_d
Jiang et al. (2011b)	Carrée / Horizontale	10 × 10	Pas de distinction de surface (mesure globale)	1 à 100	Verre acrylique	Non précisé	Particule Arizona (ISO 12103-1 A2)	Non précisé	150	$F_d \rightarrow v_d^+$
Sun et al. (2013)	Carrée / Horizontale	10 × 10	Pas de distinction de surface (mesure globale)	1 à 25	Verre acrylique / acier galvanisé	Mesure de concentration amont/aval	Particule Arizona (ISO 12103-1 A2)	17900 à 35600	170	$F_d \rightarrow v_d^+$
Ben Othmane (2011)	Circulaire / Verticale	25	Horizontale et verticale	1 à 6	Acier inoxydable	Spectroscopie de fluorescence	Fluorescéine sodée	100000 à 250000	Non précisé	$v_d \rightarrow v_d^+$ locale

ⁱ Rayon de courbure

Après analyse, on constate qu'un besoin de données expérimentales locales de dépôt dans les coudes de moyenne et grande taille est toujours présent, plus particulièrement dans des conduits de section rectangulaire, d'autant plus que les écoulements y sont particuliers (Section 1.4). Ces écoulements influencent fortement les paramètres aérauliques, tant au niveau des profils de vitesse que des grandeurs liées à la turbulence. Les résultats fournis par les études portant sur les gaines de moyenne taille ne sont pas forcément transposables aux gaines de taille industrielle : un biais d'échelle peut subsister tant qu'une validation sur des conduits de grande taille n'est pas menée.

La quantification du dépôt d'aérosols dans des singularités de taille industrielle demande, par ailleurs, une adaptation des protocoles de mesure, puisque les taux de dilution dans ce type de gaines sont fortement augmentés, et les taux de dépôt sont, par conséquent, eux, diminués.

1.3.2 Modélisation

1.3.2.1 Modélisation empirique - Corrélations

Les études sur les tubes de petite taille citées précédemment ont permis de développer des modèles empiriques reliant le dépôt (v_d ou l'efficacité de dépôt E) et les paramètres géométriques. Celles focalisées sur les conduits droits sont présentées dans le Tableau 1.8 et les expressions des corrélations dans le Tableau 1.9.

Ces corrélations font intervenir les paramètres suivants : D_B le coefficient de diffusion brownienne, g l'accélération de pesanteur, k la rugosité, L_C la longueur du conduit, Sc le nombre de Schmidt, Sc_B le nombre de Schmidt brownien, Sc_t le nombre de Schmidt turbulent, y la distance à la paroi, κ la constante de von Kármán et χ le facteur de forme.

Sur les conduits droits, dans le cas de petits conduits circulaires (Figure 1.12), [Friedlander et Johnstone \(1957\)](#) et [Davies \(1966\)](#) ont développé des corrélations ciblées sur les particules de petit diamètre (modélisation du dépôt par diffusion, $d_p < 1 \mu\text{m}$), alors que [Liu et Agarwal \(1974\)](#) et [Papavergos et Hedley \(1980\)](#) se sont plutôt focalisés sur les particules dont le diamètre est supérieur au micron, qui se déposent plutôt par sédimentation. La variabilité entre les corrélations est relativement importante (une demi-décade), comme le montre la Figure 1.12. Il n'existe donc pas de consensus entre les corrélations pour les applications sur des gaines de petites tailles.

Si on se place dans le cas d'une gaine de grande taille, lorsque l'on compare ces corrélations à celles développées pour des gaines de moyenne taille ([Sippola et Nazaroff, 2004](#) ; [Ben Othmane, 2011](#)), les écarts entre les corrélations sont très prononcés (Figure 1.13). Comparées aux vitesses de dépôt dans le cas d'un petit conduit, les vitesses de dépôt prédites dans les grands conduits sont plus dispersées pour des temps caractéristiques aux alentours de 0,1 et supérieurs à 1.

On remarque donc, après analyse, qu'il n'y a pas de consensus sur une corrélation à utiliser dans le cas de conduits de ventilation de taille industrielle. Les différences qui apparaissent peuvent provenir d'un biais d'échelle induit par l'utilisation de corrélations développées à petite ou moyenne échelle, la géométrie ou encore le caractère établi ou non de l'écoulement.

Des corrélations ont également été développées pour prédire le dépôt d'aérosols dans les coudes (Tableau 1.10) en régime turbulent. Ces corrélations font intervenir les notations suivantes : CR le rapport de courbure, De le nombre de Dean, St le nombre de Stokes et θ_C l'angle de courbure du

coude (angle entre les plans de la section amont et la section aval du coude).

Toutes les corrélations fournissant des efficacités de dépôt ont été développées sur des coudes de section circulaire de petites tailles et majoritairement pour des écoulements établis. La Figure 1.11 montre la variabilité entre les efficacités de dépôt prédites par les corrélations, alors même que ces corrélations sont utilisées dans leur domaine d'application. La corrélation de Ben Othmane (2011) n'est pas présentée sur la Figure 1.11 car elle fournit une vitesse de dépôt, contrairement aux autres corrélations qui fournissent une efficacité de dépôt. Il s'agit de la seule corrélation développée sur la base d'un coude de section circulaire de moyenne taille. À nouveau, une expression ne fait pas consensus pour prédire le dépôt dans un coude.

Par ailleurs, l'utilisation de la vitesse de dépôt adimensionnée fait intervenir la vitesse de frottement (u^*). La vitesse de dépôt adimensionnée dépend directement de sa valeur (rappelons que $v_d^+ = v_d/u^*$). La vitesse de frottement varie fortement en fonction de la géométrie et du matériau de la gaine, ainsi que des vitesses d'air étudiées. Dans la majorité des études citées, très peu d'informations sont données pour expliquer l'origine et la validation de la valeur donnée.

Nous avons pu constater que les écarts sont importants entre les corrélations développées sur les coudes : il y a besoin de développer des équivalents de ces corrélations pour une application à des gaines de taille industrielle.

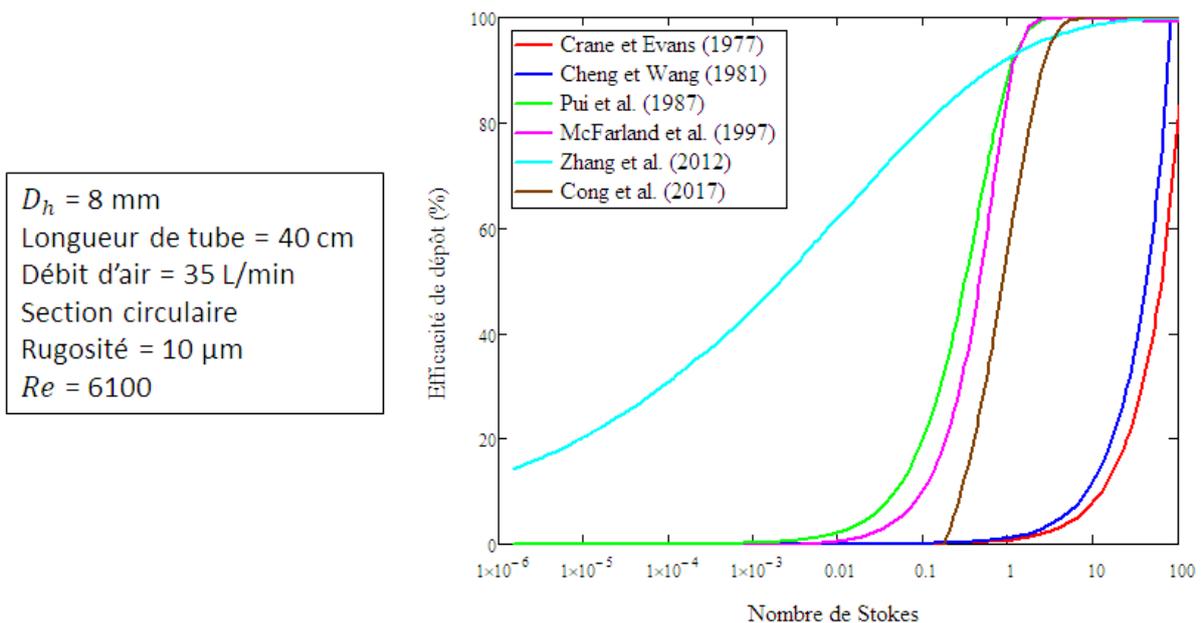


Figure 1.11 – Exemple d'application de corrélations développées pour des coudes de petite taille en régime turbulent

Tableau 1.8 – Études ayant mené au développement d'une corrélation entre le dépôt et certains paramètres en régime turbulent pour des conduits droits

Référence	Mécanisme de dépôt (pour les conduits droits)	Diamètre des conduits de validation (cm)	Re	d_p (μm)	Orientation des parois
Friedlander et Johnstone (1957)	Diffusion	0,54 à 2,50	8000 à 50000	0,8 à 2,63	Non précisé
Davies (1966)	Diffusion	-	Non précisé	$\tau_p^+ < 1$	Non précisé
Liu et Agarwal (1974)	Dépôt inertiel	7	10000 à 50000	1,4 à 21	Tube vertical
Papavergos et Hedley (1980)	Sédimentation	-	-	-	Sol et plafond
Wood (1981)	Diffusion et impaction	Wells et Chamberlain (1967); Montgomery et Corn (1970)	-	-	Non précisé
Sippola (2002)	Diffusion turbulente, inertie	15,2	30000 à 135000	1 à 16	Plafond et paroi verticale
Nerisson (2009)	Diffusion, inertie, sédimentation	Validé sur d'autres modèles	Validation sur Charuau (1981); Liu et Agarwal (1974)		Sol, plafond, paroi verticale
Ben Othmane (2011)	Diffusion, inertie, sédimentation	25	100000 à 250000	1 à 6	Sol, plafond, paroi verticale
Lin et al. (2014)	Diffusion	0,8	4426 à 8500	0,05 à 0,45	Pas de distinction

Tableau 1.9 – Expression des corrélations pour les conduits droits selon les travaux cités dans le Tableau 1.8

Référence	Corrélation ⁱ
Friedlander et Johnstone (1957)	$v_d = \frac{0,0118 \times Re^{\frac{7}{8}} \times Sc_B^{\frac{1}{3}} \times D_B}{D_h}$
Davies (1966)	$v_d = \frac{\left(\frac{D_B}{\nu}\right)^{\frac{2}{3}}}{14,5 \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \times \arctan\left(\frac{2 \times X_{Davies} - 1}{\sqrt{3}}\right) + \frac{\pi}{6 \times \sqrt{3}} + \ln\left(\frac{(X_{Davies} + 1)^2}{1 - X_{Davies} + X_{Davies}^2}\right) \times \frac{1}{6}\right]}$ <p>avec $X_{Davies} = \frac{1}{2,9 \times \left(\frac{D_B}{\nu}\right)^{\frac{1}{3}}}$</p>
Liu et Agarwal (1974)	$v_d = \begin{cases} 0,0006 \times \tau_p^{+2} & \text{si } \tau_p^+ \leq 12,9 \\ 0,1 & \text{sinon} \end{cases}$
Papavergos et Hedley (1980)	$v_d = 2 \times 10^{-3} \times \tau_p^{+2}$
Wood (1981)	$v_d^+ = \begin{cases} 0,045 \times Sc_B^{-2/3} & \text{si } \tau_p^+ < 0,1 \\ 4,5 \times 10^{-4} \times \tau_p^{+2} & \text{si } 0,1 \leq \tau_p^+ \leq 10 \end{cases}$

ⁱ Si l'orientation de la paroi n'est pas précisée, v_d est calculée pour tout le pourtour du conduit.

Référence

Corrélation

Sippola (2002)

$$v_d^+ = \begin{cases} k_1 S_{cB}^{-\frac{2}{3}} + k_4 \tau_p^{+k_5} & \text{si } k_1 S_{cB}^{-\frac{2}{3}} + k_4 \tau_p^{+k_5} \leq k_3 \\ k_3 & \text{si } k_1 S_{cB}^{-\frac{2}{3}} + k_4 \tau_p^{+k_5} > k_3 \end{cases}$$

$$\text{avec } k_1 = \sqrt{\frac{f}{2}}; k_3 = 0, 13; k_4 = \begin{cases} 1, 8 \times 10^{-4} & \text{pour le plafond} \\ 8, 1 \times 10^{-4} & \text{pour la paroi verticale} \end{cases} \text{ et } k_5 = \begin{cases} 1, 1 & \text{pour le plafond} \\ 1, 4 & \text{pour la paroi verticale} \end{cases}$$

Pour une paroi du sol ou du plafond : $v_d^+ = \frac{-(g \times \tau_p^+)^n}{1 - \exp(-(g \times \tau_p^+)^n \times I_p)}$ avec n le vecteur normal à la paroi considérée, et

$$I_p = \frac{S_{c_t}}{\kappa} \ln y^+ + \lambda (S_{cB}, \tau_p^+) \text{ où } \lambda = \left[\frac{\tau_p^{+2n}}{\omega^n} + \left(\frac{S_{cB}^{-\lambda_1}}{\lambda_0} \right)^n \right]^{-1/n} \text{ avec } \lambda_0 = 13, 7, \lambda_1 = 2/3, \omega = 1700, n = 1, y^+ = 30 \text{ et } S_{c_t} = 1$$

Pour une paroi verticale : $v_d^+ = \frac{1}{I_p}$

$$\text{Pour une paroi verticale : } v_d^+ = \frac{u^* \times S_{cB}^{-\frac{1}{3}}}{U} + 0, 015 \times \tau_p^{+1,33}$$

$$\text{Pour une paroi du plafond : } v_d^+ = \frac{u^* \times S_{cB}^{-\frac{1}{3}}}{U} + 0, 003 \times \tau_p^{+1,08}$$

$$\text{Pour une paroi du sol : } v_d^+ = \frac{u^* \times S_{cB}^{-\frac{1}{3}}}{U} + 0, 0226 \times \tau_p^{+1,33} + v_g^+ \text{ où } v_g^+ = \frac{v_g}{u^*} = \frac{1}{u^*} \times \frac{\rho_p \times d_p^2 \times g \times C_c}{18 \times \mu \times \chi}$$

Ben Othmane (2011)

$$E = 0, 63998 + 0, 01509 \times X_{Lin} - 1, 60778 \times 10^{-4} \times X_{Lin}^2$$

Lin et al. (2014)

$$\text{avec } X_{Lin} = \frac{d_p}{L_C} \times \frac{10^{12}}{Re}$$

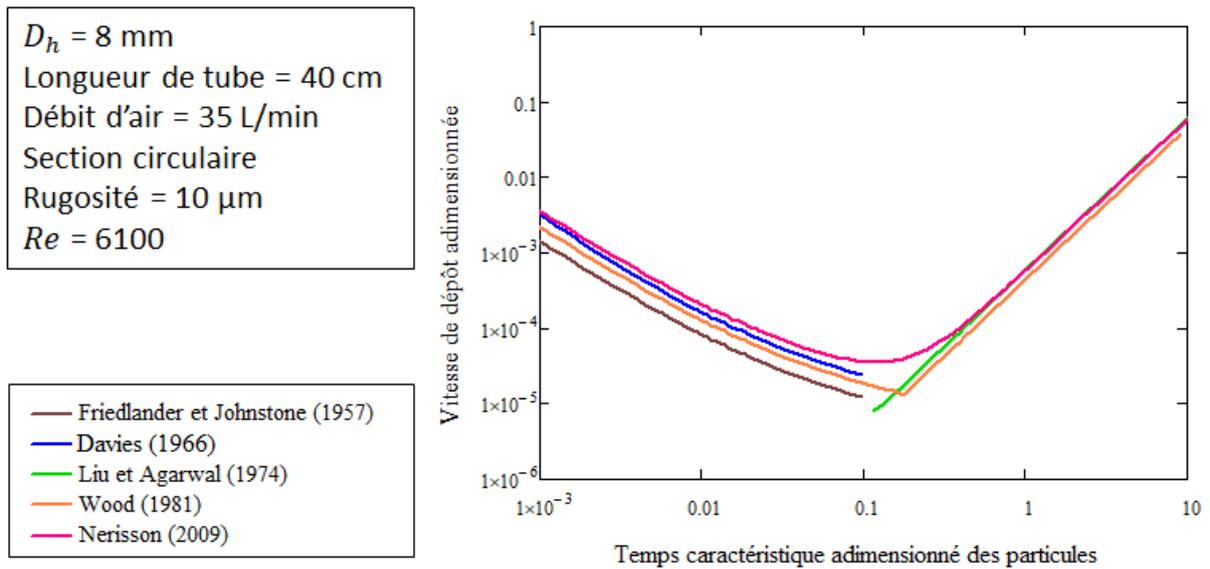


Figure 1.12 – Exemple d'application des corrélations développées pour des gaines droites de petite taille (v_d^+ globale) en régime turbulent

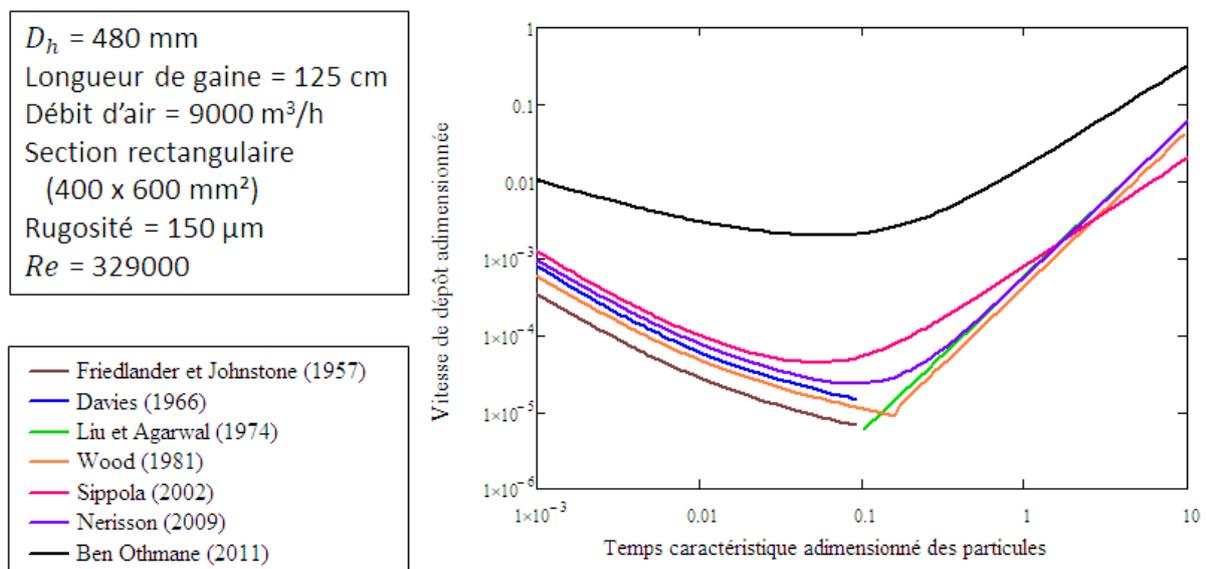


Figure 1.13 – Exemple d'application, sur une paroi verticale, des corrélations développées pour des gaines droites de moyenne taille en régime turbulent

Tableau 1.10 – Études ayant mené au développement d'une corrélation entre le dépôt et certains paramètres en régime turbulent pour des coudes

Référence	Orientation et diamètre des conduits de validation	Re	RC (cm)	Corrélation
Crane et Evans (1977)	Non précisée / Comparaison à d'autres modèles (Yeh, 1974; Cheng et Wang, 1975)	–	$4 \leq CR \leq 20$	$E = \pi \times \frac{St}{4}$
Pui et al. (1987)	Verticale / 3,95 à 8,51 mm	100 à 10000	$5 \leq CR \leq 7$	$E = 1 - 10^{-0,963St}$
McFarland et al. (1997)	Non précisée / 16 mm	12000 à 30000	8 (CR = 5)	$E = 100 - \exp\left(\frac{4,61 + A_{McF} \times \theta_C \times St}{1 + B_{McF} \times St + C_{McF} \times \theta_C \times St^2 + D_{McF} \times \theta_C^2 \times St}\right)$ <p>avec $A_{McF} = -0,9526 - 0,05686CR$; $B_{McF} = \frac{-0,297 - 0,0174CR}{1 - 0,07CR + 0,0171CR^2}$; $C_{McF} = -0,306 + \frac{1,895}{CR^{0,5}} - \frac{2}{CR}$ et $D_{McF} = \frac{0,131 - 0,0132CR + 0,000383CR^2}{1 - 0,129CR + 0,0136CR^2}$</p>
Ben Othmane (2011)	Verticale / 25	100000 à 250000	–	$v_d^+ = \frac{u^* \times S_{CB}^{-\frac{1}{3}}}{U} \times 0,02\tau_p^{+1,33}$
Zhang et al. (2012) (étude numérique)	Non précisée / Pui et al. (1987); McFarland et al. (1997)	10000 à 100000	$1,5 \leq CR \leq 20$	$E = 1 - \exp\left(-0,528 \times St^2 \bar{v}_R \times \theta_C \times CR^{0,5}\right)$
Cong et al. (2017) (étude numérique)	Verticale / 4 à 10 mm	-	0,8 à 16	$E = 1 - \exp\left(-0,993 \times St + 8,88 \times 10^{-5} \times De\right)$

1.3.2.2 Modélisation semi-empirique

Quelques modélisations semi-empiriques existent dans la littérature. Le modèle développé par Guha (1997) et le modèle empirique de Lai et Nazaroff (2000) ont servi au développement du modèle semi-théorique de Zhao et Wu (2006) pour une application en gaine de ventilation. Ben Othmane et al. (2010) ont développé leur propre modèle pour gaine de ventilation en améliorant le modèle à 3 couches proposé par Zhao et Wu (2006).

Le choix s'est porté sur la modélisation de Ben Othmane et al. (2010) car chaque modélisation citée précédemment est une amélioration de la précédente. La modélisation de Ben Othmane et al. (2010) repose sur la résolution de l'équation suivante :

$$J = - (D_B + \xi_p) \frac{dC}{dy} + (v_{ther} + i \times v_g + v_{tp}) C \quad (1.19)$$

avec $\frac{\partial J}{\partial y} = 0$. Les différents flux intervenant dans cette expression sont présentés dans le Tableau 1.11.

Tableau 1.11 – Expressions des différents flux intervenant dans la résolution du modèle de Ben Othmane et al. (2010)

Flux	Expression	Description et paramètres
Sédimentation	$C \times v_g = \tau_p \times g \times C \quad (1.20)$	Vitesse de sédimentation v_g , avec $v_g = f(d_p)$
Diffusion brownienne et diffusion turbulente	$\frac{D_B + \xi_p}{\nu} \times \frac{dC}{dy} \quad (1.21)$	Diffusivité des particules ξ_p (Équation 1.26), avec $\frac{D_B + \xi_p}{\nu} = f(d_p, u^*, Re)$
Turbophorèse	$C \times v_{tp} = -\tau_p \left(\frac{d(u'_{py})^2}{dy} \right) \times C \quad (1.22)$	Vitesse de turbophorèse v_{tp} , avec $v_{tp} = f(d_p, u', u^*, Re)$
Thermophorèse	$C \times v_{ther} = -\frac{C_c \nu H_{ther}}{T} \frac{dT}{dy} \times C \quad (1.23)$	Vitesse de thermophorèse v_{ther} , avec $v_{ther} = f(d_p, T, \Delta T, u^*)$ (T la température en gaine et ΔT l'écart entre celle-ci et la paroi)

En passant à une vitesse de dépôt adimensionnée, Ben Othmane et al. (2010) expriment la vitesse de dépôt à résoudre, adimensionnée pour tous les mécanismes, de la manière suivante :

$$v_d^+ = \frac{F(200)}{\int_{y_0^+}^{200} F(y^+) \times \left(\frac{D_B + \xi_p}{\nu} \right)^{-1} dy^+} \quad (1.24)$$

où :

$$F(200) = \exp \left(\int_{y_0^+}^{y^+} (v_{ther}^+ - i \cdot v_g^+ + v_{tp}^+) \times \left(\frac{D_B + \xi_p}{\nu} \right)^{-1} dy^+ \right) \quad (1.25)$$

Les bornes d'intégration y_0^+ et 200 correspondent respectivement à l'origine et l'épaisseur de la couche limite. L'exposant « + » signifie que les grandeurs sont adimensionnées et i vaut 1 pour la paroi du sol de la gaine et 0 pour une paroi verticale.

Les autres grandeurs intervenant dans les grandeurs précédemment citées sont :

- ξ_p la diffusivité turbulente des particules, considérée comme égale à la diffusivité turbulente de l'air ξ_a :

$$\frac{\xi_a}{\nu} = y^{+(A-y^+B)} \left[\frac{C}{Re} \right] \left(\frac{y^+}{D+y^+} \right) \times 10^{-3} \quad (1.26)$$

où A , B , C et D sont des coefficients empiriques et $A = 4$, $B = 0,08$, $C = 2,5 \times 10^7$ et $D = 400$ dans le cas d'un régime d'écoulement établi, avec ν la viscosité cinématique de l'air et y la distance à la paroi latérale (x étant la direction de l'écoulement, cf. Figure 1.3);

- u'_{py} la fluctuation de vitesse des particules dans l'axe perpendiculaire à la paroi (selon la décomposition de Reynolds : $U = u + u'$) :

$$u'_{py}{}^2 = \left(\frac{1}{1 + 0,7 \left(\frac{\tau_p}{\tau_f} \right)} \right) u'^2 \quad (1.27)$$

avec u' la fluctuation de vitesse de l'air dans l'axe perpendiculaire à la paroi et τ_f l'échelle temporelle lagrangienne de turbulence :

$$u'^2 = u^{*2} \times \left(\frac{ay^{+2}}{1 + by^{+c}} \right)^2 \quad (1.28)$$

et $\tau_f = \frac{\xi_a}{u'^2}$; a , b et c sont des coefficients empiriques et $a = 0,005$, $b = 0,002923$ et $c = 2,128$ dans le cas d'un régime d'écoulement établi;

- H_{ther} le coefficient thermophorétique :

$$H_{ther} = \left(\frac{2,34}{1 + 3,42Kn} \right) \left(\frac{\frac{k_a}{k_p} + 2,18Kn}{1 + 4,36Kn + 2\frac{k_a}{k_p}} \right) \quad (1.29)$$

avec Kn le nombre de Knudsen, k_a la conductivité thermique de l'air et k_p celle des particules;

- $\frac{dT}{dy}$ le gradient de température estimé par :

$$\frac{dT}{dy} = \frac{1}{k_a Pr} \times \frac{\rho_a C_{th} u^{*2}}{y_0^+ + \frac{Sc_t}{\kappa} \ln \left(\frac{y^+}{y_0^+} \right)} \times \Delta T \quad (1.30)$$

où C_{th} est la capacité thermique des particules, Pr le nombre de Prandtl, $Sc_t = 1$ et y_0^+ est l'origine de la couche limite : $y_0^+ = y_0 \frac{u^*}{\nu}$ et $y_0 = \frac{d_p}{2} + k - e$ où e est la rugosité « effective » et calculée suivant des expressions différentes selon le régime de turbulence, d'hydrauliquement lisse à complètement rugueux (voir Équation 8 de l'étude de Ben Othmane *et al.*, 2010).

Au vu des équations précédentes, la vitesse de dépôt dans le modèle de Ben Othmane *et al.* (2010) dépend :

- de la vitesse d'air moyenne U (de Re);
- du diamètre des particules d_p ;
- de la vitesse de frottement u^* ;
- de la rugosité k ;
- du profil de vitesse fluctuante de l'air en proche paroi u'_{ay} .

Par ailleurs, les paramètres de l'air interviennent également (ν , C_{th} , T , λ), ainsi que la géométrie des gaines (via le diamètre hydraulique).

1.4 Les écoulements

La section précédente montre l'importance des paramètres liés à l'écoulement dans la modélisation du dépôt, notamment le nombre de Reynolds, la vitesse de frottement et le profil de vitesse en proche paroi. Une caractérisation fine de l'écoulement est donc nécessaire pour analyser le dépôt. L'objectif de cette section est d'apporter des éléments de compréhension des écoulements complexes prenant place dans les conduits droits rectangulaires et les coudes, de grande dimensions et représentatifs des gaines de ventilation. Elle fournit également un état des lieux de la littérature focalisée sur les mesures expérimentales aérauliques dans ce type de conduit.

1.4.1 Dans les conduits droits

Le Tableau 1.12 liste les travaux aérauliques expérimentaux trouvés dans la littérature, qui s'intéressent aux conduits droits de section non circulaire en régime turbulent (Malet *et al.*, 2022). Ces travaux ne sont pas nombreux et se sont intéressés à des conduits dont le matériau de construction n'est pas représentatif d'une gaine de ventilation. On remarque également que les diamètres des conduits étudiés restent situés inférieurs à 300 mm avec des techniques de mesure essentiellement basées sur l'utilisation de fil chaud.

Ces travaux s'intéressent essentiellement aux écoulements secondaires de second type. En effet, dans les écoulements turbulents, le flux primaire est affecté par la présence d'écoulement secondaire lorsque les conduits n'ont pas une section circulaire. Ces écoulements secondaires sont des écoulements circulatoires dans le plan perpendiculaire au flux primaire (Figure 1.14). Leur apparition est due à l'anisotropie de la turbulence et ces écoulements secondaires représentent moins de 3% environ de la vitesse du flux primaire. Les travaux les plus anciens se sont plutôt intéressés à l'apparition de ce phénomène (longueur d'établissement), alors que les plus récents s'intéressent aux effets de paramètres géométriques sur l'écoulement, comme le rapport d'aspect par exemple.

Cette analyse montre la nécessité de conduire des mesures de grandeurs aérauliques dans des gaines de grande taille : des mesures liées à la turbulence, de vitesses longitudinale et transverse dans la gaine, mais également en proche paroi, ce caractère étant très peu abordé dans les études citées (et n'abordant que la vitesse moyenne). Ces grandeurs peuvent, comme nous l'avons vu dans la section précédente, apporter une base expérimentale dans les modèles.

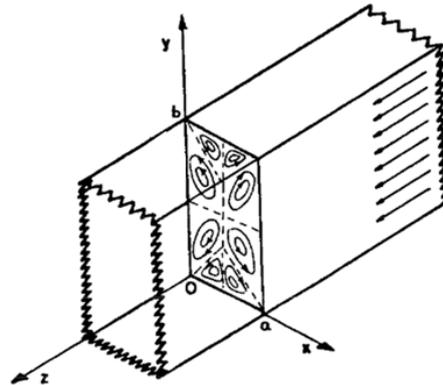


Figure 1.14 – Écoulement secondaire de second type dans un conduit droit rectangulaire en régime turbulent (Speziale, 1982)

Certains travaux expérimentaux se sont intéressés aux liens entre la vitesse de frottement et les écoulements, mais généralement en modifiant sciemment l'état de surface, en fixant des obstacles réguliers et uniformes, de taille connue sur la paroi du conduit. Ces travaux ne sont pas détaillés ici car ils ne représentent pas les états de paroi des gaines industrielles, mais l'on peut citer les travaux de [Lauder et Ying \(1972\)](#) ; [Gao et Sundén \(2004\)](#) par exemple.

1.4.2 Dans les coudes

Les écoulements dans les coudes sont complexes, en régime laminaire comme en régime turbulent. En effet, les coudes génèrent des écoulements secondaires de premier type : ces écoulements modifient le flux primaire dans les conduits courbes et sont dus à la force centrifuge et au gradient de pression entre les parois intérieures et extérieures du coude (Figure 1.15).

Le Tableau 1.13 regroupe les études aérauliques expérimentales existantes portant sur les coudes (angle entre l'amont et l'aval de 90°) de section non circulaire en régime turbulent. Les études sur les coudes de section circulaire et sur les conduits en U (« coude » à 180°) sont nombreuses mais ne font pas l'objet de notre étude et ne sont, par conséquent, pas détaillées ici. On peut toutefois citer les travaux de [Tunstall et Harvey \(1968\)](#) ; [Enayet et al. \(1982\)](#) ; [Sudo et al. \(1998, 2000\)](#) ; [Spedding et al. \(2008\)](#) ; [Li et al. \(2013\)](#).

Tableau 1.12 – Travaux expérimentaux sur l'aérodynamique dans les conduits droits de section non circulaire en régime turbulent

Référence	Section	Rapport d'aspect	Diamètre du conduit (mm)	D_h (m)	L_C/D_h	Longueur du conduit (m)	Re	Techniques et mesures	Matériau
Hoagland (1962)	Carrée	1 : 1	127	0,13	29	3,7	10000 à 100000	Fil chaud — Profils de vitesse axiale à $\neq Re$ et isovaleurs de vitesse axiale	Plexiglas
	Rectangulaire	2 : 1	127×64	0,09	406	3,7			
	Rectangulaire	3 : 1	127×42	0,06	610	3,7			
Brundrett et Baines (1964)	Carrée	1 : 1	76	0,08	281	21,3	83000	Fil chaud — Isovaleurs de vitesse axiale	Contreplaqué recouvert de plastique
Gessner et Jones (1965)	Carrée	1 : 1	203	0,20	40	8	75000 à 300000	Fil chaud (1D et 2D) — Isovaleurs de vitesse axiale à $\neq Re$	Formica collé à une plaque d'aggloméré
	Rectangulaire	2 : 1	203×102	0,14	60	8,4	50000 à 300000		
Lauder et Ying (1972)	Carrée	1 : 1	102	0,10	55	$3 \times 0,91 = 5,5$	21000	Fil chaud et Pitot — Profils de vitesse de 10 points à $\neq Re$	Plexiglas
Riffat et Lee (1990)	Rectangulaire	6 : 1	250×40	0,07	43	3	7500 à 18600	12 profils de turbulence au Pitot (longueur d'établissement)	Contreplaqué
Gao et Sundén (2004)	Rectangulaire	8 : 1	113×15	0,03	23	0,7	5800	PIV ⁱ — Profils de vitesse longitudinale et transverse	Plexiglas
Maeda et al. (2005)	Rectangulaire	2 : 1	98×50	0,07	78	5,2	65000	Fil chaud — 7 locations de mesures d'isovaleurs de vitesse axiale	Non précisé
Duda et al. (2020)	Carrée	1 : 1	125×125	0,13	3	0,4	40000 à 80000	PIV — Dans un petit coin de la gaine : champs et profils de vitesse transverse, vorticité, énergie cinétique turbulente	Plexiglas

ⁱ Particle Image Velocimetry

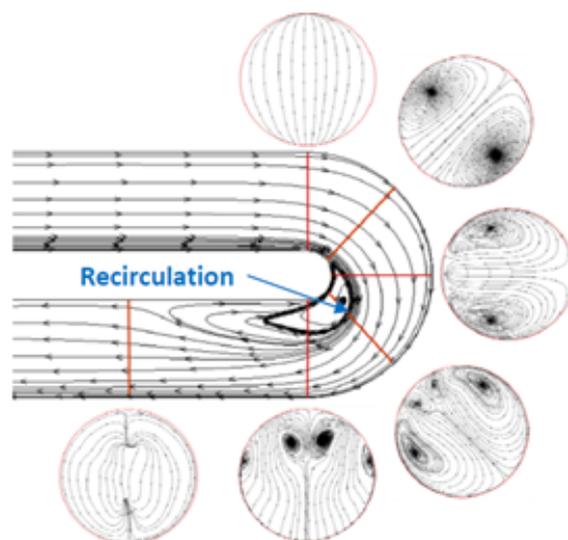


Figure 1.15 – Écoulement secondaire de premier type dans un coude circulaire en régime turbulent
(Zhang *et al.*, 2010)

Les travaux listés dans le Tableau 1.13 présentent au moins des profils de vitesse mesurés en régime turbulent. On peut constater qu'une grande majorité des études portent sur les coudes de section carrée. Les diamètres de conduits étudiés sont variables, mais toujours rarement représentatifs des gaines industrielles. Le même constat peut être fait pour les matériaux de construction des gaines étudiées (aucune gaine en acier par exemple). Deux techniques de mesure ont été utilisées, les mesures par fil chaud et par LDA. Tous les coudes étudiés dans ces travaux sont des coudes dont les rayons de courbure sont « doux », dans le sens où les coudes à angle saillant (la paroi intérieure —intrados —ou la paroi extérieure —extrados —fait un angle abrupt de 90°) ou segmentés (courbure intrados ou extrados faites de plusieurs segments) ne sont pas étudiés. Une étude expérimentale a porté sur ce type de coude, mais de section circulaire (Tunstall et Harvey, 1968).

Cette analyse montre à quel point les écoulements sont perturbés dans les coudes. Il apparaît alors délicat, au premier abord, d'utiliser la vitesse de dépôt comme grandeur caractéristique pour la quantification du dépôt d'aérosols dans les coudes : la mesure de la concentration d'aérosols dans le coude risque de ne pas être représentative en tout point du coude. La même hypothèse se pose pour la vitesse de frottement dans le cas de l'utilisation de la vitesse de dépôt adimensionnée pour des comparaisons entre études.

Il apparaît donc nécessaire d'obtenir des mesures globales sur les écoulements en amont, en aval et dans des coudes de grande taille de section rectangulaire, afin d'apporter des connaissances et des données sur ce type de gaines et améliorer en conséquence l'analyse du dépôt qui y a lieu. De plus, ces mesures fournissent une base expérimentale de validation lors de l'utilisation de codes CFD.

Tableau 1.13 – Travaux expérimentaux aérodynamiques sur les coudes de section non circulaire en régime turbulent

Référence	Section	D_h (cm)	R_C (mm)	CR	Re	Techniques et mesures	Matériau
Humphrey <i>et al.</i> (1981)	Carrée	4	92	2,3	40000	LDA — 12 profils de 25 points à 4 angles dans le coude	Plexiglas
Taylor <i>et al.</i> (1982)	Carrée	4	92	2,3 et 7	790 à 40000	LDA — Profils de 10 points de 2 composantes de vitesse, des fluctuations à 3 angles dans le coude	Plexiglas
Sudo <i>et al.</i> (2001)	Carrée	8	160	4	40000	Fil chaud — Isovaleurs des vitesses axiales et transverses à 3 angles dans le coude	Verre acrylique
Mokhtarzadeh-Dehghan et Yuan (2002)	Carrée	45,7	307	1,17	360000	Fil chaud 1D et 2D — Profils de vitesse axiale, fluctuations, à 3 angles dans le coude et le long du coude	Contreplaqué
Kuan <i>et al.</i> (2003, 2007)	Carrée	15	225	1,5	100000	LDA — Profils de vitesse axiale et transverse et d'intensité turbulente, selon 6 angles dans le coude avec comparaison numérique	Plexiglas
Gao <i>et al.</i> (2016b)	Rectangulaire	32 (rapport d'aspect de 1 : 1, 1 : 3, 3 : 1, 1 : 5 et 5 : 1)	Non précisé	—	260000 à 280000	Fil chaud — 4 profils de vitesse axiale de 5 points	Non précisé

1.5 Conclusion

Nous avons pu voir, dans un premier temps, que les techniques de mesure de dépôt d'aérosols sont nombreuses et ont tendance, de nos jours, à se diriger vers le développement de micro-capteurs. Les techniques non-intrusives ne sont pas nombreuses ou reposent sur des mesures de dépôt en nombre par des techniques optiques. Les techniques clé-en-main sont rares et reposent exclusivement sur des techniques optiques. Par ailleurs, la sensibilité des techniques existantes est très variable d'une technique à l'autre.

Dans un second temps, nous avons pu constater que les modèles développés jusqu'à présent pour prédire le dépôt conduisent à des résultats très différents, notamment en comparant les corrélations développées pour des petits conduits droits (Friedlander et Johnstone, 1957; Liu et Agarwal, 1974; Wood, 1981; Nerisson, 2009) et par Sippola (2002) et Ben Othmane (2011) pour les conduits droits de moyenne taille, mais aussi en comparant les corrélations développées pour les coudes. De plus, l'aéroulque et la présence d'écoulements secondaires sont à prendre en compte, car ils peuvent fortement influencer l'écoulement.

Par ailleurs, nous avons vu que les travaux expérimentaux sur le dépôt d'aérosols sont nombreux, mais que la majorité d'entre eux s'intéressent exclusivement aux tubes de petites tailles et aux mesures globales de dépôt. Lorsque ces travaux s'intéressent à des gaines de moyenne taille, celles-ci ont des sections carrées et circulaires. Très peu d'études expérimentales, tant au niveau de la mesure du dépôt qu'au niveau de la modélisation, sont représentatives des gaines industrielles. Ces travaux ne font pas consensus, visible en comparant les prédictions de différentes corrélations.

L'analyse de l'état de l'art souligne donc le manque de données expérimentales concernant les mesures **locales de dépôt d'aérosols** dans les gaines de ventilation, droites et coudées, de taille industrielle. Ces mesures permettraient d'identifier et caractériser les zones d'accumulation de dépôt (points chauds) dans les réseaux de ventilation, notamment dans les singularités. De plus, pour utiliser les modèles semi-empiriques et les codes de CFD, une étape de validation est nécessaire, ce qui requiert une caractérisation fine de l'aéroulque. L'état de l'art présenté dans ce chapitre montre également un déficit de données expérimentales aéroulques, en particulier pour les écoulements en proche paroi et dans les coudes.

Concernant les mesures aéroulques, quelques études expérimentales en régime turbulent ont porté sur les gaines de sections carrées et rectangulaires. Cependant, les mesures sont souvent conduites sur des gaines qui conservent des D_h petits comparés à ceux des gaines industrielles, et parfois réalisées sur des portions de sections ou de gaines. Les mesures sont généralement focalisées sur l'étude des écoulements secondaires, avec quelques mesures en proche paroi se limitant à l'étude du profil de vitesse moyenne.

Pour répondre à ces besoins au niveau aéroulque, la technique de vélocimétrie par imagerie de particules (PIV) et l'anémométrie à fil chaud sont les deux techniques de mesures de grandeurs aéroulques qui seront utilisées dans ce travail. La PIV permet d'obtenir une visualisation globale de l'écoulement grâce à la mesure de champs de vitesse horizontaux et verticaux, dans le coude mais également en aval de celui-ci. La PIV fournit également des profils de vitesse moyenne et transverse,

base expérimentale de comparaison avec les résultats obtenus par simulations avec des codes CFD. L'anémométrie à fil chaud fournit des mesures plus locales, avec une analyse plus fine de l'écoulement en proche paroi : des mesures de vitesse moyenne et de vitesse fluctuante peuvent être obtenues et, ainsi, utilisées comme données d'entrée dans les modèles semi-empiriques. La vitesse de frottement peut également être estimée.

Plus généralement, ces deux techniques de mesure vont permettre d'analyser les tendances que suit le dépôt des particules, après mesure de celui-ci. Ces techniques seront présentées dans la première partie du chapitre suivant.

Pour répondre aux besoins de mesures de dépôt, nous souhaitons mesurer localement le dépôt d'aérosols dans des coudes de géométrie différente, en mesurant les grandeurs intervenant dans la vitesse de dépôt. Il est décidé, dans ce travail, d'étudier le dépôt local d'aérosol plutôt inertiel, afin d'assurer une certaine quantité de dépôt, puisque les taux de dilution dans une gaine de taille industriel sont très élevés. Les vitesses d'air étudiées doivent être représentatives de celles retrouvées dans les réseaux (vitesses élevées). La technique de mesure de dépôt d'aérosols devra donc avoir une limite de détection suffisamment faible pour permettre de mesurer des petites quantités de dépôt pour des temps d'expérience raisonnable. Ce volet sera présenté dans la deuxième partie du chapitre suivant.

Au vu de l'analyse de l'état de l'art concernant la taille des gaines, mesurer localement le dépôt d'aérosols dans des gaines de ventilation droites et coudées de taille industrielle implique le développement d'un protocole expérimental de mesure. Ce type de gaine n'ayant pas été étudié jusqu'à présent pour la quantification du dépôt, aucun protocole de mesure clé-en-main n'est ressorti de l'analyse. Le développement du protocole sera détaillé dans le Chapitre 3.

Matériels et méthodes

Sommaire

2.1	Installation DIESE	51
2.2	Aéraulique	54
2.2.1	Particle Image Velocimetry (PIV)	54
2.2.1.1	Instrumentation	54
2.2.1.2	Protocole	57
2.2.1.3	Optimisation du protocole	58
2.2.2	Anémométrie à fil chaud	64
2.2.2.1	Instrumentation	64
2.2.2.2	Protocole	65
2.3	Aérosol	67
2.3.1	Choix de la technique de mesure de dépôt surfacique	67
2.3.2	Type d'aérosol et génération	68
2.3.3	Caractérisation du LIXEA	70
2.3.3.1	Optimisation de la fréquence	71
2.3.3.2	Puissance	71
2.3.3.3	Débits de dispersion et de séchage	71
2.3.4	Distribution de taille des aérosols générés	72
2.3.5	Système d'injection des aérosols en gaine	74
2.3.6	Concentration volumique en gaine C_{bulk}	76

2.1 Installation DIESE

L'installation sur laquelle sont réalisées les expériences de ce travail est un réseau de ventilation comparable aux réseaux industriels, installé à l'IRSN à Saclay (Malet et Hare, 2018; Malet *et al.*, 2022). Cette installation, nommée DIESE, est présentée schématiquement sur la Figure 2.1.

Il s'agit d'une boucle aéraulique comprenant une longueur de gaine totale d'environ 60 m en circuit ouvert. Les gaines, en acier galvanisé, sont rectangulaires et mesurent 400 mm de haut pour 600 mm de large, soit un diamètre hydraulique D_h de 48 cm. DIESE fonctionne en aspiration. Une Centrale de Traitement d'Air (CTA) est installée en amont de l'installation (Repère 1 sur la Figure 2.1). L'air est filtré (niveau de filtration H13 : 99,95%) et peut être chauffé grâce à une batterie chaude électrique de 90 kW. L'air passe ensuite par une longueur droite de $10D_h$, un coude horizontal, une seconde longueur droite de $30D_h$ et passe par un coude vertical (Repère 2) pour atteindre la plateforme en U, qui comprend

les gaines du début de la plateforme du haut jusqu'au premier coude vertical. En aval du U et de deux coudes verticaux, une jonction en T raccorde un bras optionnel de dilution (Repère 3), qui peut être clos grâce à un registre. À la suite de la jonction, de trois coudes et après une longueur droite de $20D_h$, l'air passe par une réduction (400×600 mm² à 200×300 mm², Repère 4) et atteint l'extraction au niveau des ventilateurs (Repère 5).

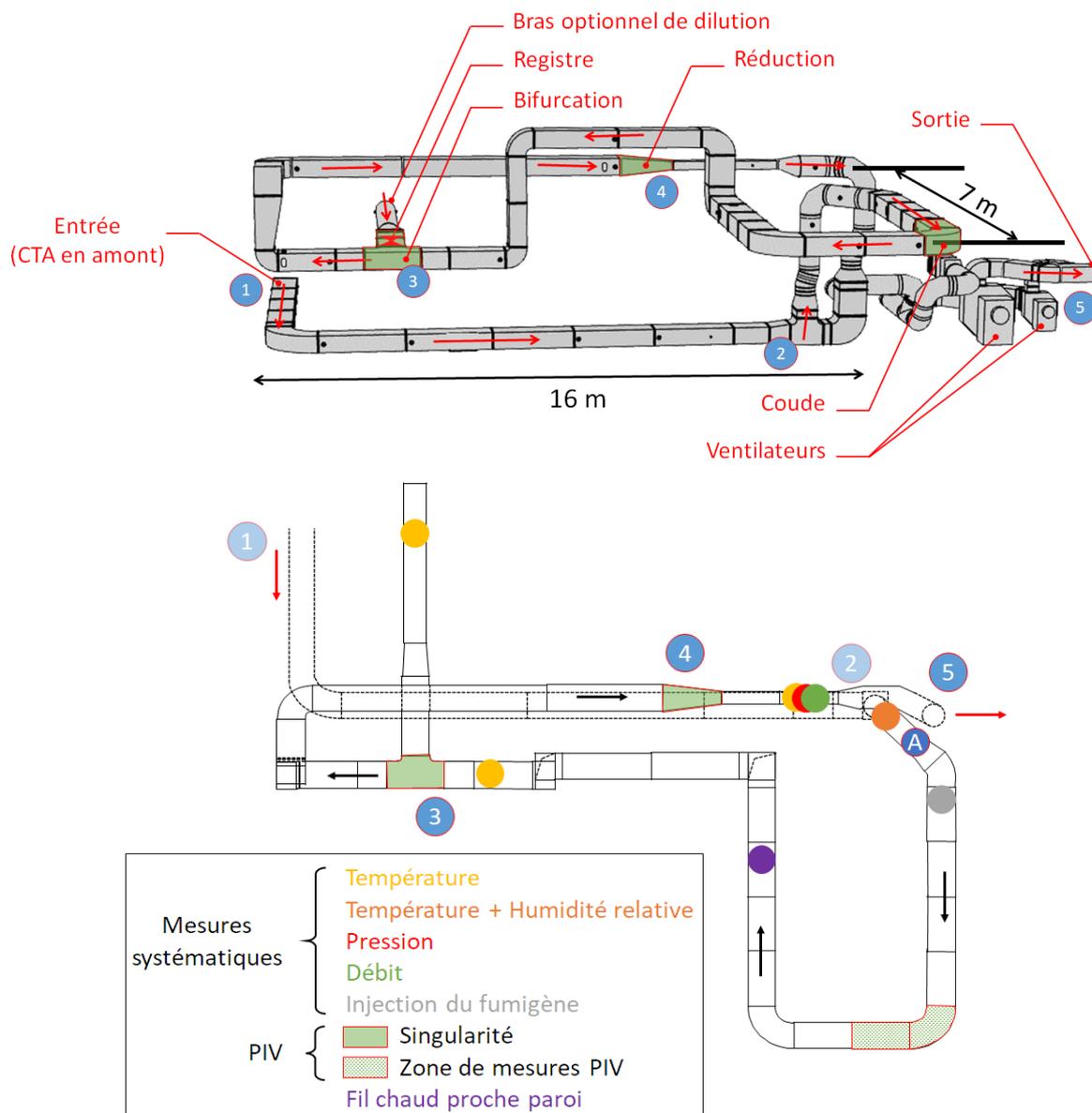
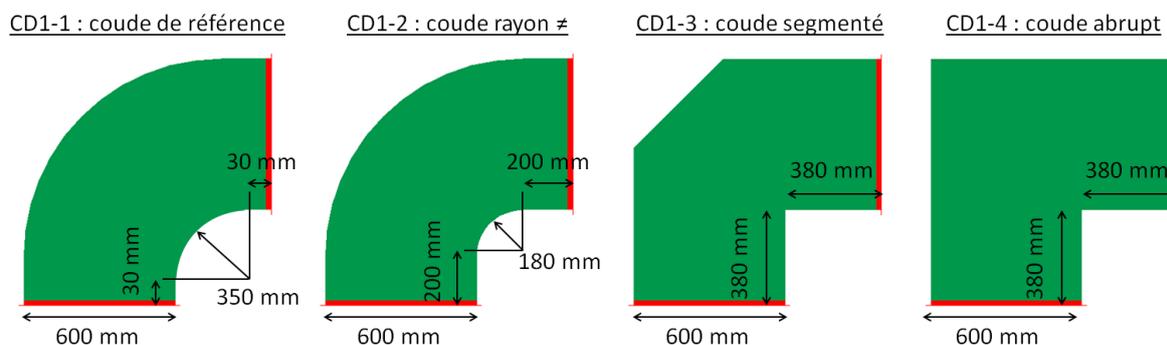


Figure 2.1 – Schéma de présentation de l'installation DIESE – En haut : vue de face ; en bas : vue de dessus

L'installation est modulaire : DIESE est majoritairement composée de nombreux tronçons interchangeables, les tronçons droits mesurant 1250 mm de long. Chaque singularité (par exemple : coude, jonction, équipements) peut être échangée par une singularité de même type, mais dont les

caractéristiques géométriques sont différentes. Trois zones sont destinées à l'étude de singularités (en vert sur la Figure 2.1).

Dans ce travail, la zone « coude » est plus spécifiquement étudiée. Différents coudes peuvent être installés ; leurs caractéristiques géométriques sont présentés sur la Figure 2.2.



L'accès à l'intérieur de la gaine se fait par des trappes, type d'accès commun des réseaux industriels, et des piquages rivetés (Figure 2.3).

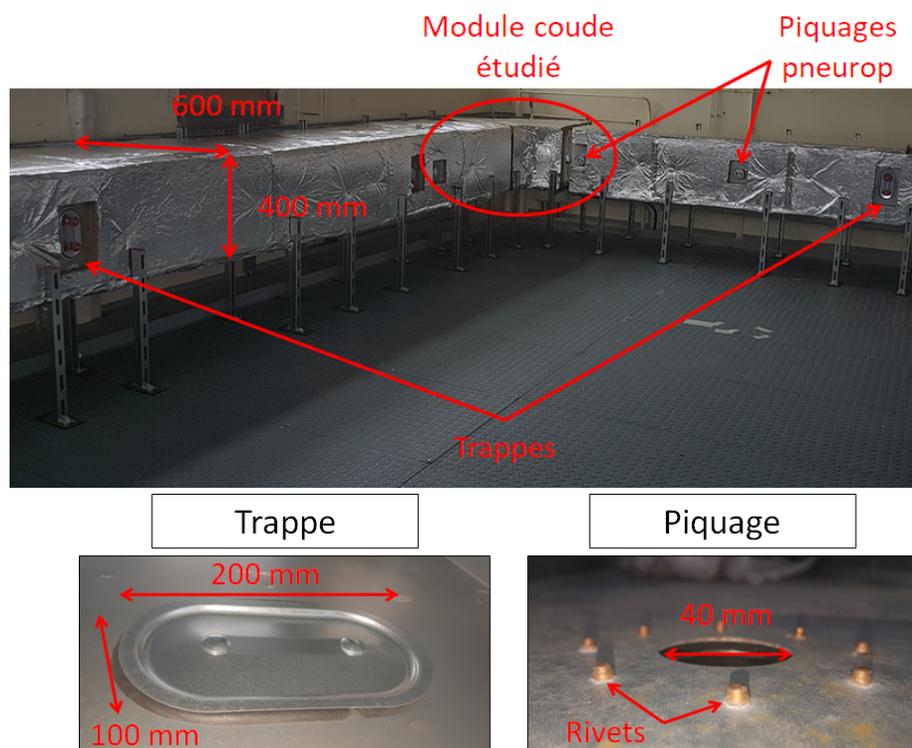


Figure 2.3 - Photographie et dimensions d'une gaine de DIESE (en haut) et des accès à la gaine (en bas)

Le débit de l'installation est variable grâce à la présence de deux ventilateurs. Les débits jusqu'à 5000 m³/h sont assurés par un premier « petit » ventilateur, les débits supérieurs à 5000 m³/h jusqu'à 10000 m³/h sont assurés par le second ventilateur. Quatre débits d'étude sont utilisés comme références sur DIESE (Tableau 2.1).

Le pilotage de l'installation se fait via l'utilisation du logiciel PANORAMA.

Des mesures systématiques de pression, de débit, de température et d'humidité relative sont réalisées à des endroits spécifiques de DIESE (Figure 2.1). Les mesures sont acquises à une fréquence de 1 Hz. DIESE est également équipée pour des mesures par spectrométrie hélium et par fil chaud (Hare *et al.*, 2019). Les mesures de profil de vitesse par fil chaud industriel (1 Hz, CTV210, KIMO) sont effectuées grâce à des rails de déplacement automatiques.

Tableau 2.1 – Débits de référence sur DIESE

Notation	Débit de consigne (Nm ³ /h)	Vitesse d'air (m/s)	<i>Re</i>
Q1	5050	5,8	~ 280 000
Q2	7850	9,1	~ 436 000
Q3	9272	10,7	~ 515 000
Q4	3100	3,6	~ 200 000

2.2 Aéraulique

2.2.1 Particle Image Velocimetry (PIV)

La vélocimétrie par image de particules (Particle Image Velocimetry — PIV) est une technique optique de visualisation des écoulements pour l'étude des vitesses (Grant, 1997).

L'écoulement estensemencé avec des particules qui, suffisamment fines, suivent fidèlement l'écoulement. Les particules sont éclairées à l'aide d'un laser et observées avec une caméra. Une paire de photo est prise par la caméra, les deux photos espacées d'un intervalle de temps dt (temps inter-trame, en μ s généralement) à spécifier. La valeur de dt est choisie afin que les particules se déplacent d'une dizaine de pixels entre les deux photos. Un nombre suffisant de paires d'image est enregistré pour effectuer un traitement statistique sur ces paires : une corrélation entre les deux photos est établie (« cross-correlation ») sur la base du déplacement des particules. Ce traitement du déplacement des particules permet de remonter à une vitesse.

Le laser éclairant l'écoulement sous forme de nappe, la PIV fournit des champs de vitesse.

2.2.1.1 Instrumentation

Le dispositif de PIV a été installé de manière à obtenir des mesures dans le premier coude de la plateforme en U et dans le tronçon droit en aval de ce coude (cf. Figure 2.1). Les deux tronçons concernés sont des tronçons transparents équivalents aux tronçons en acier galvanisé (Figure 2.4). Ces tronçons sont en Poly(méthyl méthacrylate) (PMMA) transparents de 10 mm d'épaisseur. Ils ont été assemblés par collage intégral. Le coude transparent a un rayon de courbure interne de 360 mm, soit 10 mm de différence avec son équivalent en acier galvanisé, différence due à des contraintes techniques. Les

deux tronçons transparents ont les mêmes dimensions de section intérieure que les tronçons en acier galvanisé ($400 \times 600 \text{ mm}^2$).

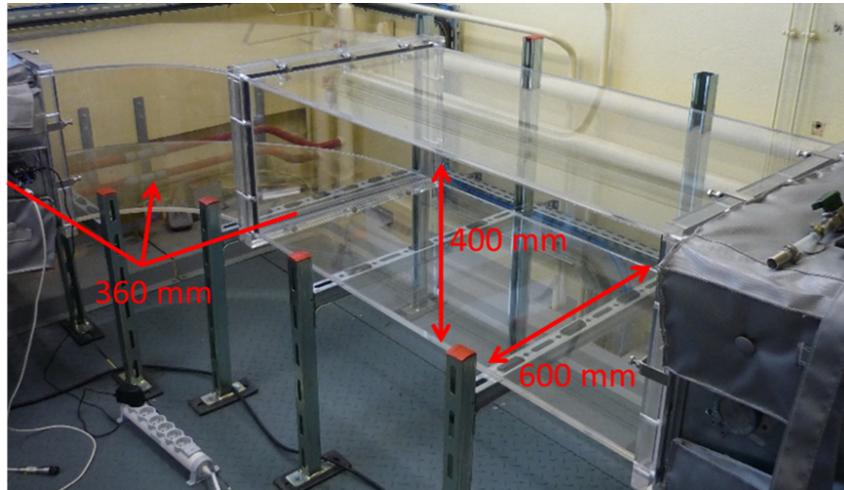


Figure 2.4 – Photographie et dimensions du coude et du tronçon droit transparents

L'objectif est d'obtenir des champs de vitesse horizontaux et verticaux pour comparaison avec des simulations CFD. Pour ce faire, une structure en profilés aluminium a été installée pour fixer la caméra, le laser et les rideaux de protection (Figure 2.5 en haut pour les champs horizontaux et en bas pour les verticaux). Les champs dans le coude sont réalisés de la même façon, avec le laser positionné de sorte que la nappe soit située au niveau de la zone de mesure voulue. Les structures soutenant le laser et la caméra sont sur roues, afin de pouvoir les déplacer facilement. La caméra peut être translatée selon l'axe vertical de manière motorisée, permettant d'ajuster plus facilement et plus finement la mise au point. Elle peut également être déplacée selon l'axe horizontal, manuellement.

Le laser utilisé est un LPU 550 (Litron Lasers). Il s'agit d'un laser Nd :YAG, dont la longueur d'onde des émissions est de 532 nm et la puissance maximale de 800 mJ. La fréquence d'acquisition est de 25 Hz. Une nappe est générée par le laser et l'épaisseur et l'orientation de la nappe se règlent en utilisant le système optique rotatif qui se trouve à l'extrémité de la tête laser. La visualisation se fait avec une caméra CCD Imager SX 6M (LaVision) dont les caractéristiques sont :

- temps inter-trame minimum de 140 ns ;
- résolution de 2752×2200 pixels ;
- taille du pixel de $4,54 \times 4,54 \mu\text{m}$;
- fréquence d'acquisition maximale de 25 trames/s à pleine résolution.

L'objectif monté sur la caméra est un AF Nikkor 24 mm f/2.8D (Nikon). Pour l'obtention des champs sur le coude, un filtre (LaVision) est vissé sur l'objectif. Il s'agit d'un filtre passe-bande, conçu pour ne laisser passer que la lumière dont la longueur d'onde est celle du laser, soit 532 nm, avec une largeur de bande de 10 nm, minimisant ainsi la problématique liée aux reflets (le montage PIV se trouvant dans un hall vitré).

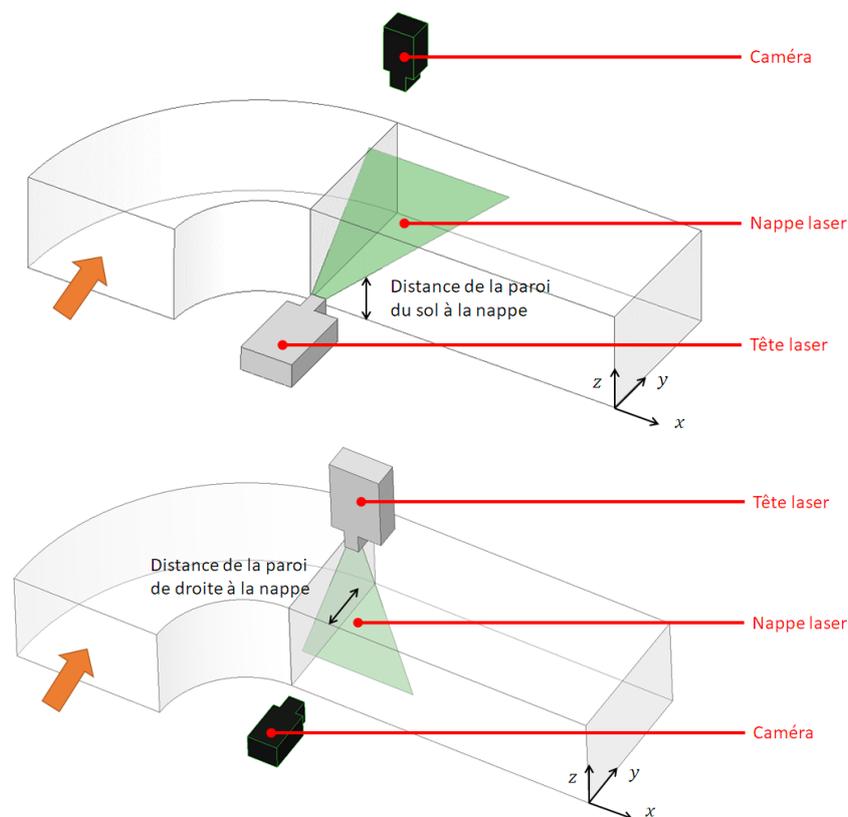


Figure 2.5 – Schéma et photographie du montage pour la PIV en champ horizontal (en haut) et en champ vertical (en bas)

Les mires sont « faites maison », combinant des pièces 3D, des supports de hauteur réglable et une règle ou du papier millimétré (Figure 2.6, à gauche). La mire ne peut pas être positionnée à la main dans la zone de mesure et a dû être adaptée aux contraintes de DIESE, c'est-à-dire une mire :

- compacte pour un accès par les trappes ;
- suffisamment légère pour être déplacée facilement jusqu'à la zone de mesure ;
- suffisamment stable et solide pour ne pas tomber lors de la translation.

Le pilotage de la caméra et du laser se fait via une carte de synchronisation (PTU X, LaVision). Pour l'acquisition des images et pour le post-traitement, le logiciel DaVis est utilisé (v. 10.2).

Des tests ont été réalisés avec différents générateurs de fumée (combinés ou non) positionnés plus ou moins en amont des zones de mesure pour obtenir la meilleure homogénéité d'ensemencement dans les zones de mesure. Le meilleur compromis a été obtenu en utilisant le générateur Smotec 1500 (CONTEST), générateur de grande capacité, avec une injection pariétale dans la gaine : l'injection de fumigène se fait par un piquage de 40 mm de diamètre en paroi de gaine, environ $10D_h$ en amont du coude (Repère gris, Figure 2.1).

Cette configuration permet de générer des bouffées de fumigène de manière intense sur des durées suffisantes pour nos acquisitions. L'ensemencement se fait par bouffée (exemple d'image sur la Figure A.1

page 183), et a été validée pour des visualisations de grands champs (Fouchier *et al.*, 2018). Les particules ne sont pas forcément réparties sur tout le champ, mais le nombre d'images enregistré est suffisant pour que le traitement statistique donne des résultats sur la totalité du champ. La « quantité » de brouillard générée peut être modifiée dans les options du générateur, ce qui est utile pour adapter l'ensemencement lorsque la vitesse de l'écoulement est modifiée.

2.2.1.2 Protocole

La hauteur de la caméra est tout d'abord réglée en fonction de la taille du champ voulue (taille de champ moyenne : $500 \times 600 \text{ mm}^2$). Dans un second temps, on réalise la mise au point de l'image du champ à visualiser, en utilisant une mire de calibration. La hauteur de la mire est réglée avant sa mise en gaine par une trappe, dans l'installation à l'arrêt. Sa position est ensuite ajustée pour coïncider avec l'emplacement du champ à mesurer. La mire est visualisée avec la caméra pour la mise au point.

La calibration consiste en :

- l'ouverture progressive du diaphragme (f22 à f10 ou f8) et mise au point pour améliorer la netteté de l'image et éviter une saturation des capteurs de la caméra ;
- la calibration des images sur le logiciel grâce à l'image de la mire obtenue (facteur d'échelle, environ égal à 4 pixel/mm) ;
- le réglage de l'épaisseur et de l'orientation de la nappe (cf. Figure 2.6, à droite) ;
- la diminution du nombre de réflexion, grâce au calfeutrage de la zone d'essai avec des rideaux et par l'utilisation, par exemple d'adhésif noir, sur les points d'intensité lumineuse maximale.

Les vibrations dues au fonctionnement de l'installation nécessitent également une attention particulière : elles sont minimisées à l'aide d'isolants. Sans que l'on ait observé d'effets dans ce travail, ces vibrations peuvent potentiellement provoquer un décalage entre le champ observé et la zone de netteté (champ mis au point lors de la calibration). L'apparition de ce décalage dépend également de l'ouverture du diaphragme utilisé, puisque celle-ci influence la profondeur de champ. En ce sens, une amélioration possible de notre montage serait de solidariser la structure de maintien du laser et la structure supportant la caméra.

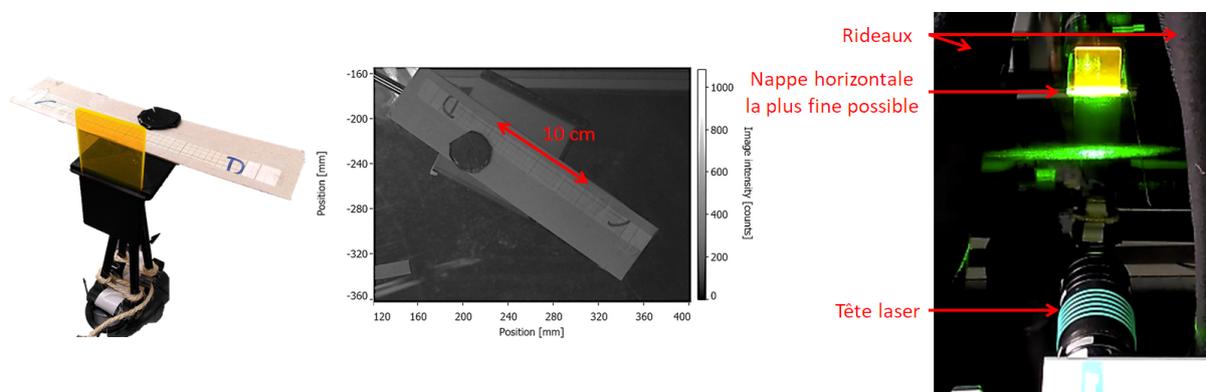


Figure 2.6 – De gauche à droite, photographie d'une mire, de son image de calibration et d'un réglage de nappe en gaine

La deuxième partie du protocole consiste en la mise en route de l'installation, de l'ensemencement et l'acquisition des images.

2.2.1.3 Optimisation du protocole

Des premiers tests expérimentaux et de post-traitement sont réalisés afin d'optimiser :

- la valeur d'atténuation à utiliser lors des prises de vue : l'atténuation joue sur la puissance délivrée par le laser ;
- le nombre d'images à acquérir : le nombre de doublons d'images à enregistrer pour réaliser le post-traitement ;
- le processus de post-traitement : différents paramètres peuvent être ajustés pour obtenir le meilleur taux de corrélation TC ¹.

L'intervalle de temps dt entre les deux tirs laser est également un paramètre majeur dans l'acquisition de données. Il est lié à la vitesse d'air dans la conduite : plus la vitesse est élevée, plus dt est faible, afin que les particules ne se déplacent pas « trop » entre la première image et la seconde image. En général, le déplacement doit être de l'ordre de 10 pixels. Il s'agit donc d'un réglage à effectuer pour chaque configuration. Pour chaque configuration, on conserve 1 à 3 acquisitions dont le dt est différent pour mesurer la variabilité.

Atténuation

La valeur d'atténuation (Att) peut varier entre 1 et 10. Lorsque la valeur d'atténuation se rapproche de 10, la puissance délivrée par le laser augmente. La puissance délivrée par le laser est donc maximale lorsque $Att = 10$ et minimale lorsque $Att = 0$. Pour optimiser cette valeur, on compare les profils mesurés au centre des champs horizontaux obtenus à 75% de la hauteur de la gaine, à $0,47D_h$ en aval du coude, au débit Q3 (9272 Nm³/h de consigne). Les profils de vitesses longitudinale et transverse pour les différentes atténuations sont présentés sur la Figure 2.7. Le 0 de l'axe des abscisses correspond à la paroi intrados de la gaine (paroi de droite dans le sens de l'écoulement).

Les écarts entre les différentes atténuations testées ne sont pas significatifs. La valeur de l'atténuation est choisie lors de l'acquisition en fonction du rendu de l'image et pour éviter la saturation des pixels due à l'intensité lumineuse trop forte.

Nombre d'images

Des acquisitions sont réalisées dans la même configuration en enregistrant des nombres différents d'images. Ce test permet d'effectuer un test de sensibilité sur le nombre d'images : on augmente le nombre d'images à chaque acquisition pour déterminer le nombre d'images à partir duquel celui-ci n'a plus d'influence significative sur le profil. Optimiser le nombre d'images à acquérir permet à la fois de gagner du temps lors de l'acquisition, et de gagner du temps et du volume de stockage lors de l'étape de post-traitement.

1. Valeur comprise entre 0 et 1 indiquant le taux de réussite de la corrélation entre les deux images d'un doublon. Plus TC est proche de 1, plus la corrélation est réussie.

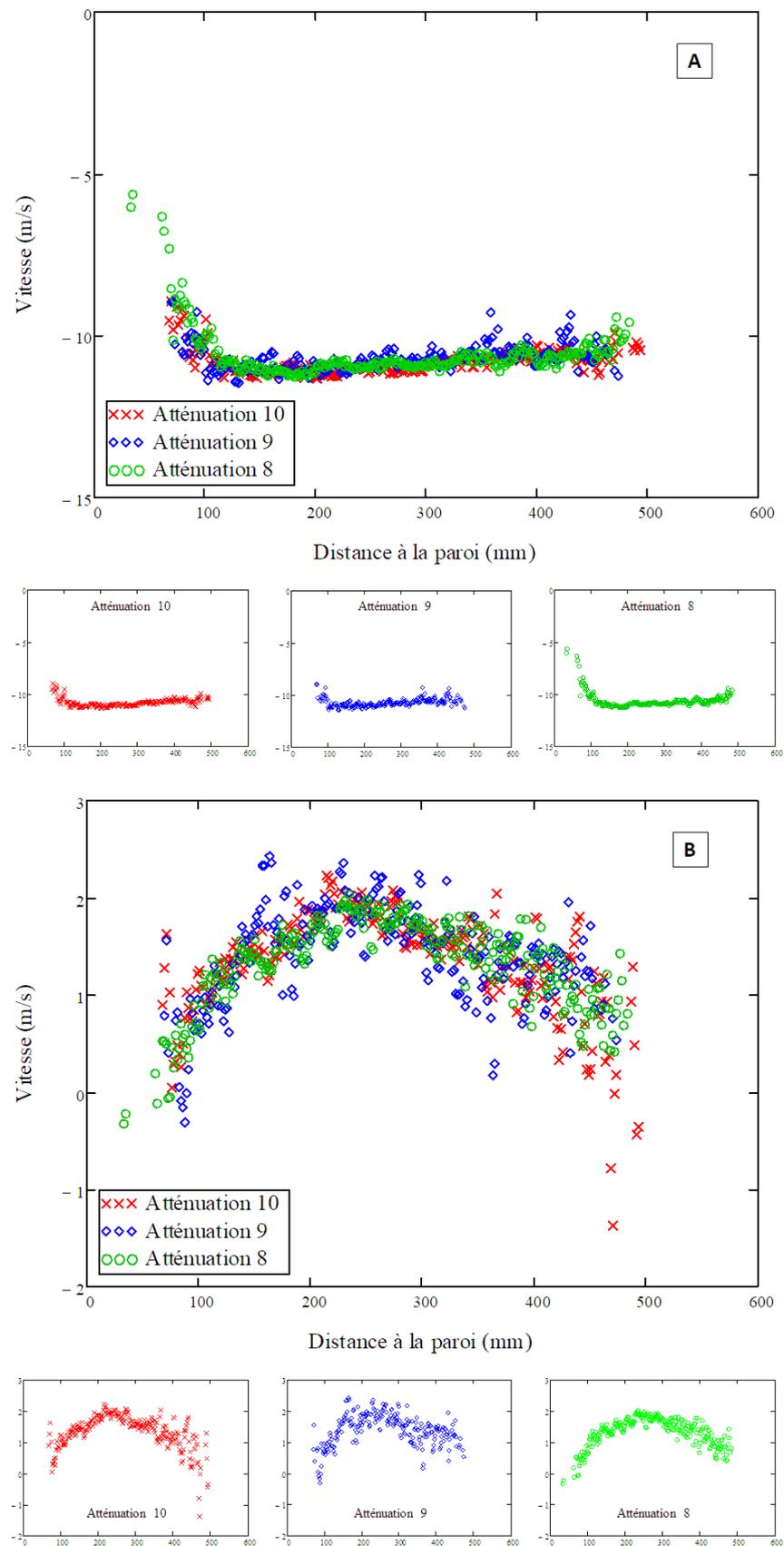


Figure 2.7 – Profils de vitesse (A) longitudinale et (B) transverse obtenus par PIV pour différentes valeurs d'atténuation — Champ horizontal à 75% de la hauteur de gaine à $0,47D_h$ en aval du coude, au débit Q_3

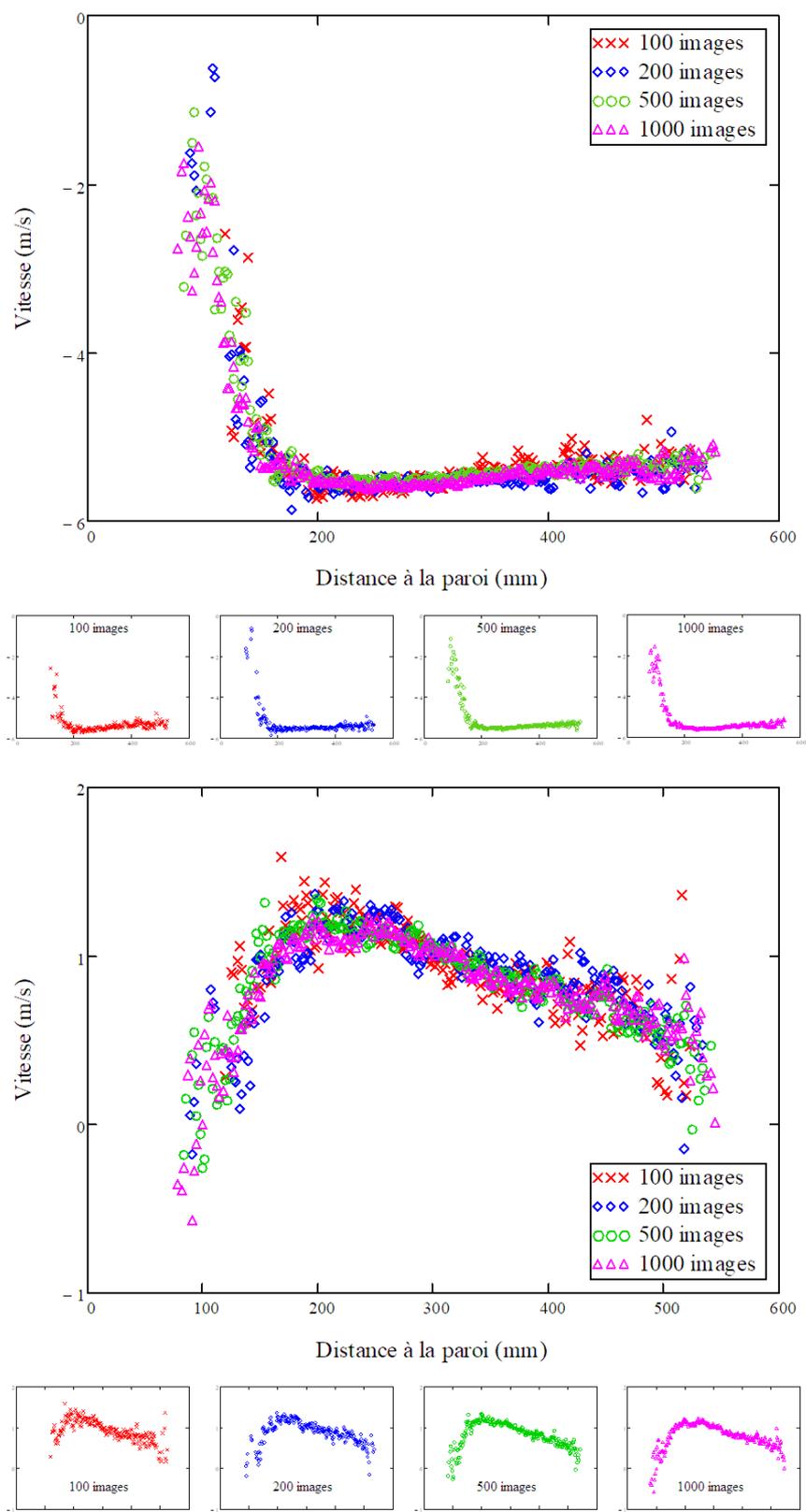


Figure 2.8 – Profils de vitesse longitudinale (en haut) et transverse (en bas) obtenus par PIV pour différents nombres d’images — Champ horizontal à 50% de la hauteur de gaine à $0,47D_h$ en aval du coude, au débit Q_1

Les acquisitions sont réalisées pour 100, 200, 500 et 1000 images. Le champ observé est horizontal, situé à $0,47D_h$ en aval du coude, à 50% de la hauteur au débit Q_1 ($5050 \text{ Nm}^3/\text{h}$ de consigne).

Les profils de vitesse longitudinale et transverse sur la largeur du tronçon (600 mm) obtenus pour les différents nombres d'images sont présentées sur la Figure 2.8 respectivement. L'acquisition de 1000 images au lieu de 500 n'apporte pas d'amélioration significative. Entre 200 et 500 images, des légères différences apparaissent : l'étalement des points se réduit sur le palier de vitesse maximum. Entre 100 et 200 images, l'étalement des points se réduit et le profil devient plus précis et plus complet, surtout près de la paroi intrados. Il est donc décidé de réaliser des acquisitions de 400 images pour limiter le temps de post-traitement, car les résultats à 200 et 500 images ne sont que légèrement différents.

Choix du processus de post-traitement

Tout d'abord, il est décidé de post-traiter les paires d'images, en utilisant :

1. un filtre de soustraction du minimum du signal local (« subtract time filter ») : filtre qui déduit le minimum d'intensité lumineuse sur une plage d'un certain nombre d'images (5, 7 ou 11 généralement, choisi par l'utilisateur) et influence par conséquent les niveaux d'intensité lumineuse de toute l'image. Le nombre d'images utilisé n'a pas présenté de différence significative selon qu'on utilise 5, 7 ou 11 images. Le nombre d'images est fixé à 7 (exemple d'image brute et d'image filtrée sur la Figure A.1 page 183 ;
2. un traitement PIV :
 - a. une passe initiale (« initial pass ») : une fenêtre de taille spécifique est interrogée, avec un taux de recouvrement² spécifique également, étape permettant de traiter grossièrement le déplacement des particules ;
 - b. des passes finales (« final passes »), dont le principe est le même que la passe initiale, mais dont la taille de fenêtre interrogée est plus petite pour traiter plus finement le déplacement des particules ;
3. un post-traitement, qui permet de trier les vecteurs à conserver selon certaines conditions, comme la suppression de vecteurs dont le taux de corrélation est trop faible par exemple. Un exemple de champ post-traité est présenté Figure A.3 page 184 ;
4. un traitement statistique sur les vecteurs, pour obtenir les champs de vitesse moyenne par exemple.

Différentes caractéristiques de traitement PIV sont essayées pour obtenir les meilleurs taux de corrélation (Tableau 2.2). On fait notamment varier la taille de la fenêtre d'interrogation de la passe initiale (64×64 pixels contre 48×48 pixels) et le taux de recouvrement lors des passes finales (50% contre 75%).

2. Le taux de recouvrement exprime, en pourcentage, de combien la fenêtre interrogée sur la première image de la paire se superpose à celle sur la seconde image. Un exemple de champ de valeurs de taux de corrélation est présenté sur la Figure A.2 page 184.

Tableau 2.2 – Caractéristiques des différents traitements PIV testés

	Première passe		Passes finales	
Test 1	Fenêtre	Carrée (1 : 1)	Fenêtre	Circulaire (1 : 1)
	Taille de la fenêtre	64×64 pixels	Taille de la fenêtre	16×16 pixels
	Recouvrement	0%	Recouvrement	50%
			Nombre de passes	4
Test 2	Fenêtre	Carrée (1 : 1)	Fenêtre	Circulaire (1 : 1)
	Taille de la fenêtre	48×48 pixels	Taille de la fenêtre	16×16 pixels
	Recouvrement	0%	Recouvrement	50%
			Nombre de passes	4
Test 1b	Fenêtre	Carrée (1 : 1)	Fenêtre	Circulaire (1 : 1)
	Taille de la fenêtre	64×64 pixels	Taille de la fenêtre	16×16 pixels
	Recouvrement	0%	Recouvrement	75%
			Nombre de passes	4
Test 2b	Fenêtre	Carrée (1 : 1)	Fenêtre	Circulaire (1 : 1)
	Taille de la fenêtre	48×48 pixels	Taille de la fenêtre	16×16 pixels
	Recouvrement	0%	Recouvrement	75%
			Nombre de passes	4

Les tests sont réalisés sur un champ vertical à 50% de la largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude, au débit Q3. Le dt est égal à 80 μ s. La visualisation des taux de corrélation image par image dans le logiciel ne permet pas de différencier la validité des tests. On analyse donc les résultats des quatre tests en vitesse longitudinale (Figure 2.9 en haut) et en vitesse transverse (Figure 2.9 en bas). On constate que les tests 1b et 2b fournissent des résultats incohérents. Le choix de 75% de recouvrement lors de la passe finale ne correspond donc pas à nos attentes. En revanche, il n'y a pas de différence entre les tests 1 et 2. La taille de la fenêtre d'interrogation pour la passe initiale de 64×64 ou 48×48 pixels ne semble pas influencer significativement le résultat. Les 50% de recouvrement pour les passes finales sont satisfaisants pour notre application. Le test 1 est retenu pour l'étape de post-traitement des mesures PIV.

Pour l'étape de post-traitement, on choisit de supprimer les vecteurs dont le taux de corrélation est inférieur à 0,9. Un exemple de champ de taux de corrélation est présenté en Annexe A.2 page A.2. Cette valeur de 0,9 est une contrainte forte puisque le taux de corrélation est compris entre 0 et 1. Appliquer ce critère permet de ne sélectionner que les meilleures corrélations avant d'appliquer le traitement statistique. Dans certains cas, ce critère n'a pas pu être atteint. La valeur du critère est indiquée pour chaque profil brut présenté (cf. Annexe A).

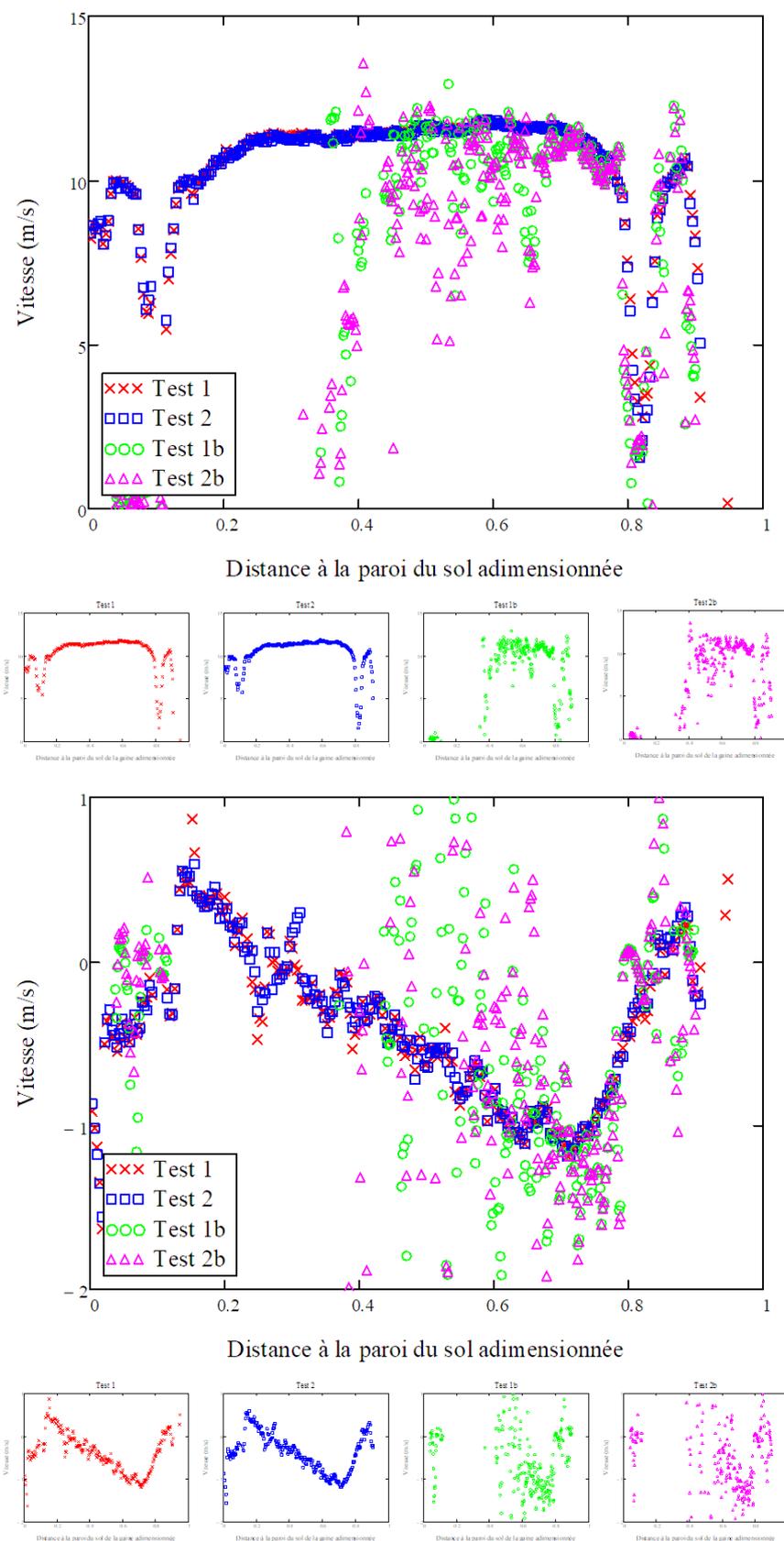


Figure 2.9 – Profils de vitesse longitudinale (en haut) et transverse (en bas) obtenus pour les quatre tests de post-traitement — Champ vertical à 50% de la largeur de gaine à $0,47D_h$ en aval du coude, au débit Q3

2.2.2 Anémométrie à fil chaud

L'objectif de l'utilisation de l'anémométrie à fil chaud dans ce travail est de mesurer des profils de vitesse en proche paroi, dans le but d'obtenir, *in fine*, les profils de vitesse fluctuante nécessaires dans le modèle développé par Ben Othmane *et al.* (2010), et d'estimer la vitesse de frottement u^* (voir Section 1.1, à la suite de l'Équation 1.12). Les mesures au fil chaud fournissent des vitesses (u), des fluctuations de vitesse (u') et des intensités turbulentes (u'/u).

2.2.2.1 Instrumentation

Le fil chaud utilisé est un fil métallique en tungstène de 5 μm de diamètre, soudé à deux broches. Un fil chaud « proche paroi » est utilisé pour les profils en proche paroi (Figure 2.10a, 55P15, Dantec Dynamics). L'utilisation de ces fils chauds se fait à température constante (Constant Temperature Anemometry (CTA)) : la température du fil est mesurée et l'intensité délivrée au fil est adaptée pour la maintenir constante, car plus la vitesse de l'air est élevée, plus le fil est refroidi. La sonde « fil chaud » est fixée sur un support droit de 4 mm de diamètre et 235 mm de long (55H21, Dantec Dynamics; Figure 2.10b). Le support est lié électroniquement à la centrale d'acquisition (StreamLine 90N10 Frame, Dantec Dynamics), pilotée par le logiciel StreamWare (v.5.02).

La sonde est tout d'abord calibrée à l'aide de la station de calibration (StreamLine 90HO2, Dantec Dynamics), positionnée avec une orientation relative au flux d'air identique à sa position par rapport au flux d'air en gaine (exemple sur la Figure 2.11). Le support et le fil chaud sont les mêmes pour la calibration et pour la mesure en gaine. La gamme de vitesse et le nombre de mesures de vitesse à calibrer sont donnés dans le Tableau 2.3). La calibration est réalisée à chaque mesure d'un profil de vitesse.

Tableau 2.3 – Caractéristiques des calibrations et profils proche paroi

Vitesse moyenne dans DIESE (m/s) (cf. Tableau 2.1)	Calibration		Profil	
	Gamme de vitesse	Nombre de points	Répartition des points sur la gamme de vitesse	Fréquence d'acquisition (Hz)
5,8	0,5 — 11	Linéaire	42	1024
10,7	0,5 — 20	Log-square	42	1024
3,6	0,5 — 5	Linéaire	20	1024

La calibration est ensuite réalisée par le logiciel par régression polynomiale d'ordre 4. Au moment de la calibration, l'utilisateur indique, dans le logiciel, une température de référence qui doit être la plus proche possible de la température de l'air circulant en gaine lors des mesures (Repère orange sur la Figure 2.1). La calibration doit donc être faite à une température proche de la température de l'essai en gaine. Il est à noter que la sonde de température fournie en complément du fil chaud n'est pas utilisée ici.

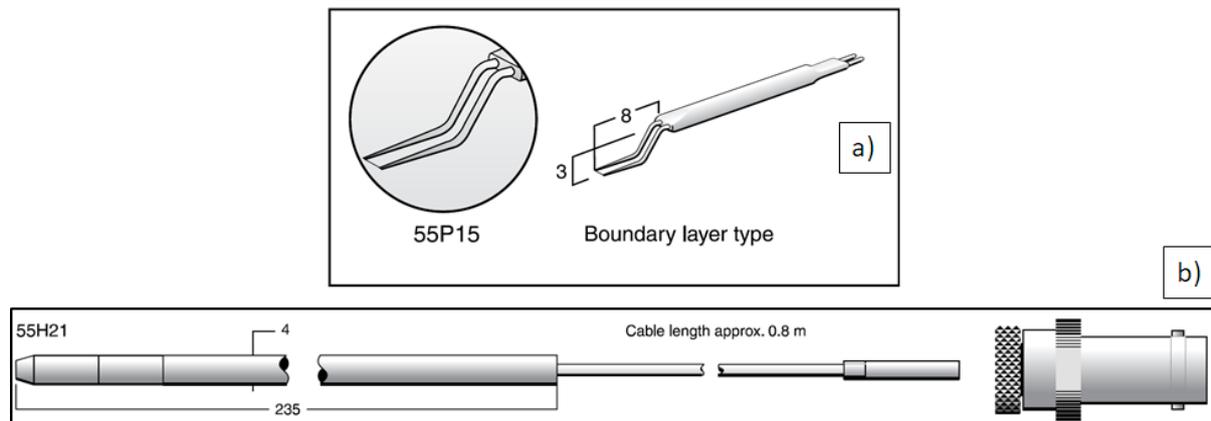


Figure 2.10 – Schéma et dimensions a) du fil chaud proche paroi et b) du support utilisés (dimensions en mm) – Source : Dantec Dynamics

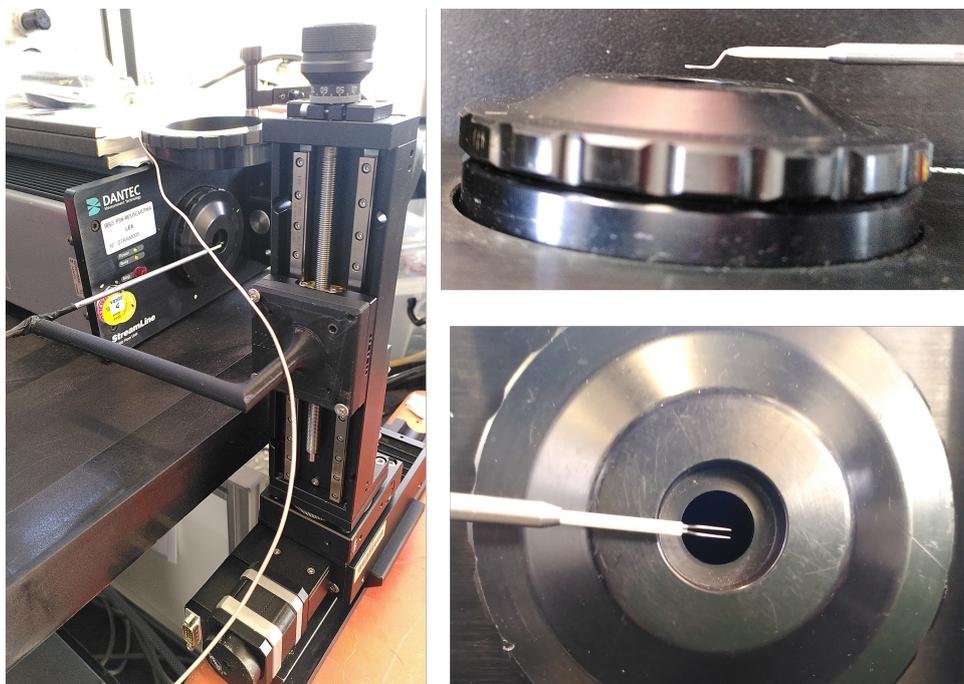


Figure 2.11 – Photographies d'un fil chaud proche paroi face à la station de calibration

2.2.2.2 Protocole

L'ensemble de la préparation, installation et calibration des mesures a été réalisé par Rémy PLOIX, doctorant prenant la suite de ce travail.

Le fil chaud est installé sur un support à une hauteur $z = -24$ cm (Figure 2.13), la mesure à mi-hauteur de gaine ($z = -20$ cm) n'ayant pas pu être réalisée pour des raisons pratiques. Pour pouvoir déplacer le fil chaud, un rail de déplacement micrométrique motorisé (LIMES 60-50-HSM, résolution au μm et course de 5 cm) est utilisé. Une pièce imprimée en 3D est fixée sur le rail, sur laquelle le support du fil

chaud est lui-même fixé (Figure 2.12).

Lors de l'installation en gaine, tout l'assemblage est inséré dans DIESE par des trappes d'accès. Cet emplacement a l'avantage d'être environ $7,5D_h$ en aval d'une singularité et $2D_h$ en amont d'une autre singularité de DIESE. L'emplacement est indiqué au Repère violet sur la Figure 2.1, permettant d'avoir un profil de vitesse plus établi, et d'être confortable pour la mise en gaine grâce à la présence :

- de plusieurs trappes, qui permettent l'insertion précautionneuse de l'équipement dans la gaine à la main avec une vue relativement dégagée ;
- d'un piquage, qui sert au passage des câbles du fil chaud et du rail micrométrique.

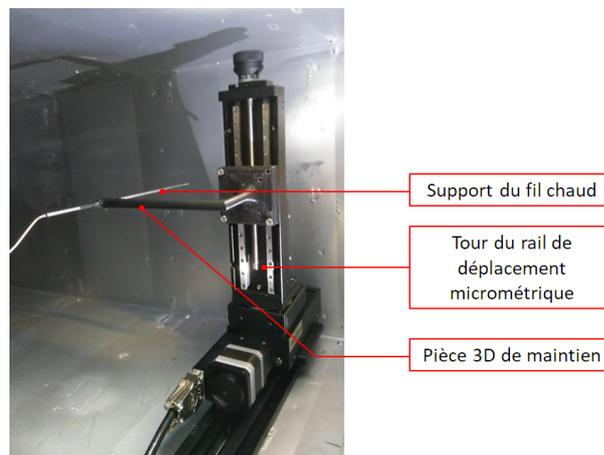


Figure 2.12 – Installation du fil chaud proche paroi dans une gaine de DIESE

Le fil de la sonde est orienté verticalement (selon l'axe z) et se déplace horizontalement suivant y (Figure 2.13).

La manipulation du fil chaud est minutieuse pour éviter un impact (i.e. la rupture du fil), contre la paroi par exemple. Pour éviter cette rupture lors des mesures en proche paroi, le rail est en butée le plus loin possible de la paroi. Ensuite, le fil chaud est rapproché progressivement de la paroi, en diminuant la taille des déplacements au fur et à mesure de l'approche.

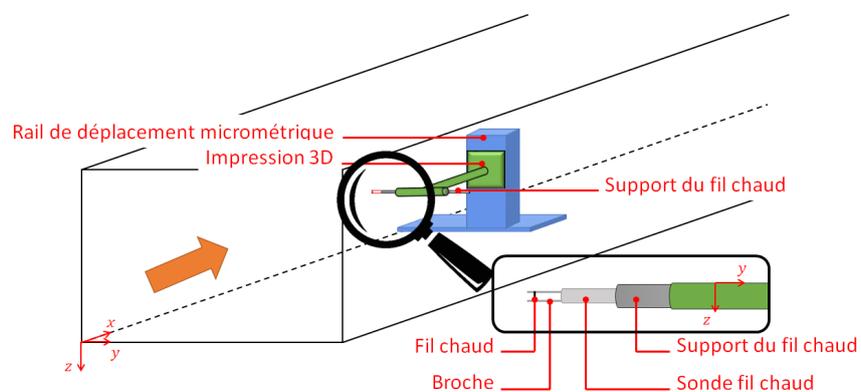


Figure 2.13 – Schéma de l'installation du fil chaud dans une gaine de DIESE

2.3 Aérosol

L'objectif étant de mesurer le dépôt d'aérosols dans les gaines de DIESE, il est nécessaire de décider d'un type d'aérosol à générer, d'un générateur et d'une technique de mesure. Les débits d'air dans les gaines de DIESE sont importants, donc le taux de dilution des aérosols est élevé. Lorsque ces concentrations générées sont fortement diluées, les concentrations surfaciques de dépôt sont faibles, et la durée des expériences peut alors s'avérer longue si le générateur choisi génère un faible débit massique. Il faut donc trouver un compromis entre la sensibilité de la technique de mesure (une limite de détection la plus basse possible) et un générateur avec un débit massique généré le plus élevé possible, en prenant en compte le temps d'expérience (qui doit être « raisonnable »).

2.3.1 Choix de la technique de mesure de dépôt surfacique

La technique de mesure est choisie la première. Le cahier des charges impose une technique de mesure qui doit être :

- locale : le dépôt est quantifié sur des « petites » surfaces, permettant de distinguer différentes zones sur une paroi par exemple, pour s'intéresser à l'inhomogénéité du dépôt sur les surfaces (notamment en présence d'écoulement secondaire) ;
- sensible : la limite de détection de la technique est très faible pour que la durée de l'expérience soit raisonnable et que des petites quantités de dépôt puissent être détectées ;
- non intrusive : aucun substrat n'est fixé en paroi (comme un filtre par exemple) pour ne pas modifier le matériau et interrompre la continuité de la surface de la gaine, les discontinuités engendrant des modifications de la couche limite et faisant intervenir d'autres mécanismes de dépôt, comme des phénomènes électrostatiques. De plus, l'objectif de ce travail est de s'intéresser au dépôt à échelle 1, y compris du point de vue de l'état de surface et du matériau ;
- affranchie de découpe ou de lavage de gaine : la technique de mesure peut être mise en œuvre, avec le matériel correspondant, en passant par les accès déjà présents sur les gaines (trappes d'accès et piquages).

D'après la Section 1.2 (Costa *et al.*, 2022a), le Tableau 2.4 rassemble et compare les techniques de mesure de dépôt pour évaluer leur applicabilité sur DIESE.

La technique de pesée est éliminée car trop peu sensible pour notre application. De plus, l'utilisation d'une balance nécessite de placer un substrat en paroi de gaine pour pouvoir peser le dépôt, impliquant une intrusion : la surface de dépôt est modifiée, ce n'est plus la gaine, c'est un substrat, et la couche limite est modifiée. Cette technique a été utilisée une fois, à notre connaissance, pour des mesures de quantité importante de dépôt dans des gaines de ventilation (Lavoie *et al.*, 2007).

Les micro-capteurs nécessitent d'être installés en paroi de gaine pour effectuer des mesures et ne sont donc pas retenus.

Le caractère intrusif des techniques optiques repose sur l'obligation d'utiliser des surfaces transparentes, donc des surfaces constituées d'un matériau non représentatif des gaines de ventilation.

Pour notre application, la combinaison de la spectroscopie de fluorescence avec un substrat en paroi n'est pas retenue car la technique est intrusive. La combinaison avec le lavage des gaines n'est pas retenue non plus car les tronçons de DIESE sont lourds et la mesure obtenue n'est pas suffisamment locale dans une gaine de taille industrielle.

Après cette analyse, le choix se porte sur la spectroscopie de fluorescence combinée à la collecte du dépôt par frottis. En effet, cette combinaison répond à tous les besoins requis :

- la taille des surfaces de mesure est choisie par l'opérateur : la technique fournit des mesures locales de dépôt ;
- la spectroscopie de fluorescence est connue pour sa sensibilité (Kasavan et Doherty, 2000). La limite de détection de la fluorescence est difficile à estimer car elle dépend du spectromètre, celle du spectromètre utilisé au laboratoire est de 50 ng/L ;
- les frottis reposent sur la collecte des aérosols par essuyage des aérosols fluorescents directement sur la paroi de la gaine : la technique n'est pas intrusive ;
- le matériel utilisé pour les frottis n'est pas encombrant : il ne nécessite pas de découpage ou de lavage de gaine.

Cette technique de frottis a été utilisée à l'IRSN dans un cadre de prestation (Liatimi et Prevost, 2013), également par Ben Othmane (2011), où les frottis ont été réalisés sur les parois d'une gaine circulaire de 16 et 25 cm. Néanmoins, les protocoles mis en œuvre sont peu détaillés concernant :

- la gestion du bruit de fond des surfaces de collecte : l'état de surface avant l'expérience n'est pas pris en compte ;
- l'application du protocole : le nombre de frottis à réaliser est donné sans en détailler l'origine ;
- la collecte du dépôt : aucun critère ne permet d'assurer que la totalité des particules déposées est collectée, que ce soit sur la surface de collecte ou dans la ligne de prélèvement.

Le principe de la technique de mesure par frottis est repris pour application dans DIESE, mais cela nécessite une adaptation et l'élaboration de critères pour rigoureusement prendre en compte les points sus-cités. Le développement de ce protocole fait l'objet du Chapitre 3.

2.3.2 Type d'aérosol et génération

La spectroscopie de fluorescence comme technique de mesure du dépôt d'aérosols implique, comme son nom l'indique, l'utilisation d'un aérosol fluorescent et une distribution de taille de l'aérosol généré monodisperse (cf. Chapitre 1). De plus, les particules auxquelles nous choisissons de nous intéresser sur DIESE sont supermicroniques (2 à 10 μm , norme NF ISO 2889).

Tableau 2.4 – Récapitulatif des techniques de mesure de dépôt d'aérosol en fonction des critères d'application

	Pesée	Spectroscopie de fluorescence			Micro-capteurs	Techniques optiques	Techniques optiques commercialisées
		Substrat	Lavage	Frottis			
Locale	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sensible	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Non-intrusive	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗
Sans manutention de gaine	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓

Notre choix s'est d'abord porté sur un générateur qui est couramment utilisé au laboratoire de l'IRSN, le LIXEA atomizer série BA - 500 kHz (SinapTec). Il s'agit d'un générateur à ultrasons à céramique vibrante (Figure 2.14). Deux types de particules sont générés avec le LIXEA : des particules de 2 et de 5 μm de diamètre. Les caractéristiques des solutions correspondantes sont présentées dans le Tableau 2.5. La proportion de NaCl en masse est de 90% contre 10% d'uranine, car une solution constituée de 100% d'uranine pose des problèmes de viscosité. La masse volumique du NaCl est égale à 2160 kg/m^3 et celle de l'uranine à 1500 kg/m^3 , ce qui donne une masse volumique de 2090 kg/m^3 aux aérosols en ces proportions.

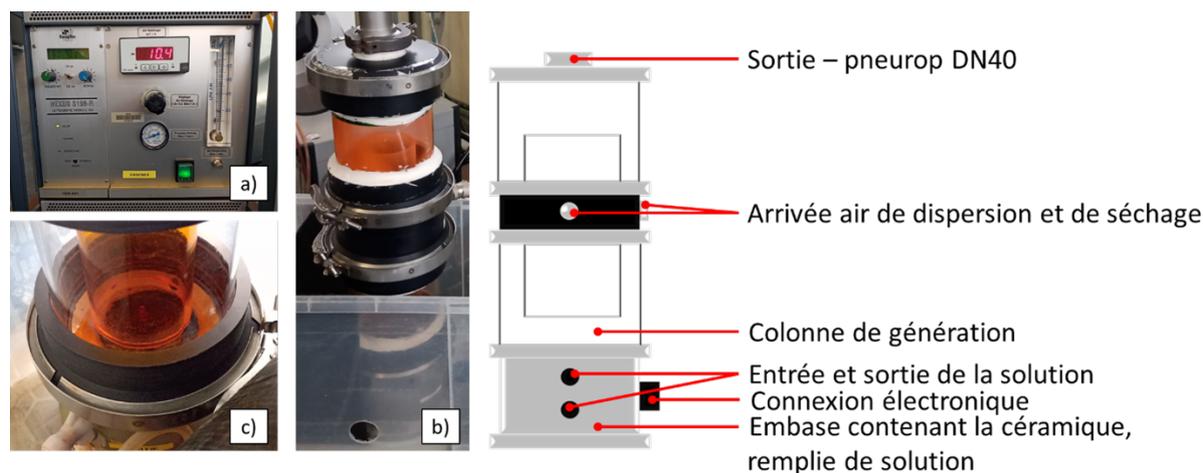


Figure 2.14 - a) Photographie du boîtier électronique du LIXEA, b) Photographie et schéma de la colonne de génération et c) Photographie de la nébulisation

La solution à atomiser est placée dans l'embase, elle-même alimentée au cours de l'expérience grâce à une pompe péristaltique (MINIPULS 3, GILSON). Quatre paramètres sont à régler pour la génération d'aérosols secs fluorescents :

- la puissance transmise à l'embase de nébulisation, qui influence le débit massique généré ;
- la fréquence de la source ultrasonore, fréquence pour laquelle la puissance est maximale ;
- le débit d'air de dispersion, entraînant les gouttes d'environ 7 μm de diamètre dans la colonne de génération (entre 0 et 60 L/min) ;
- le débit d'air de séchage des particules dans la colonne de génération (entre 6 et 30 m^3/h).

Les valeurs de réglage du générateur sont décrites dans le Tableau 2.5. Un protocole d'utilisation est exécuté à chaque expérience, comprenant un lavage systématique afin d'éviter la génération de particules dont la fluorescence aurait diminué, un séchage systématique à l'étuve pour éviter des pertes de puissance, et une surveillance de la fréquence en cours d'expérience, puisque celle-ci peut varier légèrement.

Tableau 2.5 – Caractéristiques des solutions et valeurs de réglage du LIXEA

Solution			Réglages du générateur			
Diamètre théorique voulu (μm)	Concentration de NaCl (g/L)	Concentration d'uranine (g/L)	Fréquence de résonance ⁱ (kHz)	Puissance ⁱ (W)	Débit de séchage (m^3/h)	Débit de dispersion (L/min)
2	227	25	562	58	10	20
5	14,5	1,6	565	75	10	20

ⁱ Les valeurs de fréquence et de puissance sont données à titre indicatif. Celles-ci peuvent varier en fonction du diamètre des particules générées et de l'usure de la céramique vibrante.

Un autre générateur d'aérosols est utilisé pour générer un aérosol de 10 μm . Il s'agit du Flow Focusing Monodisperse Aerosol Generator (FMAG 1520, TSI), générateur dans lequel un écoulement de liquide est acheminé par un pousse-seringue puis est focalisé par un débit d'air pour former un jet en sortie de buse. Une vibration mécanique est appliquée, cassant le jet en gouttelettes. Les solutions utilisées contiennent également du NaCl et de l'uranine. Les gouttelettes sèchent ensuite pour ne laisser qu'un résidu sec de NaCl tracé à l'uranine. Ce générateur a été peu mis en œuvre durant cette thèse (un essai) et les mesures de dépôt liées à l'utilisation de ce générateur présentées dans le Chapitre 5 nécessiteront d'être répétées.

2.3.3 Caractérisation du LIXEA

Comme décrit dans la Section 2.3.2, la fréquence, la puissance et les débits de dispersion et de séchage sont à régler lors de l'utilisation du LIXEA.

Une étude préliminaire a été conduite afin de déterminer les valeurs de réglage du LIXEA pour une optimisation de la génération, soit pour un débit massique généré maximal (Costa *et al.*, 2021). Pour ce faire, une solution composée de 227 g/l de NaCl, de 25 g/l d'uranine (fluorescéine sodée) et d'eau déminéralisée a été utilisée pour générer un aérosol de diamètre théorique 5 μm .

L'objectif est d'observer l'influence des paramètres de fonctionnement du générateur. Cette étude a été réalisée en début de thèse, sans disposer d'un APS, utilisé lors des essais de mesures de dépôt (cf. Chapitre 5). Sur les figures qui suivent, la concentration massique est obtenue en utilisant le nombre de particules mesuré avec un compteur optique (WELAS-2000, Palas) et en calculant la masse d'une particule, supposée sphérique et non poreuse, de masse volumique 2160 kg/m^3 , à partir du diamètre optique donné par le compteur optique et en supposant un indice de réfraction de l'aérosol de NaCl tracé à l'uranine égal à l'indice de réfraction des particules de latex.

Les valeurs de réglage utilisées habituellement sont considérées ici comme les valeurs de référence et sont les suivantes :

- Fréquence = 560 kHz, valeur évoluant un peu avec l'usure de la céramique ;
- Puissance = puissance maximale, environ 60 W ;
- Débit de dispersion = 20 L/min ;
- Débit de séchage = 10 m^3/h .

Pour trouver les valeurs optimales de réglage, des tests sont conduits sur chaque paramètre, en considérant la valeur de référence, la valeur de référence augmentée et diminuée.

2.3.3.1 Optimisation de la fréquence

La fréquence de résonance est facilement réglable car elle correspond à la valeur maximale de la puissance. La Figure 2.15 présente les dix distributions de trente secondes enregistrées pour la valeur de référence (560 kHz, en rouge), la valeur de référence augmentée (560 + 10 = 570 kHz, en violet) et la valeur de référence diminuée (560 - 10 = 550 kHz, en jaune), soit une variation de 1,8%.

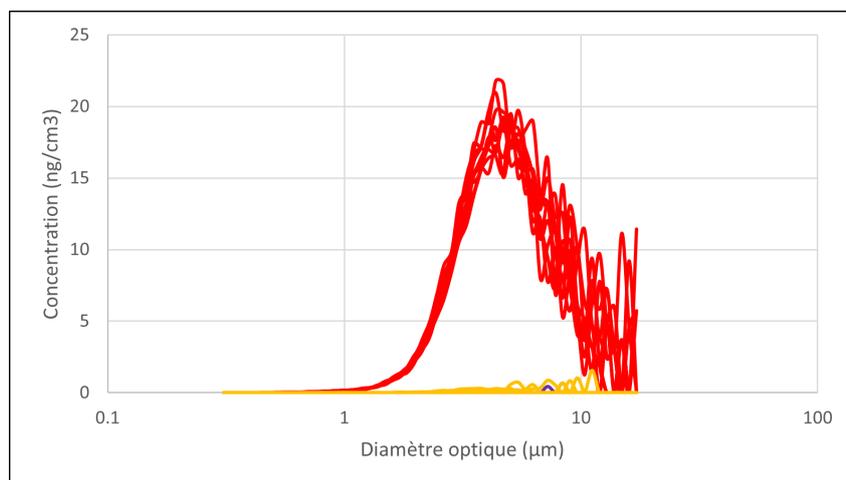


Figure 2.15 – Distributions granulométriques en masse pour trois valeurs de fréquence — valeur de référence f_{ref} en rouge (560 kHz), $f_{ref} + 10$ (570 kHz) en violet et $f_{ref} - 10$ en jaune (550 kHz)

On constate qu'il n'y a plus de particules générées lorsque la fréquence est modifiée de ± 10 kHz. Le réglage de la valeur de référence est donc bien effectué.

2.3.3.2 Puissance

Pour la valeur optimale de puissance, seule une diminution de la puissance est effectuée par rapport à la valeur de référence, puisque cette dernière est réglée sur la puissance maximale. Les distributions granulométriques sont donc obtenues pour deux valeurs (Figure 2.16), la valeur maximale (celle de référence, en rouge) égale à 60 W environ et la valeur de référence diminuée, égale à 50 W. L'écart entre les deux valeurs représente une variation de 16%.

Lorsque la puissance est diminuée, la concentration chute d'un facteur 4. Le réglage de la valeur de puissance sur la valeur maximale est donc optimal pour générer le maximum de particules.

2.3.3.3 Débits de dispersion et de séchage

Des tests identiques sont réalisés sur le débit de dispersion, puis sur le débit de séchage. Le débit de dispersion est réglé sur sa valeur de référence (20 L/min) et subit une variation de 25%, avec une modification de la valeur de référence de ± 5 L/min. Les résultats obtenus ne sont pas présentés car aucune évolution significative de la granulométrie générée n'est observée. L'évolution du $DAMM$ et de l'écart-type géométrique σ_G n'a pas été observée, ce qui pourrait faire l'objet d'une étude plus précise. Pour plus de précaution, la position de la vanne de réglage sur 20 L/min est figée durant les campagnes expérimentales pour éviter une modification du débit.

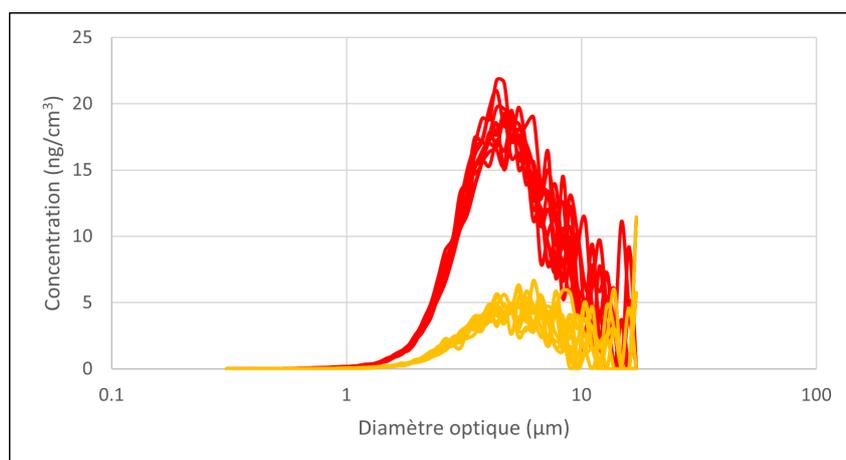


Figure 2.16 – Distributions granulométriques en masse pour deux valeurs de puissance — valeur de référence en rouge (60 W) et valeur diminuée en jaune (50 W)

Concernant le débit de séchage, la valeur de référence est de 10 m³/h et subit une variation de 25%, avec une modification de la valeur de référence de $\pm 2,5$ m³/h. De la même façon que pour le débit de dispersion, aucune évolution significative n'est constatée sur la granulométrie générée.

2.3.4 Distribution de taille des aérosols générés

Pour les mesures de distribution en taille des aérosols générés dans DIESE, on utilise un APS. Cet instrument de mesure fournit un nombre de particules par cm³ selon un certain nombre de canaux de diamètre aérodynamique (52 canaux), répartis de 0,5 à 20 µm. L'air est prélevé à un débit total de 5 L/min : 1 L/min est sélectionné par une buse interne et les 4 L/min restants sont filtrés. Le débit total est ensuite accéléré par une buse à orifice, qui aboutit à la cellule de mesure. Les particules traversant la cellule de mesure diffusent la lumière de deux faisceaux laser (technique « time of flight »). Un photodétecteur capte la lumière diffusée.

L'APS est choisi pour les mesures granulométriques car il nous permet d'obtenir des diamètres aérodynamiques sur la gamme de taille qui nous intéresse, pour son utilisation et sa mise en place facile.

On utilise souvent l'APS combiné à un diluter (Aerosol Diluter, 3302A, TSI) pour « diminuer » la concentration d'aérosols lorsque celle-ci est trop élevée et sature l'APS. Le diluter est un instrument doté d'un capillaire (fin tube biseauté) qui sélectionne isocinétiquement un débit spécifique au taux de dilution choisi et le débit complémentaire est filtré.

Le compteur optique WELAS-2000 (TSI) est aussi utilisé pour des mesures de distribution de taille, mais seulement dans le cadre des études préliminaires de caractérisation du LIXEA (cf. Section 2.3.3). Les diamètres optiques de particules entre 0,2 et 100 µm sont mesurables par diffusion optique de la lumière. Le débit de prélèvement est également de 5 L/min.

Des distributions de taille sont mesurées en sortie du générateur pour observer la stabilité du diamètre aérodynamique médian en masse³ (D_{AMM}). Soixante distributions de trente secondes chacune sont mesurées avec un APS (3321, TSI) avec un nombre de particules générées assez variable au cours du temps (Figure 2.17).

Le diamètre aérodynamique médian en masse (D_{AMM}) et l'écart-type géométrique (σ_G) (Figure 2.18) sont stables sur trente minutes. En revanche, le débit massique n'est pas stable (Figure 2.18). Ces observations sont identiques à tous les essais pour lesquels la mesure a été réalisée sur la durée de l'essai, soit les essais de mesure de dépôt dans les coudes. Pour les essais en conduits droits, les mesures sont réalisées sur 10 échantillons de 30 s (5 avant et 5 après la génération). Le débit massique en sortie du générateur est élevé (entre 400 et 2000 mg/h) : les autres générateurs du commerce n'ont pas été retenus car leur débit généré est trop faible, malgré le fait que la distribution de taille de l'aérosol généré par le LIXEA ne soit pas rigoureusement monodisperse, avec un écart géométrique standard (σ_G) compris entre 1,35 et 1,45.

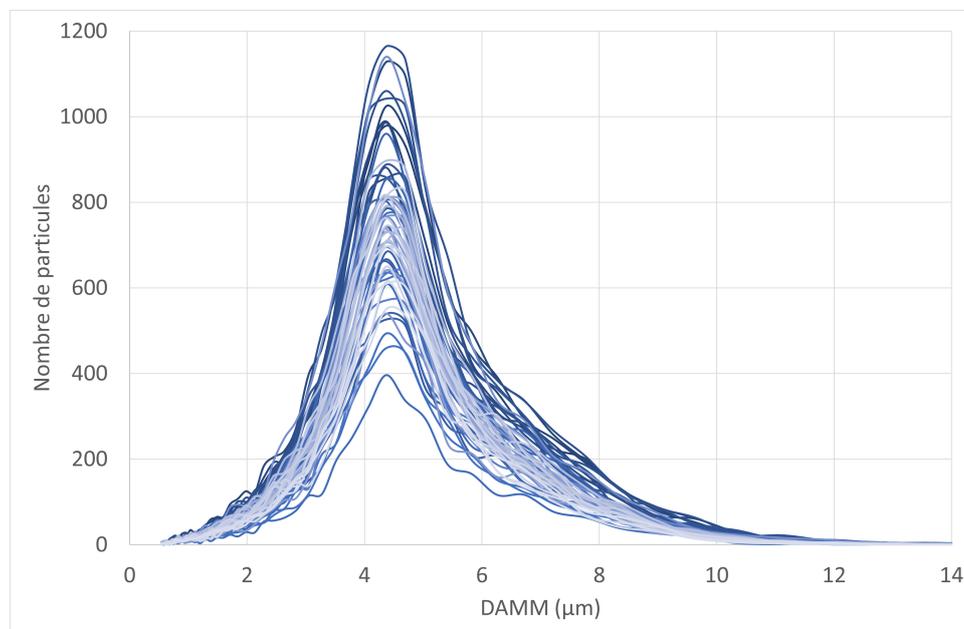


Figure 2.17 – Distributions de taille des aérosols générés avec le LIXEA sur trente minutes

3. Diamètre équivalent à celui d'une sphère dont la masse volumique est de 1000 kg/m^3 et dont la vitesse de sédimentation est égale à celle de la particule.

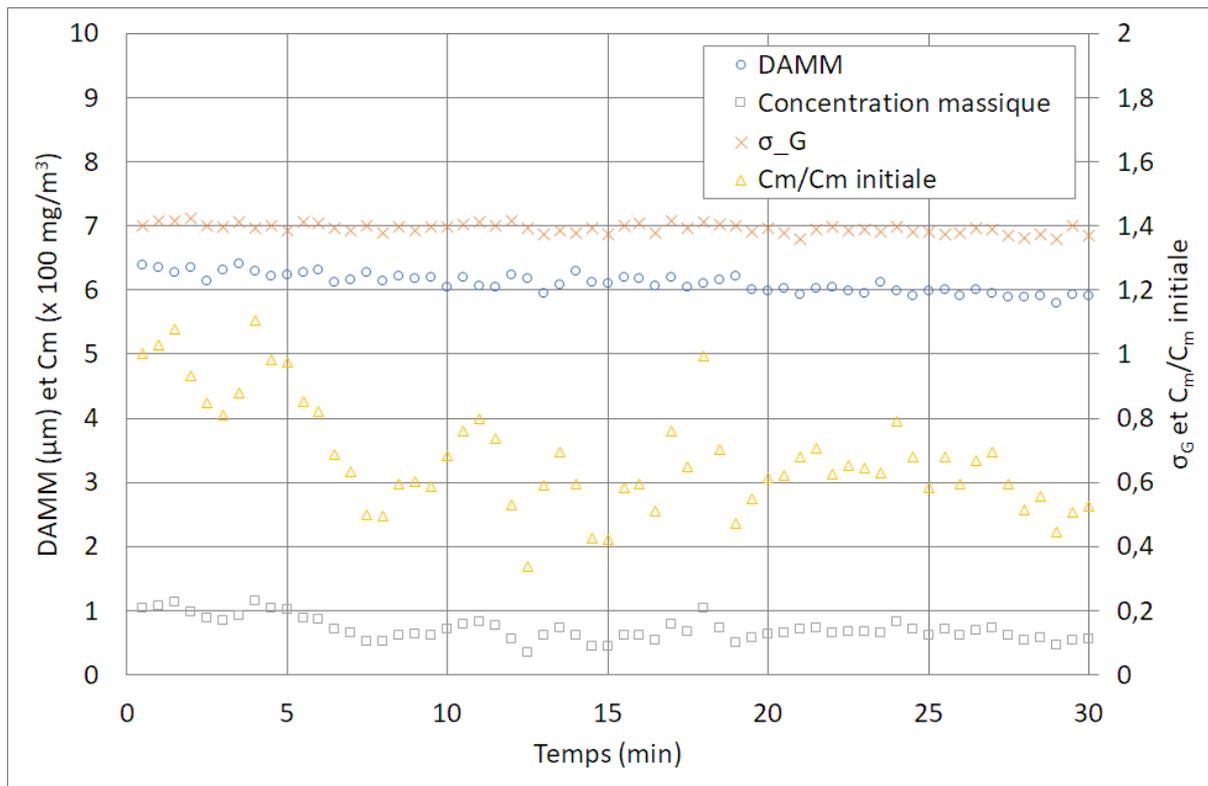


Figure 2.18 – Mesure à l'APS sur trente minutes (30×60 s) du diamètre des particules générées avec le LIXEA (*DAMM*), de leur écart-type géométrique (σ_G) et de la concentration massique (C_m)

2.3.5 Système d'injection des aérosols en gaine

Plusieurs configurations d'injection ont été envisagées (*Costa et al., 2021*) :

- une injection pariétale ;
- une canne d'injection coudée à co-courant ;
- une canne d'injection droite verticale.

La canne d'injection pariétale n'est pas retenue car, avec les vitesses d'air élevées dans la gaine, les aérosols restent dans le haut de la gaine et peinent à s'homogénéiser. La canne au diamètre le plus large possible est retenue. Cependant, il est impossible d'insérer la canne coudée par les piquages pneurop de 40 mm de diamètre. Il est donc décidé d'injecter les aérosols via une canne verticale, de 32 mm de diamètre, dont l'extrémité est à mi-hauteur de la gaine. Pour maximiser le débit massique injecté dans DIESE, la ligne d'injection reliant le générateur à DIESE a été optimisée en minimisant le nombre de singularités (de coudes, de réductions) et les longueurs droites pour minimiser les pertes liées au dépôt dans la ligne d'injection. Un deuxième objectif est d'avoir deux voies distinctes : une dirigée vers un filtre pour stabiliser la génération avant injection dans DIESE et une dirigée vers DIESE.



Figure 2.19 – Photographie de la ligne d'injection

La ligne d'injection (présentée en photo Figure 2.19 et schématiquement Figure 2.20) est finalement composée de tubes circulaires en acier inoxydable de 40 mm de diamètre intérieur, majoritairement horizontaux. Comme la présence de coude est ici requise, il est décidé que les rayons de courbure soient d'au minimum $5D_h$. Les rayons de courbure de chaque côté du Y sont semblables et égaux à $8D_h$. Un tronçon spécifique est dédié au prélèvement pour des mesures de distributions de taille. À l'intérieur de ce tronçon, une canne de prélèvement coudée est soudée, dont le diamètre intérieur est de 8 mm et dotée d'une buse isocinétique choisie pour respecter les conditions de prélèvement isocinétique lors de l'utilisation du LIXEA avec l'APS. En effet :

- dans un tube de 40 mm de diamètre intérieur, pour un débit de sortie (du LIXEA) de $10 \text{ m}^3/\text{h}$, la vitesse est de 2,2 m/s;
- pour un débit de prélèvement (de l'APS) de 5 L/min, pour obtenir une vitesse est de 2,2 m/s, la buse de prélèvement doit avoir un diamètre de 7 mm.

Le coude de la canne isocinétique a un rayon de courbure d'environ $10D_h$. Le coude vertical en aval de la vanne a un rayon courbure de $5D_h$. Entre ce coude et la canne d'injection, une légère réduction permet à la canne d'injection d'être passée par le piquage pneurop en réduisant le diamètre intérieur de 40 à 32 mm. La canne d'injection est centrée, verticale et s'arrête à mi-hauteur de la gaine. L'injection d'aérosol se fait au niveau du Repère A sur la Figure 2.1.

Pour vérifier le bon fonctionnement de la ligne d'injection, qu'aucun diamètre n'est sélectionné préférentiellement et que l'aérosol est sec en sortie de ligne d'injection, des distributions de taille sont mesurées à l'APS à deux emplacements. Elles sont mesurées au Repère 1 (Figure 2.20), puis l'APS est déplacé pour conduire les mesures au bout de la canne d'injection (Repère 2). Les résultats (Figure 2.21) de suivi du *DAMM* en masse et de l'écart-type géométrique (σ_g) sur cinq minutes montrent que la ligne d'injection est bien optimisée. En moyenne, *DAMM* vaut $6,6 \mu\text{m}$ au Repère 1 et $6,8 \mu\text{m}$ au Repère 2; σ_G vaut 1,36 au Repère 1 et 1,37 au Repère 2. Le nombre total de particules étant inférieur à

10^6 \#/cm^3 , le phénomène de coagulation peut être négligé. De plus, le diamètre ne diminuant pas, les particules sont considérées comme sèches en sortie du générateur.

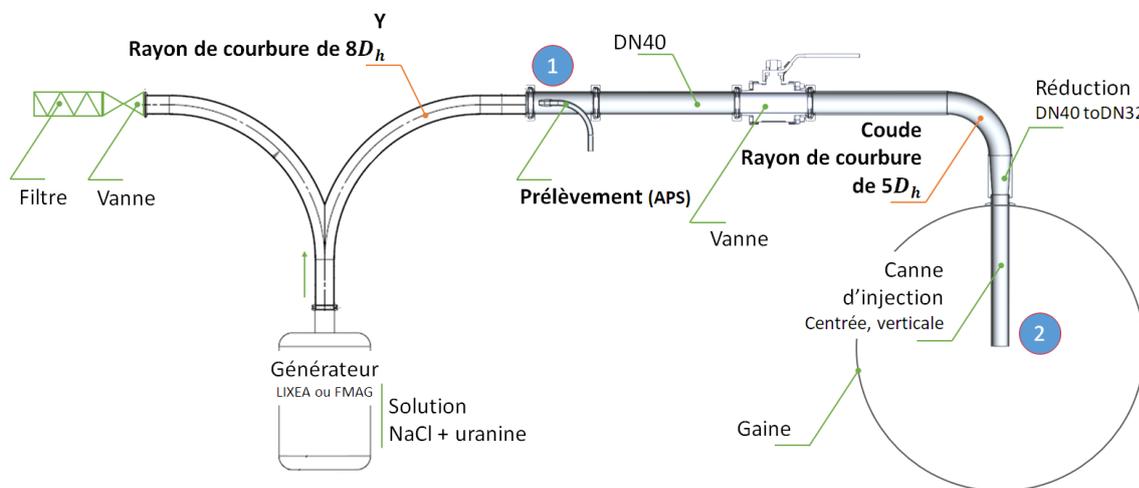


Figure 2.20 – Schéma de la ligne d'injection

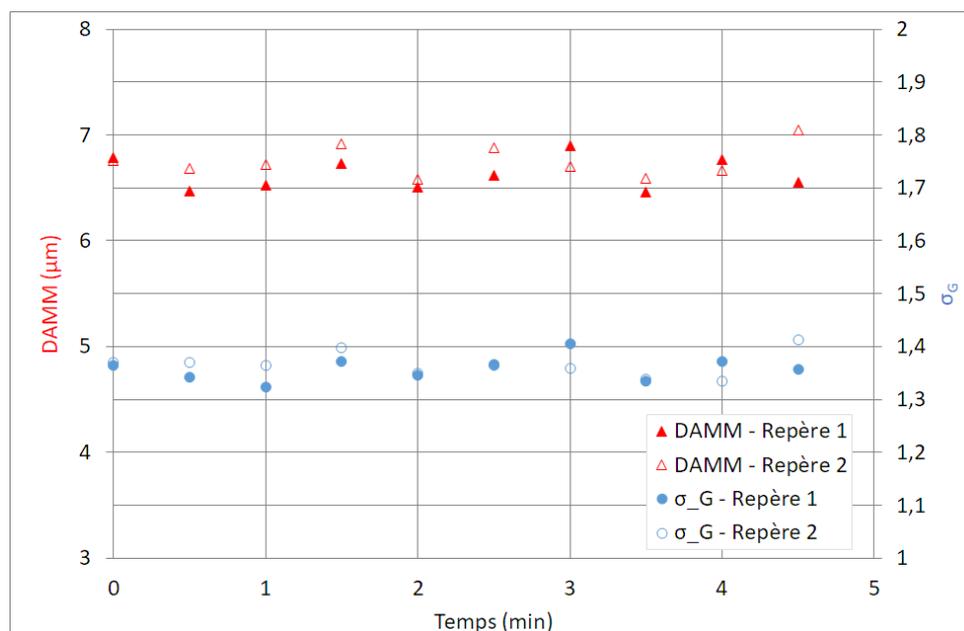


Figure 2.21 – Évolution du diamètre et de l'écart-type géométrique de l'aérosol en amont et en aval de la ligne d'injection

2.3.6 Concentration volumique en gaine C_{bulk}

Pour mesurer la concentration volumique en gaine C_{bulk} (concentration moyenne temporelle), l'APS ne peut pas être utilisé car :

- la concentration mesurée est trop fortement diluée dans DIESE;

- pour assurer un débit de prélèvement isocinétique en accord avec le débit de prélèvement de l'APS, les cannes de prélèvement devraient avoir un diamètre de 3 mm ; il faudrait mesurer le dépôt dans ces cannes, ou l'estimer, or les prédictions des corrélations diffèrent beaucoup dans les coudes ;
- il faudrait de nombreux APS pour mesurer dans plusieurs zones à la fois.

Par conséquent, on met en place un système de prélèvement sur filtre. Des lignes de prélèvement sont installées au plus proche des zones de mesure de dépôt. Une ligne de prélèvement comprend, d'amont en aval (Figure 2.22) :

- une canne de prélèvement. Il s'agit d'un tube en acier inoxydable dont le diamètre intérieur est de 9 mm. Elle fait 55 cm de long et comporte un coude de rayon intérieur de 38 mm (soit $4,2D_h$). Elle est installée en gaine par un piquage de manière à être centrée : l'extrémité de la canne atteint le milieu de la largeur de la gaine ;
- une vanne quart de tour ;
- un tube flexible court pour se raccorder à un embout de porte-filtre ;
- un porte-filtre en acier inoxydable dans lequel est placé un filtre en fibre de verre de 47 mm de diamètre ;
- une pompe dont le débit est réglé au plus proche des conditions d'isocinétisme : la vitesse dans la canne doit se rapprocher au maximum de la vitesse dans la gaine (cf. Tableau 2.6) ;
- un compteur volumétrique à gaz, pour mesurer le volume d'air prélevé sur la durée de l'expérience.

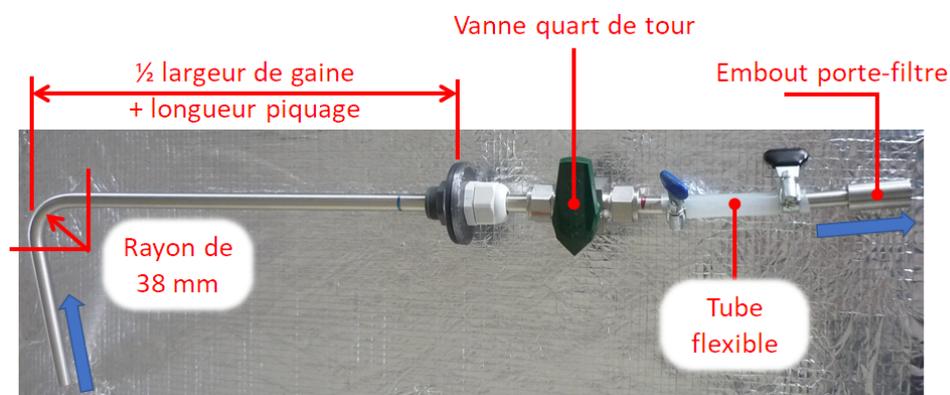


Figure 2.22 – Photographie d'une ligne de prélèvement

Tableau 2.6 – Débits isocinétiques dans les lignes de prélèvement

Débit de consigne (Nm ³ /h)	Q4 (3100)	Q1 (5050)	Q2 (7850)	Q3 (9272)
Vitesse d'air dans la gaine et dans la ligne de prélèvement (m/s)	3,6	5,8	9,1	10,7
Débit dans la ligne de prélèvement pour l'isocinétisme (L/min)	14	22	35	41

Développement du protocole de mesure de dépôt par frottis

Sommaire

3.1	Développement et validation	79
3.2	Protocole expérimental de mesure du dépôt d'aérosol dans des gaines de ventilation de taille industrielle	80
3.2.1	Résumé	80
3.2.2	Introduction et état de l'art	80
3.2.3	Grandeurs mesurées	82
3.2.4	Développement d'un protocole expérimental de mesure de dépôt dans des gaines droites	83
3.2.4.1	Protocole de frottis	83
3.2.4.2	Vérifications ponctuelles	87
3.2.4.3	Calcul des incertitudes	88
3.2.5	Application sur une installation dédiée	89
3.2.5.1	Installation expérimentale	89
3.2.5.2	Méthode expérimentale	91
3.2.5.3	Répétabilité	92
3.2.6	Validation et perspectives	94
3.2.7	Conclusion	96

3.1 Développement et validation

Les deux chapitres précédents ont permis de déterminer que la technique de mesure de dépôt d'aérosols dont la taille varie de 2 à 10 μ m est la spectroscopie de fluorescence. Cette technique est associée à une collecte du dépôt par frottis, directement en paroi de la gaine. Les instruments utilisés pour générer l'aérosol fluorescent nécessaire ont été choisis.

Cependant, comme cela a été expliqué dans la Section 2.3.1, les protocoles expérimentaux utilisant la technique de frottis pour collecter le dépôt en paroi ne peuvent pas être utilisés tels qu'ils sont. En effet, outre le fait que ces protocoles n'aient pas été développés pour une application dans des gaines de taille industrielle, certains points ne sont pas abordés ou manquent de précisions.

Il nous faut donc mettre au point un nouveau protocole de mesure du dépôt d'aérosols par frottis, en réalisant les vérifications nécessaires pour son applicabilité dans des gaines de DIESE.

Le développement de ce nouveau protocole de mesure de dépôt d'aérosols par frottis a fait l'objet d'un article de revue (Costa *et al.*, 2022b). Cet article, repris dans son intégralité dans ce chapitre, porte sur l'adaptabilité du protocole de mesure de dépôt d'aérosols dans les gaines industrielles à d'autres installations, tout en détaillant l'instrumentation utilisée, les vérifications et les validations qui ont mené à l'établissement de celui-ci.

3.2 An experimental protocol for measuring aerosol deposition in industrial-sized ventilation ducts

3.2.1 Abstract

In the literature, studies on aerosol deposition in ventilation ducts mainly focus on ventilation ducts with a hydraulic diameter (D_h) of around 15 to 25 cm and with circular or square cross-sections. However, to our knowledge, common industrial-sized ventilation ducts ($D_h \sim 50$ cm) with rectangular cross-sections have not been studied. As a result, experimental aerosol deposition measurement protocols relative to ventilation ducts of smaller sizes are not suitable for measurement in industrial-sized ducts. Therefore, a new experimental protocol is proposed here, which can be used without destruction of the surface or addition of a substrate on the duct surface and could be applied in industrial ventilation networks as soon as certain conditions are met. In this paper, we present an experimental protocol developed to measure aerosol deposition adapted for large-scale ventilation ducts. First, the collection and measurement technique, the type of aerosol and the injection method are chosen. Second, the experimental protocol relative to the collection of aerosols deposited on duct surfaces is developed, based on a so-called “wiping” technique. Many verifications are presented here to ensure repeatable and reproducible measurements. Third, a repeatability study is conducted, as well as a validation process. In the last section of this paper, we present some results on aerosol deposition obtained on a test facility compared to two other studies.

Keywords: aerosol deposition, metrology, experimental protocol

3.2.2 Introduction and state of the art

It is now essential to further our knowledge of particulate contaminant transfer mechanisms in ventilation networks, especially with regard to contaminant deposition on surfaces. Indeed, in health applications, for example, particles can deposit in the respiratory system, which is linked to indoor air quality and, therefore, to the ventilation system (Gao *et al.*, 2016a; Ding *et al.*, 2016; Miller *et al.*, 2020). The same conclusion is seen in industry, as the development of micro-organisms in ventilation networks can become a contamination source (Ben Othmane *et al.*, 2011; Lavoie *et al.*, 2011). Another example is nuclear facilities, where a better understanding of deposition mechanisms and localization helps determine the quantity of particles remaining inside a ventilation duct and, consequently, helps prevent hazardous accumulations of radioactive particles in specific locations (Burkett *et al.*, 1984; Herranz *et al.*,

2010). Consequently, experimental studies need to be conducted to further our knowledge on deposition of particles.

However, in the literature, most experimental studies on particle (aerosol) deposition are about small diameter tubes (Chen et Pui, 1995; McFarland et al., 1997; Stenger et Bajura, 1982), such as sampling lines. These small tubes have circular sections and a diameter of around 1 cm. A few studies focus on medium-sized ventilation ducts, i.e. ducts with circular or square sections with a hydraulic diameter of between 15 and 25 cm (Sippola et Nazaroff, 2004; Ben Othmane, 2011; Da et al., 2015). To our knowledge, no work focuses on “industrial”-sized ventilation ducts with rectangular sections, i.e. ducts with a hydraulic diameter greater than 30 cm.

Additionally, only low masses of aerosols deposit on industrial-sized duct surfaces over a period of a few hours, as the dilution flow rate in industrial ducts is high (flow rate can reach 50,000 m³/h). Consequently, to obtain measurable masses of deposited aerosols, the experiment duration must be a few weeks. Thus, a compromise must be found between generating enough aerosols to limit the experiment duration and finding a technique with a low limit of detection to be able to measure deposition. The choice of the measurement technique will then determine the type of aerosol that can be used for the experiment, which in turn determines the type of aerosol generator.

Several techniques for measuring aerosol deposition are described in the literature (Costa et al., 2022a). The best-known techniques are weighing, fluorescence spectroscopy, micro-sensors and optical techniques. To measure aerosol deposition in industrial-sized ventilation ducts, the measurement technique must measure deposition locally, be very sensitive, non-intrusive and must not require duct handling. Costa et al. (2022a) show that the detection limit of the weighing technique is too high for this purpose; micro-sensors are intrusive, as their presence in the ducts modifies the flow boundary layer; and optical techniques require transparent ducts. The most suitable deposition measurement technique is fluorescence spectroscopy: deposited fluorescent aerosols are collected and put in a dissolving volume of solution. After dissolution, the solution is analyzed using fluorescence spectroscopy to provide a deposited mass by calibration of the spectrometer. Three methods exist for collecting aerosols, which can be combined with fluorescence spectroscopy:

- a substrate is fixed on the surface of the duct, such as a filter (see Thatcher et al. (2002), for example). After deposition, the substrate is removed from the surface and placed in a dissolving volume;
- part of the surface of the duct is designed to be removable. After deposition, the surface is removed and washed with water (for example Sippola et Nazaroff 2004), which is directly analyzed by fluorescence spectroscopy;
- part of the surface of the duct is delimited by a sort of stencil, which is fixed on the duct after deposition; this delimited surface is then wiped with humidified wipes and the wipes are put in a dissolving volume (Ben Othmane, 2011).

Only the wiping technique combined with fluorescence spectroscopy provides a very sensitive local measurement of deposition without modifying the boundary layer and without duct handling. As a result of this review of the literature, we conclude that Ben Othmane (2011) and Da et al. (2015) conducted the only studies developing this wiping technique combined with fluorescence spectroscopy applied to medium-sized ventilation ducts. Ben Othmane dismantles the duct upstream from the test section, then fixes a sort of stencil on the duct wall after deposition and collects particles within the surface delimited by the stencil by wiping with humidified wipes. The wipes are held by the operator.

With at least 3 wipings, Ben Othmane succeeds in collecting all the particles deposited. However, Ben Othmane's protocol is applied to medium-sized ducts (D_h of 20-25 cm) with circular cross-sections, requires duct handling (due to the absence of access hatches) and does not explicitly give any general verification criteria.

Consequently, there is a need to develop an experimental protocol with verifications and criteria to measure aerosol deposition in industrial-sized rectangular ventilation ducts.

The objective of this paper is to present the development and validation of an experimental protocol for directly measuring aerosol deposition on the surface of industrial-sized rectangular ventilation ducts, inspired by the measurement technique developed by Ben Othmane (2011) and Da *et al.* (2015). The paper is divided into four parts. In the first part, we present the required variables. The second part focuses on the experimental aerosol deposition measurement protocol. In the third part, we describe in detail an application of this protocol in a test facility. In the fourth part, we present the validation of the experimental protocol.

3.2.3 Measured variables

Different variables can be used to represent aerosol deposition and not all of them are directly measured (Costa *et al.*, 2022a). Deposition velocity v_d (m/s) is a most common deposition parameter used in the literature. v_d is expressed as¹:

$$v_d = \frac{J}{C_{bulk}} \quad (3.1)$$

where J is the deposition flux over a surface ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$) and C_{bulk} is the volume concentration in the bulk (kg/m^3) (Figure 3.1).

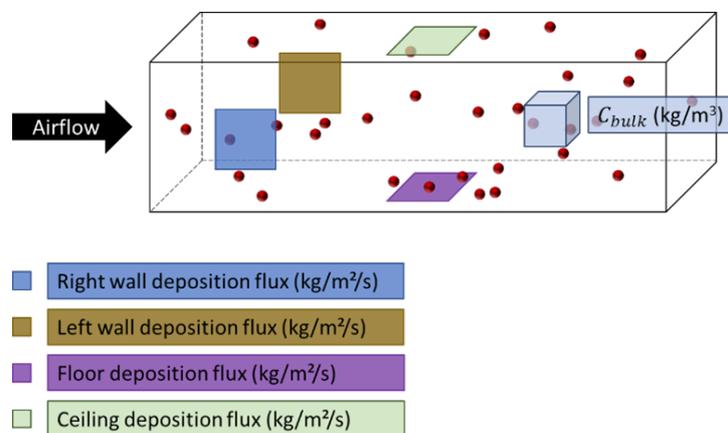


Figure 3.1 – Presentation diagram of deposition flux

Deposition measurement techniques provide a deposited mass of aerosol (m_d in kg), which is linked to J :

$$J = \frac{m_d/S}{\Delta t} \quad (3.2)$$

1. Les notations des grandeurs dans l'article sont conservées telles quelles, mais apparaissent toutefois dans la Nomenclature.

where S is the deposition surface (m^2) over the duration of the experiment Δt (s).

In the case of fluorescence spectroscopy, a fluorescent aerosol needs to be generated and collected after deposition. Collected aerosols are placed in a volume V (m^3) of ammonia water for dissolution and once the fluorescent aerosols have dissolved, the spectrometer is used to measure the fluorescence intensity of the solution I , which, by a calibration process, provides a volume concentration of fluorescein C_v (kg/m^3):

$$m_d = C_v \times V \quad (3.3)$$

and

$$C_v = a \times I + b \quad (3.4)$$

where a and b are the coefficients provided by the calibration.

C_{bulk} is obtained by sampling fluorescent aerosols inside the duct, using a sampling line connected to a filter. The sampling line must be installed as close as possible to the location of deposition measurement and sampling must be performed in isokinetic conditions. The aerosols are sampled throughout the entire duration of the experiment. After the end of the experiment, the filter is collected. The inside of the sampling tube is also washed with specific volumes of ammonia water to collect all the aerosols that may have been deposited during the sampling process. In other ventilation networks, this protocol should be conducted once to determine the number of washings that need to be performed to collect deposited aerosols in sampling lines, which is specific to flow rates and aerosol generator. An example of this kind of verification is presented in Section 3.1.4.2.2.

The total collected mass is obtained from the mass deposited inside the sampling line (m_{sl} in kg) and the mass collected on the filter (m_f in kg):

$$C_{bulk} = \frac{m_f + m_{sl}}{V_a} \quad (3.5)$$

where V_a (m^3) is the volume of air sampled over the duration of the experiment. m_f and m_{sl} are also obtained by dissolution in ammonia water and fluorescence spectroscopy measurement and calculated the same way as m_d (Equation (3.3)).

3.2.4 Experimental protocol development for deposition measurement in straight ducts

3.2.4.1 Wiping protocol

3.2.4.1.1 Material. A new type of stencil has been developed that can easily be inserted and fixed on ducts. These are called “masks” and are 3D-printed pieces that delimit the collection surface. Usually, in industrial ventilation networks, hatches are present (for maintenance for example) to give access to the inside of the ducts: the masks can be inserted into the duct through these hatches and then fixed on the duct surface after the deposition experiment. For example, on galvanized steel ducts, magnets can be used to fix the masks to the ducts. The measurement is performed in two steps: a “blank” measurement after cleaning the considered surface, and the deposition measurement after the experiment. These two measurements need to be done at exactly the same place, so a specific mask is used for each step. The 3D-printed “blank” masks must have a slightly larger inner surface than the deposition masks to ensure wiping across the entire deposition surface (see example showing the disappearance of green

lines in Figure 3.2). Each mask is associated with a “stamp” to hold the wipe (Figure 3.3 on the left and Figure 1.5).

As masks are 3D-printed, they can easily be adapted to any type of duct, such as circular ducts for example (Figure 3.3 on the right).

The masks and stamps used for the blank measurement and the collection of aerosols after deposition are washed with tap water after each experiment to ensure their cleanliness. They are then dried in an oven at 25°C minimum for at least 24 hours.

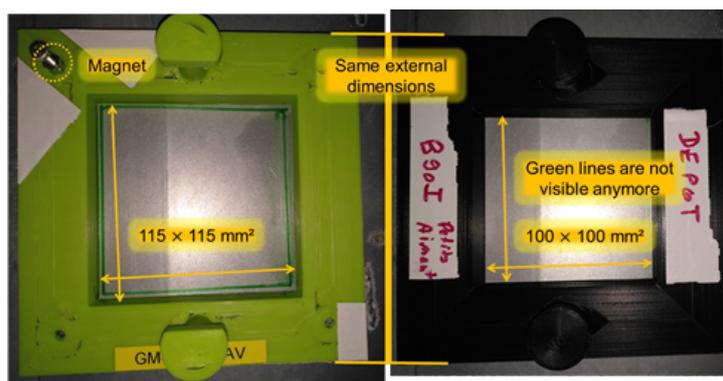


Figure 3.2 – 3D-printed blank mask (left) and deposition mask (right)

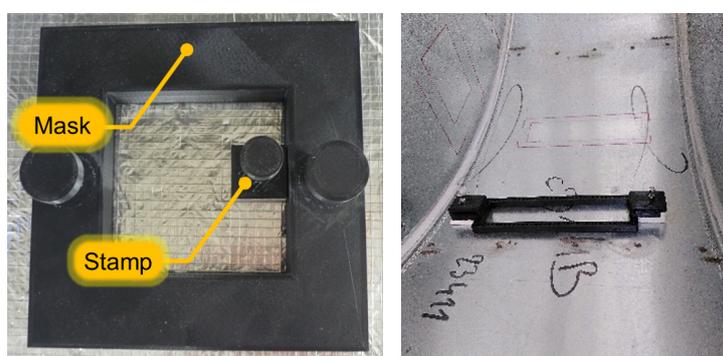


Figure 3.3 – Example of a mask and its stamp (left) and a curved mask fixed on a curved duct (right)

To wipe the surface delimited by the mask, i.e. the collection surface, a wipe is held on the stamp by the operator (Figure 3.4). Both the use of solid masks and the use of a stamp contribute to reducing any potential contamination of the wipe, compared to existing protocols (Ben Othmane, 2011) or washing processes (Sippola et Nazaroff, 2004). The wipe is then humidified with demineralized water. The delimited surface is wiped with the stamp (Figure 3.4) following specific steps for wiping: the edge of the surface is wiped first followed by the inside of the surface. One so-called ‘wiping’ entails performing the two steps twice.



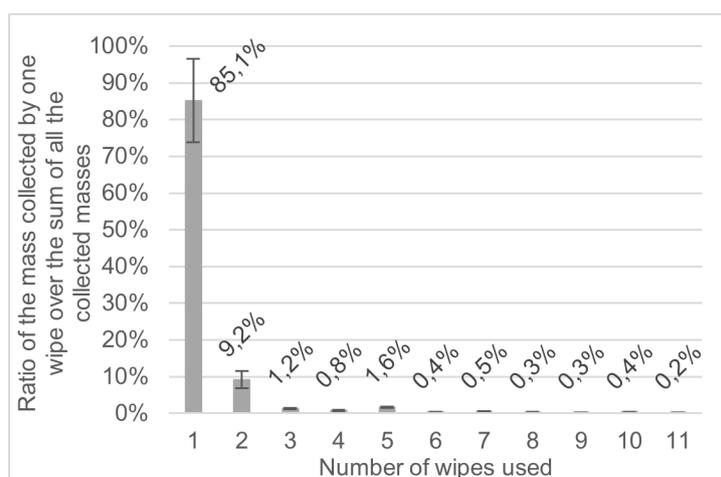
Figure 3.4 – Photograph of an operator performing a wiping

For each experiment, a blank and a deposition measurement are systematically performed and vials are kept in the dark (to avoid degradation of fluorescence by light [Smith et Pretorius 2002](#)) after placing the wipes inside.

3.2.4.1.2 “Blank” measurement. To ensure the cleanliness of the surfaces studied prior to an experiment, each surface is wiped a specific number of times, established after many experiments (see an application of the protocol in Section 3.1.4.2.3): a “blank” measurement is performed after wiping the surface and analyzing the wipe using fluorescence spectroscopy. A criterion has been set for this purpose: the deposited mass collected with the “blank” wiping (m_{d_0} in kg) must be lower than a maximum deposited mass ($m_{d_{0max}}$ in kg) decided based on many preliminary experiments:

$$m_{d_0} < m_{d_{0max}} \quad (3.6)$$

i.e. 10 ng, which corresponds to a deposited concentration of 0.08 ng/cm².

Figure 3.5 – Aerosol collection with each wiping on a galvanized steel surface with deposition around 8 ng/cm²

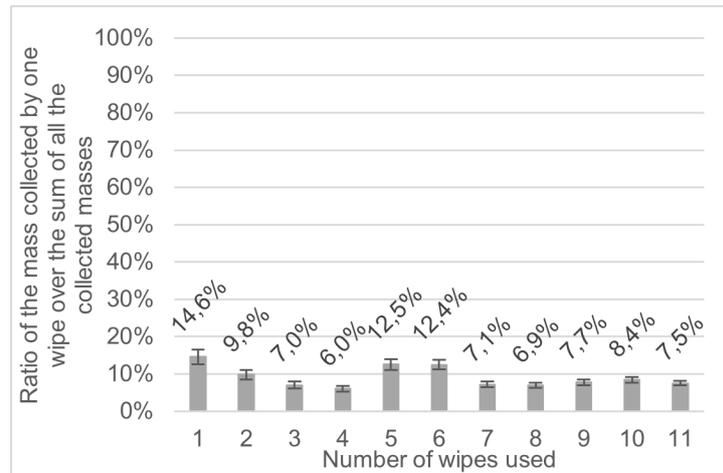


Figure 3.6 – Aerosol collection with each wiping on a galvanized steel surface with deposition around 0.5 ng/cm^2

3.2.4.1.3 Deposition measurement. An important feature of the protocol is the determination of the number of wipings needed to ensure the full collection of deposited aerosols. Preliminary experiments have shown, as expected, that the number of wipings depends on the deposited concentration. For this purpose, a specific protocol is thus applied once to determine how many wipings need to be performed: each wipe used to collect aerosols is put in its own vial and analyzed by fluorescence spectroscopy. The results for each wipe (i.e. two wipings of the surface) used on a surface with much deposition ($C_d \sim 8 \text{ ng/cm}^2$) on the duct after deposition of an aerosol with a mean mass median aerodynamic diameter (mean MMAD) of around $3 \mu\text{m}$ is presented in Figure 3.5. The results may lead to the conclusion that 10 wipes are enough to collect all deposited aerosols; however, Figure 3.6 shows that the decrease of collected deposition on the wipes for a surface with little deposition ($C_d \sim 0.5 \text{ ng/cm}^2$) is not as direct. Consequently, 10 wipings ensure the full collection of deposited particles. This result is important since in previous study, the number of wiping was not given as a function of the collected mass. Furthermore, to verify that all particles are collected, a criterion has been set regarding the last wipe: the deposited mass collected with the last-used wipe, considered to be the residual mass (m_{d_n} in kg), must be lower than 20% of the sum of the deposited mass collected with each wipe (m_{d_i} in kg):

$$m_{d_n} = 20\% \sum_{i=1}^n m_{d_i} \quad (3.7)$$

where i is the number of wipes. The 20% value has been determined after many experiments applying this protocol.

Finally, the protocol developed here is described as follows (Table 3.1): the delimited surface is wiped 11 times using 7 wipes: wipe #1 is used for 1 wiping; wipes #2 to #5 are used for 2 wipings, as the wipe is not saturated in fluorescein and this step enables the operator to save time; wipe #6 is used for 1 wiping. These first 6 wipes (corresponding to 10 wipings) are put in vial #1, which will provide $\sum_{i=1}^{n-1} m_{d_i}$ in Equation (3.7). Wipe #7, which will provide m_{d_n} in Equation (3.7), is used for 1 wiping and is put in vial #2 to verify that all deposited aerosols have been collected. A specific volume of ammonia water is put in each vial (usually for $C_d \geq 0.4 \text{ ng/cm}^2$: 50 mL in vial #1 containing 6 wipes and 10 mL in vial #2 containing 1 wipe) for a later fluorescence spectroscopy analysis.

Table 3.1 – Number of wipings for aerosol deposition collection

Vial number	Number of wipings	Wipe number	
	1	#1	
#1	2 for each wipe	#2 to #5	$\sum_{i=1}^{n-1} m_{d_i}$
	1	#6	
#2	1	#7	m_{d_n}

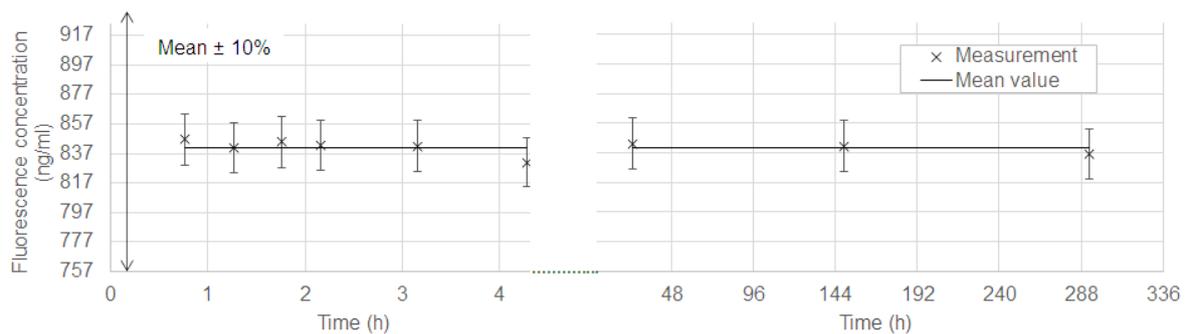


Figure 3.7 – Fluorescence measurement evolution over time

Depending on the duct material, the surface roughness could entail a modification of the number of wipings required to collect all deposited particles.

3.2.4.2 One-time verifications

3.2.4.2.1 Cleanliness of ammonia water distribution. Before each distribution of ammonia water, a fluorescence spectroscopy measurement of ammonia water is performed. The measured value is below the detection limit of the spectrometer.

3.2.4.2.2 Cleanliness of the vials. A specific volume of ammonia water is put in the vial and analyzed by fluorescence spectroscopy after some time. The measurement provides the same value as ammonia water itself (background noise of the spectrometer): unused vials are clean regarding fluorescent particles.

3.2.4.2.3 Cleanliness of the wipes. One unused wipe is put in a vial and six unused wipes are put in a vial. Then, a specific volume of ammonia water is added in each vial. After an interval to allow for virtual dissolution, the ammonia water is analyzed, and the fluorescence spectrometer used to detect fluorescent masses of 0.24 and 0.21 ng respectively. We consider these two values as our background limit.

3.2.4.2.4 Fluorescence stability over time. A verification of the stability of fluorescence in the vials is performed over more than 240 hours of dissolution. For this purpose, a filter with fluorescent aerosols is placed in a dissolving volume and fluorescence is measured at different times following dissolution. The vial is kept in the dark between all the measurements and in the same place to avoid temperature variation. Stability of fluorescence is verified, as presented in Figure 3.7, for a duration of almost 300 hours.

3.2.4.3 Uncertainty calculation

Uncertainties of J and C_{bulk} are calculated from Equations (3.1), (3.2), (3.3), (3.4) and (3.5).

Table 3.2 – Bias errors and absolute uncertainties for each parameter involved in the deposition velocity expression

C_v	Bias error E_{jC_v} :	$E_j = a_{E_j} \times I + b_{E_j}$
	$C_{v_{corrected}} = C_v - E_{jC_v}$	
	Fluorescence spectrometer uncertainty u_{sp}	$u_{sp} = \frac{a_{U_{sp}} \times I + b_{U_{sp}}}{2}$
V	Uncertainty calculated with a rectangular law with the precision of the bottle top dispenser	$\sqrt{N_{use}} \times \frac{P \times V_{max}}{\sqrt{3}}$
L	Uncertainty calculated with a rectangular law with a set MPE for one side of the collection surface ($S = L \times l$); must be applied for l too	$\frac{MPE_L}{\sqrt{3}}$
Δt	Uncertainty calculated with a rectangular law with a set MPE	$\frac{MPE_{\Delta t}}{\sqrt{3}}$
V_a	Bias error E_{jV_a} linked to the sampling flowrate Q_i :	
	$V_{a_{corrected}} = V_a - E_{jV_a}$	
	Rectangular law with a set MPE	$\frac{MPE_V}{\sqrt{3}}$

Table 3.2 presents the calculations to obtain bias errors and absolute uncertainties of each parameter involved in deposition velocity calculation, where a_{E_j} , b_{E_j} , $a_{U_{sp}}$ and $b_{U_{sp}}$ values come from the calibration certificate (home calibration process based on 5 calibration solutions and three measurements performed by three different operators); V_{max} and the precision of the bottle top dispenser P are provided by the supplier (the bottle top dispenser is the device used to dispense specific amounts of ammonia water for fluorescent particle dissolution); N_{use} is the number of times the bottle top dispenser is used; L is one side of the collection surface; Maximum Permissible Errors (MPEs) are chosen wisely by the operator; $V_{standard_{Q_i}}$ is the volume sampled by the standard volumetric gas meter at Q_i flowrate. Values of the uncertainties used in this study are given in Section 3.1.4.2.2.

Mean MMAD uncertainty includes standard deviation of 5 measurements performed over 30 seconds each. Air speed uncertainty includes time standard deviation of airflow measurement over the duration of the experiment.

For all the graphics, uncertainties are calculated with a confidence interval of 95% (i.e. coverage factor equals 2).

3.2.5 Application on a dedicated facility

3.2.5.1 Experimental test facility ²

3.2.5.1.1 Description. A test facility to study aerosol deposition in industrial-sized ducts was used for the development and validation of the experimental protocol developed. The total length of this network is around 60 m (Figure 3.8). It is a ventilation network with rectangular ducts and a hydraulic diameter D_h of 48 cm (sections of 400 mm × 600 mm) made of galvanized steel (Figure 3.9) and thermally insulated. This facility enables H13 filtrated air flow (99.95% filtration rate) from 2,000 to 10,000 m³/h by exhaust ventilation, temperature regulation (from 6 to 50°C) and regulation to reduce humidity. An Air Handling Unit (AHU) is installed upstream of the inlet. Hatches and air intake ISO KF flanges provide access to the inside of the facility ducts for deposition measurement (Figure 3.9).

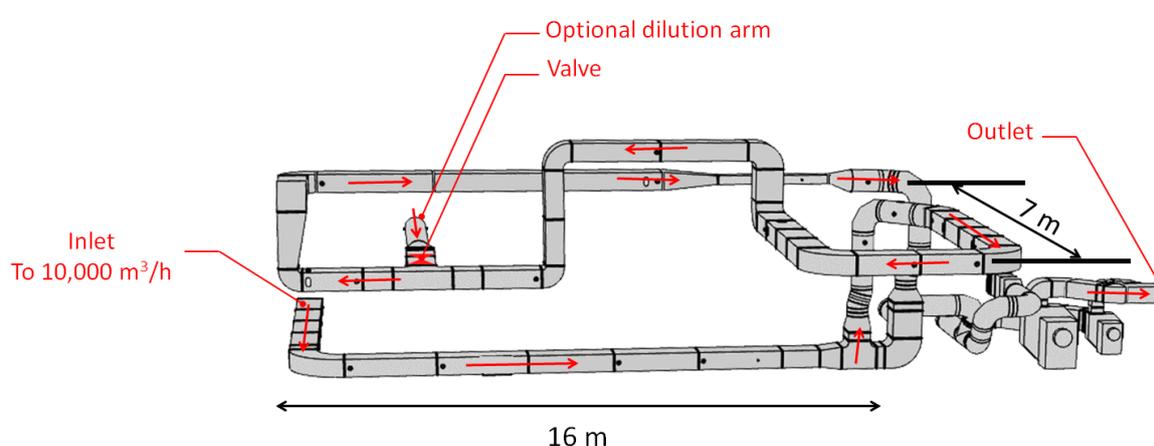


Figure 3.8 – Lateral view of the test facility

3.2.5.1.2 Aerosol generation. Using fluorescence spectroscopy entails the use and tracing of aerosols thanks to a fluorescent molecule: soda-based fluorescein aerosols are generated. Fluorescence spectroscopy associated with wiping also requires an aerosol with a monodisperse size distribution. Ben Othmane (2011) and Sippola et Nazaroff (2004) generated monodisperse fluorescent particles with a Vibrating Orifice Aerosol Generator (VOAG, TSI). However, their experiment durations were very long (several days). In this study, the airflows are much higher than Ben Othmane (2011); Sippola et Nazaroff (2004), so generated concentrations need to be much higher too to avoid very long experiments. To generate high particle concentrations as monodisperse as possible, fluorescent aerosols are generated with: a LIXEA Atomizer (Serie BA – 500 kHz, SinapTec) for mean MMAD of around 2 and 5 μm and a Flow Focusing Monodisperse Aerosol (FMAG 1520, TSI) generator for a mean MMAD of around 10 μm.

2. Cette section (3.2.5.1) est une synthèse de la section de présentation de DIESE et est donc redondante avec la Section 2.1. Le lecteur peut, s'il le souhaite, directement passer à la section suivante (3.2.5.2), page 91.

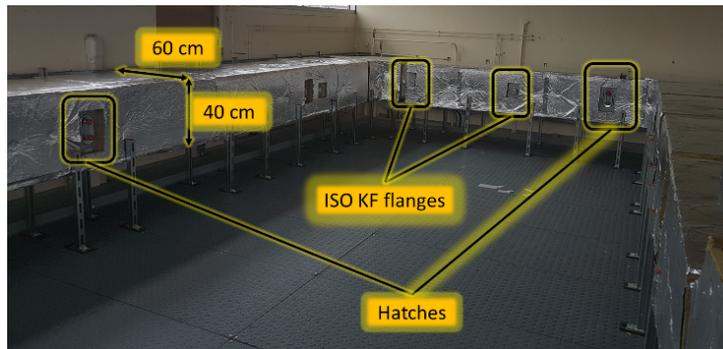


Figure 3.9 – Photograph of a section of rectangular ducts of the test facility

The LIXEA is a generator with a vibrating ceramic. To generate the aerosols with the LIXEA, the atomized solution contains:

- uranine and sodium chloride (NaCl) at a concentration of 1.6 g/L and 14.5 g/L respectively for 2 μm aerosols;
- uranine and sodium chloride (NaCl) at a concentration of 25 g/L and 227 g/L respectively for 5 μm aerosols. The addition of salt allows us to obtain a diameter of 5 μm : a solution with only fluorescein to generate 5 μm aerosols would be too viscous, as the solubility limit of fluorescein would almost be reached.

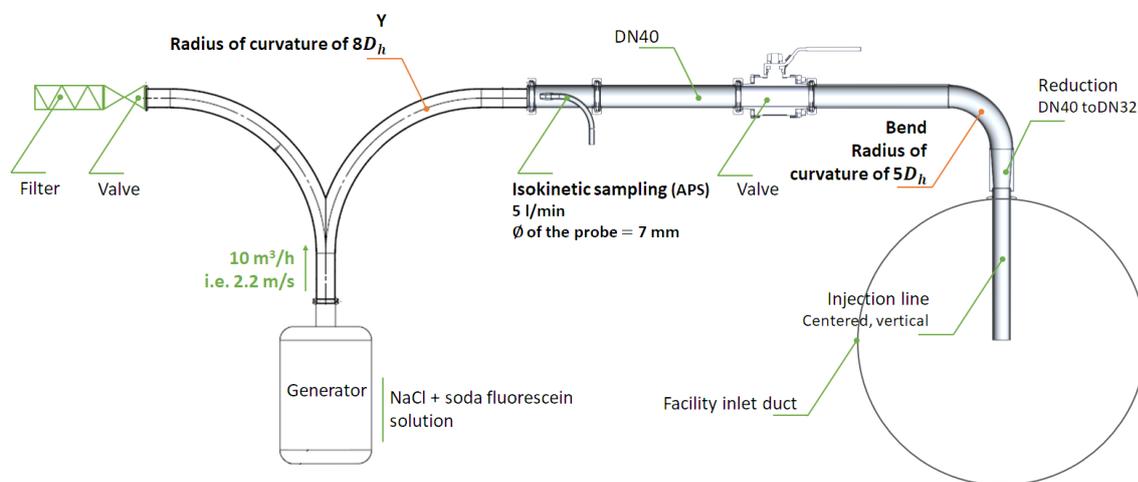


Figure 3.10 – Presentation diagram of the test facility aerosol injection line

The FMAG generates aerosols by using a solution of uranine and sodium chloride (NaCl) at a concentration of 0.5 g/L and 4.7 g/L respectively for 10 μm aerosols.

Generation also relies on the injection line. The injection line designed for the test facility (with the LIXEA as an example) is presented schematically in Figure 3.10. During development of the injection line, the total length and the number of disturbances (valve, bends, and reductions) were minimized to reduce aerosol deposition inside. For this purpose, the curvature ratios of both bends are $8D_h$ and $5D_h$ respectively.

3.2.5.2 Experimental method

3.2.5.2.1 Stages in an experiment using the facility. To perform aerosol deposition tests in straight ducts in the facility, the experimental protocol is based on different steps:

- the first part covers the pre-experiment stages:
 - 30 min of ventilation;
 - the “blank” wiping;
 - the blank analysis; according to the “blank” criterion (Equation 3.6), if the surface is not clean, the wiping process is repeated;
- the second part covers the experiment stages:
 - ventilation and waiting for a dynamic and thermal balance of the clean air;
 - fluorescent aerosol is injected;
 - during the injection, the injected aerosol is sampled for C_{bulk} concentration measurement;
 - aerosol size distribution is measured during the injection duration using an Aerodynamic Particle Sizer (APS 3321, TSI) and an aerosol diluter (Aerosol Diluter 3302A, TSI) by isokinetic sampling in the injection line (Figure 3.10);
 - after the aerosol injection is stopped, the ducts are again ventilated for 30 min;
- the third part covers the post-experiment stages:
 - sampling lines are washed;
 - all the surfaces of interest are wiped;
 - deposited concentrations associated with each surface, each filter and each sampling line are measured by fluorescence spectroscopy.

3.2.5.2.2 C_{bulk} measurement in the facility. During the injection, air is sampled for m_f concentration measurement using a sampling tube of 9 mm diameter (no profiled probes), 55 cm length and a 90° bend on a filter (fiberglass filter, 47 mm diameter). The sampling line is connected to a pump, with flow set to reach isokinetic conditions, and the pump is connected to a volumetric gas meter for V measurement.

For m_{sl} measurement, sampling lines are washed with the same solution used for dissolution of deposited fluorescent aerosols on wipes or filters.

To determine how many times the sampling lines must be washed to collect all aerosols, two sampling lines with a similar deposition quantity within them are first analyzed by measuring deposited mass collected with each washing using fluorescence spectroscopy. The results obtained with 5 mL washing are presented in Figure 3.11a), which presents the mass collected at each washing (m_{sl_i}) divided by the sum of the n mass collected at each washing ($\sum_{i=1}^n m_{sl_i}$), in order to obtain a percentage. The results in Figure 3.11a) could lead us to conclude that the sampling lines are clean after 5 washings. However, as the first five washings are grouped within only one value, the same test is conducted on 3 sampling lines, where the two first have been exposed to similar aerosol concentrations, whereas the third has been exposed to significantly more aerosols. They are washed only 6 times using 10 mL for each washing. Measurements are presented in Figure 3.11b) and clearly show that 5 washings with 10 mL are sufficient to consider the sampling lines clean.

Three washings might be sufficient, but 5 washings are performed here to provide more confidence in the results.

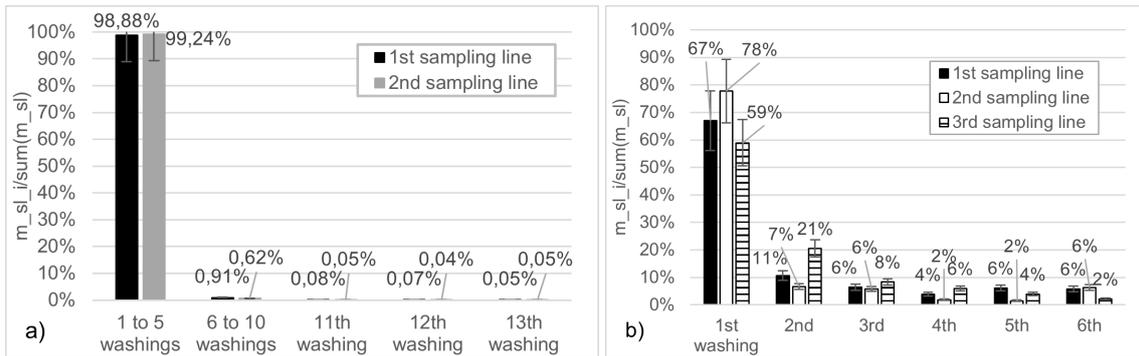


Figure 3.11 – Collection of deposition in sampling lines by washing with a) 5 mL washing and b) 10 mL washing

3.2.5.2.3 Wiping protocol application. In the rectangular ducts of the facility, deposition velocity is measured on one surface of each wall: on a surface of the floor of the duct, on a surface of the ceiling and a surface on each vertical wall (one on the left wall regarding the flow direction and one on the right).

Masks are inserted into the ducts through access hatches measuring 100 mm × 200 mm. The inner surface of the blank mask is 115 mm × 115 mm. For deposition collection, masks have an inner surface of 100 mm × 100 mm (Figure 3.2). On the back of the masks, some holes enable us to attach magnets on the galvanized steel walls of the ducts.

The wiping process is performed using wipes designed for delicate tasks (Kimtech™ Science). The number of wipings to ensure a valid blank measurement in the facility with a 400 mm × 600 mm duct is presented in Table 3.3.

Table 3.3 – Usual number of wipings performed for blank measurement in the facility

Surface orientation	Number of wipings
Ceiling	10
Floor	20
Vertical (left and right)	15

For fluorescence spectroscopy, a FLUO LOG Handheld (ESE) with a FLUO SENS DD 005 f6 (ESE) spectrometer are used.

Values set for uncertainty calculations are listed in Table 3.4 regarding uncertainties for each parameter involved in the deposition velocity expression (Table 3.2).

3.2.5.3 Repeatability

The last step in validating the experimental protocol of aerosol deposition measurement in industrial-sized ventilation ducts is to check the repeatability of the deposition velocities obtained. For this purpose, we verify:

- the stability of the generated diameter;
- the stability and repeatability of aerosol dilution in the duct;

- the repeatability of deposition velocity results.

The next sub-parts each focus on these aspects.

Table 3.4 – Values of uncertainty parameters

Parameter	Uncertainty parameter	Value
$L = l \sim 100$ mm (square collection surface)	$MPE_L = MPE_l$	4 mm
$\Delta t \sim 30$ min	$MPE_{\Delta t}$	10 s
V_a	MPE_V	3.5% of V_a
V	P of the $V_{max} = 100$ mL bottle top dispenser	0.5% of the read value
	P of the $V_{max} = 10$ mL bottle top dispenser	0.5% of the read value

3.2.5.3.1 Stability of the generated aerosol diameter. To check if the generated aerosol diameter is stable over time, the size distribution of the generated aerosol is measured during an injection in the test facility by sampling particles every 60 seconds 30 times, for a total measurement time of 30 minutes.

Mean MMAD and geometric standard deviation (GSD) are measured using an APS combined with a diluter (3321 and 3302A respectively, TSI). Figure 3.12 shows 30 size distributions and that the stability is verified. The stability of the generated mass flow is not of interest, as the deposition measurement is performed over the same duration as the sampled volume concentration, assuming that deposited mass fluctuation is proportional to generated mass flow fluctuation.

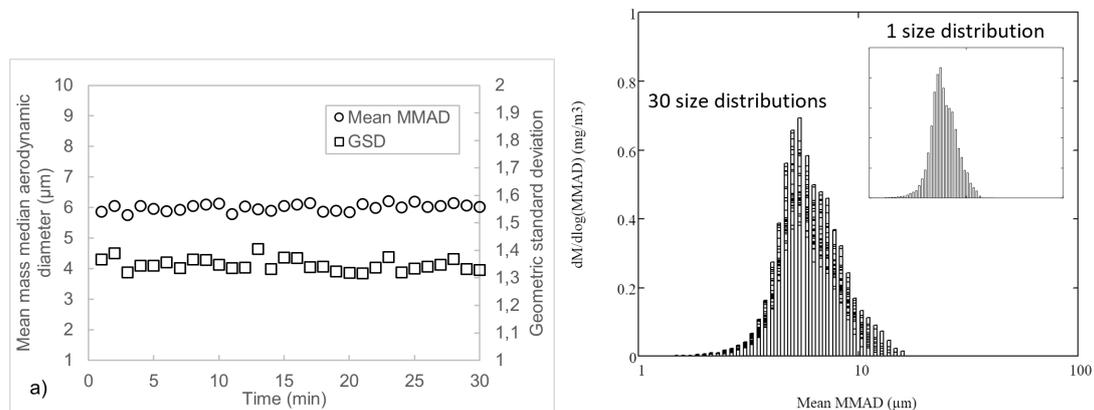


Figure 3.12 – a) Mean MMAD and GSD over 30 minutes and b) example of measured size distributions over 30 minutes

3.2.5.3.2 Aerosol dilution in the facility. The air speed profile in one location must be the same from one experiment to the next. Profiles of the horizontal component of the duct air speed $8D_h$ downstream of a flow disturbance on different days for the 4 flow rates (air speed from around 3 to 11 m/s) are measured and presented in Figure 3.13(a). The 'R' at the end of some key entries means that these curves are reproductions of profiles with the same name. Nondimensionalized profiles are

presented in Figure 3.13(b). The air speed profiles are repeatable and self-similar.

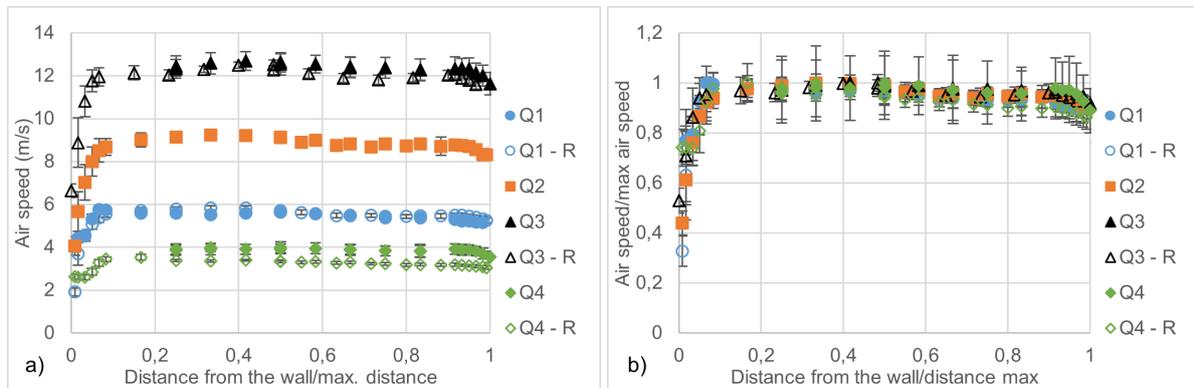


Figure 3.13 – Air speed profiles at different flow rates and their reproduction (a) and nondimensionalized profiles (b)

3.2.5.3.3 Repeatability of deposition velocity. Deposition velocities obtained in three experiments are plotted in Figure 3.14. The variation between the three experiments is lower than 6%. Deposition velocities are considered repeatable.

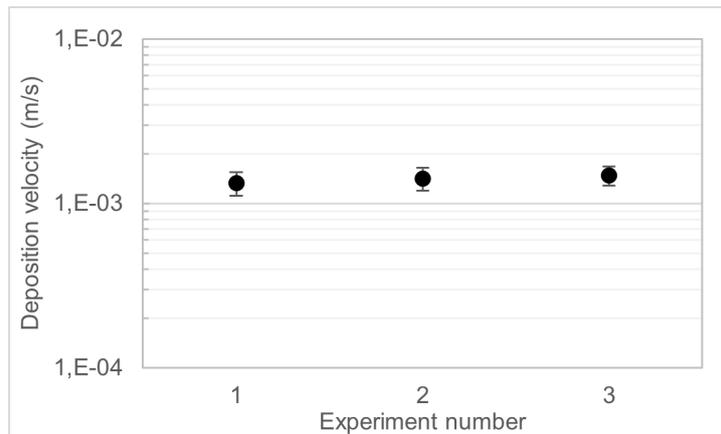


Figure 3.14 – Repeatability of deposition velocities at $5D_h$ after a flow disturbance on duct floor for a $2.7 \mu\text{m}$ mean MMAD, around 1.4 GSD and air speed around 11 m/s

3.2.6 Validation and outlooks

We apply the calculated uncertainties (Table 3.2 and Table 3.4) for the Figure presented in this section. It is difficult to compare the results obtained in this study to other experimental studies in the literature, because, on the first hand, the facility used in this study is made of industrial ducts, and thus has industrial surfaces with inhomogeneous roughness. On the other hand, the two studies we compare our work with focus on square galvanized steel ducts (Sippola and Nazaroff's study 2004) and circular stainless steel ducts (Ben Othmane's study 2011), opposed to the rectangular galvanized steel ducts in the test facility (secondary flows appearing in square and rectangular ducts Gessner et Jones 1965; Vidal et al. 2017; Duda et al. 2020). Finally, Sippola and Nazaroff's ducts have $D_h = 15.2 \text{ cm}$ and

Ben Othmane's = 25 cm, which are much smaller than the 48 cm D_h of the test facility ducts. Consequently, the flows are very different from one study to another: turbophoresis deposition mechanism can have a strong influence on deposition, thus showing the importance to have a very detailed measurement protocol. This comparison to two studies allows us to validate the orders of magnitude of the results obtained.

Figure 3.15 shows the deposition velocities of Sippola and Nazaroff (2004), Ben Othmane (2011), and this study, for flow velocities from 2 to 12 m/s and, in this study, mean MMADs of $2.70 \pm 0.04 \mu\text{m}$ and $6.30 \pm 0.07 \mu\text{m}$ (i.e. 3 and 6 μm) obtained on floor surface. Sippola and Nazaroff do not specify in their paper if the diameter indicated is a mean MMAD or some other value. Ben Othmane's diameter is the volume equivalent diameter.

The results show close deposition velocities between Sippola and Nazaroff's (2004), Ben Othmane's (2011) measurements and this study on the floor surface. As the aerosols studied are inertial (mean MMAD higher than 1 μm), the closeness of the different results on the floor surface is consistent as in this case the gravity is the main deposition mechanism.

In all the cases in this study, the results clearly show an increase in deposition velocity with increases in both air speed and particle size. Results are consistent for each flow velocity with an aerosol of 3 μm . For a given speed velocity, doubling particle size in this study's facility induces an increase in deposition velocities by factors from 2.5 to 14.

Deposition velocities increase the most with an increase of air speed for an aerosol of 6 μm from 3.7 to 11 m/s, by factors from 3.7 to 11.

With such a protocol, aerosol deposition can be determined in situ on real industrial plants, as it is done for gas tracing for ventilation balancing for example (DIN EN 12599, 2013). Indeed, gas tracing provides airflow measurements by injecting helium in industrial ventilation network. In the same way, aerosols could be injected in industrial ventilation ducts by following this method and requirements:

- to have access to the inside of the ducts, through hatches and flanges, for example;
- to stop the network for a few hours for blank measurement and sampling lines installation purposes;
- to switch ventilation on for a few hours for aerosol injection;
- to stop the network a second time after deposition for aerosol deposition collection.

From an aerosol point of view, one would need:

- an aerosol generator;
- magnetic 3D-printed masks adapted to the geometry of the ducts;
- sampling lines.

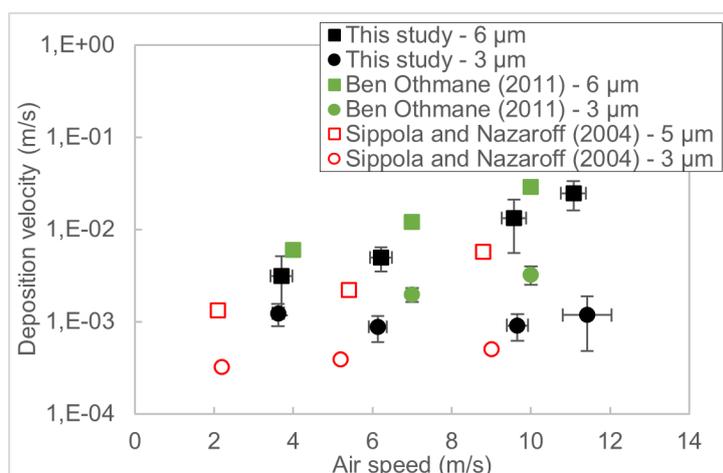


Figure 3.15 – Deposition velocity comparison between this study, **Ben Othmane (2011)** and **Sippola et Nazaroff (2004)** for 2 particle sizes on duct floor

3.2.7 Conclusion

In this paper, we present the development, validation, and application of an experimental protocol for measuring aerosol deposition on inner surfaces of industrial-sized ventilation ducts with a view to wider application in different ventilation networks. This protocol leads to the determination of aerosol deposition velocity. Fluorescence spectroscopy analysis combined with wiping was chosen as the measurement technique; and the aerosol and injection processes were chosen to be a fluorescent aerosol generated with the most monodisperse size distribution possible and a stable mean MMAD and GSD aerosol generator. This technique provides a local, very sensitive and, especially, non-intrusive measurement of the deposited particles. The last feature has an advantage compared to intrusive techniques regarding the use of the data obtained for the development and use of deposition models. The wiping process was developed and verified to ensure the accuracy and correctness of deposition velocities. Repeatability and validation of the experimental protocol was also checked in an industrial-sized ventilation network.

Compared to other existing protocols for medium-sized ducts, the protocol presented here has the advantage of being easily adaptable to any type of ventilation duct and configuration. With access to the inside of the ducts through hatches, the collection method by wiping can be performed in any case, as 3D-printed masks and stamps can be developed by any operator and their geometries are easily modifiable. Additionally, soda fluorescein does not damage the surfaces of the ducts. Consequently, a method and its requirements were proposed in the previous section to be directly applied in industrial ventilation ducts to measure aerosol deposition.

In other respects, the wiping technique could still be improved. One possibility could be to automate the wiping process to a) save time, as several surfaces could be wiped at the same time and application of the protocol is very time consuming and b) to free up the experimenter during the process. For example, a low-cost automation could be implemented by developing low-cost robots.

Après une analyse de l'état de l'art dans le Chapitre 1 et le choix des techniques et instruments pour la mesure du dépôt dans le Chapitre 2, le protocole expérimental de mesure du dépôt par frottis

a été développé dans ce chapitre. Il nous permet de collecter directement le dépôt des aérosols en gaine, sur la paroi de celle-ci, peu importe son orientation, mais il nous permet également d'évaluer la vitesse de dépôt grâce à un protocole rigoureux de collecte du dépôt dans les lignes de prélèvement. Des critères ont été établis pour assurer la collecte complète des dépôts. De plus, ce protocole a l'avantage d'être adaptable et applicable à d'autres types de gaine, selon leur propre taille et leur propre géométrie.

Ce protocole est cependant dense. En effet, ce protocole se déroule généralement sur trois jours pour l'obtention d'un point de mesure par surface étudiée. La première partie du protocole (cf. Section 3.2.5.2.1) constitue la première journée avec les mesures de bruit de fond et l'installation du matériel et de l'instrumentation (ligne de prélèvement, [APS](#)). L'expérience se déroule le deuxième jour, avec la génération, les frottis de dépôt et la collecte du dépôt dans les lignes de prélèvement. Le dernier jour regroupe toutes les mesures par spectroscopie de fluorescence et le post-traitement.

Dans la suite de ce travail, ce protocole a été appliqué dans les différentes configurations citées dans les chapitres précédents. Le chapitre qui suit se consacre aux mesures des grandeurs aérauliques, et est suivi du chapitre d'analyse des mesures de dépôt conduites, grâce à ce protocole, dans DIESE.

Mesures des grandeurs aérauliques

Sommaire

4.1	Écoulement pariétal	99
4.1.1	Estimation de la vitesse de frottement par la mesure de perte de charge	99
4.1.1.1	Présentation	99
4.1.1.2	Résultats	100
4.1.2	Profil de vitesse en proche paroi	102
4.1.2.1	Résultats	102
4.1.2.2	Estimation de la vitesse de frottement par l'analyse du profil de vitesse en proche paroi	102
4.1.2.3	Modélisation du profil de vitesse fluctuante	106
4.2	Écoulement en gaine — PIV	107
4.2.1	Résultats — Visualisation	107
4.2.2	Résultats à 45° dans le coude CD1-1	112
4.2.3	Résultats à 0,47D _h en aval du coude CD1-1	115
4.2.3.1	Champs horizontaux	115
4.2.3.2	Champs verticaux	118
4.3	Conclusion	121

Ce premier volet de résultats regroupe les mesures des grandeurs aérauliques, soit les résultats obtenus grâce à la mesure par anémométrie à fil chaud en proche paroi et par PIV. La première section s'intéresse donc à la caractérisation de l'écoulement pariétal, pour l'obtention de profils de vitesse en proche paroi, qui sont utilisés comme base expérimentale des modèles semi-empiriques et pour l'estimation de la vitesse de frottement. La seconde section est consacrée à l'étude de l'écoulement global dans le coude et en aval de celui-ci. Les mesures issues de cette étude sont comparées à des premières simulations de CFD, décrites dans [Malet et al. \(2022\)](#), et serviront de base pour la validation de codes.

4.1 Écoulement pariétal

4.1.1 Estimation de la vitesse de frottement par la mesure de perte de charge

4.1.1.1 Présentation

L'objectif est d'obtenir expérimentalement une vitesse de frottement. La vitesse de frottement u^* est couramment utilisée pour l'adimensionnalisation de la vitesse de dépôt (v_d^+) ou de la distance à la paroi (y^+). Cependant, l'origine de sa valeur est rarement décrite et détaillée dans les études.

Une méthode pour déduire expérimentalement la vitesse de frottement consiste à estimer le coefficient de frottement f_F (cf. Équation 1.12), qui s'exprime classiquement :

$$f_F = \frac{\Delta P}{\Delta L} \times \frac{D_h}{2 \times \rho_a \times U^2} \quad (4.1)$$

où ρ_a est calculée selon l'expression :

$$\rho_a = 1,292 \times \frac{273,15}{T} \quad (4.2)$$

Pour mesurer des vitesses de frottement, il faut donc mesurer :

- la perte de charge ΔP entre deux points sur une longueur droite dans la gaine ;
- la longueur droite ΔL entre les deux points de mesure de pression ;
- la température moyenne de l'air dans la gaine T .

Il est également nécessaire de mesurer la vitesse d'air moyenne U , si l'on souhaite obtenir le coefficient de frottement.

4.1.1.2 Résultats

Pour les mesures de vitesses de frottement (et uniquement dans ce cadre) dans DIESE, la plus grande longueur droite de gaine est obtenue en modifiant légèrement l'entrée de l'installation. Sur la Figure 2.1, nous avons vu que l'air entrant par une CTA, suivie d'une longueur droite et d'un coude (Repère 1). Dans cette nouvelle configuration, l'air ne passe dorénavant plus par la CTA et des tronçons droits sont installés pour une prise d'air directement à l'extérieur (Figure 4.1). La mesure de perte de charge est réalisée en paroi, entre deux piquages espacés d'une longueur droite de 9,44 mètres ± 2 cm ($\sim 19,7D_h$), grâce à des pièces imprimées en 3D insérées dans les piquages. La vitesse moyenne est obtenue grâce à une mesure de débit par anémométrie à fil chaud et la température est mesurée par une sonde de température.

La vitesse de frottement est mesurée pour quatre débits. Les mesures de perte de charge et de température sont présentées dans le Tableau 4.1 et correspondent aux moyennes obtenues sur 5 minutes de mesure échantillonnées à 1 Hz. L'écart-type donné dans le Tableau 4.1 est l'écart-type sur les 300 valeurs. Le manomètre utilisé est un SPI2-100 (installé sur un capteur multifonction C310, KIMO), dont la précision est de $\pm 0,8$ Pa pour une mesure sur une gamme de pression de -100 à 100 Pa.

Le Tableau 4.2 explicite les coefficients et vitesses de frottement obtenus en utilisant les Équations 1.12, 4.1 et 4.2. On remarque que les incertitudes obtenues sur la vitesse de frottement sont très élevées et varient de 34 à 88% pour un intervalle de confiance de 95%. Ces résultats doivent donc être considérées comme des estimations de la vitesse de frottement.

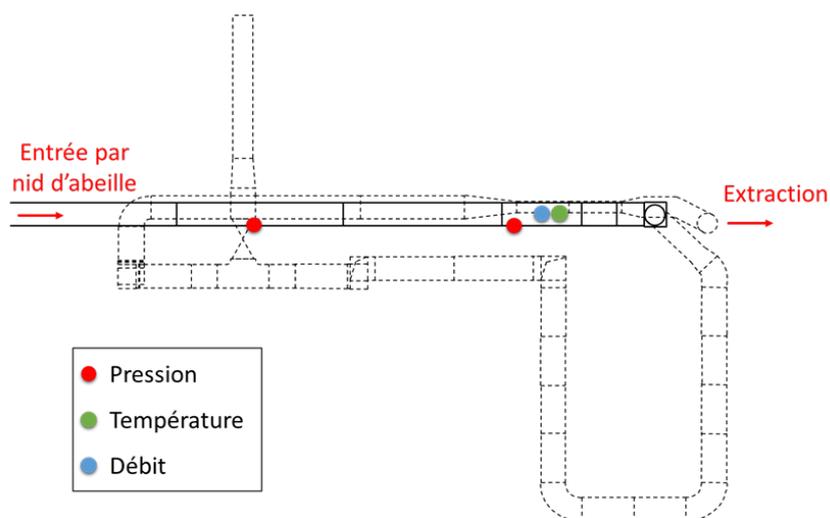


Figure 4.1 – Configuration de DIESE pour la mesure de perte de charge et emplacements des mesures de pression, température et débit

Tableau 4.1 – Estimation de la vitesse de frottement — Mesures de pression, température et débit pour les quatre débits d'étude

Q (Nm ³ /h)	ΔP			T			U		
	ΔP (Pa)	σ^i (Pa)	σ (%)	T (°C)	σ (°C)	σ (%)	Débit (m ³ /h)	σ (m ³ /h)	σ (%)
Q1	5,0	1,8	36%	29,4	0,3	0,1%	5599	86	1,5%
Q2	11,5	2,8	25%	29,0	0,4	0,1%	8707	150	1,7%
Q3	15,6	4,1	27%	28,4	0,3	0,1%	10220	139	1,4%
Q4	1,9	1,1	55%	29,4	0,2	0,1%	3437	73	2,1%

ⁱ σ = Écart-type

Tableau 4.2 – Coefficients et vitesses de frottement obtenues expérimentalement pour les quatre débits d'étude

Débit et vitesse de consigne dans DIESE (m/s)	Coefficient de frottement f_F	Vitesse de frottement u^* (m/s)	Incertitude relative sur u^{*i} (%)	
Q1	5,8	$2,58 \times 10^{-3}$	0,23	25,6%
Q2	9,1	$2,45 \times 10^{-3}$	0,35	17,9%
Q3	10,7	$2,42 \times 10^{-3}$	0,41	17,6%
Q4	3,6	$2,62 \times 10^{-3}$	0,14	44,2%

ⁱ Le coefficient d'élargissement est égal à 1 pour les incertitudes présentées, soit un intervalle de confiance de 68%.

4.1.2 Profil de vitesse en proche paroi

Après application du protocole présenté en Section 2.2.2 (page 66), des mesures au fil chaud haute fréquence en proche paroi (déplacement selon l'axe y) sont réalisées à différents débits environ $7,5D_h$ en aval d'un coude et $2,5D_h$ en amont d'un autre coude. En raison de contrainte de temps, trois débits sont étudiés et les essais ne sont pas reproduits : les débits étudiés sont Q1, Q3 et Q4 (cf. Tableau 2.1 page 54).

4.1.2.1 Résultats

Les profils de vitesse moyenne longitudinale, de vitesse fluctuante et d'intensité turbulente sont présentés Figure 4.2 de haut en bas.

Les barres d'erreur sur les profils de vitesse longitudinale (Figure 4.2, en haut) correspondent à 1 écart-type. Il existe une certaine incertitude sur la position $y = 0$, qu'il n'a pas été possible de définir. Il a été considéré que la position $y = 0$ était atteinte lorsque l'affichage de l'état du fil chaud basculait en « défaut ». Cet affichage en défaut pourrait venir, soit du fait que le fil chaud touchait effectivement la paroi, soit des vibrations.

La vitesse fluctuante passe par un maximum dans les 5 mm proches de la paroi (Q4 : 0,3 m/s; Q1 : 0,7 m/s; Q3 : 1,0 m/s), de même que l'intensité turbulente, qui atteint un pic d'environ 24% quel que soit le débit. En s'éloignant de la paroi, l'intensité turbulente diminue et atteint une valeur de 7% quel que soit le débit.

Ces mesures sont préliminaires et il conviendra, à l'avenir, de vérifier les effets de :

- la température, celle-ci étant figée par l'utilisateur dans le logiciel ;
- l'encombrement, dû à la présence du dispositif dans la gaine : le fil chaud est environ à 12 cm en amont du rail et déporté d'environ 7 cm vers la paroi ;
- des aspérités de surface, même si la zone choisie est à plus de 50 cm d'une trappe.

L'analyse pourra donc être poursuivie. À notre connaissance, il s'agit cependant des premières données mesurées à cette échelle pour des gaines de ventilation dans le cadre d'études sur le dépôt d'aérosols. Ce type de mesure est rarement présenté dans les études sur le dépôt, dans lesquelles la vitesse de frottement est peu décrite.

4.1.2.2 Estimation de la vitesse de frottement par l'analyse du profil de vitesse en proche paroi

La mesure de la vitesse de frottement par celle d'un profil de vitesse en proche paroi est connue depuis longtemps (Clauser, 1956), mais fait encore, de nos jours, l'objet de nombreuses publications. Il est communément admis qu'il faut réaliser un ajustement de ce profil pour estimer u^* . On admet aussi que le profil se décompose en une sous-couche visqueuse ($y^+ < \text{environ à } 5$), une zone de transition ($5 < y^+ < 30$) et une zone logarithmique.

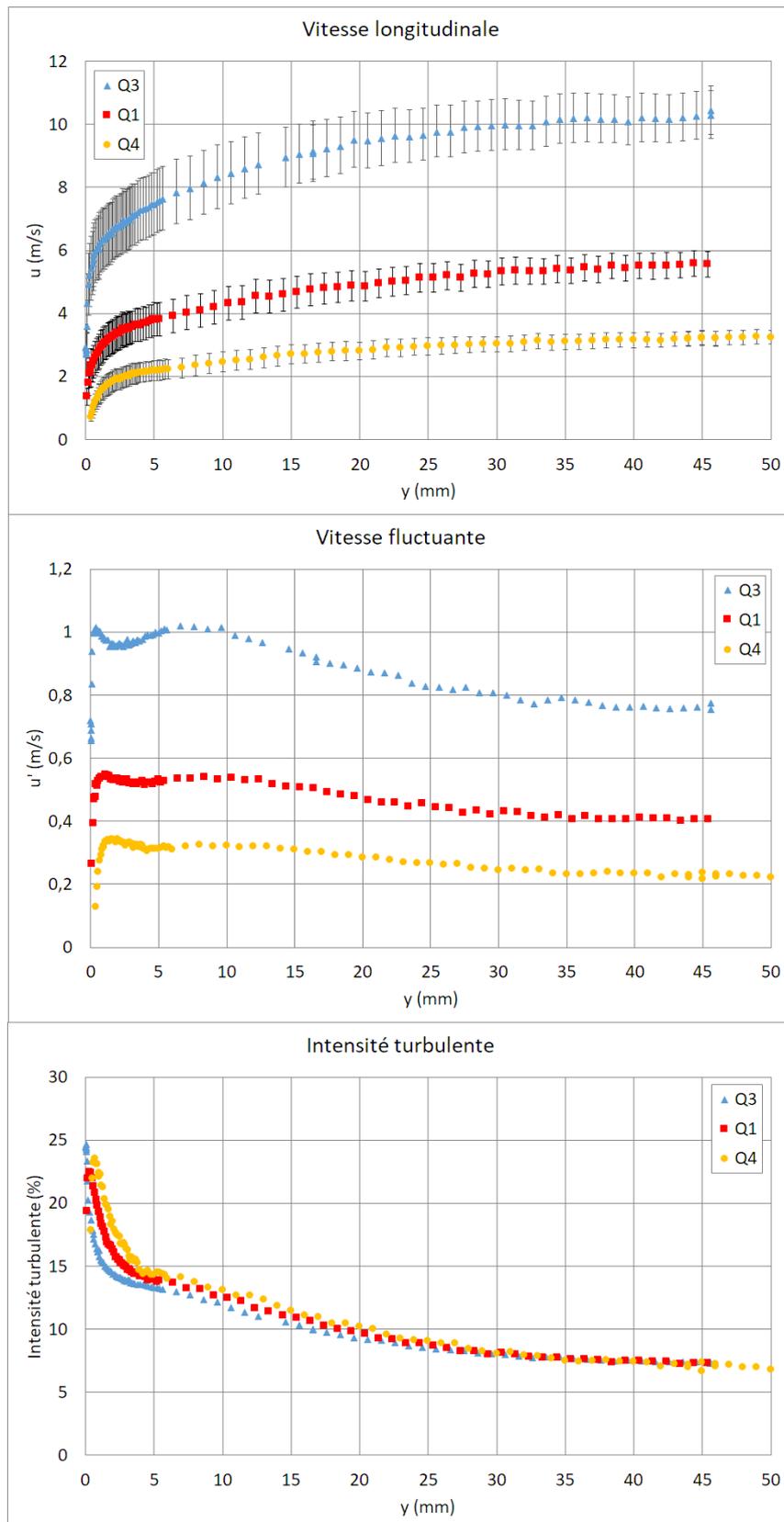


Figure 4.2 – De haut en bas : profils de vitesse longitudinale, de vitesse fluctuante et d'intensité turbulente en proche paroi

Dans la zone logarithmique, le profil de vitesse moyenne longitudinale s'exprime sous la forme d'une loi logarithmique :

$$\frac{u(y)}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{(y - y_{0_{log}}) \times u^*}{\nu} \right) + B \quad (4.3)$$

où $u(y)$ est la vitesse à chaque position y , $y_{0_{log}}$ est la limite basse de la zone logarithmique de la couche limite, κ est la constante de von Kármán, et B est une constante. Généralement, κ est égal à 0,41 et B est égal à 5 pour des parois lisses, même si ces deux constantes font aussi l'objet de nombreuses études. Les valeurs de ces constantes pour des parois rugueuses ne font pas consensus non plus, avec κ compris entre 0,39 et 0,41 et B pouvant atteindre 9.

Plusieurs études ont proposé des améliorations de cette loi, afin de prendre en compte la rugosité (Brereton, 1989; Schultz, 2002; Connelly et al., 2006) :

$$\frac{u(y)}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{(y - y_{0_{log}}) \times u^*}{\nu} \right) + B - C \quad (4.4)$$

où C est la constante qui tient compte de la rugosité.

Comme nous ne connaissons pas la valeur exacte de la rugosité des gaines de DIESE, pour estimer u^* , il faut réaliser un ajustement des données, où, en toute rigueur, les paramètres de l'ajustement sont u^* , $y_{0_{log}}$, κ , B et C . Ceci rend les résultats de l'ajustement particulièrement variables, avec des incertitudes fortes sur u^* . Récemment, Rodríguez-López et al. (2015) ont proposé une méthode complexe pour ajuster ces cinq paramètres, et Sanmiguel Vila et al. (2017) ont même proposé de s'affranchir de la mesure complète du profil. L'interprétation des mesures présentées ici a été réalisée de deux façons différentes :

1. l'ajustement est fait dans la zone logarithmique ($y_{0_{log}} = 30$) à partir de l'Équation 4.3, en fixant $\kappa = 0,41$ et $B = 5$;
2. l'ajustement est fait dans la zone logarithmique ($y_{0_{log}} = 30$) à partir de l'Équation 4.4, en fixant $\kappa = 0,41$ et $B = 5$.

On réalise les deux régressions (logiciel CurveExpert Basic v.2.2.3) pour chaque débit pour obtenir les valeurs de la vitesse de frottement.

La Figure 4.3 montre la superposition des profils de vitesse obtenus aux différents débits lors de l'utilisation de chacune des deux modélisations.

Les résultats sont présentés sur la Figure 4.3 et les vitesses de frottement u^* déduites dans le Tableau 4.3.

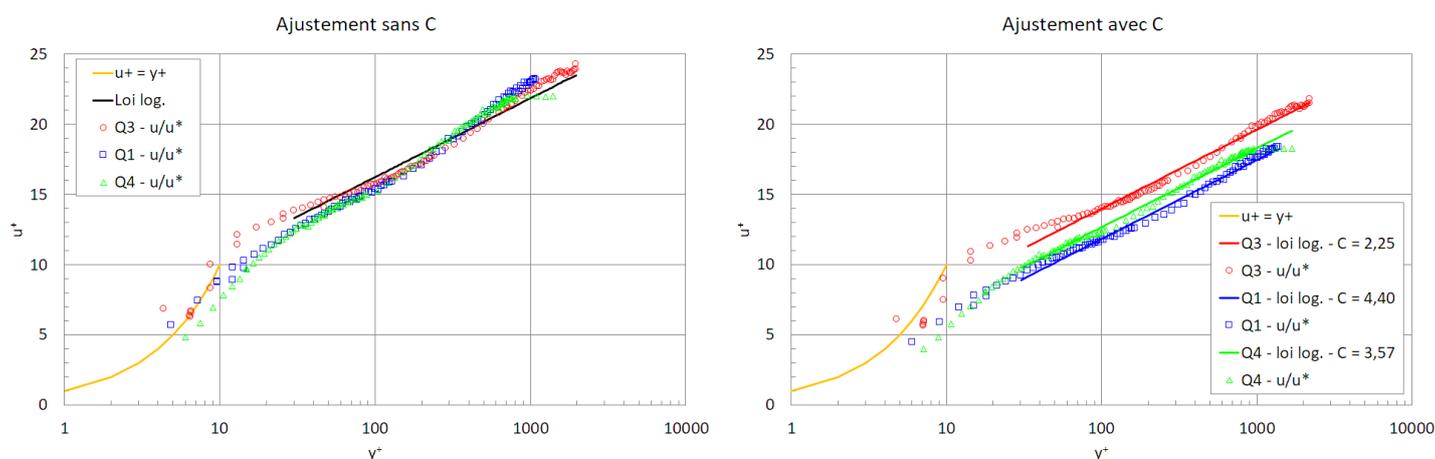


Figure 4.3 – Profils de vitesse adimensionnée et lois logarithmiques obtenus pour chaque débit à partir des Équations 4.3 (à gauche) et 4.4 (à droite)

Tableau 4.3 – Valeurs des vitesses de frottement et des coefficients de régression liées aux quatre modélisations du profil de vitesse en proche paroi

Débit	Débit de DIESE		Équation 4.3		Équation 4.4		
	U (m/s)	Re	u^* (m/s)	R^2	u^* (m/s)	C	R^2
Q1	5,8	280 000	0,24	0,95	0,30	4,40	0,99
Q3	10,7	515 000	0,43	0,98	0,48	2,25	0,99
Q4	3,5	200 000	0,15	0,96	0,18	3,57	0,99

Le Tableau 4.4 présente les écarts relatifs obtenus entre les vitesses de frottement déduites des mesures de ΔP (Tableau 4.2) et celles déduites des profils de vitesse longitudinale en proche paroi (Équation 4.3).

Tableau 4.4 – Écarts relatifs entre les vitesses de frottement basées sur la mesure de perte de charge et la mesure de vitesse moyenne en proche paroi

Vitesse de consigne dans DIESE (m/s) (cf. Tableau 2.1 page 54)	Écart relatif par rapport à u^* estimée à partir de la ΔP	
	Via Équation 4.3	Via Équation 4.4
5,8	4,3%	30,4%
10,7	4,9%	17,1%
3,6	7,1%	28,6%

Ces écarts relatifs sont inférieurs à 30%, ce qui valide, en partie, les estimations faites de u^* . Cependant, les incertitudes sont élevées sur l'estimation de u^* par la mesure de ΔP et l'estimation de u^* par la mesure du profil de vitesse en proche paroi est basée sur une modélisation semi-empirique. Il n'existe donc pas de valeurs de référence. Il conviendra de prendre compte cet aspect dans l'adimensionnalisa-

tion des mesures de dépôt. On décide, pour la suite de ce travail, d'utiliser les vitesses de frottement estimées par la mesure de la perte de charge.

4.1.2.3 Modélisation du profil de vitesse fluctuante

Pour décrire les profils de vitesse fluctuante, Guha (1997) propose une expression de la forme :

$$u'^+ = \frac{u'}{u^*} = \frac{a \times y^{+2}}{1 + b \times y^{+c}} \quad (4.5)$$

avec u' la vitesse longitudinale fluctuante de l'air à la position y et a , b et c des constantes.

Cette modélisation nous est utile car, dans le modèle de Ben Othmane *et al.* (2010), le profil de vitesse fluctuante est modélisé sous cette forme. En réalisant une régression, on peut donc ajuster le modèle à notre configuration en prenant en compte nos mesures expérimentales.

Les coefficients a , b , c et les coefficients de détermination R^2 obtenus pour chaque débit sont présentés dans le Tableau 4.5 et les profils expérimentaux et modélisés sont présentés sur la Figure 4.4.

Ces coefficients pourront être utilisés dans le modèle de Ben Othmane *et al.* (2010) lors de son application à DIESE : à chaque changement de débit, il faut modifier la vitesse de frottement et les coefficients de modélisation de la vitesse fluctuante de l'air en proche paroi.

Tableau 4.5 – Coefficients obtenus par régression du profil de vitesse fluctuante selon Guha (1997)

U (m/s) (cf. Tableau 2.1 page 54)	a	b	c	R^2
5,8	0,256	0,087	2,06	0,90
10,7	0,887	0,297	2,05	0,43
3,6	0,050	0,013	2,13	0,95

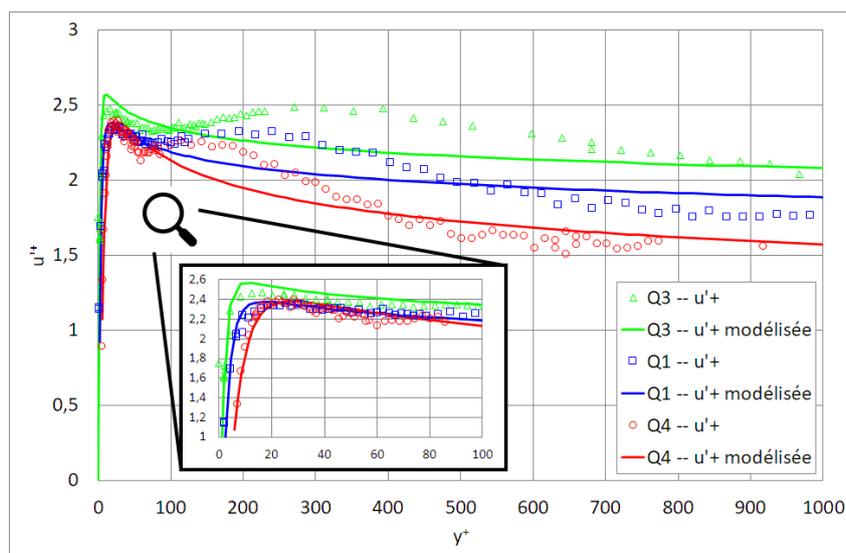


Figure 4.4 – Profils de vitesse fluctuante adimensionnée expérimentaux et modélisés

4.2 Écoulement en gaine — PIV

Le Tableau 4.6 récapitule les différents essais conduits.

Des champs sont observés en aval du coude et dans le coude. Les quatre débits d'étude (Tableau 2.1) sont étudiés à 25% et 50% de la hauteur pour les champs horizontaux et à 25% et 50% de la profondeur de la gaine pour les champs verticaux.

Observer ces champs permet de visualiser l'évolution des profils de vitesses moyennes longitudinale et transverse sur la largeur et la hauteur de la gaine afin de :

- permettre une analyse de l'écoulement dans un coude ;
- constituer une base de données pour la validation des simulations numériques prévues dans le cadre du programme DEPART (Malet et Hare, 2018) de l'IRSN, dans lequel cette thèse s'inscrit.

Dans le coude, des champs horizontaux sont acquis pour obtenir une visualisation des écoulements secondaires et ainsi mieux appréhender l'écoulement global.

Tableau 4.6 – Grille d'essais des mesures PIV

		Coude 45° Champ horizontal	Aval coude Champ horizontal	Aval coude Champ vertical
Position de la nappe en % de la hauteur ou de la profondeur de gaine	25%	Q1, Q2, Q3, Q4	Q1, Q2, Q3, Q4	Q1, Q2, Q3, Q4
	50%	Q1, Q2, Q3, Q4	Q1, Q2, Q3, Q4	Q1, Q2, Q3, Q4
	75%	Q3	Q3	—

4.2.1 Résultats — Visualisation

La Figure 4.5 permet dans un premier temps de présenter visuellement l'écoulement dans le coude, afin de se familiariser avec les écoulements secondaires de premier type qui s'y développent. Les champs de vitesse longitudinale obtenus au débit Q3 (9272 Nm³/h) à une hauteur de 50% dans le coude et dans le conduit droit en aval du coude mettent en valeur cet écoulement secondaire typique du coude. On observe une accélération du flux d'air à 45° du coude au niveau de la paroi intérieure. En longeant la paroi intérieure vers l'aval, une boucle de recirculation apparaît, où la vitesse est faible.

Dans un second temps, en combinant les mesures obtenues par PIV et celles obtenues grâce à un fil chaud industriel 1D (1 Hz, CTV210, KIMO) (Malet et al., 2022), on peut observer l'évolution des profils de vitesses longitudinale et transverse de l'amont à l'aval du coude, suivant x , x' et x'' , pour le débit Q1 à mi-hauteur de la gaine par exemple. Les mesures au fil chaud complètent les mesures longitudinales à certaines localisations où il n'y a pas de données par PIV. Les localisations des profils et les repères utilisés pour chaque graphique sont présentés sur la Figure 4.6.

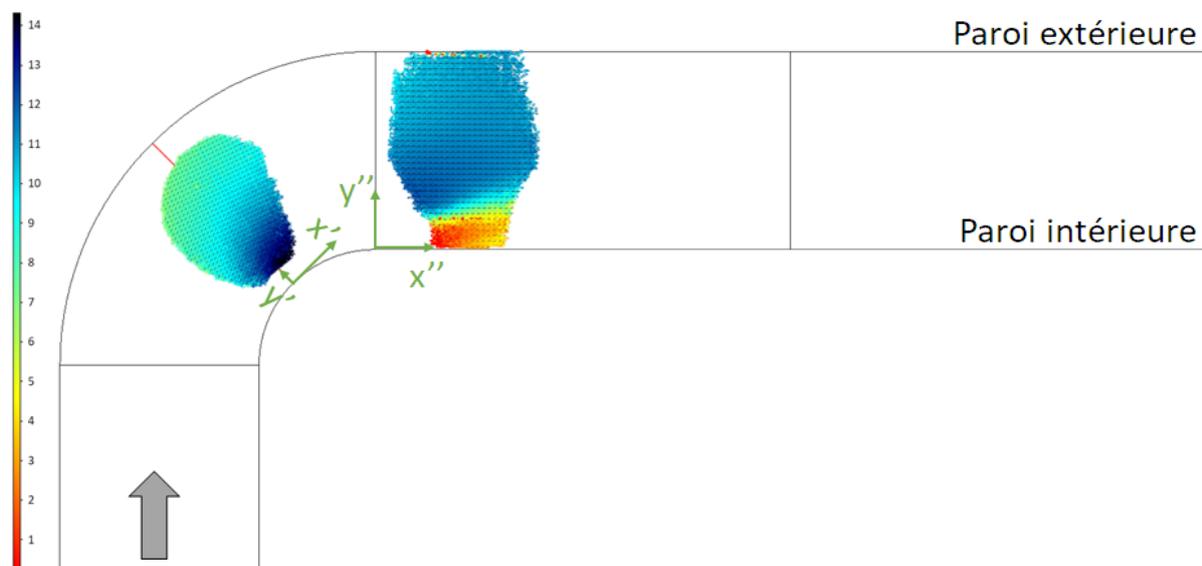


Figure 4.5 – Visualisation des champs moyens de vitesse longitudinale (m/s) obtenus par PIV dans le coude et en aval du coude

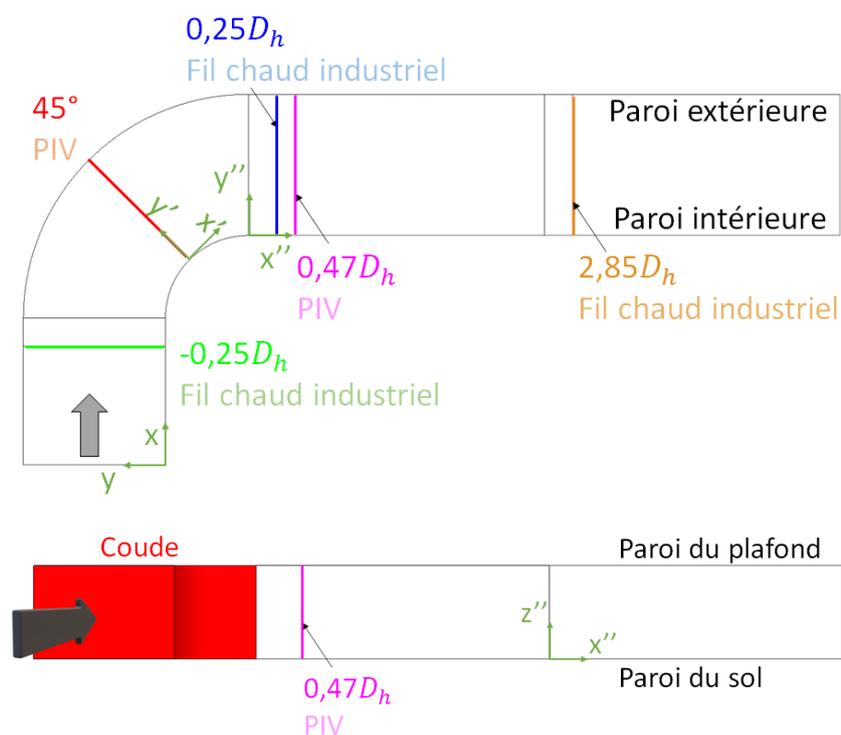


Figure 4.6 – Localisation des profils horizontaux en haut (DIESE vu du dessus) et verticaux en bas (DIESE vu de face) — Mesures par PIV et fil chaud industriel

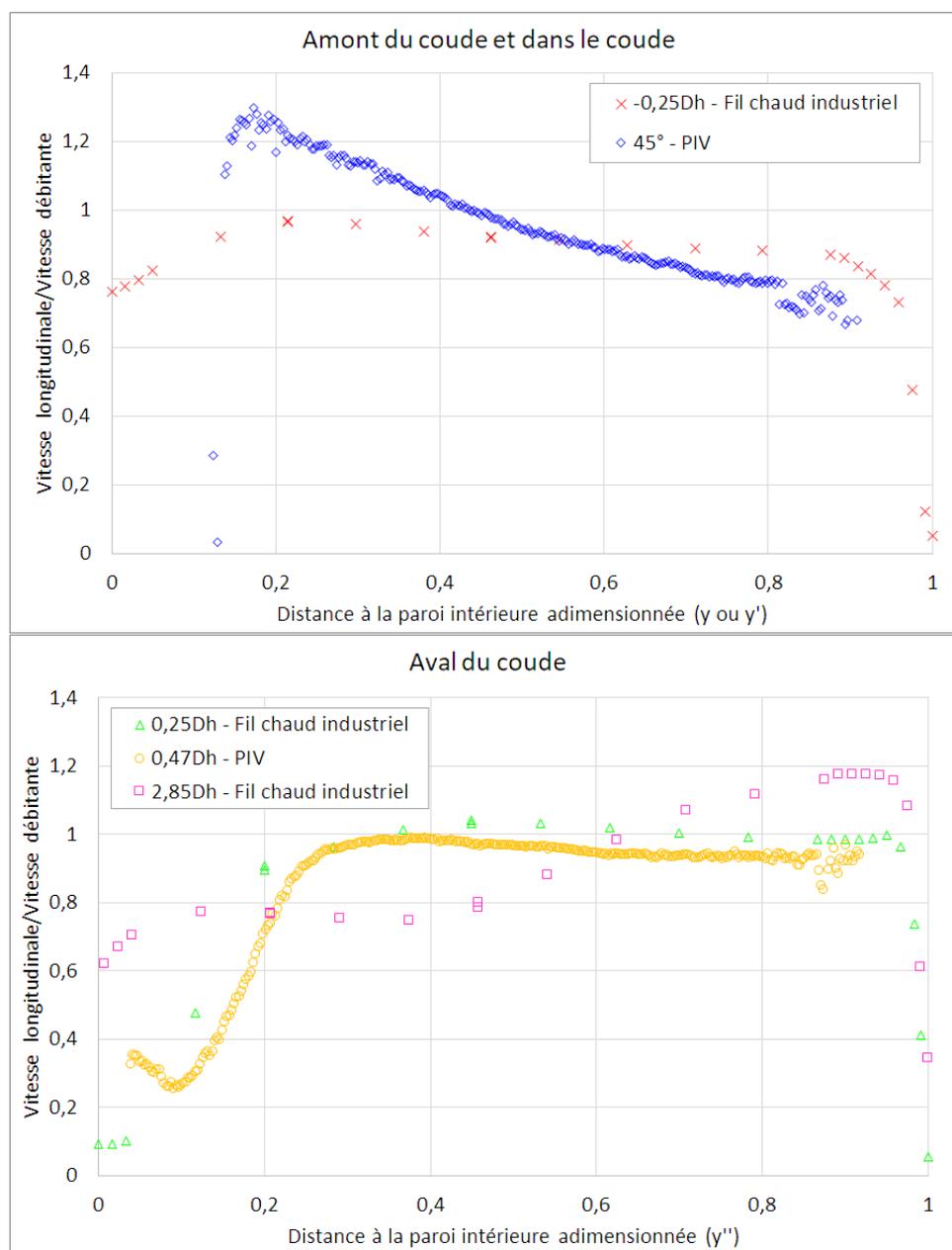


Figure 4.7 – Profils horizontaux de vitesse longitudinale d'amont en aval du coude au débit Q_1 , mesurés par PIV et fil chaud industriel (Malet *et al.*, 2022)

Les vitesses longitudinales divisées par la vitesse débitante¹ sont présentées sur la Figure 4.7. La vitesse débitante correspond à la vitesse donnée dans le Tableau 2.1 pour le débit étudié. Le profil en entrée du coude ($-0,25D_h$, mesuré au fil chaud industriel) montre que l'écoulement n'est pas encore influencé par le coude. Le profil est relativement plat grâce à la longueur droite d'environ $10D_h$ qui précède le coude.

1. La vitesse débitante est la vitesse calculée à partir du débit de consigne. Ce sont les vitesses présentées dans le Tableau 2.1 page 54.

Dans le coude, à 45° , les mesures de PIV montrent que l'écoulement est influencé par l'apparition de l'écoulement secondaire. L'écoulement est fortement accéléré au niveau de la paroi intérieure du coude et la vitesse y est maximale.

En sortie du coude ($0,47D_h$), les mesures de PIV rendent compte de la boucle de recirculation au niveau de la paroi intérieure, jusqu'à 20% de la distance à la paroi, où les vitesses sont de l'ordre de 30% par rapport à la vitesse débitante.

À $2,85D_h$ en aval du coude, l'influence du coude et de l'écoulement secondaire est toujours significative avec un profil de vitesse moyenne en deux parties : une première augmentation de la vitesse jusqu'à la moitié de la largeur de la gaine atteignant environ 65% de la vitesse débitante, une seconde augmentation jusqu'au maximum de la vitesse à partir de 75% de la distance à la paroi intérieure. Le gradient de vitesse maximale s'est déplacé de la paroi intérieure à 45° dans le coude, à la paroi extérieure à $2,85D_h$ en aval du coude.

Les vitesses transverses sont positives (Figure 4.8), signifiant que l'écoulement se dirige vers la paroi extérieure. À 45° dans le coude, le profil de vitesse transverse décroît légèrement au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la paroi intérieure. À $0,47D_h$ en aval du coude, les vitesses transverses maximales sont plus élevées et se situent aux tiers de la distance entre les parois intérieure et extérieures, ce qui souligne l'influence de l'écoulement secondaire.

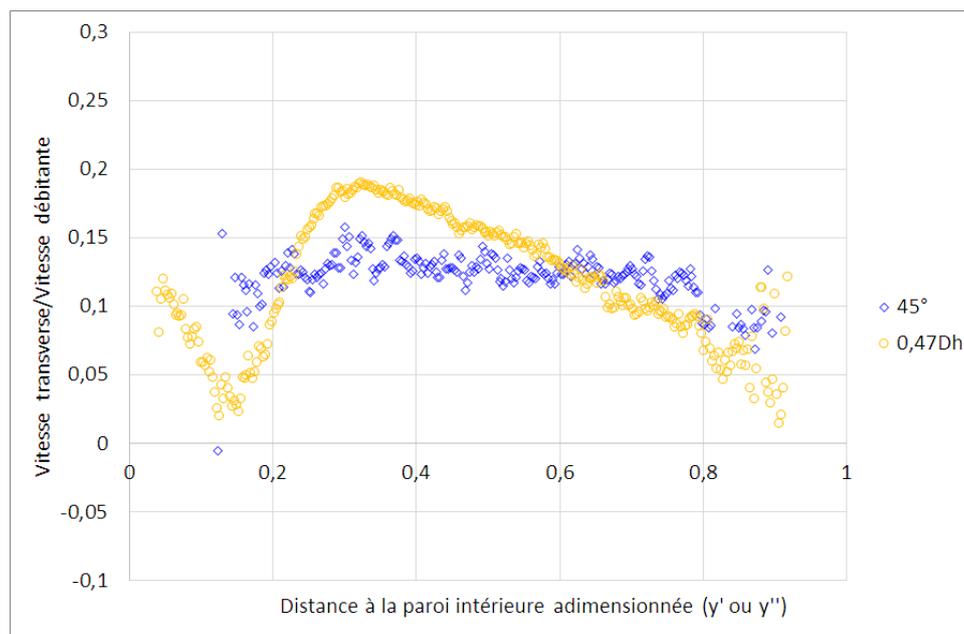


Figure 4.8 – Profils horizontaux de vitesse transverse d'amont en aval du coude au débit Q_1

Les profils longitudinaux obtenus sont comparables avec ceux mesurés au fil chaud par *Sudo et al. (2001)* et *Kuan et al. (2007)* en amont, dans et en aval d'un coude. *Sudo et al. (2001)* se sont intéressés à un coude horizontal de section carrée de 8 cm de côté ($Re = 4 \times 10^4$), et *Kuan et al. (2007)* à un coude vertical de section carrée de 15 cm de côté ($Re = 10^5$). Dans les deux études et dans DIESE, à 45° du coude, la vitesse atteint 1,4 fois la vitesse débitante contre la paroi intérieure. En aval du coude, les effets des écoulements secondaires sont visibles, avec des vitesses maximales quelque peu supérieures à la vitesse débitante. Le profil de vitesse transverse obtenu par *Kuan et al. (2007)* à 45° du coude est

parabolique, avec des vitesses transverses atteignant 20% de la vitesse débitante. Sur DIESE, le profil semble plus constant, avec des vitesses transverses de l'ordre de 10% de la vitesse débitante. En aval du coude de DIESE, le profil de vitesse transverse montre des effets moindres des écoulements secondaires, comparé au profil obtenu à $0,5D_h$ de [Kuan et al. \(2007\)](#).

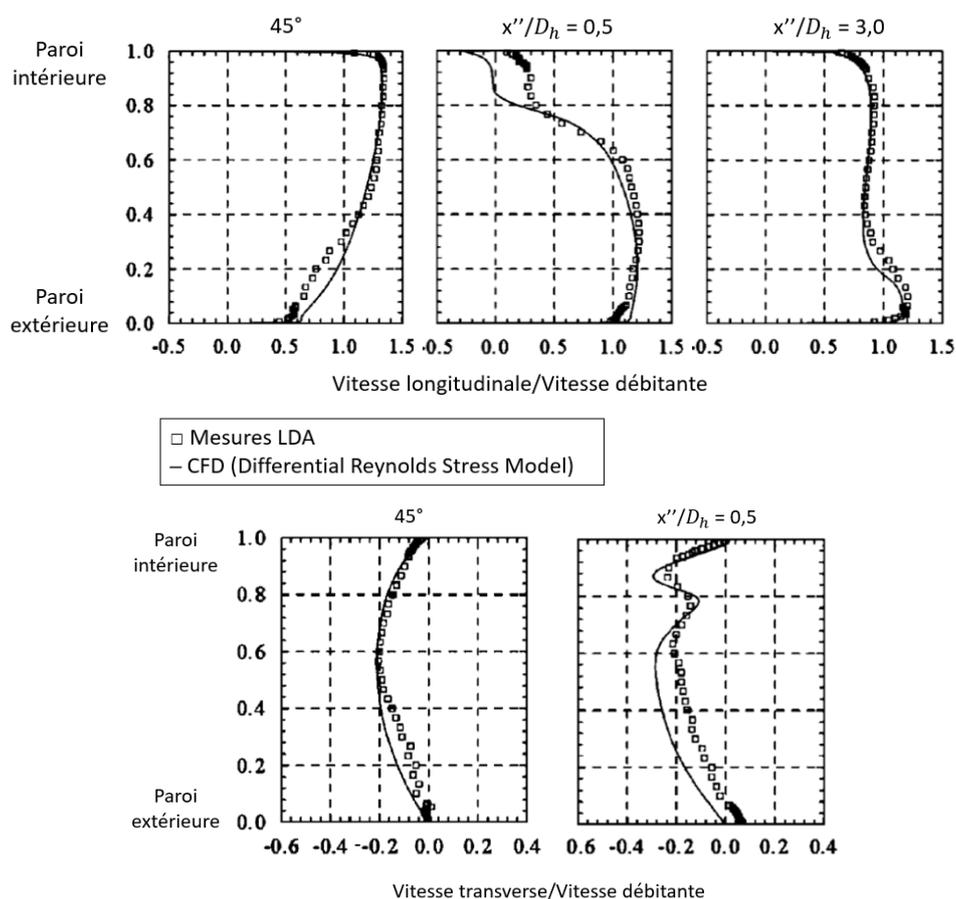


Figure 4.9 – Profils de vitesses longitudinale (en haut) et transverse (en bas) mesurés par [Kuan et al. \(2007\)](#) par LDA et par CFD dans un coude de section carrée de 15 cm de côté, $Re = 10^5$ — d'après [Kuan et al. \(2007\)](#)

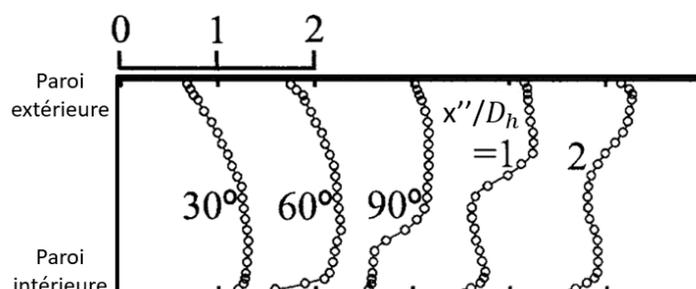


Figure 4.10 – Profils de vitesse longitudinale mesurés par [Sudo et al. \(2001\)](#) au fil chaud dans un coude de section carrée de 8 cm de côté, $Re = 4 \times 10^4$ — d'après [Sudo et al. \(2001\)](#)

Les profils de vitesse transverse mesurés par *Kuan et al. (2007)* (Figure 4.9) sont en valeur négative car les axes, dans cette étude, sont inversés par rapport à nos axes.

4.2.2 Résultats à 45° dans le coude CD1-1

Les Figures 4.11 et 4.12 présentent les profils de vitesses longitudinale et transverse obtenues aux quatre débits d'étude à 50% de la hauteur de gaine. Les vitesses sont adimensionnées par la vitesse débitante pour chaque débit.

On constate que les profils suivent la même tendance, que ce soit pour la vitesse longitudinale que pour la vitesse transverse. L'augmentation du débit, donc de la vitesse d'air, provoque un gradient de vitesse plus élevé lorsque la vitesse diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la paroi intérieure. Le pic de vitesse maximum longitudinale est alors légèrement plus marqué (pour Q3).

Les simulations de CFD, conduites à l'IRSN sur DIESE et présentées dans les articles de *Mbaye (2019)* et *Malet et al. (2022)*, présentent les mêmes tendances que les résultats expérimentaux. La différence entre les débits est moins marquée que dans les résultats expérimentaux. Les vitesses expérimentales n'ont pas été mesurées entre 0 et 10% et entre 90 et 100% de la distance à la paroi intérieure car ces parties de la gaine ont été cachées pour éviter la saturation des capteurs de la caméra due aux réflexions importantes du laser.

La vitesse transverse est positive, indiquant une orientation du flux vers la paroi extérieure du coude. Au vu des fluctuations, il n'y a pas de différences significatives entre les débits. Les vitesses transverses représentent entre 10 et 15% de la vitesse débitante à 45° dans le coude. Les profils de vitesse transverse obtenues par simulations de CFD présentent des valeurs de vitesse tout à fait comparables aux mesures expérimentales. Les courbes obtenues par simulation ont une forme parabolique. Les mesures semblent plus constantes, ce qui peut provenir du manque de données à proximité des parois, zones cachées pour éviter les réflexions du laser.

Les profils obtenus par PIV et par CFD pour les vitesses longitudinale et transverse présentent certains points communs avec les mesures présentées par *Kuan et al. (2007)* à une vitesse d'air de 10 m/s, donc proche de celle débitant dans DIESE à Q3 (cf. Figures 4.11 et 4.12) : les vitesses transverses sont de l'ordre de 10 à 20% et les vitesses longitudinales maximales atteignent 1,4 fois la vitesse débitante à 45°. Cependant, les vitesses longitudinales mesurées par *Kuan et al. (2007)* présentent un gradient négatif de vitesse plus faible que dans DIESE, et les vitesses transverses atteignent un maximum de 0,2 à 60% de la distance à la paroi intérieure contre 30% dans DIESE et 45% dans la simulation. Les différences peuvent s'expliquer par l'écart entre la géométrie de la gaine étudiée par *Kuan et al. (2007)* (carrée, 15 cm de côté) et par le fait que le coude soit orienté verticalement (contre horizontalement dans DIESE).

Dans l'Annexe A, la Section A.2 regroupe les profils de vitesse bruts utilisés avec leur spécificité de post-traitement (taux de corrélation minimum par exemple).

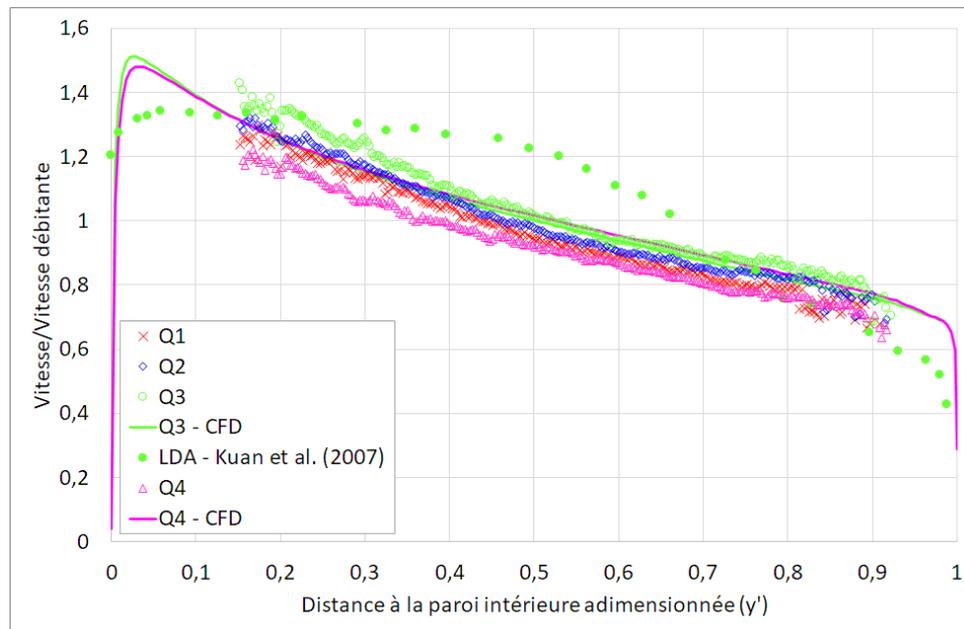


Figure 4.11 – Profils horizontaux de vitesse longitudinale pour les quatre débits d'étude à mi-hauteur du coude à 45° et simulations de CFD (Rossignol, 2021)

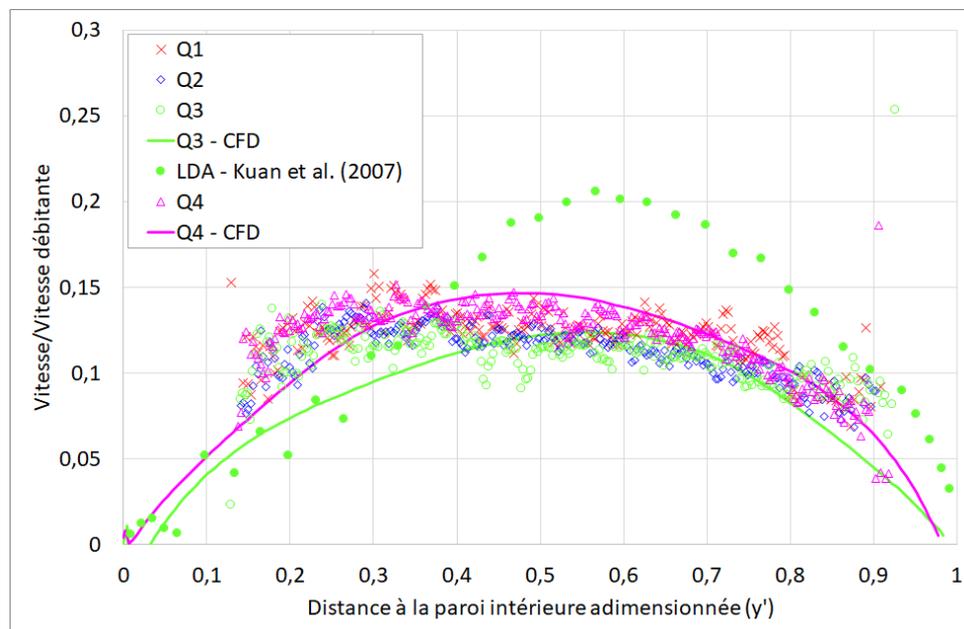


Figure 4.12 – Profils horizontaux de vitesse transverse pour les quatre débits d'étude à mi-hauteur du coude à 45° et simulations de CFD (Rossignol, 2021)

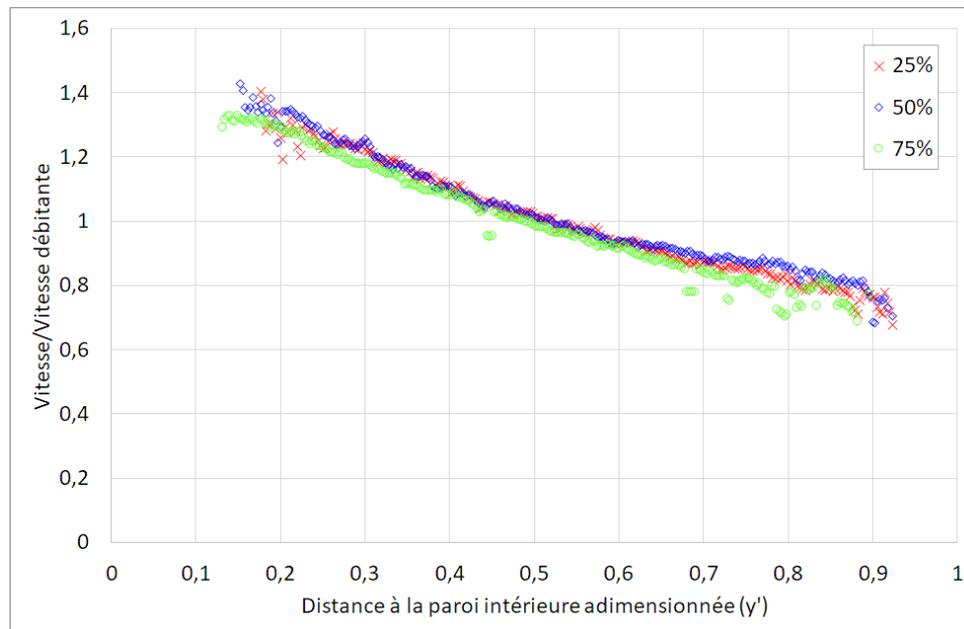


Figure 4.13 – Profils horizontaux de vitesse longitudinale à 45°, à 25, 50 et 75% de la hauteur du coude au débit Q₃

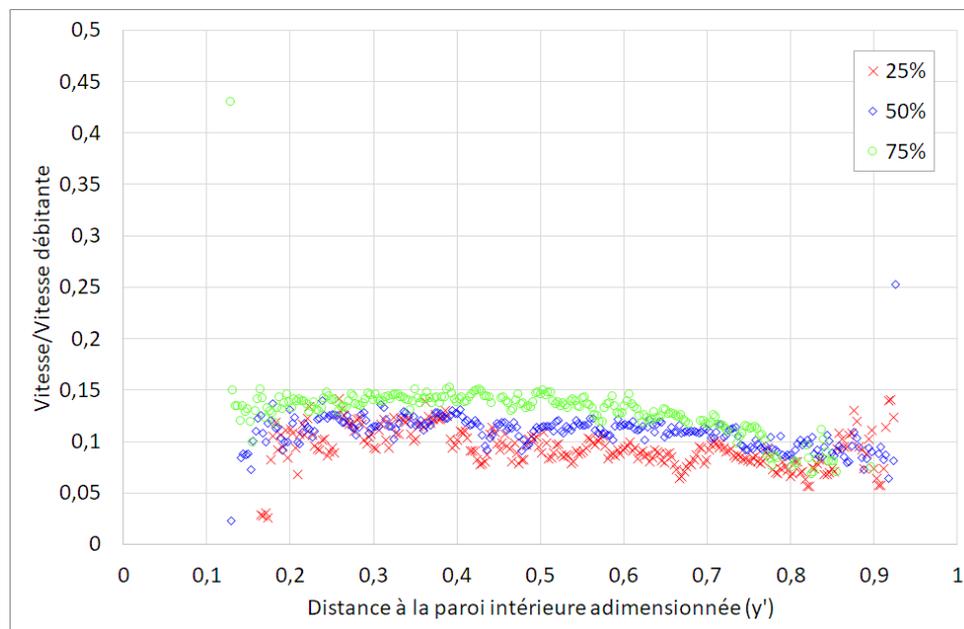


Figure 4.14 – Profils horizontaux de vitesse transverse à 45°, à 25, 50 et 75% de la hauteur du coude au débit Q₃

Si l'on compare ces profils de vitesse obtenus pour le débit Q3 à trois hauteurs différentes (Figures 4.13 et 4.14), on peut constater qu'il n'y a pas d'écart significatif entre les trois hauteurs pour la vitesse longitudinale. Concernant la vitesse transverse, celle-ci semble augmenter légèrement du bas vers le haut de la gaine.

Les profils obtenus à 25 et 50% pour les autres débits sont auto-semblables et sont présentés en Annexe A Section A.3. Cela signifie que le profil de vitesse verticale dans la gaine est relativement constant, comme nous le verrons sur l'analyse des champs verticaux dans la section suivante.

4.2.3 Résultats à $0,47D_h$ en aval du coude CD1-1

4.2.3.1 Champs horizontaux

Les Figures 4.15 et 4.16 présentent les profils de vitesses longitudinale et transverse obtenues aux quatre débits d'étude à 50% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude. Les vitesses sont adimensionnées par la vitesse débitante pour chaque débit. Les profils obtenus par simulation CFD sont présentés pour les débits Q3 et Q4.

On constate que les profils suivent la même tendance, que ce soit pour la vitesse longitudinale que pour la vitesse transverse. Concernant les vitesses longitudinales, l'augmentation du débit, donc de la vitesse d'air, provoque une diminution de l'épaisseur de la zone de recirculation au niveau du profil observé. Cette augmentation est visible sur les résultats expérimentaux des débits Q4 à Q2 (respectivement 30 à 10% de la largeur de la gaine) et sur les deux profils obtenus par simulations. Le profil mesuré expérimentalement à Q3 ne semble en revanche pas correspondre. Dans la zone de recirculation, les vitesses mesurées atteignent entre 30 et 40% de la vitesse débitante, contre 20% au maximum dans les simulations. La CFD rend compte de vitesse négative, contrairement à la PIV, comme c'est le cas pour Kuan *et al.* (2007) (cf. Figure 4.9). L'écart entre les simulations et les mesures peut venir du fait que la fiabilité des mesures PIV diminue dans les zones où les vitesses sont très faibles car les particules risquent de ne plus se déplacer suffisamment entre les deux images, le dt étant choisi en fonction de la vitesse débitante. Le profil de vitesse longitudinale présente une allure semblable aux mesures par LDA obtenues par Kuan *et al.* (2007). Dans cette étude comme dans DIESE, la boucle de recirculation couvre 30% de la distance à la paroi (contre 20% dans les simulations). En revanche, le maximum de vitesse longitudinale mesuré par Kuan *et al.* (2007) est de 1,2 contre 1 dans DIESE.

Les vitesses transverses sont positives, indiquant une orientation du flux vers la paroi extérieure. Elles représentent, à leur maximum, entre 15 et 20% de la vitesse débitante. L'écart entre les profils expérimentaux et ceux obtenus par simulations est plus significatif que dans le cas des vitesses longitudinales. Les profils obtenus par simulation montrent un effet du débit au niveau de la zone de recirculation, avec une augmentation de la vitesse transverse maximale lorsque le débit diminue : à leur maximum (40% de la largeur de la gaine), les vitesses transverses représentent 25% de la vitesse débitante à Q3 et 28% à Q4. Expérimentalement, les vitesses transverses représentent environ 20% de la vitesse débitante. Kuan *et al.* (2007) ont constaté, aussi, une sous-estimation de la décroissance de l'écoulement secondaire par le modèle de turbulence. Le profil de vitesse transverse mesuré dans DIESE présente une allure semblable à celui présenté par Kuan *et al.* (2007). En revanche, le premier pic de vitesse transverse est mesuré à 10% de la distance à la paroi intérieure par Kuan *et al.* (2007), contre

environ 5% dans DIESE.

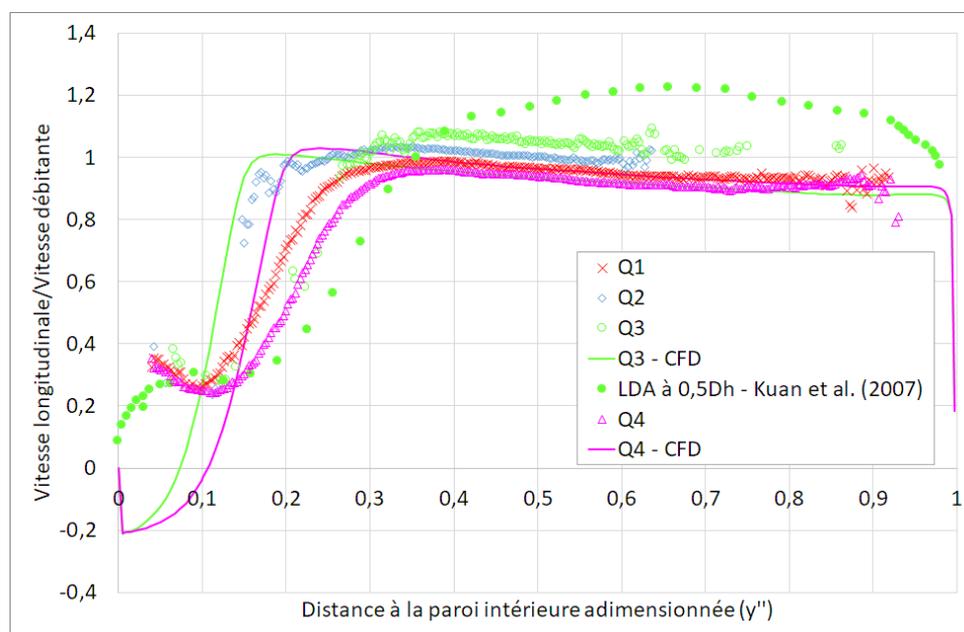


Figure 4.15 – Profils horizontaux de vitesse longitudinale pour les quatre débits d'étude à mi-hauteur à $0,47D_h$ en aval du coude et simulations CFD (Rossignol, 2021)

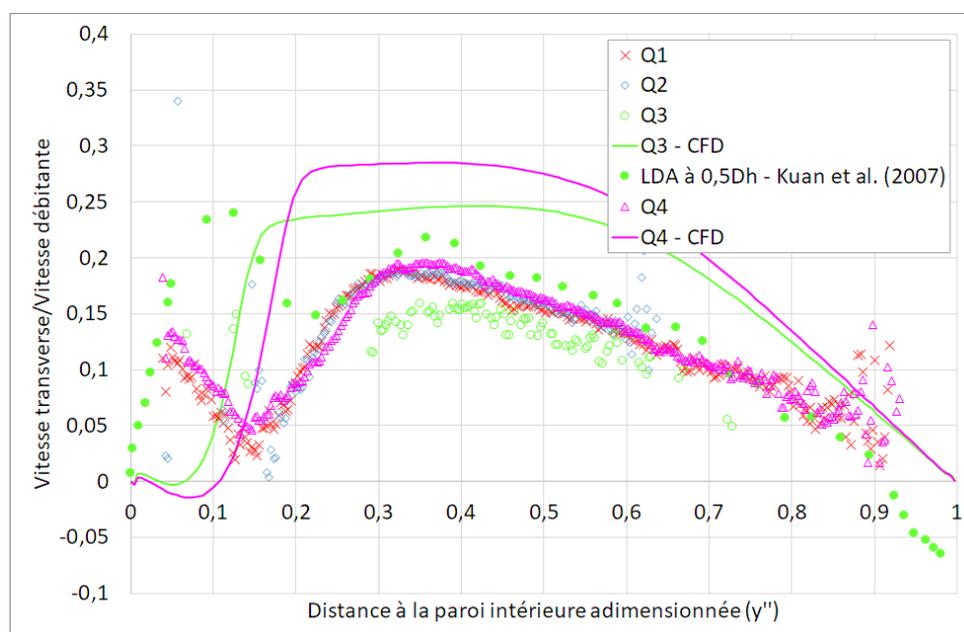


Figure 4.16 – Profils horizontaux de vitesse transverse pour les quatre débits d'étude à mi-hauteur à $0,47D_h$ en aval du coude et simulations CFD (Rossignol, 2021)

Dans DIESE, les mêmes observations peuvent être faites sur les vitesses longitudinales et transverses obtenues à 25% de la hauteur de la gaine (cf. Figures A.30 et A.31). Les vitesses transverses sont

cependant plus faibles, avec 10 à 15% de la vitesse maximum longitudinale.

Les résultats obtenus sont très semblables à ceux obtenus par *Kuan et al. (2007)* lorsqu'on compare leurs profils longitudinaux et transverses à 90° et $0,5D_h$ en aval du coude.

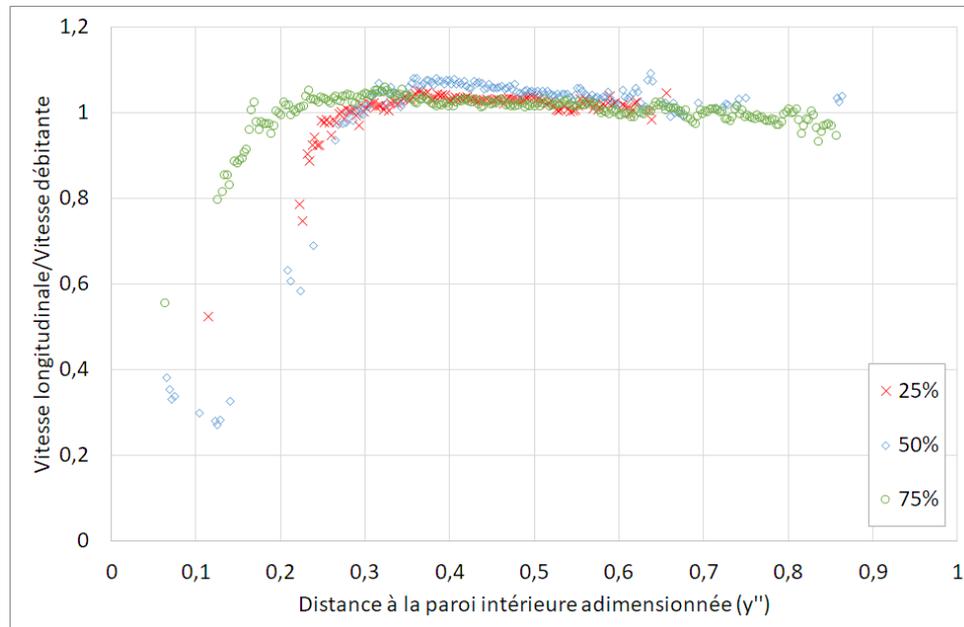


Figure 4.17 – Profils horizontaux de vitesse longitudinale à 25, 50 et 75% de la hauteur de gaine à $0,47D_h$ en aval du coude au débit Q_3

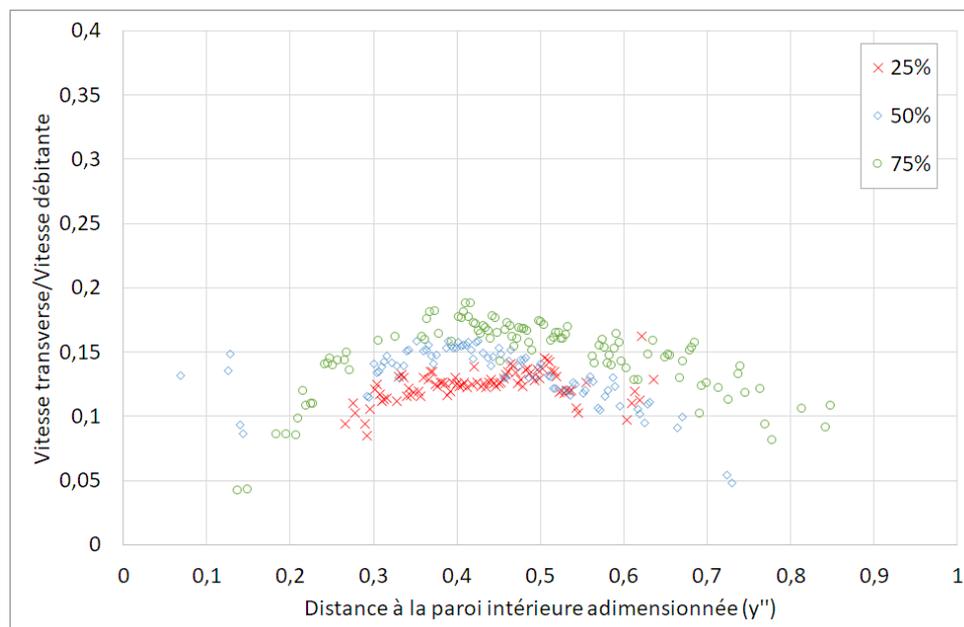


Figure 4.18 – Profils horizontaux de vitesse transverse à 25, 50 et 75% de la hauteur de gaine à $0,47D_h$ en aval du coude au débit Q_3

Si l'on compare les profils obtenus à 25, 50 et 75% de la hauteur de gaine à $0,47D_h$ en aval du coude au débit Q3, on constate :

- une boucle de recirculation plus fine à 25 et 50% de la hauteur, ce qui peut laisser penser que la vitesse longitudinale est plus importante à 75% (Figure 4.17) ;
- une augmentation du rapport de la vitesse transverse sur la vitesse débitante à mesure que l'on s'approche de la paroi du plafond, avec des rapports maximaux compris entre 13 et 19%.

4.2.3.2 Champs verticaux

Les Figures 4.19 et 4.20 présentent les profils de vitesses longitudinale et transverse obtenues aux quatre débits d'étude à 50% de la largeur de gaine, mesurée à $0,47D_h$ en aval du coude. Les vitesses sont adimensionnées par la vitesse débitante pour chaque débit. Le « 0 » correspond à la paroi du sol de la gaine, le « 1 » à la paroi du plafond.

Le profil vertical longitudinal à $0,47D_h$ en aval du coude est plat. Un léger écart différencie les débits élevés (Q2 et Q3) des débits faibles (Q1 et Q4) en termes de rapport de la vitesse longitudinale sur la vitesse débitante. Cela peut venir de la régulation du débit par rapport au débit de consigne. En effet, Q1 et Q4 sont les débits les plus faibles, avec Q1 sur la plage basse de débit du ventilateur principal (ventilateur sur lequel les réglages de réponse par rapport au débit de consigne ont été faits) et Q4 faisant intervenir le petit ventilateur.

Les profils de vitesse transverse suivent la même tendance, même si le profil mesuré au débit Q2 est plus désordonné. Les vitesses transverses changent de signe à 70% de la hauteur, par rapport à la paroi du sol de la gaine. Cela confirme la présence d'écoulement secondaire de premier type, lié au coude, avec deux écoulements contrarotatifs non symétriques à $0,47D_h$. Taylor *et al.* (1982) ont également montré une asymétrie à $0,25D_h$ en aval d'un coude vertical de section carrée, de 4 cm de côté, pour un nombre de Reynolds de 40 000. Les vitesses transverses dirigées vers la paroi du sol de la gaine sont plus élevées (de l'ordre de 9% de la vitesse débitante) que celles dirigées vers le plafond de la gaine (6%). Plus généralement, ces vitesses transverses sont deux fois plus faibles que celles mesurées dans le coude (cf. Figure 4.16).

Si l'on observe les mêmes profils mesurés à 25% de la largeur de la gaine (par rapport à la paroi intérieure) à $0,47D_h$ en aval du coude (Figures 4.21 et 4.22), l'écoulement se comporte différemment. Les vitesses sont globalement plus faibles par rapport à la vitesse débitante. On observe une courbe en « M », avec une diminution de la vitesse à 25% de la hauteur, qui s'atténue avec l'augmentation du débit. Cette diminution est maximale au débit Q4 avec une perte de plus de 10% de la vitesse. Si on se place à la moitié du profil, soit à la mi-hauteur de la gaine, on retrouve ce même écart entre les vitesses longitudinales présentées Figure 4.15 (en se plaçant à 25% du profil).

Les vitesses transverses sont très faibles (< 7%) et montrent un écoulement désordonné jusqu'à 40% de la hauteur. À partir de 60%, on retrouve deux cellules contrarotatives plus visibles. Il serait intéressant d'obtenir les mesures de profils verticaux à 75% de la largeur de la gaine pour constater l'évolution de l'écoulement, particulièrement l'écoulement transverse, qui semble moins perturbé par la présence des écoulements secondaires à mesure que l'on s'éloigne de la paroi intérieure.

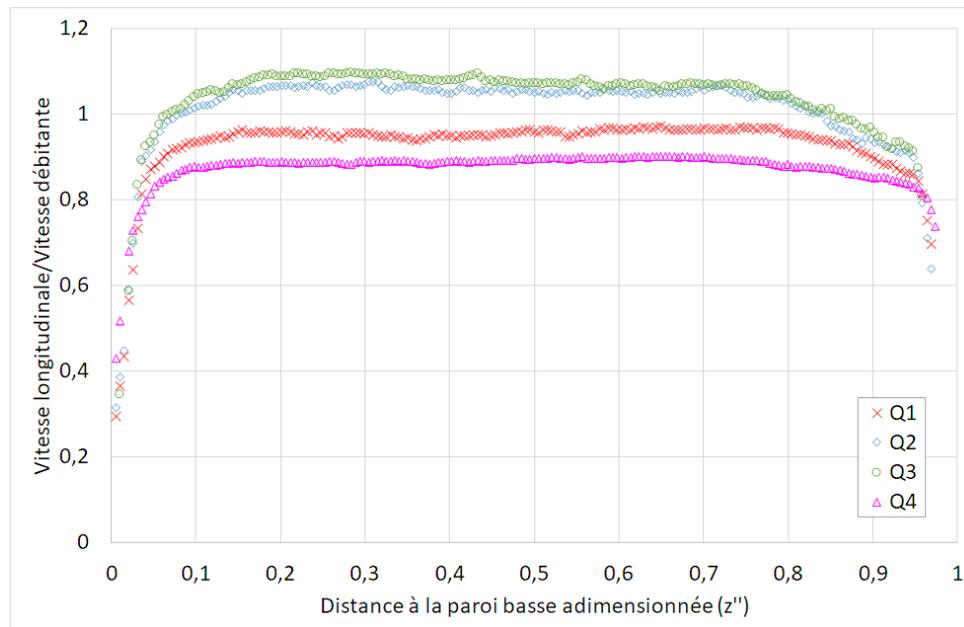


Figure 4.19 – Profils verticaux de vitesse longitudinale pour les quatre débits d'étude à mi-largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude

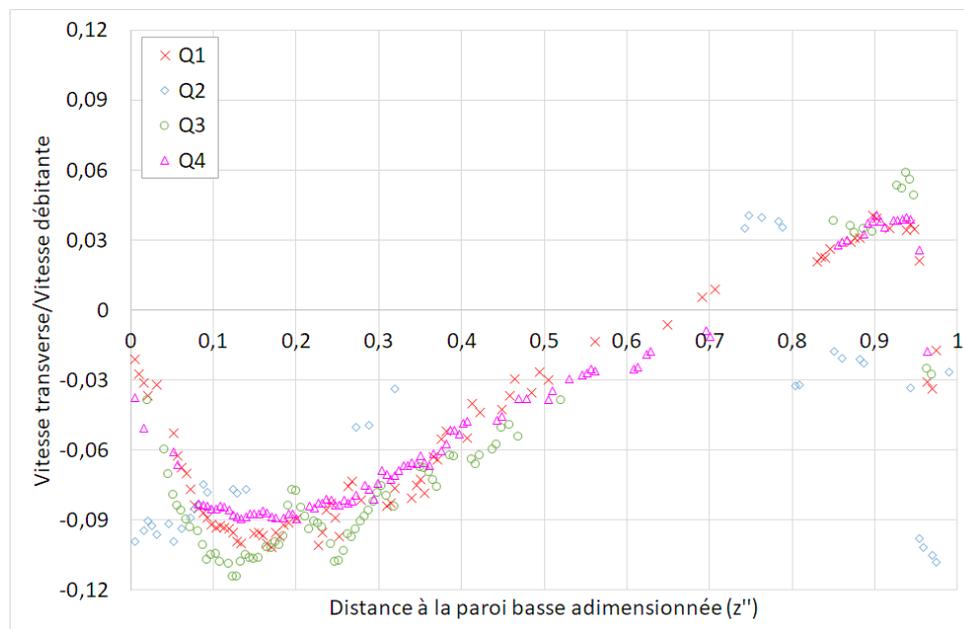


Figure 4.20 – Profils verticaux de vitesse transverse pour les quatre débits d'étude à mi-largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude

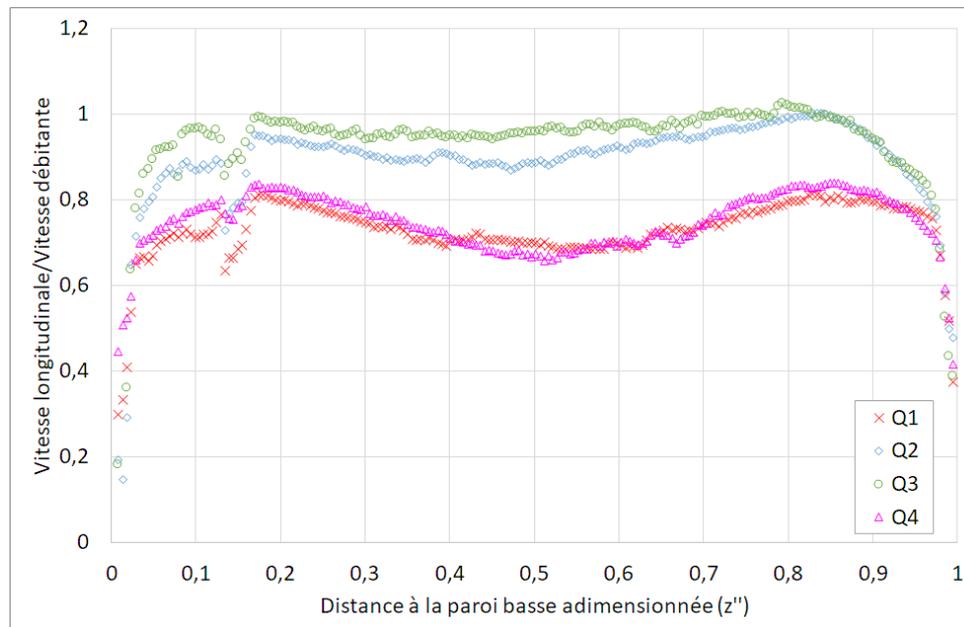


Figure 4.21 – Profils verticaux de vitesse longitudinale pour les quatre débits d'étude à 25% de la paroi intérieure à $0,47D_h$ en aval du coude

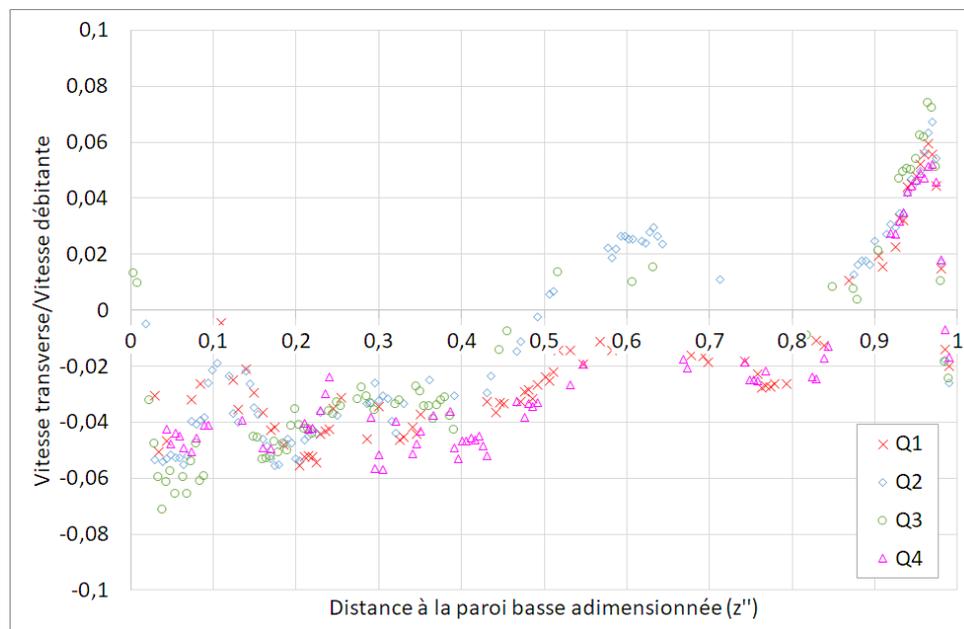


Figure 4.22 – Profils verticaux de vitesse transverse pour les quatre débits d'étude à 25% de la paroi intérieure à $0,47D_h$ en aval du coude

4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu caractériser l'écoulement pariétal et l'écoulement en gaine.

L'anémométrie à fil chaud haute fréquence nous a fourni des profils de vitesses longitudinales et fluctuantes en proche paroi. Nous avons ainsi pu les modéliser de manière semi-empirique. Ces mesures caractérisent pour la première fois, à notre connaissance, l'écoulement pariétal d'une gaine industrielle de grande taille, dans le cadre de travaux sur la mesure de dépôt d'aérosols. L'anémométrie à fil chaud haute fréquence et la mesure de pression nous ont également permis d'estimer de deux manières différentes la vitesse de frottement. Ces valeurs concordent avec des écarts relatifs inférieurs à 8%, mais présentent cependant de grandes incertitudes, liées à l'expérience pour la mesure de pression et liées à l'ajustement des données pour la mesure au fil chaud.

Les mesures présentées pour la caractérisation de l'écoulement pariétal semblent cohérentes mais n'ont, cependant, pas subi de tests de reproductibilité. Ces mesures sont actuellement poursuivies par Rémy Ploix, il s'agit donc d'un travail en cours. Les mesures de vitesse fluctuante en proche paroi et les estimations de vitesse de frottement constituent des données d'entrée pour le modèle semi-empirique retenu et utilisé au Chapitre 5 pour prédire des vitesses de dépôt.

La mesure par PIV nous a permis de caractériser visuellement l'écoulement en gaine, notamment l'écoulement complexe qui se développe dans un coude. Les écoulements secondaires de premier type ont été visualisés. Ces écoulements transverses ont une importance majeure dans le coude, où ils représentent jusqu'à 20% de la vitesse débitante. Ce pourcentage diminue jusqu'à représenter environ 10% de la vitesse débitante à $0,47D_h$ en aval du coude. Les mesures obtenues ont été comparées avec des mesures de la littérature obtenues dans des conduits de moyenne taille et de section carrée, les mesures conduites dans DIESE étant les premières à caractériser les écoulements à l'échelle industrielle dans une gaine rectangulaire. À notre connaissance, de telles mesures n'existent pas dans la littérature.

Les résultats obtenus par PIV constituent une première base de données de mesures expérimentales dans des conduits droits et coudés, de section rectangulaire et de taille industrielle. Cette première base de données sert de comparaison aux simulations de CFD, montrant une reproduction réaliste de l'écoulement dans le coude et une surestimation des vitesses transverses en aval du coude.

Les mesures aérauliques obtenues vont servir à l'interprétation des mesures de dépôt présentées dans le chapitre suivant, et constituent, pour l'IRSN, et plus largement pour la communauté scientifique, une base de données importante de validation des écoulements dans un coude de section rectangulaire.

Mesures locales de dépôt

Sommaire

5.1	Grille d'essais	123
5.2	Dépôt dans les conduits amont et aval du module coude	126
5.2.1	Résultats	126
5.2.2	Comparaison avec la littérature	132
5.2.2.1	Travaux expérimentaux	132
5.2.2.2	Modélisations	136
5.2.2.3	Synthèse	146
5.3	Dépôt à l'intérieur de différents coudes	146
5.3.1	Résultats	146
5.3.1.1	Comparaison du dépôt dans les différents coudes	147
5.3.1.2	Répartition du dépôt au sein de chaque coude	151
5.3.1.3	Synthèse	154
5.3.2	Mise en relation des résultats de dépôt des coudes avec l'aérodynamique	156
5.3.2.1	Coude de référence (CD1-1) et coude de rayon différent (CD1-2)	156
5.3.2.2	Coude segmenté (CD1-3)	157
5.3.2.3	Coude abrupt (CD1-4)	158
5.4	Synthèse	159

Ce second volet de résultats est focalisé sur les mesures locales de dépôt d'aérosols. Ces mesures ont été réalisées dans des tronçons droits en amont et en aval du module « coude », et à l'intérieur de quatre coudes de géométrie différente. Cette partie regroupe également les comparaisons des résultats obtenus avec des mesures d'autres travaux de la littérature et avec des modèles semi-empiriques.

5.1 Grille d'essais

L'étape de validation du protocole présentée dans le Chapitre 3 conduit à des mesures de dépôt sur des zones de tronçons droits en amont et en aval du premier coude de DIESE, soit aux Repères $-3,1D_h$ (Longueur Droite LD1-3) et $4,7D_h$ (LD2-2) sur la Figure 5.1. L'injection d'aérosol se fait environ $10D_h$ en amont du coude d'étude. Les prélèvements en gaine pour la mesure de C_{bulk} se font au Repère 1 pour les mesures à $-3,1D_h$ et au Repère 2 pour les mesures à $4,7D_h$. Quatre mesures sont faites, une sur chaque paroi : sol, plafond, paroi gauche et paroi droite dans le sens de l'écoulement. Les masques carrés (100 cm^2) utilisés sont ceux présentés dans la Section 3.1. Ils sont centrés par rapport à la hauteur et la largeur de la gaine.

Des masques rectangulaires sont adaptés pour épouser la courbure du coude sur les parois intrados et extrados. Ils ont la même surface intérieure (100 cm^2 , 20 cm de haut et 5 cm de large) pour la collecte du dépôt que les masques utilisés pour les tronçons droits et sur les parois du sol et du plafond des coudes.

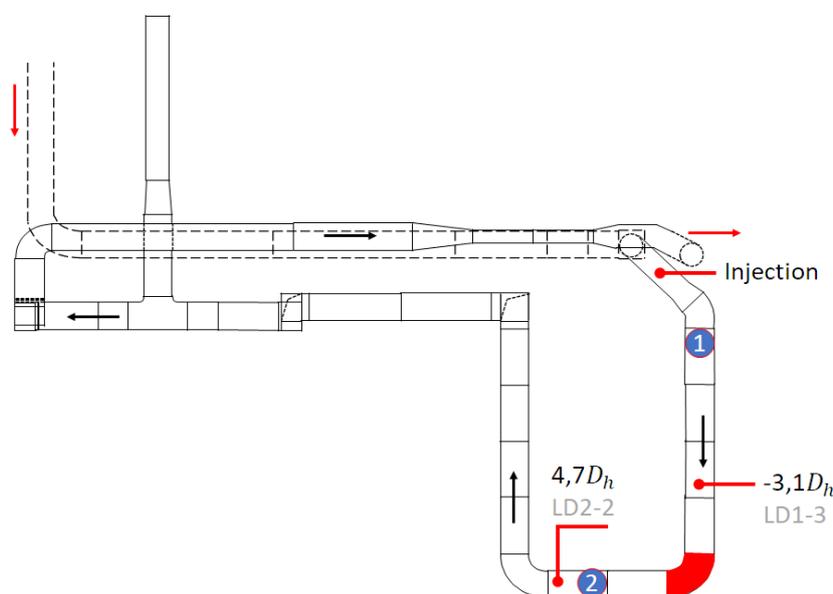


Figure 5.1 – Zone d'injection, de prélèvement et de mesures de dépôt dans DIESE

Dans le coude, seize zones sont étudiées (Figure 5.2 et Figure 5.3) et choisies pour être proches des zones étudiées avec la PIV :

- trois zones sur la paroi du sol à 45° (1, 2, 3 ; masques carrés) ;
- trois zones sur la paroi du sol à 90° (4, 5, 6 ; masques carrés) ;
- trois zones sur la paroi du plafond à 45° (7, 8, 9 ; masques carrés) ;
- trois zones sur la paroi du plafond à 90° (10, 11, 12 ; masques carrés) ;
- une zone sur la paroi extrados à 45° (13 ; masque rectangulaire) ;
- une zone sur la paroi extrados à 90° (14 ; masque rectangulaire) ;
- une zone sur la paroi intrados à 45° (15 ; masque rectangulaire) ;
- une zone sur la paroi intrados à 90° (16 ; masque rectangulaire).

Ces zones de mesure sont nombreuses afin de quantifier le dépôt localement et ainsi corrélérer les résultats avec les paramètres géométriques et aérodynamiques.

Les appellations utilisées pour les surfaces sont présentées Figure 5.3.

Comme on le voit sur la Figure 5.2, dans le coude CD1-3, il est impossible de placer le masque de la surface 15 à 45° exactement. On décide donc de le positionner directement en aval, le plus proche possible de la zone 15 du coude de référence (CD1-1). Il en est de même pour les surfaces 13 et 15 du coude CD1-4. Les arêtes des angles droits des parois extérieures et intérieures des coudes CD1-3 et CD1-4 sont dessinées en trait pointillé sur les figures de résultats de la Section 5.3.

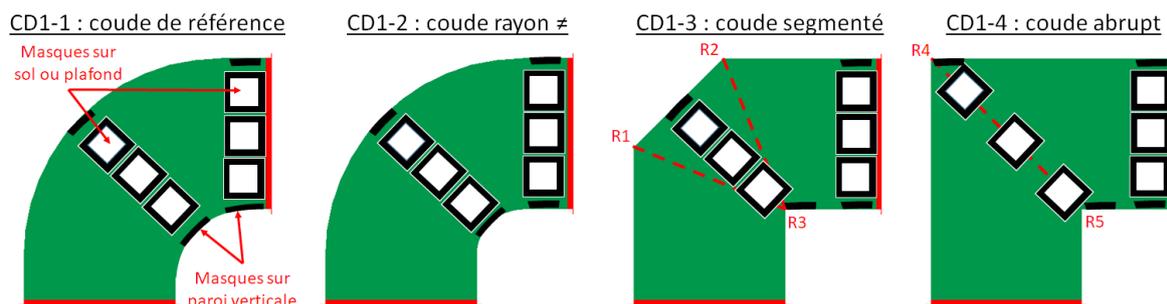


Figure 5.2 – Schéma de présentation des zones de mesure de dépôt dans les différents coudes

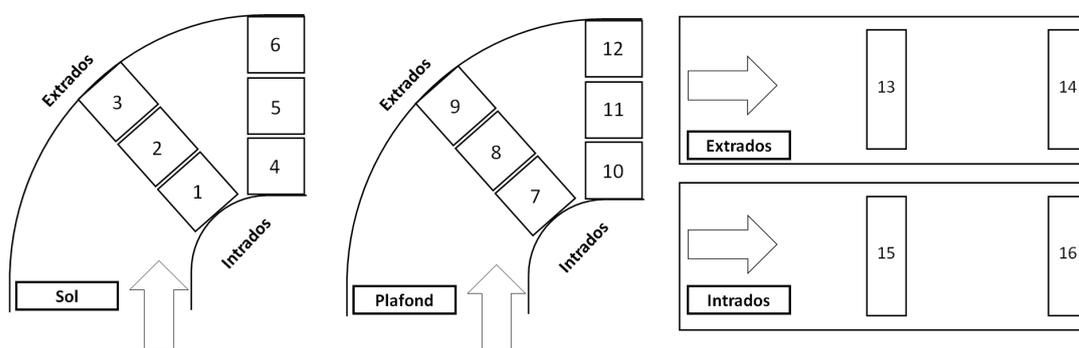


Figure 5.3 – Appellations des surfaces d'étude dans un coude

Les protocoles de génération et de mesure sont fixés (cf. Chapitre 2). La grille d'essais de mesure de dépôt en amont et en aval du coude, dans les tronçons droits est présentée Tableau 5.1 et la grille d'essais des coudes est présentée Tableau 5.2.

Tableau 5.1 – Grille d'essais des mesures de dépôt dans les tronçons en amont et en aval du coude

Débit et vitesse de consigne dans DIESE (m/s) (cf. Tableau 2.1)	Diamètre théorique (μm)		
	2 μm	5 μm	10 μm
Q1 5,8	—	✓	—
Q2 9,1	—	✓	—
Q3 10,7	✓	✓	✓
Q4 3,6	—	✓	—

Tableau 5.2 – Grille d'essais des mesures de dépôt dans le coude

Débit et vitesse de consigne dans DIESE (m/s) (cf. Tableau 2.1)	Coude – 5 μm			
	CD1-1	CD1-2	CD1-3	CD1-4
	Q3 10,7	Q3 10,7	Q3 10,7	Q3 10,7

5.2 Dépôt dans les conduits amont et aval du module coude

5.2.1 Résultats

Lors d'une expérience dans un conduit droit, un point de mesure centré est obtenu pour chaque paroi de la gaine (sol, plafond, parois verticales). Sont tracées les vitesses de dépôt mesurées adimensionnées par la vitesse de frottement (basée sur les mesures de ΔP), en fonction du temps de relaxation des particules adimensionné par le rapport u^{*2}/ν . Lorsque plusieurs points de mesure sont présentés pour une même zone, cela signifie que plusieurs expériences ont été faites dans la même configuration. Deux critères ont été fixés pour conserver les mesures de dépôt réalisées :

- l'écart maximum entre le débit isocinétique et le débit mesuré dans les lignes de prélèvement lors des expériences est fixé à 20% ;
- le rapport entre la masse déposée collectée avec la dernière lingette utilisée et la somme des masses obtenue sur toutes les autres est fixé à 20% au maximum (Section 3.2.4.1).

Les incertitudes, comprenant celle liée à la vitesse de frottement, sont données pour un intervalle de confiance de 95%. La paroi gauche (respectivement droite) correspond à la paroi verticale de gauche (droite) dans le sens de l'écoulement.

Nous présentons et commentons ici les résultats adimensionnés ($v_d^+ = f(\tau_p^+)$) pour chaque paroi (sol, verticales et plafond) pour différents diamètres de particules (Figures 5.4 à 5.6). Les résultats sont ensuite présentés en fonction du débit en gaine (Figure 5.7) et en fonction de l'orientation des parois (Figure 5.8).

La Figure 5.4 présente les mesures obtenues sur les parois du sol à $-3,1D_h$ (LD1-3) et à $4,7D_h$ (LD2-2) aux quatre débits d'étude. Les vitesses de dépôt augmentent avec l'augmentation du débit et du diamètre des particules. Les vitesses mesurées aux temps caractéristiques τ_p^+ les plus bas correspondent aux expériences où les diamètres des aérosols sont les plus bas. En effet, les vitesses de dépôt v_d^+ inférieures à $1,00 \times 10^{-2}$ sont mesurées avec des aérosols dont le diamètre théorique est $2 \mu\text{m}$. On constate, par ailleurs, que les vitesses mesurées à ce diamètre ne présentent pas de différence significative aux différents débits, au vu des incertitudes, (voir Figure 5.7). De plus, on remarque que pour un même diamètre, les vitesses de dépôt v_d^+ mesurées coïncident en amont et en aval du coude. Enfin, les vitesses de dépôt mesurées sur la paroi du sol sont élevées par rapport à celles mesurées sur les autres parois, puisque le dépôt est piloté par la sédimentation pour les particules inertielles (Figures 5.7 à 5.7). En effet, la Figure 5.8 montre, pour deux débits, que les vitesses de dépôt mesurées sur la paroi du sol sont généralement supérieures de plus d'une décade par rapport aux autres parois. Cela ne semble pas être le cas lorsque le diamètre de particule est de $10 \mu\text{m}$: les vitesses mesurées sur les parois de gauche et droite (respectivement au plafond) sont 1,5 fois (resp. 2,5) plus faibles que celles mesurées sur le sol. Il faut toutefois tenir compte du fait que les résultats obtenus à $10 \mu\text{m}$ n'ont pas été reproduits et les masses déposées mesurées sont très faibles.

La Figure 5.5 présente les mesures obtenues sur les parois verticales à $-3,1D_h$ (LD1-3) et à $4,7D_h$ (LD2-2) aux quatre débits d'étude. De la même façon que sur la paroi du sol, les vitesses de dépôt augmentent avec l'augmentation du débit (Figure 5.7) et du diamètre des particules (Figure 5.5). Les vitesses de dépôt v_d^+ mesurées à Q3 inférieures à $1,00 \times 10^{-3}$ ont été obtenues avec des aérosols de $2 \mu\text{m}$.

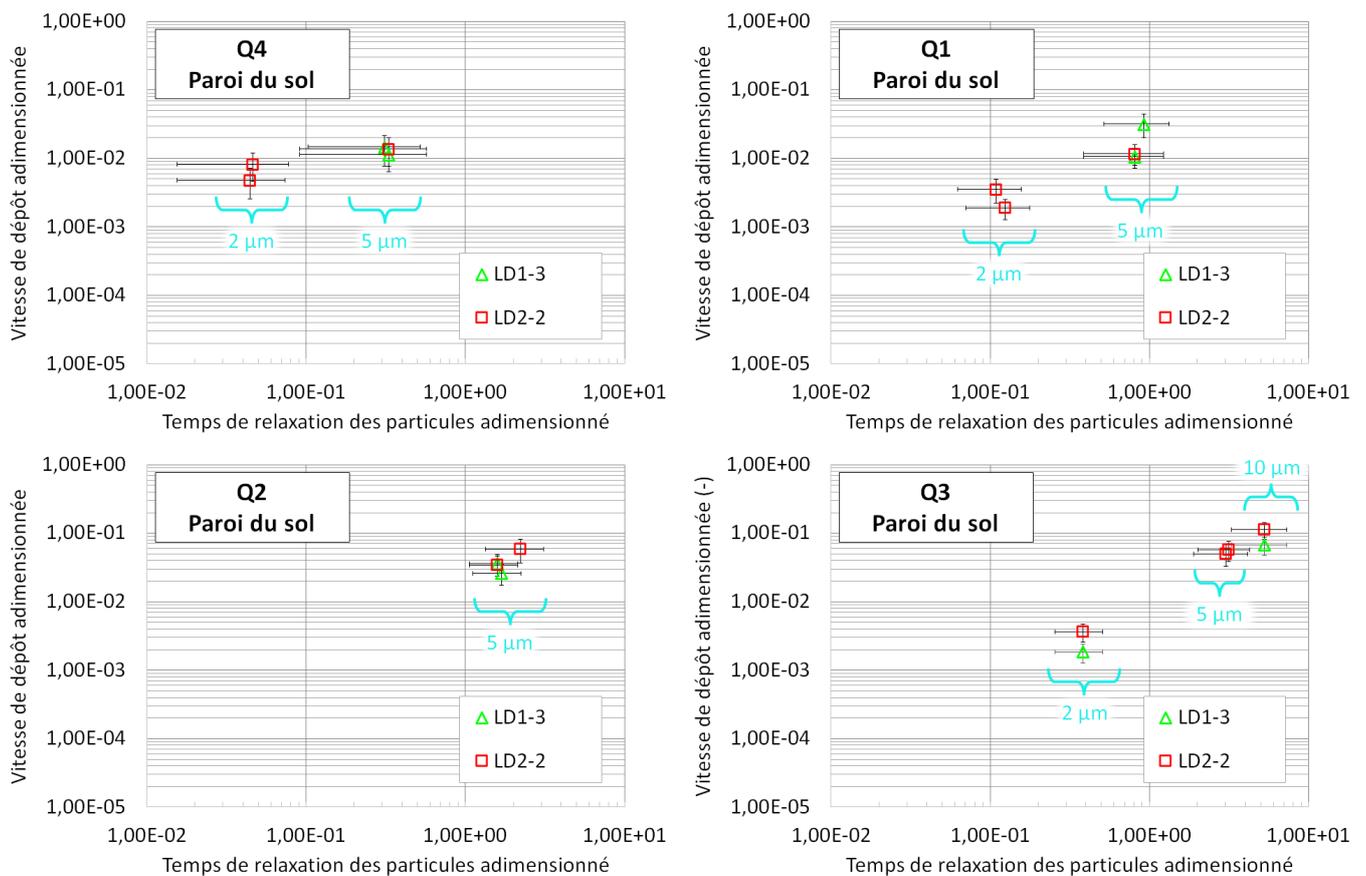


Figure 5.4 – Vitesses de dépôt adimensionnées, mesurées en amont ($-3,1D_h$ – LD1-3) et en aval ($4,7D_h$ – LD2-2) du coude, sur la paroi du sol de la gaine pour différents débits – Intervalle de confiance de 95%

Pour les mêmes diamètres, les vitesses mesurées coïncident à nouveau lorsqu'on compare les mesures obtenues en amont et en aval du coude.

Les vitesses de dépôt v_d^+ sont comprises entre $1,12 \times 10^{-4}$ et $7,91 \times 10^{-2}$, soit environ une décade de moins que pour les parois du sol, exceptées les mesures réalisées avec un aérosol de $10 \mu\text{m}$ (v_d^+ mesurées à Q3 et τ_p^+ égal à 5,28). Cela s'observe également sur la Figure 5.8, lorsque l'on compare v_d^+ pour chaque orientation de paroi selon le diamètre. Les vitesses de dépôt sur les parois verticales sont plus faibles que sur la paroi du sol. Cela peut s'expliquer par la diminution du rôle de la sédimentation.

Enfin, la Figure 5.6 présente les mesures obtenues sur les parois du plafond à $-3,1D_h$ (LD1-3) et à $4,7D_h$ (LD2-2) aux quatre débits d'étude.

Les mesures de vitesse sont plus dispersées au plafond que sur les autres parois. Les vitesses obtenues pour un aérosol de $10 \mu\text{m}$ au débit Q3 (τ_p^+ égal à 5,28, v_d^+ les plus élevées) restent très proches de celles obtenues sur les parois verticales (aussi visible sur la Figure 5.7).

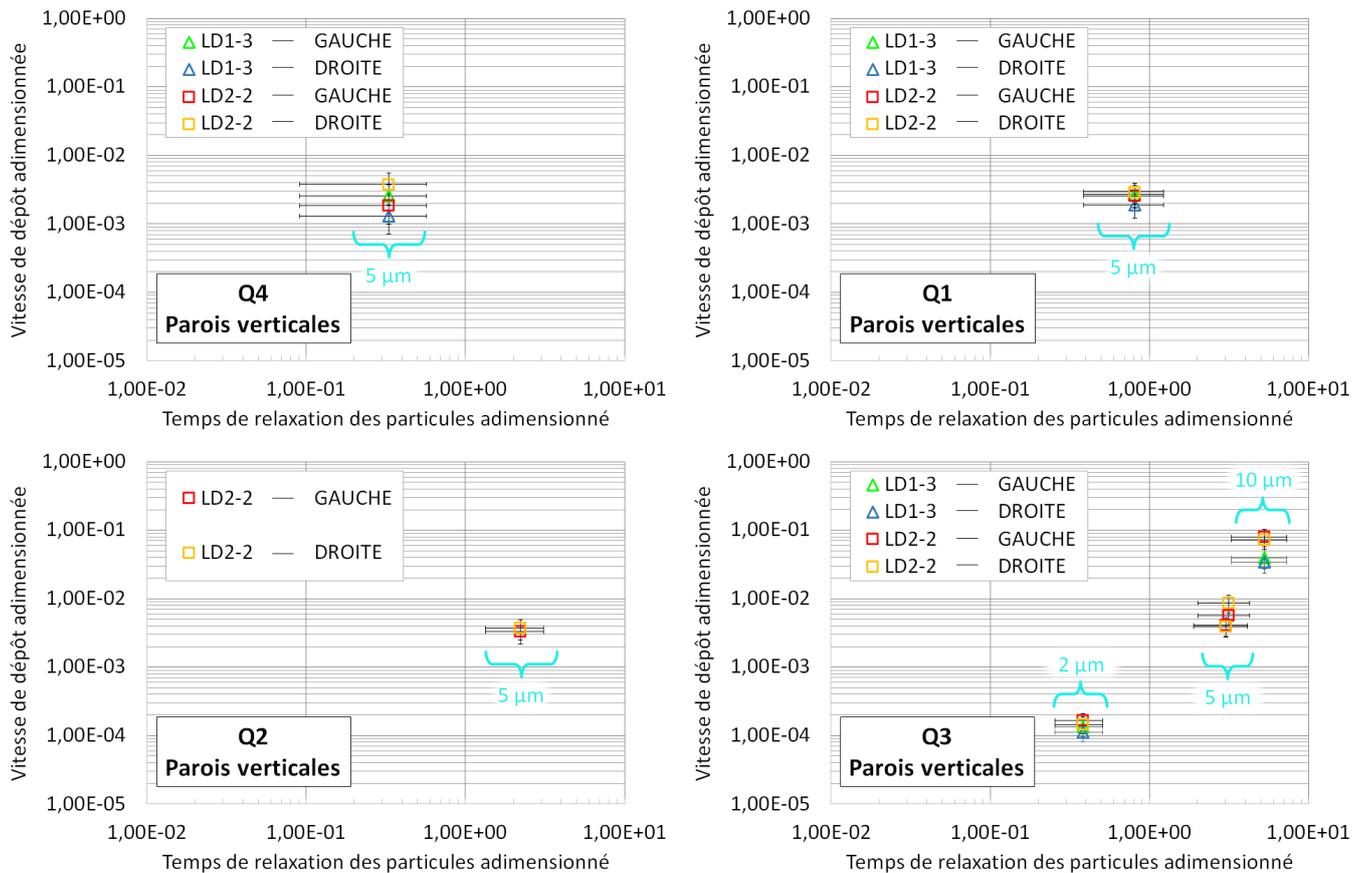


Figure 5.5 – Vitesses de dépôt adimensionnées, mesurées en amont ($-3,1D_h$ – LD1-3) et en aval ($4,7D_h$ – LD2-2) du coude, sur les parois verticales de la gaine pour différents débits – Intervalle de confiance de 95%

Si l'on observe les mesures pour chaque débit, on constate une diminution de la vitesse de dépôt avec une diminution du diamètre. Il semble cependant qu'on atteigne un minimum aux alentours de τ_p^+ égal à 0,1 ($d_p \sim 2 \mu\text{m}$). Des mesures supplémentaires à des τ_p^+ inférieurs à 0,1 permettraient de vérifier si la vitesse de dépôt augmente à nouveau, dessinant ainsi une courbe en V, due à l'influence de la diffusion turbulente. Cela nécessiterait d'utiliser un générateur adapté à la génération de particules fluorescentes dont le diamètre serait inférieur à $1 \mu\text{m}$, ce qui pourrait alors impliquer une augmentation de la durée de réalisation des dépôts, afin d'atteindre des masses déposées détectables.

De la même façon que pour les parois verticales, on constate des vitesses de dépôt plus faibles que celles obtenues sur les parois du sol de la gaine (voir Figure 5.8 également). Cela peut s'expliquer par l'effet inverse de la gravité sur le dépôt au plafond, puisque celle-ci influence les particules dans le sens opposé à leur sens de dépôt. Les écoulements secondaires de second type peuvent également influencer le dépôt sur le plafond et les parois verticales et s'ajouter au mécanisme de turbophorèse.

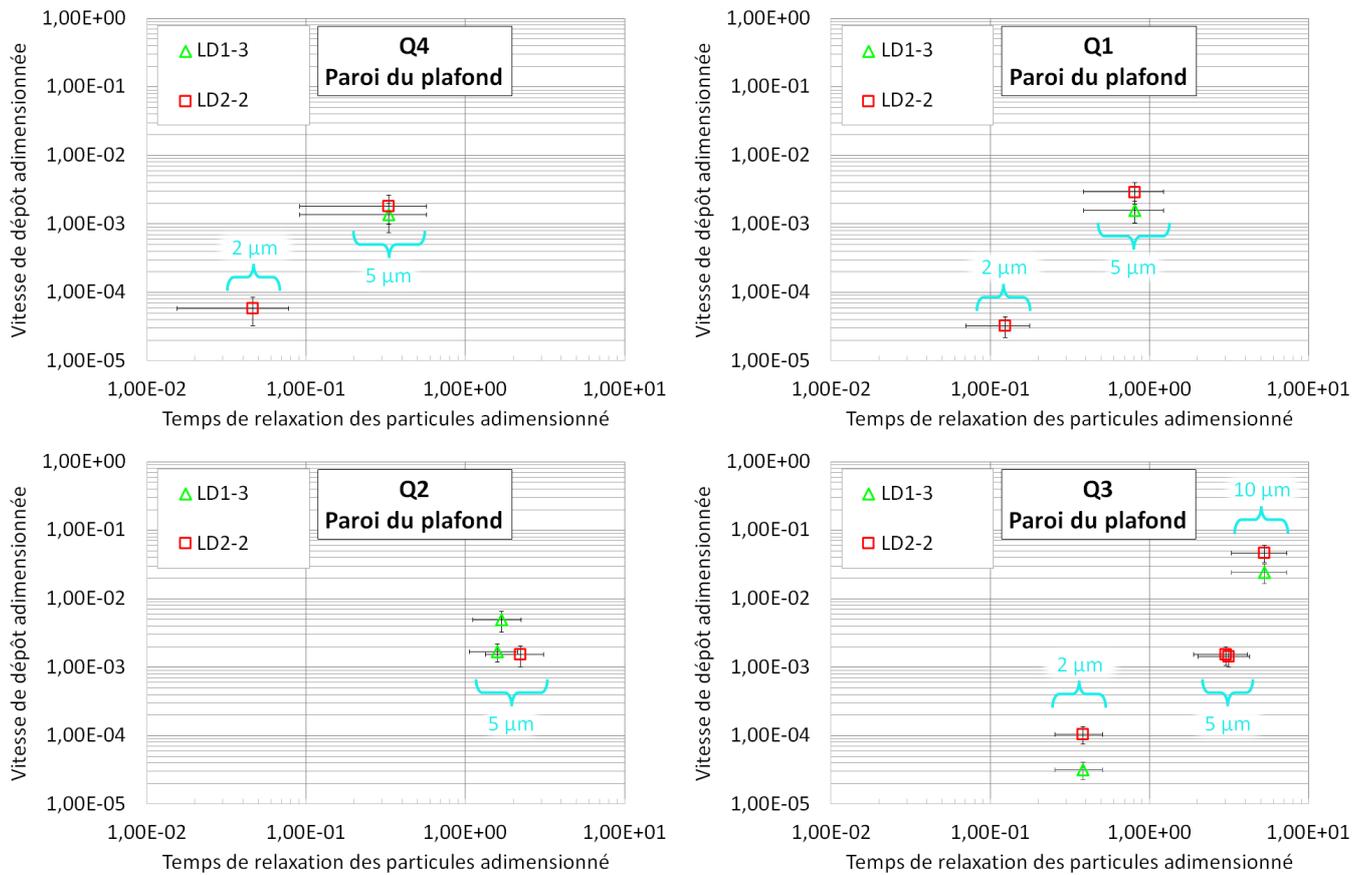


Figure 5.6 – Vitesses de dépôt adimensionnées, mesurées en amont ($-3,1D_h$ – LD1-3) et en aval ($4,7D_h$ – LD2-2) du coude, sur la paroi du plafond de la gaine pour différents débits – Intervalle de confiance de 95%

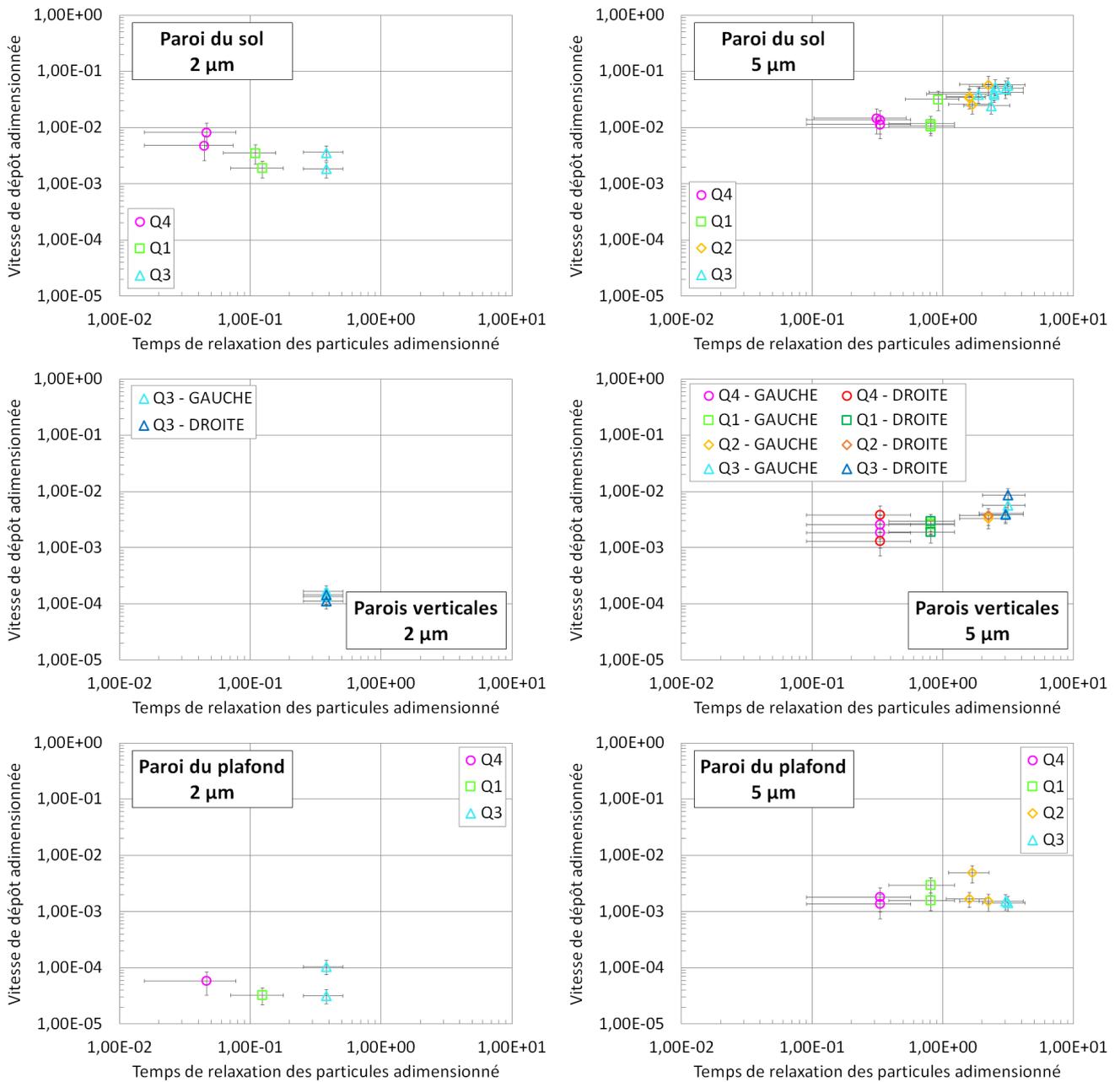


Figure 5.7 – Vitesses de dépôt adimensionnées mesurées aux quatre débits d'étude, en fonction du diamètre des particules et de l'orientation de la paroi — Intervalle de confiance de 95%

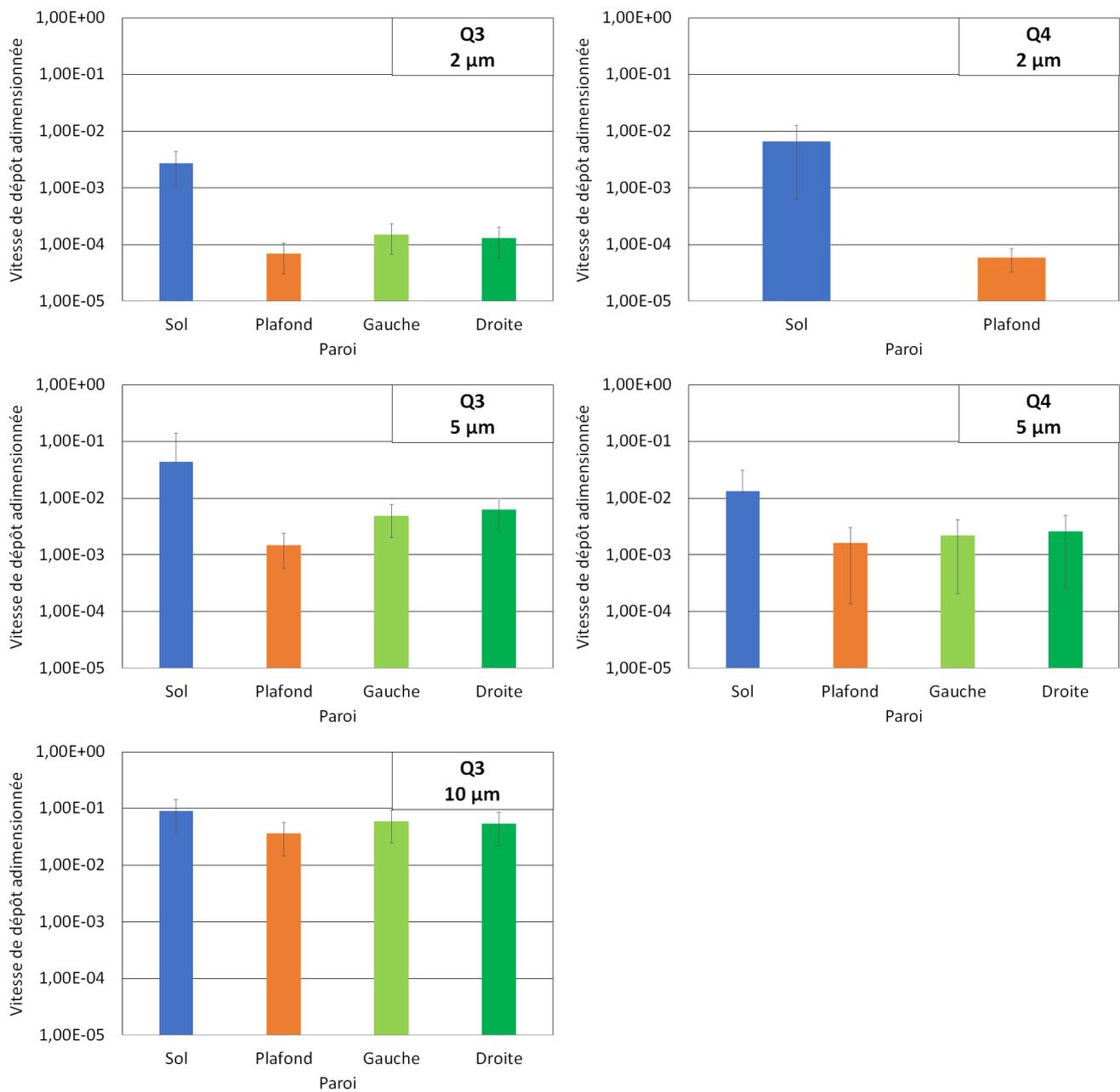


Figure 5.8 – Moyennes des vitesses de dépôt adimensionnées mesurées à Q3 et Q4, en fonction du diamètre des particules et de l'orientation de la paroi — Intervalle de confiance de 95%

5.2.2 Comparaison avec la littérature

5.2.2.1 Travaux expérimentaux

Les résultats expérimentaux présentés dans la section précédente sont comparés aux mesures réalisées par [Sippola et Nazaroff \(2004\)](#) et [Ben Othmane \(2011\)](#). En effet, il s'agit de travaux dans lesquels des mesures expérimentales de dépôt d'aérosols ont été conduites, dans des conduits de ventilation dont les caractéristiques sont présentées dans le [Tableau 5.3](#). [Sippola et Nazaroff \(2004\)](#) ont lavé des panneaux prédécoupés dans les parois d'une gaine carrée, dont le diamètre hydraulique est trois fois plus petit que celui de DIESE, après une longueur d'établissement très longue. [Ben Othmane \(2011\)](#) a utilisé les frottis pour collecter le dépôt en paroi d'une gaine circulaire, dont le diamètre hydraulique est environ deux fois plus petit que celui de DIESE. Le régime, dans cette étude, est non établi, avec une longueur d'établissement courte. Dans DIESE, la longueur d'établissement est courte par rapport à [Sippola et Nazaroff \(2004\)](#), environ $7,3$ contre $80D_h$, mais le profil horizontal de vitesse longitudinale est quasiment uniforme ([Malet et al., 2022](#)).

Les vitesses de dépôt mesurées par chacun sont présentées en fonction de la vitesse d'air, pour des diamètres de particules donnés. Le diamètre donné est la moyenne des diamètres des expériences menées. Les résultats sont regroupés pour les diamètres de particules d'environ 3 , 6 et $10 \mu\text{m}$.

Tableau 5.3 – Caractéristiques des travaux utilisés pour une comparaison des résultats expérimentaux

Référence	Section	D_h (cm)	Longueur d'établissement	U étudiées (m/s)	d_p étudiés (μm)	Matériau
Sippola et Nazaroff (2004)	Carrée	15,2	$\sim 80D_h$	2 à 9	1 à 16	Acier
Ben Othmane (2011)	Circulaire	25	$\sim 4D_h$	4 à 10	1 à 6	Acier inoxydable
DIESE	Rectangulaire	48	$\sim 7,3D_h$	4 à 11	2 à 10	Acier galvanisé

La [Figure 5.9](#) regroupe les mesures réalisées sur les parois du sol. Aux d_p 6 et $10 \mu\text{m}$, on observe une augmentation de la vitesse de dépôt avec l'augmentation de la vitesse d'air. Au diamètre d'environ $3 \mu\text{m}$, les mesures de [Ben Othmane \(2011\)](#) semble montrer une légère augmentation, mais celle-ci n'est pas significative. L'aérosol de $3 \mu\text{m}$ semble mieux suivre l'écoulement grâce à son inertie plus faible. En comparant les différentes études, on constate que les mesures réalisées dans DIESE semblent mieux s'accorder avec les travaux de [Sippola et Nazaroff \(2004\)](#). Cela peut être dû au fait que [Sippola et Nazaroff \(2004\)](#) ont travaillé sur un conduit non circulaire, donc les écoulements, même si le D_h est plus faible que celui de DIESE, sont plus semblables, notamment avec la présence d'écoulements secondaires de second type.

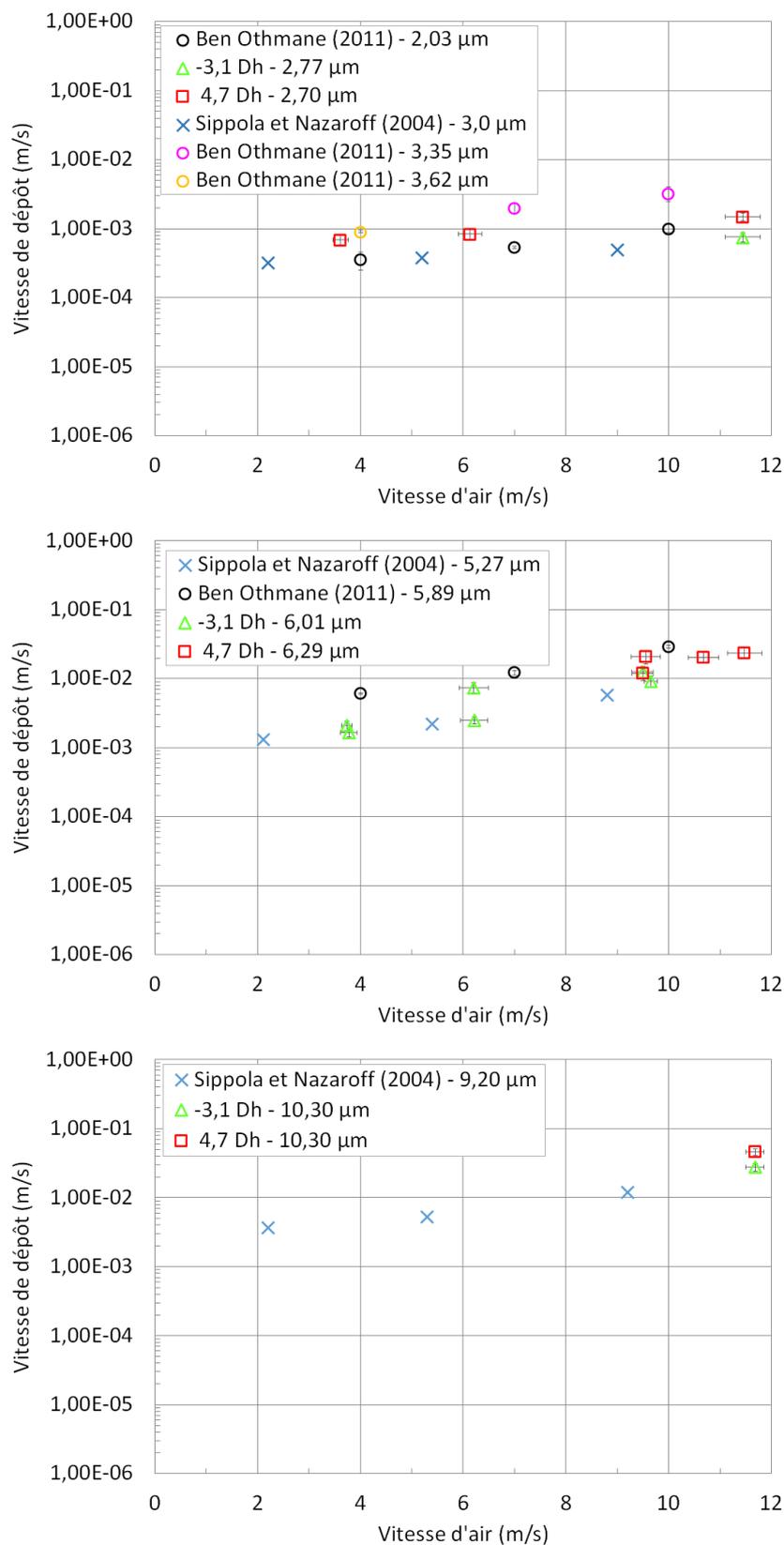


Figure 5.9 – Comparaison avec des travaux de la littérature des vitesses de dépôt mesurées dans DIESE sur la paroi du sol de la gaine — de haut en bas : aérosol de 3, 6 et 10 μm

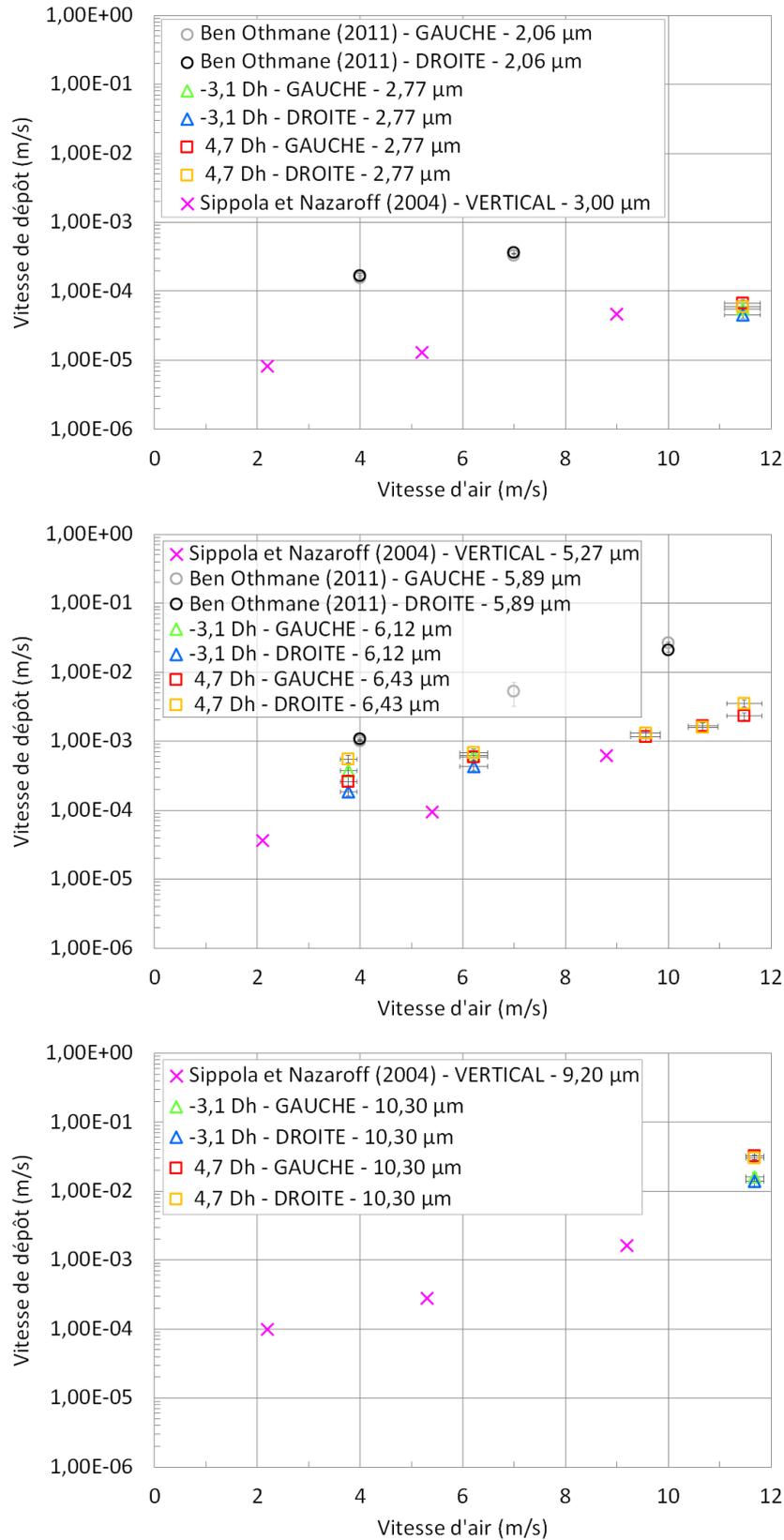


Figure 5.10 – Comparaison avec Sippola et Nazarovff (2004) des vitesses de dépôt mesurées dans DIESE sur les parois verticales de la gaine — de haut en bas : aérosol de 3, 6 et 10 μm

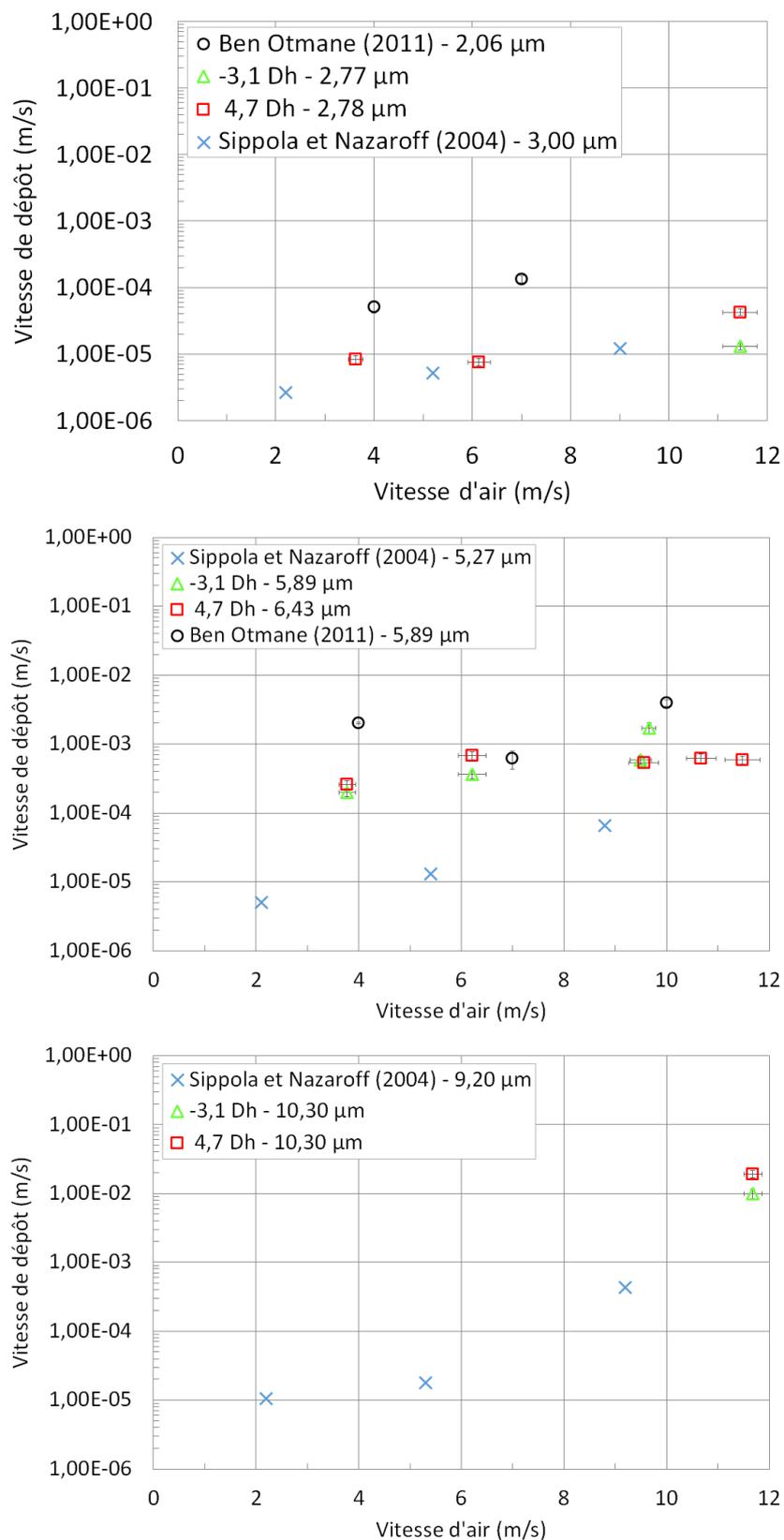


Figure 5.11 – Comparaison avec Sippola et Nazarovff (2004) des vitesses de dépôt mesurées dans DIESE sur la paroi du plafond de la gaine — de haut en bas : aérosol de 3, 6 et 10 μm

La Figure 5.10 regroupe les mesures réalisées sur les parois verticales.

Sippola et Nazaroff (2004) n'ont pas distingué la paroi gauche et la paroi droite de leur gaine selon l'écoulement. On présente donc les vitesses de dépôt de Sippola et Nazaroff (2004) pour une paroi verticale quelconque, celles de Ben Othmane (2011) et celles mesurées dans DIESE pour les parois gauche et droite dans le sens de l'écoulement. Moins de mesures ont été réalisées dans DIESE sur les parois verticales. Cependant, on peut constater que les mesures réalisées pour des vitesses d'air supérieures à 9 m/s semblent suivre les tendances des mesures de Sippola et Nazaroff (2004). Pour un aérosol de 6 μm et des vitesses d'air inférieures à 9 m/s, les vitesses de dépôt mesurées dans DIESE sont supérieures de presque une décade à celles de Sippola et Nazaroff (2004). Cet écart est dû en partie au diamètre de l'aérosol et peut également être dû à un effet d'échelle, le diamètre hydraulique de DIESE étant trois fois supérieur à celui de Sippola et Nazaroff (2004). Comme sur la paroi du sol, on observe que les vitesses de dépôt mesurées par Ben Othmane (2011) sont plus élevées, ce qui pourrait être dû à une influence du coude vertical situé juste en aval des mesures.

La Figure 5.11 regroupe les mesures réalisées sur les parois du plafond de la gaine. Les mesures au plafond sont plus dispersées d'une étude à l'autre. Cette dispersion peut être due aux différences de gradients de turbulence dans l'écoulement. Cette remarque est d'autant plus observable sur les mesures réalisées à des diamètres d'aérosols d'environ 5 μm . Les vitesses de dépôt mesurées dans DIESE semblent concorder avec celles présentées par Sippola et Nazaroff (2004) pour des aérosols de 3 et 10 μm .

Finalement, les ordres de grandeur des vitesses de dépôt mesurées dans DIESE semblent cohérents avec celles mesurées par Sippola et Nazaroff (2004) et Ben Othmane (2011). Les mesures réalisées sur la paroi du sol sont celles qui coïncident le mieux avec les deux études, paroi où le dépôt est majoritaire et piloté par la sédimentation.

Les vitesses de dépôt mesurées dans DIESE ne diffèrent pas significativement entre les parois verticales et le plafond. Il est plus difficile de visualiser des tendances communes sur ces parois avec les deux études citées; le dépôt y est plus sensible aux différences de géométrie et longueurs d'établissement. Les ordres de grandeur sont toutefois satisfaisants, plus particulièrement avec les résultats présentés par Sippola et Nazaroff (2004), dont la géométrie et le caractère établi de l'écoulement est plus proche de DIESE que l'installation de Ben Othmane (2011).

5.2.2.2 Modélisations

Les mesures de vitesses de dépôt sont, dans cette section, comparées aux modèles développés par Ben Othmane *et al.* (2010), décrit page 41 et aux corrélations de Nerisson (2009) et Sippola (2002) données page 38. Pour utiliser ces modèles, nous avons :

- déterminé les vitesses de frottement associées à nos quatre débits d'étude (cf. Sections 4.1.1.1, page 99 et 4.1.2.2, page 102);
- obtenu une expression empirique pour modéliser la vitesse fluctuante pour les débits Q1, Q3 et Q4 (cf. Tableau 4.5, page 106).

Dans ces modèles, le paramètre k^+ apparaît. Comme dit précédemment, les gaines de DIESE sont des gaines industrielles en acier galvanisé. La rugosité de l'acier galvanisé est comprise entre 50 et 150 μm , mais la gaine présente des aspérités. Ces valeurs de rugosité correspondent, pour un débit Q3,

à une rugosité adimensionnée k^+ comprise entre 2 et 6 (au débit Q4, $0,7 < k^+ < 2$).

Plusieurs valeurs de k^+ sont testées en utilisant le modèle de [Ben Othmane et al. \(2010\)](#) appliqué à DIESE pour le débit Q3, afin d'observer l'influence de la rugosité. Les tests du modèle de [Ben Othmane et al. \(2010\)](#) sont conduits avec :

1. un essai de référence : les modélisations semi-empiriques proposées par [Ben Othmane \(2011\)](#) pour la vitesse fluctuante et la diffusivité turbulente sont utilisées (cf. Équation 1.26 et Équation 1.28), obtenus pour une gaine circulaire de 25 cm de diamètre en acier inoxydable ;
2. un essai d'application à DIESE : la modélisation semi-empirique de la vitesse fluctuante utilisée est celle obtenue par grâce aux expériences sur DIESE (cf. Tableau 4.5) et la modélisation semi-empirique de la diffusivité turbulente est celle proposée par [Ben Othmane \(2011\)](#).

Les résultats obtenus pour le premier cas, c'est-à-dire en utilisant le modèle de [Ben Othmane et al. \(2010\)](#) avec les modélisations semi-empiriques obtenus dans des gaines circulaires de 25 cm de diamètre, sont présentés Figure 5.12. Les différentes courbes correspondent aux vitesses de dépôt adimensionnées prédites pour plusieurs valeurs de rugosité adimensionnée. Le débit Q3 est utilisé comme référence car nos mesures expérimentales sont plus nombreuses à ce débit. Le modèle de [Ben Othmane et al. \(2010\)](#) est appliqué sans influence de la thermophorèse puisque les gaines de DIESE sont isolées thermiquement. k^+ correspond à la rugosité k multipliée par le rapport de u^*/ν , u^* valant 0,41 m/s à ce débit.

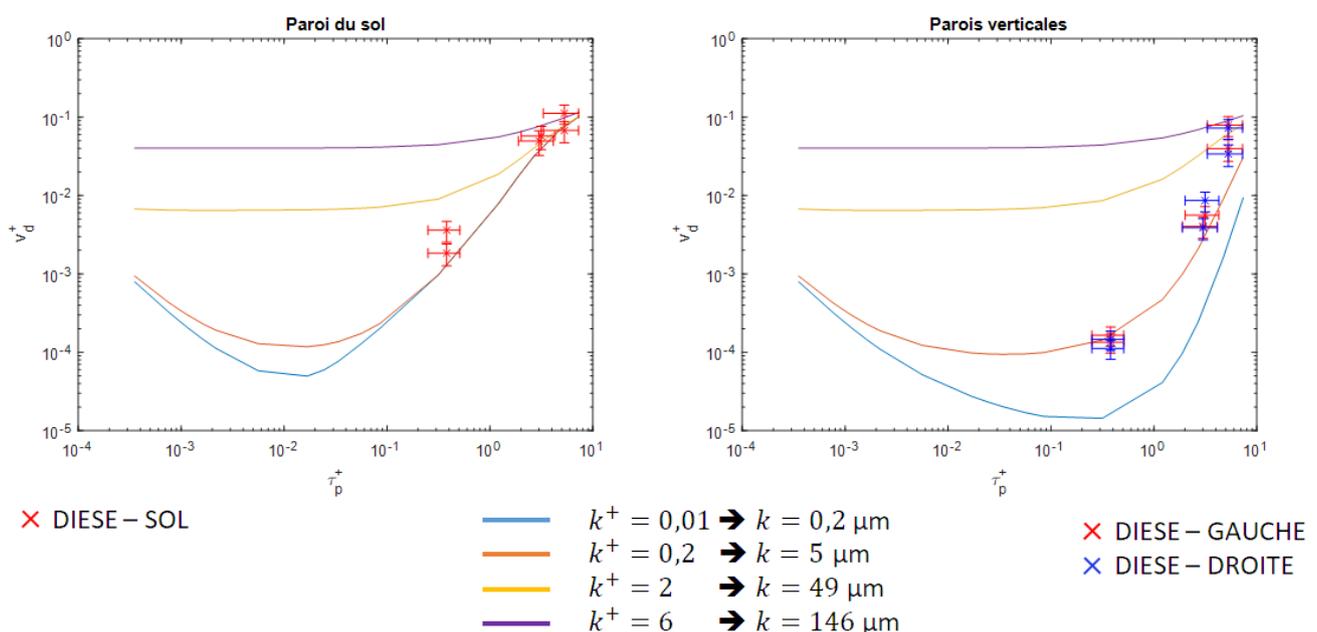


Figure 5.12 – Comparaison des vitesses de dépôt obtenues pour différentes valeurs de k^+ avec le modèle de [Ben Othmane et al. \(2010\)](#) au débit Q3 pour la paroi du sol (à gauche) et les parois verticales (à droite)

Le modèle prédit, de manière logique, une augmentation de la vitesse de dépôt avec une augmentation de la rugosité. Le modèle de [Ben Othmane et al. \(2010\)](#) dépend fortement de k^+ . Les résultats

expérimentaux obtenus dans DIESE semblent coïncider avec la courbe $k^+=0,2$ prédite par le modèle de Ben Othmane *et al.* (2010). Une rugosité adimensionnée k^+ égale à 0,2 correspond à une rugosité de $5 \mu\text{m}$, ce qui n'est pas représentatif des gaines de DIESE. On constate que les courbes prédites par le modèle pour $k^+=2$ et 6 sont très éloignées des résultats expérimentaux.

La Figure 5.13 présente les vitesses de dépôt v_d^+ prédites par le modèle dans le cas où on applique la modélisation semi-empirique de la vitesse fluctuante, obtenue à partir des mesures expérimentales en proche paroi (second cas). La modélisation semi-empirique de la diffusivité turbulente de l'air utilisée est celle utilisée par Ben Othmane *et al.* (2010).

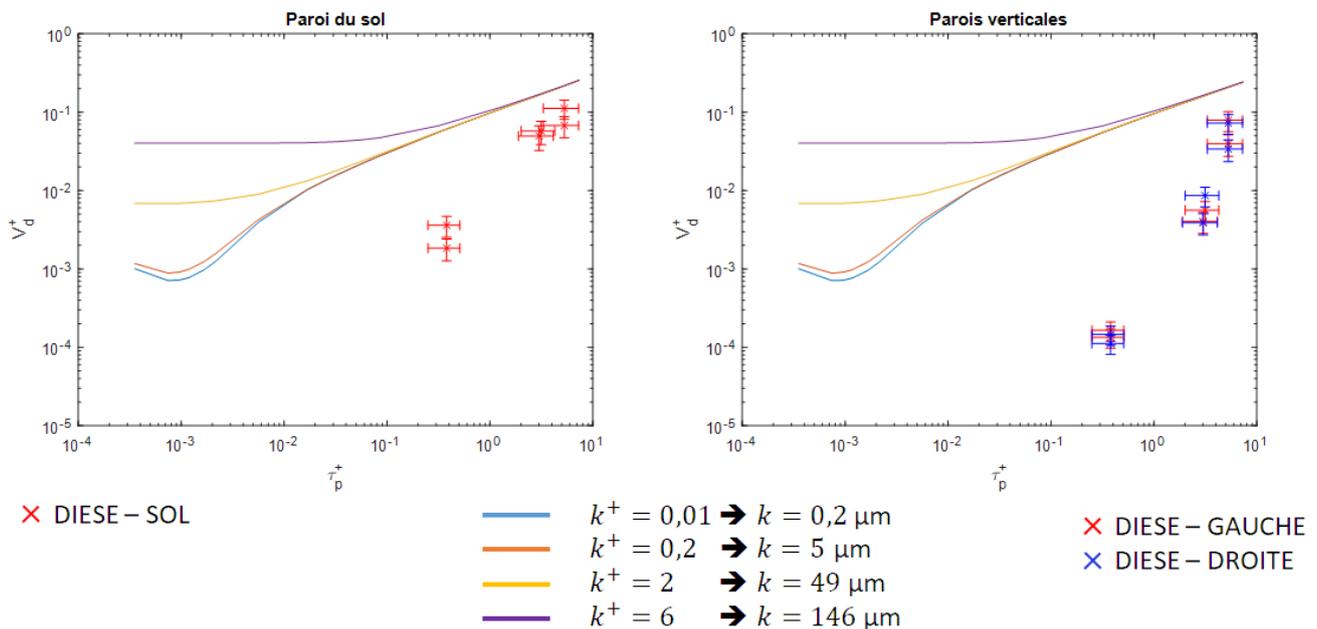


Figure 5.13 - Comparaison des vitesses de dépôt obtenues pour différentes valeurs de k^+ avec le modèle de Ben Othmane *et al.* (2010) en utilisant le profil de vitesse fluctuante mesuré sur DIESE au débit Q3 pour la paroi du sol (à gauche) et les parois verticales (à droite)

À nouveau, le modèle reflète bien l'augmentation du dépôt avec l'augmentation de la rugosité adimensionnée, avec une grande influence de paramètre. En revanche, dans ce cas, aucune valeur de rugosité ne rend compte des vitesses de dépôt mesurées expérimentalement. Cependant, la modélisation semi-empirique de la diffusivité turbulente fait intervenir quatre coefficients empiriques, comme nous l'avons vu dans l'Équation 1.26 page 42, qui ne sont pas basés sur des mesures expérimentales dans DIESE.

Quelques tests de variabilité sur ces quatre coefficients sont donc réalisés, afin d'observer si une modélisation semi-empirique correspondant à nos mesures expérimentales peut être obtenue (Figure 5.14). Tous les tests réalisés ne sont pas présentés. Une combinaison des coefficients A , B , C et D permet de recouper avec les vitesses expérimentales mesurées sur la paroi du sol, mais ce n'est pas le cas pour les parois verticales, si l'on considère la rugosité réelle de la surface.

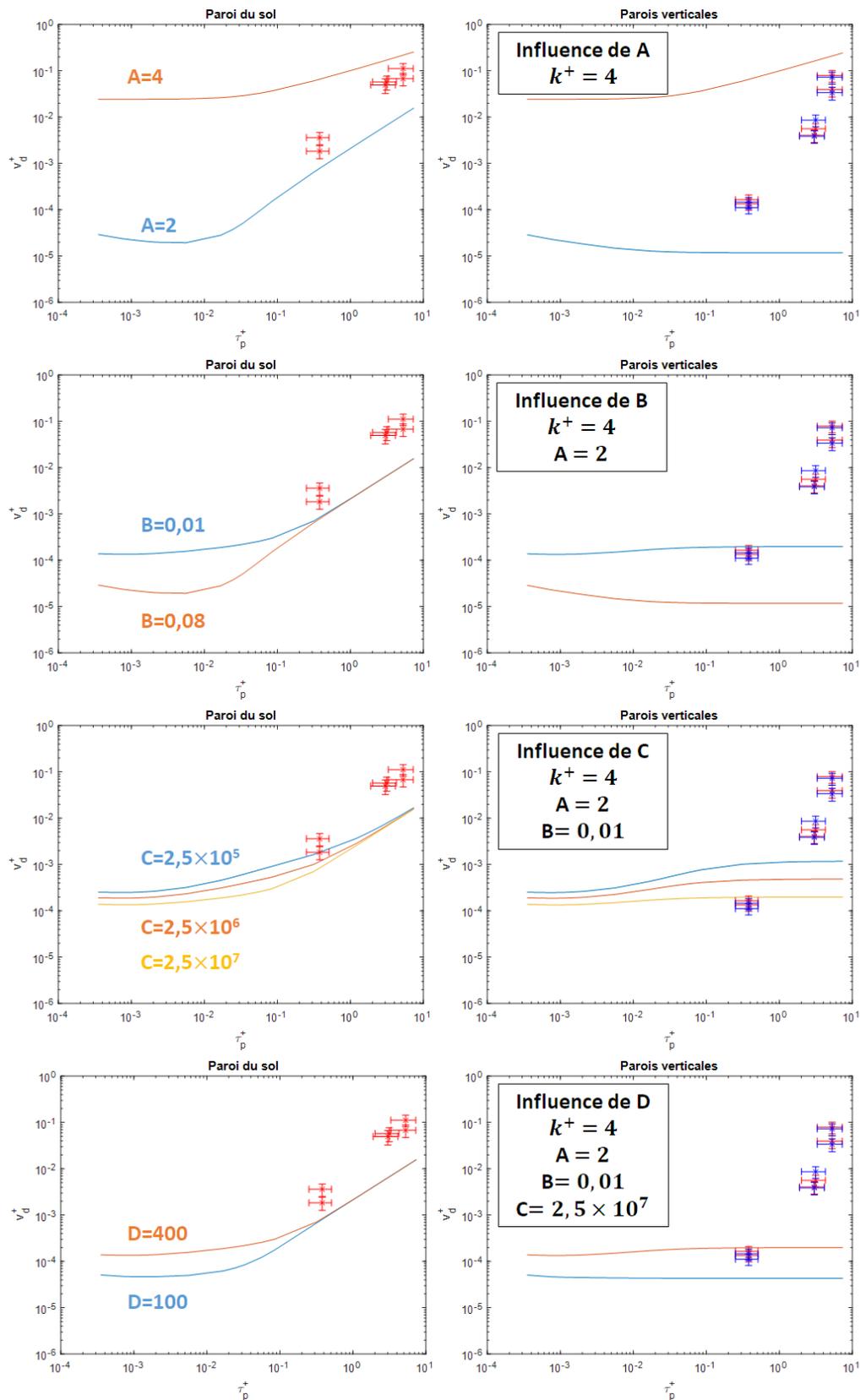


Figure 5.14 – Comparaison des vitesses de dépôt expérimentales avec celles prédites par le modèle de Ben Othmane *et al.* (2010) au débit Q_3 — Influence des coefficients A , B , C et D intervenant dans la modélisation semi-empirique de la diffusivité turbulente de l'air

Des tests ont été réalisés avec des valeurs faibles de k^+ (0,1 par exemple), sans trouver de meilleur compromis. Ce modèle peut donc, *a priori*, être adopté pour décrire le dépôt sur la paroi du sol, dans une configuration de conduits droits industriels rectangulaires similaires à ceux de DIESE, mais la modélisation du dépôt en paroi verticale et au plafond doit être améliorée (expérimentalement ou par le modèle).

Le deuxième modèle utilisé pour comparaison avec les vitesses de dépôt mesurées est la corrélation développée par Nerisson (2009), décrite page 38. Les résultats obtenus en appliquant cette corrélation à DIESE sont présentés Figure 5.15.

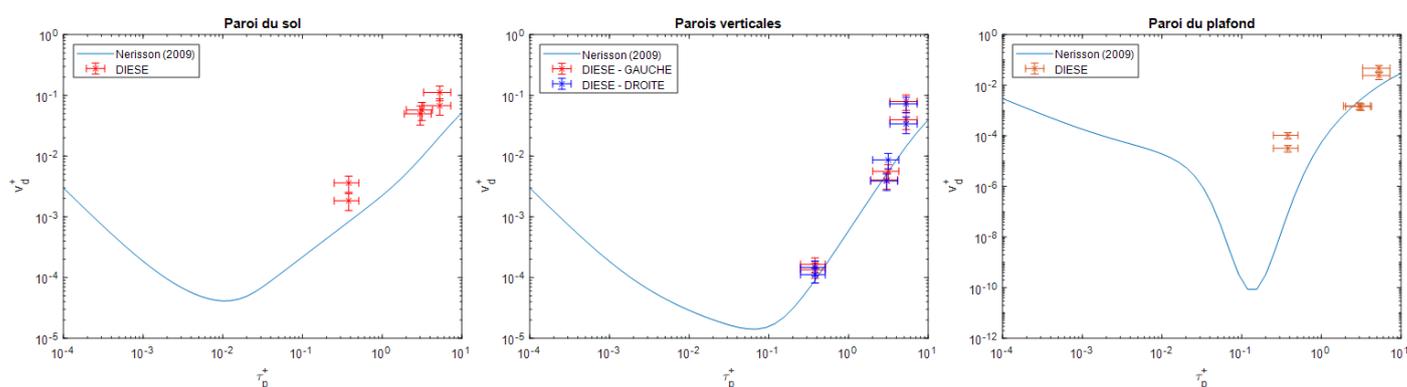


Figure 5.15 – Comparaison des vitesses de dépôt obtenues avec la corrélation de Nerisson (2009) au débit Q3 — Valeurs des paramètres : $n=1$; $\omega=1700$; $\lambda_0=13,7$; $\lambda_1=2/3$; $Sc_t=1$ et $y^+=30$

La corrélation sous-estime faiblement le dépôt sur la paroi du sol et du plafond dans le régime de sédimentation. Des mesures complémentaires à des petits diamètres de particules permettraient de vérifier si la modélisation en régime de diffusion permet de retrouver les résultats expérimentaux. En revanche, les vitesses de dépôt mesurées expérimentalement sur les parois verticales recourent avec la modélisation. Enfin, la chute de la vitesse de dépôt prédite au plafond pour les particules les plus pénétrantes ne semble pas cohérente avec un comportement physique réaliste et ne semble pas recouper avec la tendance expérimentale.

De la même façon que pour le modèle de Ben Othmane *et al.* (2010), la corrélation de Nerisson (2009) fait intervenir quatre coefficients empiriques :

- n , qui, lorsque égal à 1, permet, d'après Nerisson (2009), de retrouver le modèle semi-empirique de Wood (1981), avec $\omega=2200$, $\lambda_0=17,5$ et $\lambda_1=2/3$;
- λ_0 et λ_1 basés sur des travaux réalisés dans les couches limites thermiques.

La valeur de Sc_t est choisie arbitrairement égale à 1 et $y_{0\log}^+$ est choisi égal à 30 pour se placer en entrée de zone logarithmique de la couche limite, où la turbulence est développée (Nerisson, 2009), et, comme on le verra sur la Figure 5.17, ces paramètres ne jouent pas.

On effectue des tests de sensibilité sur chacun de ces paramètres pour en observer l'influence (Figures 5.16 et 5.17).

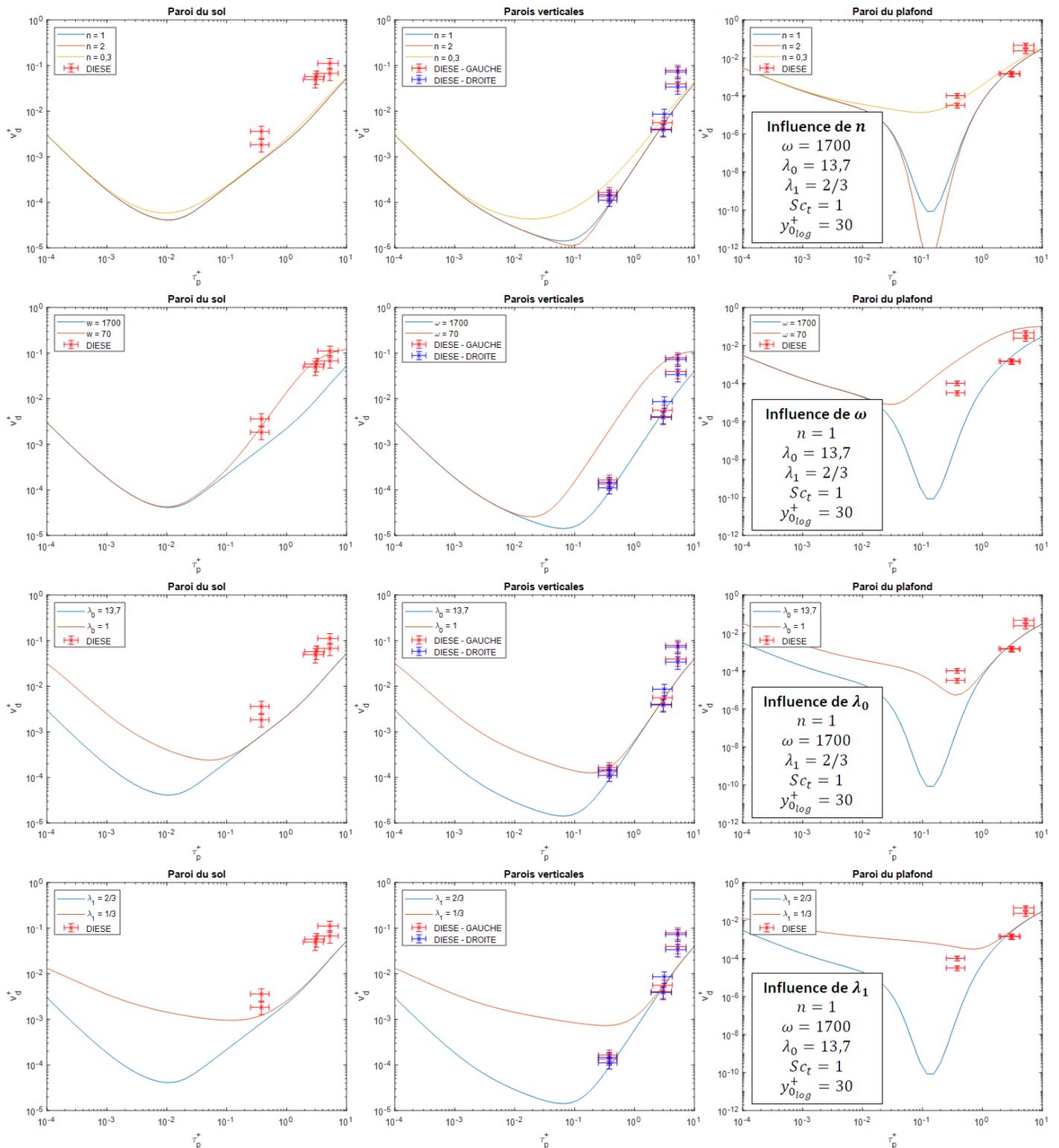


Figure 5.16 – Influence des paramètres n , ω , λ_0 et λ_1 de la corrélation de Nerisson (2009) au débit Q3

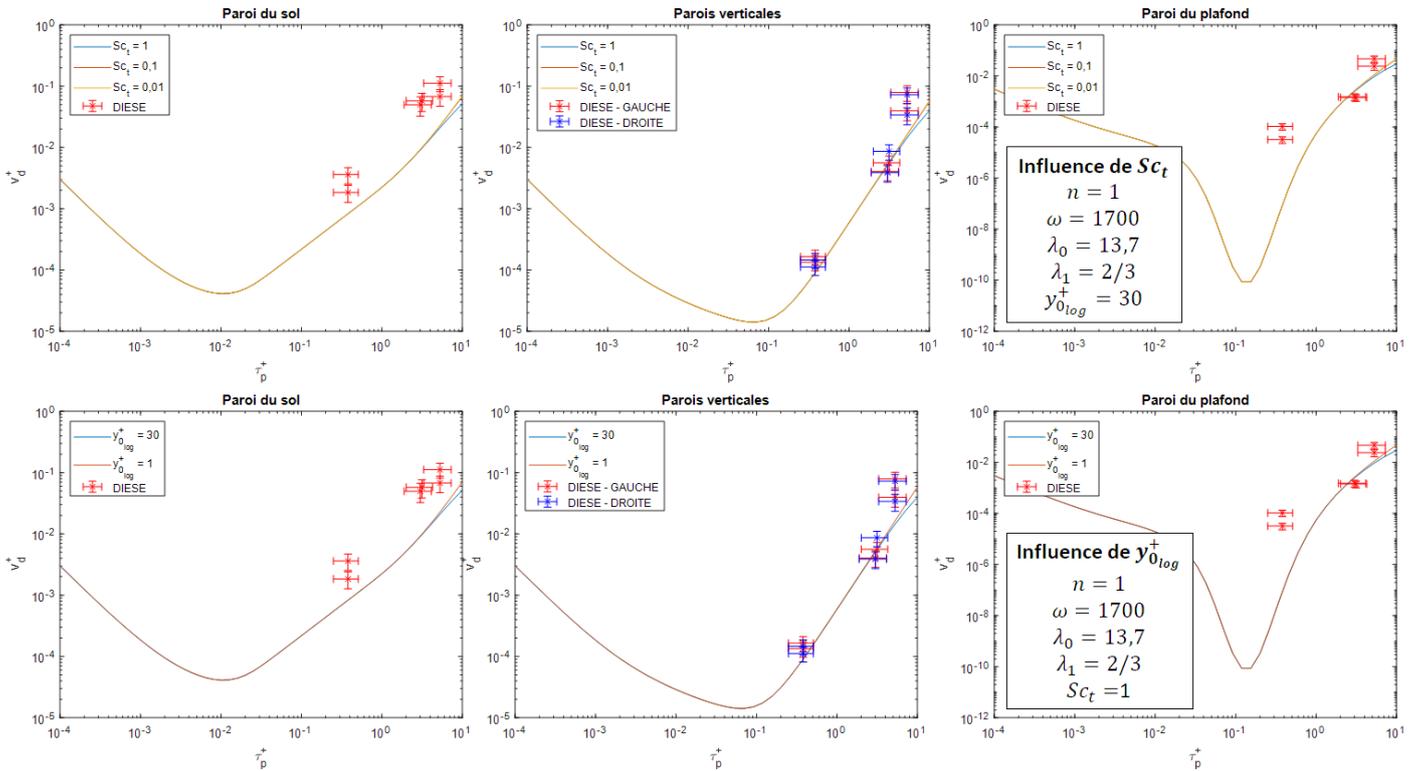


Figure 5.17 – Influence des grandeurs Sc_t et $y_{0,log}^+$ de la corrélation de Nerisson (2009) au débit Q3

L'étude de sensibilité sur les différents paramètres montre que les coefficients n et ω influencent les prédictions pour des τ_p^+ supérieurs à 10^{-1} , où nous avons des résultats expérimentaux. Des expériences avec des aérosols de diamètres inférieurs à $1 \mu m$ permettraient de vérifier la cohérence de l'influence des paramètres λ_0 et λ_1 . On constate aussi que Sc_t et $y_{0,log}^+$ n'influencent pas significativement les prédictions du modèle.

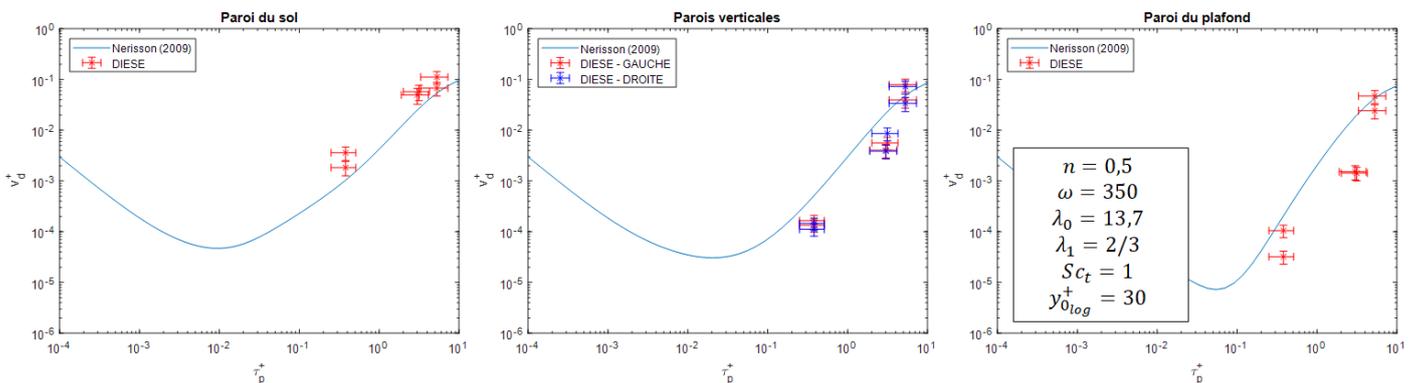


Figure 5.18 – Meilleur compromis obtenu avec la corrélation de Nerisson (2009) au débit Q3 — Valeurs des paramètres : $n=0,5$; $\omega=350$; $\lambda_0=13,7$; $\lambda_1=2/3$; $Sc_t=1$ et $y_{0,log}^+=30$

Le meilleur compromis pour prédire les résultats expérimentaux obtenus au débit Q3 est obtenu avec les coefficients suivants : $n=0,5$ (contre $n=1$ ou 2 dans la corrélation développée en 2009); $\omega=350$

(contre $\omega=1700$); et les valeurs par défaut de $\lambda_0=13,7$; $\lambda_1=2/3$; $S_{c_t}=1$ et $y_{0log}^+=30$ (Figure 5.18). La Figure 5.19 montre les prédictions du meilleur compromis appliqué aux autres débits, en comparaison avec les mesures expérimentales. Les mesures de dépôt au sol et sur les parois verticales sont bien représentées par le modèle. En revanche, il semble que la valeur de n ait une influence non négligeable sur les prédictions au plafond selon le débit.

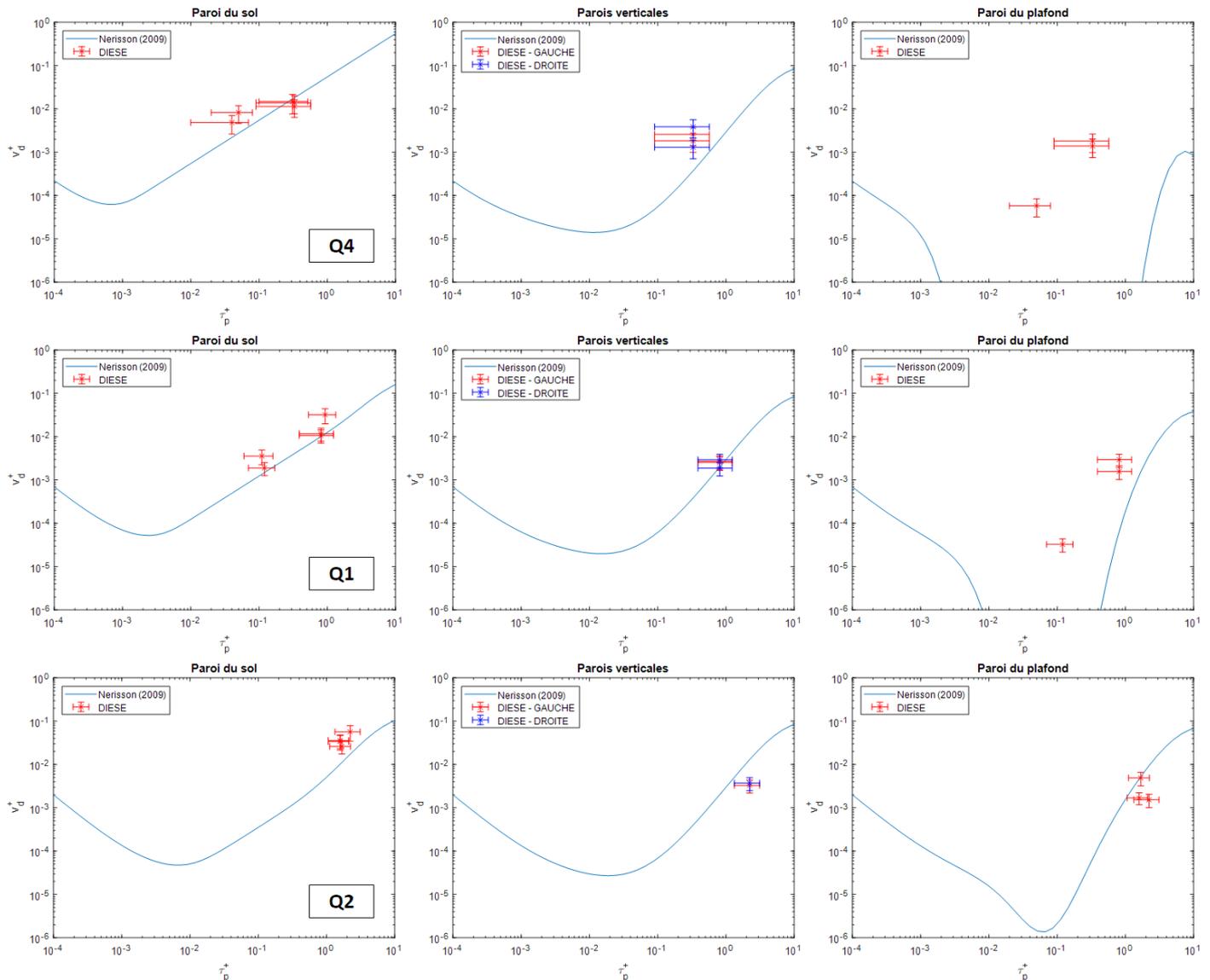


Figure 5.19 – Application aux autres débits du meilleur compromis obtenu avec la corrélation de Nerisson (2009) au débit Q3 – Valeurs des paramètres : $n=0,5$; $\omega=350$; $\lambda_0=13,7$; $\lambda_1=2/3$; $S_{c_t}=1$ et $y_{0log}^+=30$

Le troisième modèle utilisé pour comparaison est la corrélation développée par Sippola (2002). Elle prédit des vitesses de dépôt adimensionnée au plafond et sur les parois verticales. Elle fait intervenir quatre coefficients empiriques :

- $k_1 = \sqrt{f/2}$;

- $k_3 = 0,13$;
- k_4 dont la valeur dépend de l'orientation de la paroi et vaut $1,8 \times 10^{-4}$ au plafond et $8,1 \times 10^{-4}$ pour les parois verticales ;
- k_5 dont la valeur dépend de l'orientation de la paroi et vaut 1,1 au plafond et 1,4 pour les parois verticales.

Une étude de sensibilité est réalisée sur les paramètres k_4 et k_5 car ceux sont eux qui interviennent majoritairement dans l'expression de la corrélation, le coefficient k_1 prenant en compte la rugosité et k_3 représentant la vitesse de dépôt adimensionnée maximale pouvant être atteinte. La Figure 5.20 montre que les deux paramètres influencent les prédictions du dépôt de particules inertielles. Le coefficient k_5 joue notamment sur le gradient, et, lorsqu'il est égal à 3, les prédictions recourent avec les données expérimentales pour le débit Q3.

Le meilleur compromis est cependant obtenu avec les valeurs $k_4 = 2,0 \times 10^{-3}$ au plafond et sur les parois verticales et $k_5 = 1,7$, afin de s'approcher des données expérimentales mesurées aux autres débits (Figure 5.21). Les mesures sont bien prédites aux débits intermédiaires Q2 et Q1, et le modèle surestime légèrement les mesures au plafond au débit Q3 et Q2 et sous-estime légèrement les mesures au plafond et sur les parois verticales au débit Q4.

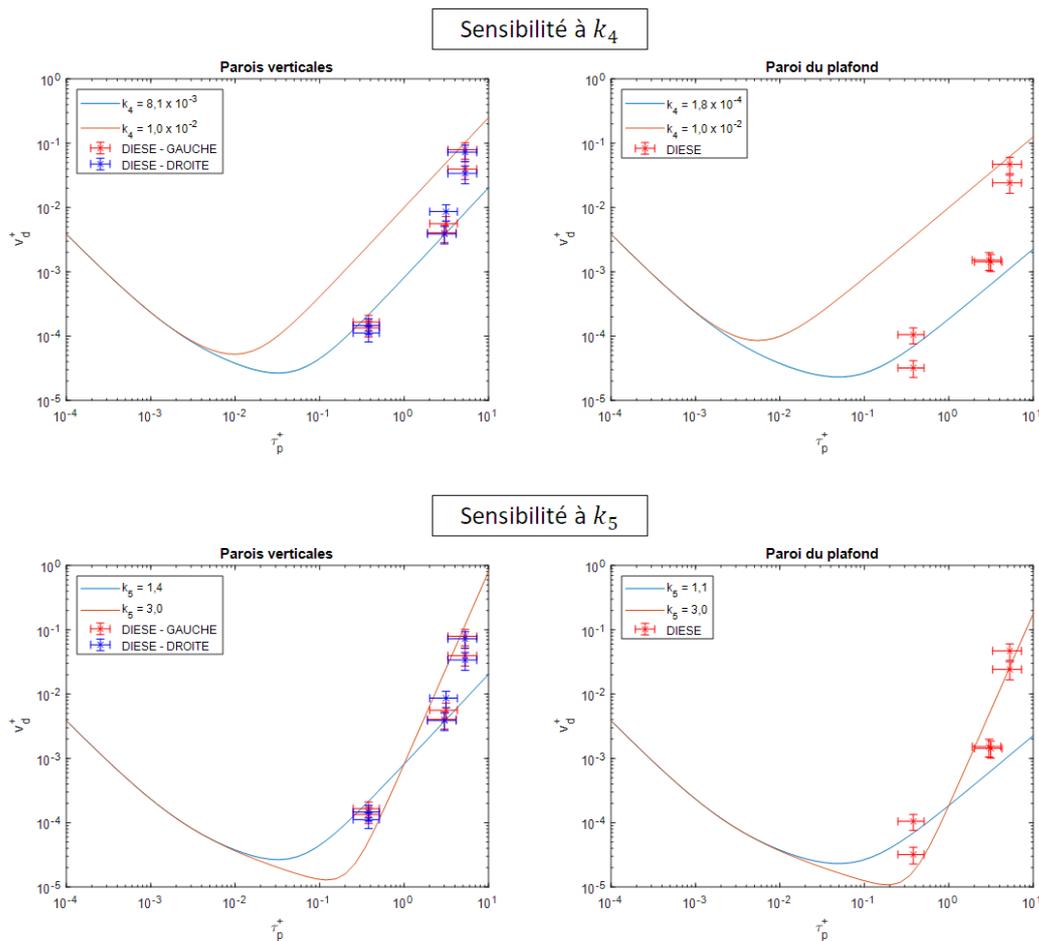


Figure 5.20 – Influence des grandeurs k_4 et k_5 de la corrélation de Sippola (2002) au débit Q3

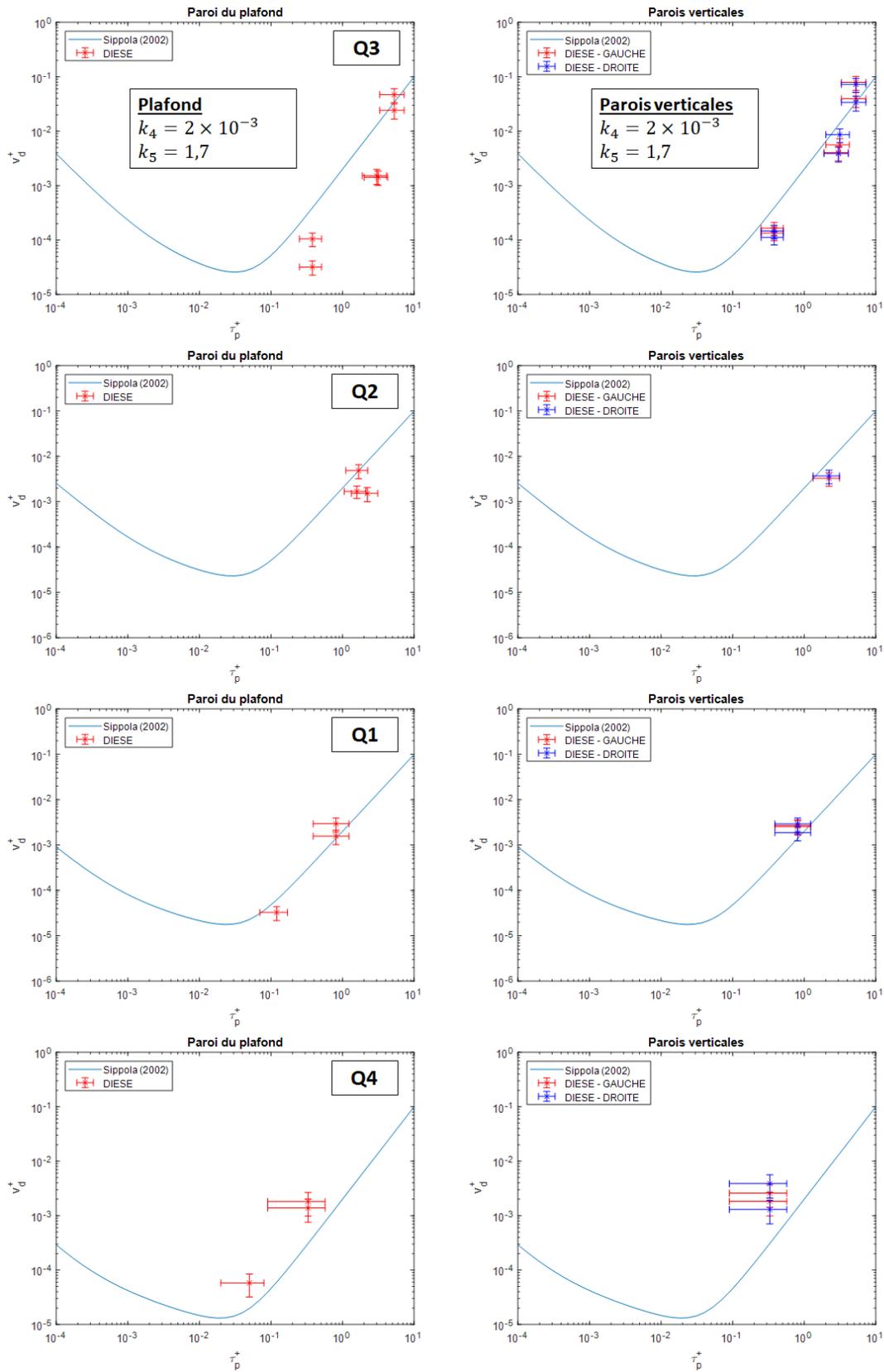


Figure 5.21 – Meilleur compromis obtenu avec la corrélation de Sippola (2002) — Valeurs des paramètres : $k_4=2,0 \times 10^{-3}$ et $k_5 = 1,7$

5.2.2.3 Synthèse

La vitesse de frottement et le profil de vitesse fluctuante ont bien pu être mesurés et ainsi incorporés dans ce modèle, fournissant une base expérimentale à la modélisation. En revanche, ce n'est pas le cas pour la diffusivité turbulente de l'air dans DIESE, contrairement à Ben Othmane (2011) qui a utilisé des données expérimentales pour affiner la modélisation semi-empirique de cette grandeur. Il est remarquable que les vitesses de dépôt prédites par le modèle semi-empirique de Ben Othmane *et al.* (2010) sont fortement dépendantes de leurs coefficients empiriques, en particulier pour les parois verticales et le plafond. Une perspective d'amélioration de l'utilisation du modèle de Ben Othmane *et al.* (2010) est la mesure de la diffusivité turbulente.

Concernant les vitesses de dépôt prédites par la corrélation développée par Nerisson (2009), lorsque la valeur des coefficients n et ω sont modifiées, celles-ci s'approchent des mesures expérimentales sur le sol et les parois verticales. Le recoupement avec les mesures au plafond est plus variable, les prédictions pour les débits élevés (Q2 et Q3) étant les meilleures.

De la même façon, la corrélation développée par Sippola (2002) s'approche des mesures expérimentales au plafond et sur les parois verticales lorsqu'on modifie la valeur de certains coefficients empiriques. Les prédictions pour les débits intermédiaires sont satisfaisantes et s'éloignent légèrement pour les débits en extrémité de gamme.

Les mesures expérimentales n'étant pas retrouvées dans leur globalité par les deux modèles testés, on peut supposer que l'aspect géométrique de la gaine joue un rôle très important dans le dépôt. En effet, les modèles testés ont été développés sur la base d'expériences réalisées dans des conduits circulaires ou carrés de moyenne taille. Contrairement aux expériences et modélisations de Ben Othmane, la longueur d'établissement ne semble pas impacter le dépôt dans DIESE : comme vu dans la Section 5.2.1, les mesures de dépôt sont identiques en amont et en aval du coude, alors que la longueur d'établissement varie de $7,3$ à $4D_h$ (rapport de 1,8).

Conduire des expériences avec d'autres diamètres de particules permettrait de vérifier ce constat sur d'autres débits et comparer les prédictions des modèles à des points de mesure supplémentaires (par exemple $d_p < 0,5 \mu\text{m}$ pour $\tau_p^+ < 0,03$). Cependant, diminuer le diamètre des particules génère un risque d'engendrer une baisse des quantités déposées : la limite de détection du fluorimètre peut être atteinte, ou risque d'augmenter fortement le temps d'expérience pour assurer un dépôt mesurable. Par ailleurs, à ces diamètres, les techniques optiques sont inapplicables.

Néanmoins, il semblerait qu'une amélioration des modèles est possible, notamment les modélisations semi-empiriques basées sur les mesures expérimentales, afin de prendre en compte les gaines de grande taille et les gaines de section rectangulaire. Il est également nécessaire d'améliorer l'estimation de la vitesse de frottement afin de réduire l'incertitude concernant cette grandeur.

5.3 Dépôt à l'intérieur de différents coudes

5.3.1 Résultats

Comme abordé dans la Section 1.4.2 et observé dans le Chapitre 4, l'écoulement dans un coude est complexe : la concentration d'aérosols inertiels dans le coude pourrait ne pas être homogène. Il paraît donc difficile d'utiliser la vitesse de dépôt comme grandeur représentative du dépôt, puisque v_d fait

intervenir la concentration en gaine C_{bulk} . Par conséquent, on s'intéresse, pour les mesures de dépôt d'aérosols dans le coude, à la concentration massique surfacique C_d .

Toutes les masses déposées ont été mesurées pour un aérosol dont le diamètre théorique est de 5 μm . Le diamètre aérodynamique mesuré se situe plutôt aux alentours de 6 μm .

Les résultats bruts sont présentés en Annexe B, car leur utilisation permet difficilement une inter-comparaison entre les coudes.

5.3.1.1 Comparaison du dépôt dans les différents coudes

La comparaison du dépôt dans les coudes, entre eux, fait l'objet de cette section. Pour ce faire, on choisit d'observer le rapport des concentrations massiques surfaciques sur la masse d'aérosols injectée, mesurée à l'APS durant l'expérience :

$$\frac{C_d}{\int_{\Delta t} C_m} \quad (5.1)$$

exprimé en ppb (ng d'aérosol déposé par g d'aérosol injecté). La concentration massique C_m est mesurée sur trente minutes par échantillon d'une minute.

Les résultats sont présentés sur la Figure 5.22 pour les parois du sol et du plafond et sur la Figure 5.23 pour les parois verticales. L'incertitude sur C_d est inférieure à 10% pour un intervalle de confiance de 95%.

D'un point de vue global, on peut dire que le coude qui engendre le plus de dépôt semble être le coude abrupt CD1-4. CD1-1 et CD1-2, dont le premier a un rayon de courbure environ deux fois supérieur au second, présentent des dépôts relativement similaires. CD1-3 et CD1-4 présentent plus de dépôt que ces derniers.

Si l'on s'intéresse à la paroi du sol (Figure 5.22 en haut), on peut constater que, à 45°, CD1-2 est le coude qui présente le moins de dépôt, soit presque trois fois moins de dépôt que CD1-4 pour les mêmes surfaces (surfaces 1 à 3). Le dépôt sur ces surfaces dans CD1-2 montre la présence d'un gradient négatif de la paroi intérieure vers la paroi extérieure, commun aux coudes CD1-1 et CD1-3; CD1-4 présentant un gradient inversé.

À 90° sur la paroi du sol, CD1-2 présente toujours le moins de dépôt (trois fois moins que CD1-4 pour les surfaces 4 à 6), avec un gradient du même type qu'à 45°, également commun à CD1-1 et CD1-3. CD1-4 présente un dépôt trois fois supérieur sur la surface centrale à 90° (surface 5) que sur les surfaces voisines. Cette tendance est retrouvée dans une moindre mesure dans CD1-3 et reste inexplicite à ce jour. Des essais de répétabilité sont nécessaires pour les confirmer.

Les mesures effectuées sur les parois du plafond à 45° (surfaces 7 à 9, Figure 5.22 en bas) montrent un dépôt très faible par rapport aux parois correspondantes sur le sol : un rapport de 3 environ pour CD1-4, de 17 pour CD1-2 et supérieur à 30 pour CD1-1 et CD1-3.

À 90° sur la paroi du plafond (surfaces 10 à 12, Figure 5.22 en bas), les mesures montrent des dépôts très légèrement plus élevés qu'à 45°. Par rapport aux surfaces correspondantes sur la paroi du sol, les rapports sont toujours très élevés avec : un rapport de 2 pour CD1-4, de 3 pour CD1-1, de 44 pour CD1-3 et de 60 pour CD1-2.

Les surfaces verticales (surfaces 13 à 16) (Figure 5.23) présentent des dépôts comparables aux surfaces du plafond pour CD1-1. Les autres coudes présentent une augmentation du dépôt d'amont en aval sur ces surfaces. Dans CD1-2, le dépôt est très faible en surface 15 et augmente de 45° à 90° (d'amont en aval). CD1-3 présente également un dépôt très faible en surface 15. Les dépôts sur les surfaces 14 à 16 de CD1-3 sont homogènes entre elles. Dans CD1-4, le dépôt est faible sur la paroi intrados du coude, mais la paroi extrados présente des dépôts très élevés par rapport aux autres coudes (entre 7 et 59 fois supérieur pour la surface 14 par exemple). Le dépôt en surface 14 dans CD1-4 est comparable au dépôt mesuré sur le sol (surface 6).

Finalement, les coudes qui présentent le moins de dépôt sont ceux dont les rayons de courbure sont les plus élevés. Les coudes académiques, comportant des angles droits, présentent des dépôts élevés, ce qui font d'eux des candidats adéquats pour tester la modélisation. Le dépôt y est également plus important au plafond, ce qui peut être la conséquence des écoulements secondaires, des recirculations associées, et de la diffusion turbulente.



Figure 5.22 – Rapport des concentrations d'aérosol déposées par rapport à la masse d'aérosols injectée (en ppb) dans les quatre coudes d'étude pour les parois du sol et du plafond

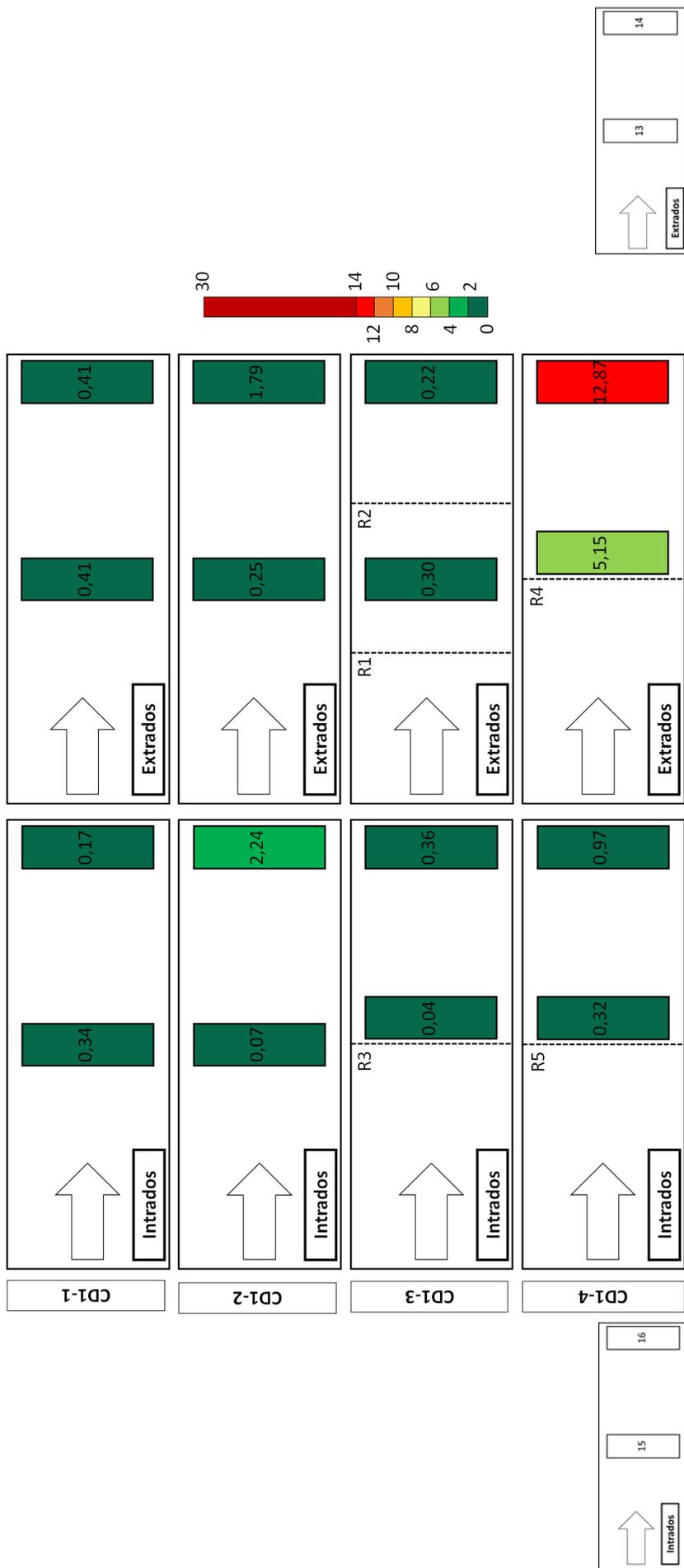


Figure 5.23 – Rapport des concentrations d'aérosol déposées par rapport à la masse d'aérosols injectée (en ppb) dans les quatre coudes d'étude pour les parois verticales

5.3.1.2 Répartition du dépôt au sein de chaque coude

Dans cette section, nous comparons la répartition du dépôt au sein de chaque coude. La répartition du dépôt à l'intérieur des quatre coudes d'étude (cf. Figure 5.2) est présentée sous forme de ratio de la concentration massique déposée mesurée localement sur la concentration massique maximale mesurée dans le coude :

$$C_{d_{Coude}} = \frac{C_d}{C_{d_{max_{Coude}}}} \quad (5.2)$$

La répartition du dépôt sur les surfaces du sol est différente selon les coudes (Figure 5.24, en haut), contrairement à ce que l'on a pu voir dans les conduits droits en amont et en aval du coude, puisque le dépôt est piloté par la sédimentation : l'écoulement influence fortement le dépôt. Dans CD1-1 et CD1-2, dont les géométries diffèrent uniquement par leur rayon de courbure ($R_{CCD1-1} \sim 2 \times R_{CCD1-2}$), le dépôt est maximum le long de la paroi intérieure. Un gradient de dépôt négatif est visible de la paroi intérieure vers la paroi extérieure, avec une légère diminution des masses déposées mesurées. Dans CD1-3, coude dont la paroi extérieure est segmentée en trois parties et la paroi intérieure forme un angle droit, le dépôt au sol est relativement faible à 45°, avec des mesures qui ne représentent plus que 35 à 50% de la masse déposée maximale. Le dépôt est, en revanche, maximal en sortie du coude, à 90°. Dans CD1-4, les masses déposées mesurées les plus faibles sur la paroi du sol sont le long de la paroi intérieure, contrairement aux trois autres coudes, même si cela reste assez peu marqué (0,42, 0,40 et 0,32).

Le dépôt collecté sur les surfaces du plafond de la gaine est très faible dans CD1-1, CD1-2 et CD1-3 (Figure 5.24, en bas). La grande majorité du dépôt semble donc se faire sur la paroi du sol. La valeur de $C_{d_{Coude}}$ égale à 0,77 mesurée dans CD1-1 pourrait venir d'une contamination lors de l'expérience et devra être confirmée. Dans CD1-4, les dépôts mesurés au plafond sont plus élevés que dans les autres coudes. Le dépôt au plafond est plus élevé en sortie qu'à 45°. Il semble que la répartition du dépôt soit plus « uniforme » dans ce coude, avec un écart réduit entre les valeurs obtenues sur le sol et sur le plafond.

Sur les parois verticales, la tendance semble être la même que sur les surfaces du plafond (Figure 5.25). En effet, les dépôts sont à nouveau minimaux par rapport à ceux mesurés sur le sol dans les coudes CD1-3, CD1-2 et CD1-3 (maximum 5% de la valeur maximale). Dans CD1-2, les valeurs mesurées sont plus élevées à 90°, en sortie du coude. Il en est de même dans CD1-4, où m_d atteint 47% de la valeur maximale mesurée dans ce coude. CD1-4 présente, par ailleurs, des dépôts plus conséquents le long de la paroi extérieure du coude. Cette observation est sûrement due à la présence d'un angle abrupt sur la paroi intérieure et la paroi extérieure, conduisant le flux à se diriger directement vers la paroi extérieure, contrairement aux coudes avec un rayon de courbure « doux ». La seule présence d'un angle abrupt sur la paroi intérieure, comme dans CD1-3, ne semble pas influencer la répartition du dépôt par rapport à CD1-1. Cette observation montre l'intérêt des coudes académiques dont la géométrie et la courbure douce permet de diriger l'écoulement. Cela engendrerait moins de turbulence et donc un dépôt moindre.

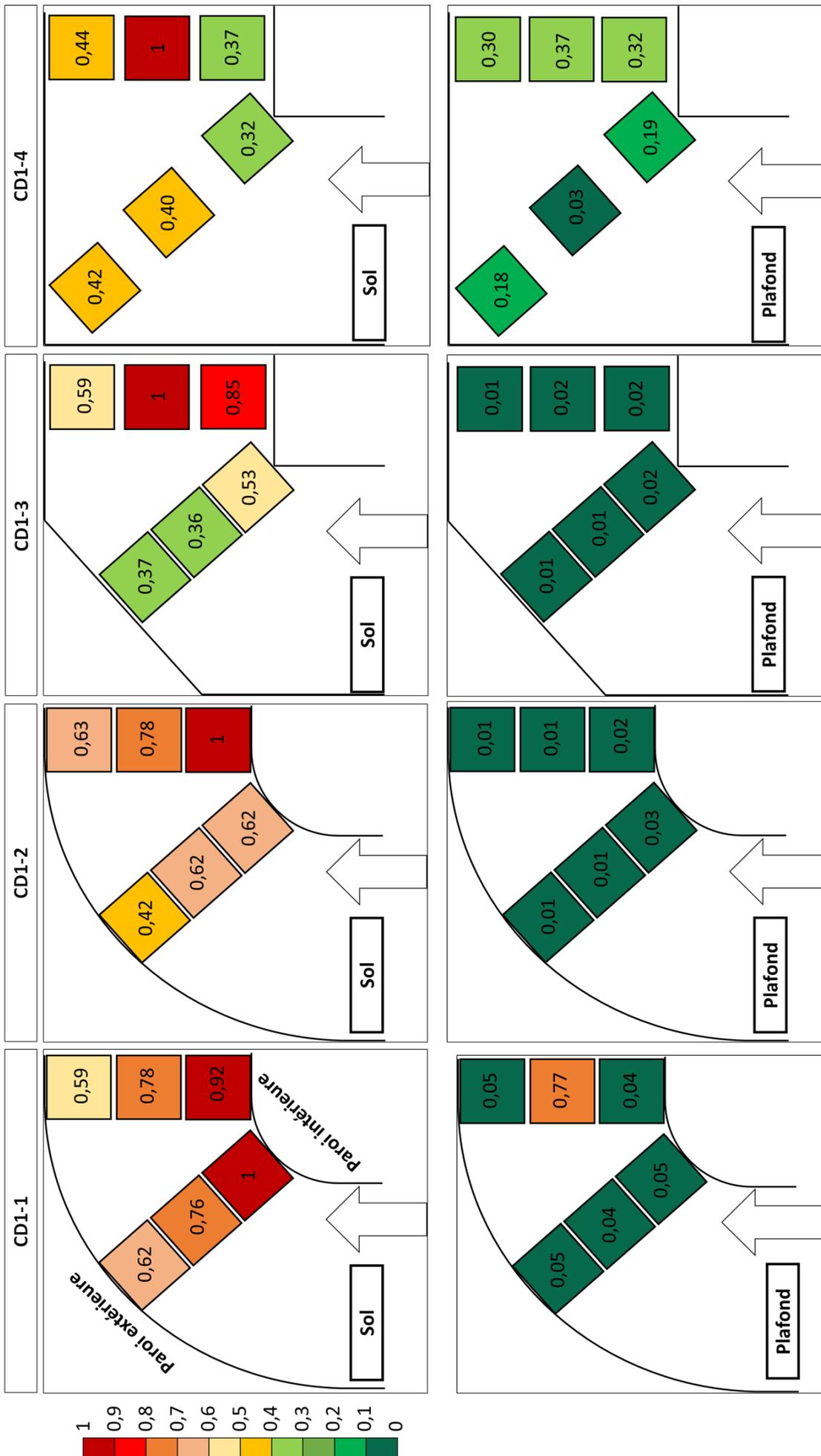


Figure 5.24 – Répartition du dépôt dans les quatre coudes d'étude pour les parois du sol et du plafond

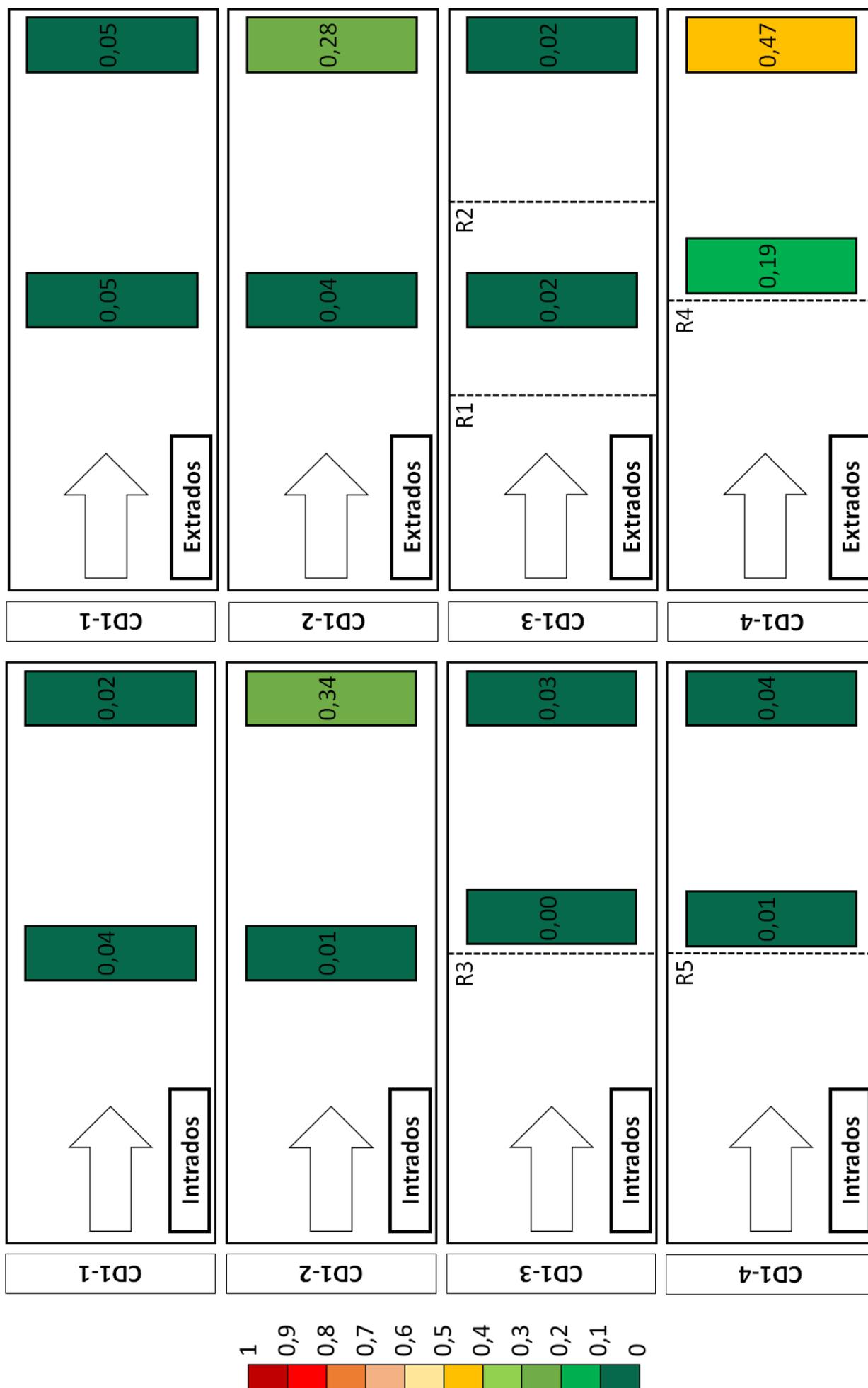


Figure 5.25 – Répartition du dépôt dans les quatre courbes d'étude pour les parois verticales — Paroi intérieure (intrados) à gauche et paroi extérieure (extrados) à droite

Pour faciliter l'interprétation sur la paroi du plafond et les parois verticales, la Figure 5.26 explicite les rapports des concentrations massiques surfaciques par rapport au maximum du plafond ou des parois verticales, selon le cas.

Cette figure montre que, sur les parois du plafond, CD1-1 présente la répartition la plus homogène. Dans CD1-2 et CD1-3, la répartition est hétérogène avec un gradient négatif de la paroi intrados vers la paroi extrados, hétérogénéité qui peut être due à la forte courbure de CD1-2 et à la segmentation de CD1-3. Dans CD1-4, la répartition du dépôt montre un dépôt plus important et homogène en sortie du coude et très peu de dépôt à 45° au centre.

Concernant les parois verticales, les observations sont proches de celles pour la paroi du plafond. CD1-1 présente la répartition la plus homogène, avec un point plus faible à l'intrados à 90°. CD1-2 présente très peu de dépôt à 45° et un dépôt majoritaire à 90°, ce qui est différent de CD1-1 : le rayon de courbure semble fortement impacter la répartition du dépôt sur les parois verticales et au plafond. La segmentation modifie la répartition du dépôt : CD1-3 montre un dépôt plus important sur les parois verticales à 90° et à 45° sur la paroi extrados, paroi qui fait face à l'écoulement en entrée. La surface 5 (45° à l'intrados) étant positionnée juste en aval du coude abrupt, il est cohérent que le dépôt y soit faible. La répartition dans CD1-4 est très hétérogène sur les parois verticales : l'angle abrupt sur les parois intrados et extrados à 45° engendre une diminution du dépôt à 45° et sur la surface 16 par rapport à la surface 14.

5.3.1.3 Synthèse

Finalement, les résultats obtenus dans le coude dégagent trois tendances :

1. les coudes dont la courbure est « douce », qui présentent un dépôt majoritaire sur la paroi du sol. Un gradient négatif de dépôt est visible de la paroi intérieure, où l'on retrouve le dépôt maximal, à la paroi extérieure. Le dépôt est minimal sur les parois du plafond et également faible sur les parois verticales. Il semble qu'une diminution du rayon de courbure provoque une augmentation du dépôt à 90° (sortie du coude) sur les parois verticales. Les dépôts sont très faibles au plafond et la diminution du rayon de courbure semble engendrer une diminution du dépôt ;
2. les coudes « segmentés », avec un angle abrupt en paroi intérieure et une paroi extérieure segmentée en trois parties, où le dépôt maximal se trouve toujours sur la paroi du sol, mais est décalé à l'aval par rapport aux coudes de courbure douce. Le dépôt est maximal à 90° sur le sol du coude, près de la paroi intérieure. Le dépôt est significativement plus faible au sol à 45° et le dépôt reste minimal sur la paroi du plafond et les parois verticales ;
3. les coudes « abrupts », qui comportent un angle droit à 45° des parois intérieure et extérieure, dans lesquels la répartition du dépôt semble plus homogène. Le dépôt est toujours maximal sur la paroi du sol à 90°. Le gradient de dépôt remarquable sur la paroi du sol des coudes de courbure douce disparaît au profit d'une répartition plutôt homogène. Le dépôt sur la paroi du plafond augmente significativement par rapport aux autres coudes, de même que sur la paroi extérieure. Le dépôt est minimal sur la paroi intérieure.

Ces résultats n'ont pas été reproduits. L'analyse doit donc prendre en compte la possibilité d'un biais expérimental, cela même si le protocole mis en place assure quelques garanties.



Figure 5.26 – Répartition du dépôt au rapport au dépôt maximal mesuré sur la surface du plafond et sur les parois verticales dans les quatre coudes d'étude

5.3.2 Mise en relation des résultats de dépôt des coudes avec l'aéraulique

L'objectif de cette section est de mieux comprendre la raison pour laquelle le dépôt se fait préférentiellement aux localisations évoquées dans la section précédente, en lien avec les grandeurs aérauliques caractérisant l'écoulement dans la gaine de ventilation de DIESE. Pour ce faire, on cherche à mettre en relation les mesures aérauliques réalisées, notamment les mesures de PIV, et d'autres travaux de la littérature avec les mesures de dépôt dans les quatre coudes d'étude.

5.3.2.1 Coude de référence (CD1-1) et coude de rayon différent (CD1-2)

Comme les coudes dont le rayon de courbure est « doux », dans le sens contraire à « abrupt », ont le même type de géométrie, ils sont tous deux regroupés dans cette section.

Nous avons pu constater dans la section précédente que l'accumulation préférentielle de particules se fait dans les mêmes zones selon que CD1-1 ou CD1-2 est étudié. En effet, le dépôt est majoritaire sur la paroi du sol (Figure 5.24), plus particulièrement le long de la paroi intrados, à 45 et 90°.

Cette accumulation pourrait se comprendre par une combinaison de l'effet de la gravité sur les particules étudiées, qui sont plutôt inertielles de par leur diamètre supermicronique, et de l'effet du gradient de vitesse maximal.

L'effet de la gravité a pour conséquence non seulement de faire déposer préférentiellement les particules sur la paroi du sol de la gaine, mais également « d'empêcher » les particules de se déposer sur la paroi du plafond.

Ce gradient de vitesse maximal apparaît à 45° (Figure 4.7 du haut, page 109). À 90° (Figure 4.7 du bas, page 109), le gradient de vitesse maximal n'est plus contre la paroi intérieure mais se trouve toujours dans le premier tiers de la distance à la paroi extérieure.

Concernant les parois verticales, le dépôt y est très faible dans ces deux coudes (Figure 5.26). Cela peut s'expliquer par la présence d'une surpression sur la paroi extérieure et une dépression sur la paroi intérieure : le flux d'air a tendance à se diriger vers l'intérieur du coude à proximité de la paroi extérieure et vers l'extérieur du coude à proximité de la paroi intérieure. La Figure 5.27 illustre ces différences de pression, obtenues par Li *et al.* (2013) par CFD pour une vitesse de 10 m/s dans un coude à 180° de section rectangulaire dont le diamètre hydraulique est de 13,3, ainsi que le profil de pression simulé dans DIESE, d'après Mbaye (2019).

De ce fait, la mesure obtenue sur la surface centrée à 90° au plafond (surface 11) dans CD1-1 peut être considérée comme incohérente.

Lorsque le rayon de courbure diminue (comparaison de CD1-1 avec CD1-2), on observe une diminution du dépôt à 45° sur les parois verticales (Figure 5.26, en bas). Cette diminution du dépôt mesurée sur les surfaces 13 et 15 dans CD1-2 peut s'expliquer par une diminution du gradient de pression dans le coude par rapport à CD1-1. En effet, Taylor *et al.* (1982) ont montré que la diminution du rayon de courbure d'un coude entraîne une diminution de la différence de pression entre les parois intérieure et extérieure du coude, et ce sur la quasi-totalité du coude. Le gradient de pression ne jouerait significativement qu'à l'entrée et à la sortie du coude.

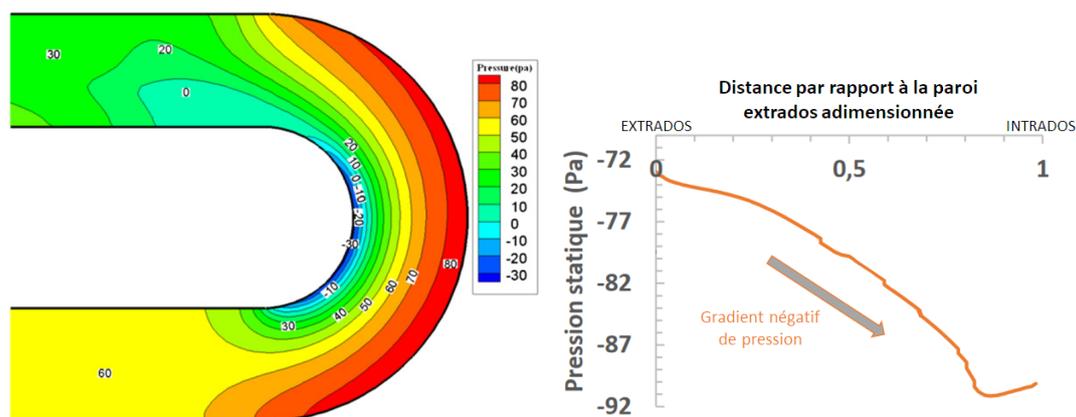


Figure 5.27 – À gauche : Illustration des pressions obtenues par CFD dans un coude à 180° de section rectangulaire, d'après *Li et al. (2013)* — À droite : Profil simulé de pression en sortie du coude, d'après *Mbaye (2019)*

5.3.2.2 Coude segmenté (CD1-3)

Les mesures de dépôt d'aérosols obtenues dans CD1-3, le coude segmenté, présentent des tendances communes à celles des coudes dont la courbure est douce (CD1-1 et CD1-2). En effet, le dépôt au plafond est très faible comparé au dépôt mesuré sur les surfaces de collecte de la paroi du sol de la gaine. Sur les parois verticales, la tendance est la même que celle observée sur les mesures dans CD1-1 : le dépôt est aussi faible que sur les surfaces du plafond.

Sur les surfaces du sol de CD1-3, les masses déposées y sont plus élevées que sur les autres parois, avec une accumulation préférentielle sur les surfaces situées à 90° vers la paroi intérieure du coude. Les masses déposées mesurées à 45° sont nettement plus faibles, avec en moyenne 42% de la masse déposée maximale mesurée; alors que dans CD1-2 par exemple, on mesure en moyenne 59%.

Une étude numérique a été conduite par *Arun et al. (2020)* sur un coude segmenté de section circulaire (diamètre non précisé) (voir schéma Figure 5.28, à gauche). La Figure 5.28, au milieu, illustre les écoulements secondaires dans un plan transverse à l'écoulement en sortie du coude. On remarque la présence de trois cellules rotatives, contrairement aux coudes à courbure douce qui présentent deux cellules rotatives (Figure 5.28, à droite). La présence de cette troisième cellule rotative située dans le bas de la gaine en sortie du coude pourrait justifier que le dépôt est plus prononcé à 90°, avec un écoulement qui est guidé en entrée grâce à la segmentation, mais qui provoque sa rotation en sortie, dans le cas où cette troisième cellule existe également dans les conduits rectangulaires.

Pour aller plus loin dans l'analyse du dépôt local dans ce coude, la simulation CFD pourrait être utilisée. Pour ce faire, les mesures par PIV conduites dans le cadre de cette thèse permettront de valider les simulations de CFD, afin, ensuite, de réaliser des simulations prospectives dans des coudes de géométrie différente. Quelques mesures complémentaires par anémométrie à fil chaud (technique de mesure plus aisée à mettre en œuvre que la PIV) permettraient de valider les simulations de CFD dans le type de coude que ceux étudiés ici, avec une section rectangulaire dans le cas de DIESE.

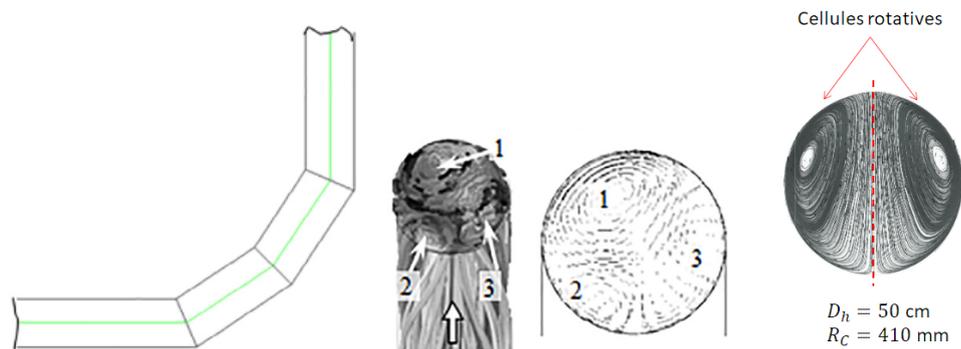


Figure 5.28 – À gauche : Schéma du coude segmenté étudié par (et d'après) *Arun et al. (2020)* — Au milieu : Illustration des écoulements secondaires par CFD dans un coude segmenté, à 90° et de section circulaire, d'après *Arun et al. (2020)* — À droite : Illustration de deux cellules rotatives développées à 45° dans un coude de section circulaire et de grand rayon de courbure, d'après *Wang et al. (2015)*

5.3.2.3 Coude abrupt (CD1-4)

Le coude abrupt, CD1-4, est celui qui présente le plus de différences au niveau des mesures si l'on compare aux coudes à courbure douce :

1. sur la paroi du sol, de la même façon que dans CD1-3, la masse déposée maximale est mesurée à 90° , sur la surface de collecte située au milieu de la gaine (surface 5). Cette zone de dépôt préférentielle peut s'expliquer par l'observation de la Figure 5.29. Il s'agit des résultats de simulations CFD réalisées par *Venters et al. (2019)* et *Bluestein et al. (2019)* dans des coudes quasiment abrupts de section carrée. On observe que le maximum de vitesse se situe au niveau de cette zone de dépôt préférentielle et que les zones où les mesures de dépôt décroissent, la vitesse de l'air décroît également ;

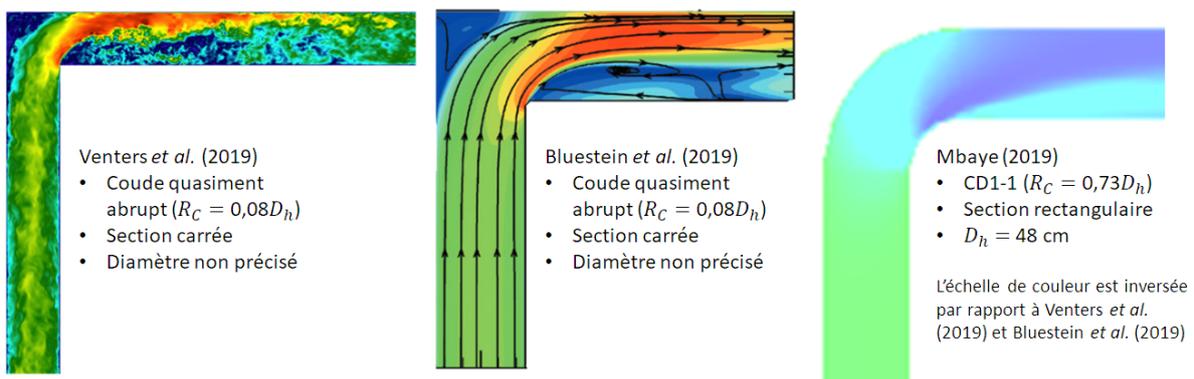


Figure 5.29 – Illustration de la norme de vitesse par CFD dans des coudes abrupts de section carrée, d'après *Venters et al. (2019)* et *Bluestein et al. (2019)* et dans CD1-1 de DIESE, d'après *Mbaye (2019)*

2. sur la paroi du plafond, le dépôt est faible mais est beaucoup plus important que dans les trois autres coudes d'étude, sûrement dû à l'apparition plus précoce (plus en amont dans le coude CD1-4, comparé aux autres coudes d'étude) des écoulements secondaires et 1) de la boucle de

recirculation proche de la paroi intérieure, qui se déclenche au niveau même de l'angle droit que forme la paroi intérieure et 2) de la deuxième boucle de recirculation au niveau de l'angle droit que forme la paroi extérieure, contraignant ainsi l'air à s'écouler dans une section plus réduite. [Arun et al. \(2020\)](#) ont d'ailleurs montré que, par rapport à un coude segmenté, la vitesse au sein de la gaine dans un coude abrupt est plus élevée par rapport à la vitesse moyenne débitante ;

3. cette élévation de la vitesse dans la gaine dans le coude abrupt observée par [Venters et al. \(2019\)](#) et [Bluestein et al. \(2019\)](#) montre également que le flux fortement accéléré vient s'impacter plus en amont sur la paroi latérale (cf. Figure 5.29). Si l'on extrapole cette observation à une gaine de section carrée, cela explique les résultats obtenus pour les masses déposées, dont les valeurs sont plus élevées sur la paroi de gauche (paroi extérieure, surfaces G45 et G90).

5.4 Synthèse

Grâce aux mesures de dépôt réalisées dans les conduits en amont et en aval d'un coude, nous avons pu valider le protocole de mesure de dépôt d'aérosol développé pour être appliqué dans les conduits de ventilation de taille industrielle ($D_h > 40$ cm). Une première base de données a ainsi pu être constituée avec les vitesses de dépôt issues de ces mesures, avec des diamètres de particules et des vitesses d'air variés. Les expériences ont généralement été réalisées plusieurs fois pour s'assurer de la cohérence des résultats. Nous avons ainsi présenté nos résultats sous forme de vitesses de dépôt, adimensionnées ou non, et comparé celles-ci avec d'autres travaux de la littérature, dans lesquels les gaines étudiées sont de moyenne taille (D_h compris entre 15 et 25 cm). La comparaison avec un modèle semi-empirique ([Ben Othmane et al., 2010](#)) et une corrélation ([Nerisson, 2009](#)) ont mis en avant la nécessité d'améliorer les modèles existants ou d'en développer de nouveaux, en passant par une étape de validation sur des conduits rectangulaires de grande taille.

Une seconde base de données a été constituée grâce aux mesures de dépôt réalisées localement à l'intérieur de quatre coudes de géométrie différente. Cette base de données repose sur des mesures conduites avec un diamètre de particule et une vitesse d'air. Avec seize surfaces de mesure de dépôt dans chaque coude, nous avons quantifié localement le dépôt. À notre connaissance, il n'existe pas à ce jour de données locales sur le dépôt dans des coudes rectangulaires de grande taille.

La comparaison, entre les coudes, des dépôts mesurés a permis de mettre en valeur que les courbes dont la courbure est douce engendrent moins de dépôt que les autres coudes étudiés. Les coudes abrupts semblent, eux, engendrer le maximum de dépôt. Globalement, le dépôt y est systématiquement beaucoup plus faible sur les parois verticales et au plafond, comparé au dépôt sur la paroi du sol.

L'analyse de la répartition du dépôt dans chaque coude a, à son tour, montré que le dépôt s'effectue majoritairement sur la paroi du sol. Dans les coudes de courbure douce, un gradient négatif de dépôt est présent de la paroi intérieure à la paroi extérieure, sur la paroi du sol. Le coude abrupt présente une répartition plus homogène du dépôt et le dépôt est plus élevé sur la paroi du plafond et la paroi extérieure, comparé aux autres coudes.

Des tendances se sont exprimées lorsque nous avons comparé les mesures de masses déposées

sur les surfaces de collecte avec les mesures aérauliques et certains travaux de CFD de la littérature. Une mise en relation est pour l'instant difficile car, dans la littérature, l'analyse des écoulements dans des coudes de section rectangulaire, de grande taille, de géométrie telle que celles étudiées ici n'existe pas.

C'est pourquoi, à l'avenir, des simulations de CFD doivent être réalisées dans différentes géométries, afin de poursuivre l'interprétation de ces nouvelles mesures locales de dépôt issues de ce travail. On pourrait également s'intéresser aux vitesses, aux coefficients de pression et de frottement, et à l'allure des écoulements secondaires pour interpréter les résultats sur le dépôt local. Les simulations de CFD pourront être, au préalable, validées sur les nombreux résultats obtenus par PIV présentés dans le Chapitre 4.

Par ailleurs, si l'étude par CFD des écoulements dans ces quatre coudes apporte des éléments d'interprétation des mesures de dépôt locales, il convient de noter qu'il serait intéressant de multiplier les essais, afin de vérifier les tendances dégagées par l'analyse des mesures, puisque les expériences conduites dans les différents coudes ont été réalisées une fois.

Enfin, les données présentées ici concernent un seul diamètre de particules et un seul débit. Il serait intéressant d'alimenter la base de données avec la conduite d'essais à d'autres diamètres de particules ($\leq 1 \mu\text{m}$ par exemple). Compte tenu du caractère complexe des essais, si la CFD est validée sur les données de ce travail, les mesures locales pourraient être choisies de manière plus spécifique à ces autres diamètres d'aérosols et débits, et définies par la CFD.

Conclusion et perspectives

L'objectif de ce travail était de contribuer à la caractérisation des transferts de contaminants dans les réseaux de ventilation industriels. Cet objectif reposait sur l'apport de nouvelles informations, de nouvelles données sur le dépôt d'aérosols dans les gaines de ventilation, en identifiant les zones de dépôt privilégiées et en quantifiant le dépôt dans les gaines. Nous nous sommes intéressés, dans ce travail, à un tronçon de gaine particulier que constitue le coude. Il fallait donc y mesurer localement le dépôt, dans des gaines de ventilation représentatives de celles que l'on peut trouver dans l'industrie, mais également lier ces mesures de dépôt avec les grandeurs caractéristiques des écoulements d'air dans ces gaines.

L'analyse bibliographique des travaux existants a porté sur trois volets principaux :

1. le premier sur les techniques de mesure de dépôt. L'état des lieux des techniques existantes (Costa *et al.*, 2022a) a constitué la base du travail expérimental qui a suivi, puisque les mesures de dépôt à réaliser reposaient sur le choix d'une technique parmi celles-ci. En effet, les contraintes soulevées par la réalisation de mesures locales sur la paroi de gaines de grande taille imposaient de choisir une technique de mesure *in situ* et dont la limite de détection était suffisamment faible pour pallier la problématique de dilution des aérosols, importante dans la gaine, due aux grands débits ;
2. le deuxième focalisé sur les mesures de dépôt d'aérosols dans les gaines droites et les coudes. Ce volet a notamment fait ressortir un manque de données expérimentales de dépôt dans les gaines de taille industrielle et une absence de consensus entre les corrélations prédisant le dépôt. Par exemple, la comparaison des corrélations de Sippola (2002) et Ben Othmane (2011) a montré l'influence de la géométrie des gaines avec une section carrée (D_h de 15,2 cm) et circulaire (25 cm). Par ailleurs, les vitesses de frottement utilisées pour l'adimensionnalisation des vitesses de dépôt ont été peu souvent mesurées en détail ;
3. le troisième sur les mesures aérauliques dans les gaines droites et les coudes. L'analyse de ces travaux a également souligné l'absence de mesures détaillées des grandeurs caractéristiques des écoulements d'air complexes que l'on peut trouver dans les gaines, plus particulièrement dans les coudes de grande dimension. En effet, les travaux se sont à nouveau plutôt intéressés aux mesures dans les gaines de petite taille, plutôt de section carrée. La technique de PIV est peu utilisée dans ces études.

Plus globalement, cette analyse bibliographique a montré la nécessité de développer un protocole expérimental de mesure de dépôt adapté à notre travail, c'est-à-dire à une application dans des gaines de taille industrielle où l'accès est généralement restreint et contraint.

Le nouveau protocole expérimental développé pour mesurer le dépôt d'aérosols (Costa *et al.*, 2022b) a permis d'assurer une collecte complète des aérosols déposés, notamment avec la mise en place de critères de validation de la collecte effectuée, directement en paroi de gaine et de manière locale. La collecte du dépôt a été associée à la spectroscopie de fluorescence, assurant une limite de détection très faible, point important pour les mesures de dépôt dans des gaines de ventilation de grande taille, où les débits d'air importants engendrent des faibles concentrations d'aérosols et, *a fortiori*, de faibles masses déposées.

C'est sur l'installation **DIESE** de l'IRSN, réceptionnée durant la première année de ce travail de thèse, que ce protocole a été développé, puis mis en œuvre et appliqué. **DIESE** est un réseau de ventilation de grande envergure et représentatif des gaines industrielles mis en service en 2019. Ce réseau est constitué de gaines dont le diamètre hydraulique est 48 cm et de section rectangulaire, et de nombreuses singularités. Il s'agit d'un réseau en boucle ouverte, fonctionnant par aspiration.

Dans un premier temps, l'écoulement dans **DIESE** a été caractérisé via la mesure de grandeurs aérodynamiques reposant sur :

- l'étude des écoulements en proche paroi dans un conduit droit avec, principalement, des mesures de pression, et quelques mesures par anémométrie à fil chaud, afin de déduire des vitesses de frottement en fonction des différents débits. Les vitesses de frottement ont donc été estimées par deux méthodes. Leurs incertitudes sont élevées mais ont été prises en compte dans le calcul des incertitudes sur la vitesse de dépôt (prise en compte généralement non faite ou non explicitée dans la littérature) ;
- l'étude plus globale des écoulements complexes que l'on retrouve dans les gaines incurvées, grâce à l'utilisation de la vélocimétrie par image de particules (**PIV**) dans un coude. Des champs horizontaux et verticaux de vitesse ont été obtenus dans le coude et en sortie du coude, à différentes hauteurs et profondeurs, et les vitesses longitudinales et transverses ont été comparées à la littérature. Ces mesures constituent une base de données conséquente unique, utile à la validation des codes de **CFD**, et *in fine* pour des simulations prospectives.

Dans un second temps, une base de données a pu être constituée à partir des mesures de dépôt d'aérosols inertiels de 2 à 10 μm , selon des vitesses d'air de 4 à 11 m/s. Les mesures ont tout d'abord fait ressortir une influence directe de l'orientation de la paroi. Les comparaisons des vitesses de dépôt obtenues dans **DIESE** en conduit droit en amont et en aval du coude avec d'autres travaux ont ensuite mis en évidence des similitudes pour les parois du sol, où la sédimentation est le mécanisme de dépôt prépondérant. En revanche, les mesures sur parois verticales et au plafond de la gaine ont montré des divergences entre les études. Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer ces différences : la géométrie des gaines (la section et le diamètre hydraulique par exemple) peut fortement influencer l'écoulement en régime turbulent, notamment avec la présence des écoulements secondaires dans les gaines à section non circulaire ; la turbophorèse peut également être influencée par la géométrie et l'écoulement, avec une évolution différente des gradients de turbulence.

L'utilisation d'un modèle semi-empirique développé sur des gaines de ventilation circulaire de moyenne taille (**Ben Othmane, 2011**), lorsque appliqué à **DIESE**, a permis, grâce à un travail d'ajustement, d'obtenir des prédictions cohérentes pour le sol, sans être le cas pour les autres parois. L'utilisation de deux modèles empiriques (**Sippola, 2002** ; **Nerisson, 2009**) a permis de s'approcher plus finement des résultats expérimentaux en faisant varier les coefficients empiriques dont ils dépendent.

À l'intérieur de quatre coudes de géométrie différente, le dépôt local a été caractérisé par des mesures de concentrations surfaciques déposées plutôt que par des vitesses de dépôt. Ce travail est la première étude à présenter des mesures locales dans des coudes de grande dimension. Le changement de géométrie a mis en exergue une influence forte de celle-ci sur le dépôt. En analysant, en parallèle, les mesures de dépôt, les mesures aérodynamiques et des études de la littérature réalisées en **CFD**, nous avons constaté que la modification de la géométrie des coudes impacte l'écoulement (vitesse moyenne, gradients de pression) et plus particulièrement la mise en place des écoulements secondaires au sein

du coude, illustrant l'importance de bien modéliser les écoulements pour retrouver les mesures locales de dépôt.

Dans le futur, grâce à des outils tels que l'impression 3D, le protocole de mesure locale de dépôt d'aérosols développé pourra facilement être adapté à d'autres configurations, que l'accès à l'intérieur de gaine ou que la géométrie de la surface de collecte soient différents. Par ailleurs, comme dit plus tôt dans ce travail, une automatisation ou robotisation de la spectroscopie de fluorescence par frottis pourra amener à une multiplication plus aisée des mesures. Ainsi, on pourra s'intéresser à la validation de nombreux autres types de singularités, dont les géométries sont variables d'une installation à l'autre. Plus globalement, des mesures réalisées directement dans des gaines industrielles pourront ainsi être envisageables, afin d'apporter une étude au cas par cas dans les installations.

Par ailleurs, une amélioration des corrélations, plus particulièrement celle développée par **Ben Othmane (2011)**, pourra permettre de prédire directement des quantités d'aérosols déposés en présentant l'avantage d'être peu coûteux en ressource et en temps, contrairement à l'utilisation des codes de CFD.

Néanmoins, la validation des simulations de CFD avec les données issues de la PIV permettra de cibler plus finement les mesures locales à réaliser pour compléter la base de données et la validation, notamment en régime de diffusion. Dans d'autres configurations, des simulations prospectives pourront être réalisées si besoin.

Les simulations permettront, *in fine*, de développer des nouvelles corrélations adaptées aux coudes, validées sur des coudes de grande dimension, et ces corrélations prédiront ainsi le dépôt en fonction des grandeurs aérauliques et des paramètres géométriques.

Bibliographie

- Abadie, M., Limam, K. et Allard, F. : Indoor particle pollution : effect of wall textures on particle deposition. *Building and Environment*, 36(7):821–827, août 2001. DOI 10.1016/S0360-1323(01)00007-5. (Cité en page 8.)
- Alexander, L. G. et Coldren, C. L. : Droplet Transfer from Suspending Air to Duct Walls. *Industrial & Engineering Chemistry*, 43(6):1325–1331, juin 1951. DOI 10.1021/ie50498a024. (Cité en page 27.)
- Amaral, S., de Carvalho, J., Costa, M. et Pinheiro, C. : An Overview of Particulate Matter Measurement Instruments. *Atmosphere*, 6(9):1327–1345, septembre 2015. DOI 10.3390/atmos6091327. (Cité en page 8.)
- Araya, C., Cazorla, A. et Reche, I. : Detachment Procedure of Bacteria from Atmospheric Particles for Flow-cytometry Counting. *BIO-PROTOCOL*, 9(12), 2019. DOI 10.21769/BioProtoc.3273. (Cité en page 14.)
- Arun, G., Kumaresh Babu, S., Natarajan, S. et Kulasekharan, N. : Study of flow behaviour in sharp and mitred pipe bends. *Materials Today : Proceedings*, 27:2101–2108, 2020. DOI 10.1016/j.matpr.2019.09.076. (Cité en pages xxv, 157, 158 et 159.)
- Ball, M. et Mitchell, J. : The deposition of micron-sized particles in bends of large diameter pipes. *Journal of Aerosol Science*, 23:23–26, janvier 1992. DOI 10.1016/0021-8502(92)90339-W. (Cité en page 31.)
- Baron, P. A. et Willeke, K. : *Aerosol measurement : principles, techniques, and applications*. Wiley Interscience, New York, 2nd édition, 2001. ISBN 0-471-35636-0. (Cité en page 8.)
- Barth, T., Lecrivain, G. et Hampel, U. : Particle deposition study in a horizontal turbulent duct flow using optical microscopy and particle size spectrometry. *Journal of Aerosol Science*, 60:47–54, juin 2013. DOI 10.1016/j.jaerosci.2013.02.004. (Cité en pages 22, 23 et 32.)
- Ben Othmane, M. : *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), 2011. (Cité en pages xxii, 8, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 40, 48, 68, 81, 82, 84, 89, 94, 95, 96, 132, 136, 137, 146, 161, 162 et 163.)
- Ben Othmane, M., Havet, M., Gehin, E. et Sollicec, C. : Mechanisms of Particle Deposition in Ventilation Ducts for a Food Factory. *Aerosol Science and Technology*, 44(9):775–784, août 2010. DOI 10.1080/02786826.2010.490799. (Cité en pages xxiv, xxvii, 2, 3, 41, 43, 64, 106, 136, 137, 138, 139, 140, 146 et 159.)
- Ben Othmane, M., Havet, M., Gehin, E., Sollicec, C. et Arroyo, G. : Predicting cleaning time of ventilation duct systems in the food industry. *Journal of Food Engineering*, 105(3):400–407, août 2011. DOI 10.1016/j.jfoodeng.2011.03.027. (Cité en page 80.)
- Bluestein, A. M., Venters, R., Bohl, D., Helenbrook, B. T. et Ahmadi, G. : Turbulent Flow Through a Ducted Elbow and Plugged Tee Geometry : An Experimental and Numerical Study. *Journal of Fluids Engineering*, 141(8):081101, août 2019. DOI 10.1115/1.4042256. (Cité en pages xxv, 158 et 159.)

- Boor, B. E., Siegel, J. A. et Novoselac, A. : Wind Tunnel Study on Aerodynamic Particle Resuspension from Monolayer and Multilayer Deposits on Linoleum Flooring and Galvanized Sheet Metal. *Aerosol Science and Technology*, 47(8):848–857, août 2013. DOI 10.1080/02786826.2013.794929. (Cité en pages 22 et 23.)
- Bowers, W. D., Chuan, R. L. et Duong, T. M. : A 200 MHz surface acoustic wave resonator mass micro-balance. *Review of Scientific Instruments*, 62(6):1624–1629, juin 1991. DOI 10.1063/1.1142442. (Cité en pages 16 et 21.)
- Brereton, G. J. : Deduction of skin friction by Clauser technique in unsteady turbulent boundary layers. *Experiments in Fluids*, 7(6):422–424, juin 1989. DOI 10.1007/BF00193426. (Cité en page 104.)
- Brundrett, E. et Baines, W. D. : The production and diffusion of vorticity in duct flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 19(3):375–394, juillet 1964. DOI 10.1017/S0022112064000799. (Cité en page 45.)
- Brussaard, C. P. D. : Optimization of Procedures for Counting Viruses by Flow Cytometry. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(3):1506–1513, mars 2004. DOI 10.1128/AEM.70.3.1506-1513.2004. (Cité en page 14.)
- Burba, G. : *Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural, and regulatory applications : a field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates*. LI-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska, 2013. ISBN 978-0-615-76827-4. (Cité en page 9.)
- Burkett, M. W., Martin, R. A., Fenton, D. L. et Gunaji, M. V. : Fire Simulation in Nuclear Facilities – The FIRAC Code and Supporting Experiment. In *18th DOE Nuclear Airborne Waste Management and Air Cleaning Conference*, page 34, Baltimore, MD, août 1984. (Cité en page 80.)
- Campanella, H., Esteve, J., Montserrat, J., Uranga, A., Abadal, G., Barniol, N. et Romano-Rodríguez, A. : Localized and distributed mass detectors with high sensitivity based on thin-film bulk acoustic resonators. *Applied Physics Letters*, 89(3):033507, juillet 2006. DOI 10.1063/1.2234305. (Cité en pages 16 et 21.)
- Campanella, H., Uranga, A., Romano-Rodríguez, A., Montserrat, J., Abadal, G., Barniol, N. et Esteve, J. : Localized-mass detection based on thin-film bulk acoustic wave resonators (FBAR) : Area and mass location aspects. *Sensors and Actuators A : Physical*, 142(1):322–328, mars 2008. DOI 10.1016/j.sna.2007.05.004. (Cité en page 16.)
- Charuau, J. : ETUDE DU DEPOT DES PARTICULES DANS LES CONDUITS. OPTIMISATION DES TUBES DE PRELEVEMENT DES AEROSOLS RADIOACTIFS. Rapport technique Rapport CEA-R-5158, 1981. (Cité en pages 27, 29 et 36.)
- Chen, D.-R. et Pui, D. Y. H. : Numerical and experimental studies of particle deposition in a tube with a conical contraction—Laminar flow regime. *Journal of Aerosol Science*, 26(4):563–574, juin 1995. DOI 10.1016/0021-8502(94)00127-K. (Cité en pages 14 et 81.)
- Cheng, Y. et Wang, C. : Inertial deposition of particles in a bend. *Journal of Aerosol Science*, 6(2):139–145, mars 1975. DOI 10.1016/0021-8502(75)90007-5. (Cité en page 40.)
- Clauser, F. H. : The Turbulent Boundary Layer. In *Advances in Applied Mechanics*, volume 4, pages 1–51. Elsevier, 1956. ISBN 978-0-12-002004-1. (Cité en pages 12 et 102.)

- Cohen Hubal, E. A., Suggs, J. C., Nishioka, M. G. et Ivancic, W. A. : Characterizing residue transfer efficiencies using a fluorescent imaging technique. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 15(3):261–270, mai 2005. DOI 10.1038/sj.jea.7500400. (Cité en page 14.)
- Cong, X., Yang, G., Qu, J. et Zhao, J. : A model for evaluating the particle penetration efficiency in a ninety-degree bend with a circular-cross section in laminar and turbulent flow regions. *Powder Technology*, 305:771–781, janvier 2017. DOI 10.1016/j.powtec.2016.10.074. (Cité en page 40.)
- Connelly, J. S., Schultz, M. P. et Flack, K. A. : Velocity-defect scaling for turbulent boundary layers with a range of relative roughness. *Experiments in Fluids*, 40(2):188–195, février 2006. DOI 10.1007/s00348-005-0049-x. (Cité en page 104.)
- Costa, D., Malet, J. et Géhin, E. : Dry aerosol particle deposition on indoor surfaces : Review of direct measurement techniques. *Aerosol Science and Technology*, 56(3):261–280, mars 2022a. DOI 10.1080/02786826.2021.2013431. (Cité en pages xvi, xvii, xix, 2, 6, 12, 67, 81, 82, 161 et 203.)
- Costa, D., Malet, M. et Gehin, E. : An experimental protocol for measuring aerosol deposition in industrial-sized ventilation ducts. *Measurement Science and Technology*, 33(9), avril 2022b. DOI 10.1088/1361-6501/ac68d3. (Cité en pages 2, 80, 161 et 203.)
- Costa, D., Wiese, J. et Malet, J. : Utilisation d'un aérosol tracé à la fluorescéine sodée dans le banc DIESE. Rapport technique IRSN/2020-0788, IRSN, Saclay, mars 2021. (Cité en pages 70 et 74.)
- Crane, R. et Evans, R. : Inertial deposition of particles in a bent pipe. *Journal of Aerosol Science*, 8(3):161–170, juin 1977. DOI 10.1016/0021-8502(77)90003-9. (Cité en page 40.)
- Da, G., Géhin, E., Ben Othmane, M., Havet, M., Sollicec, C. et Motzkus, C. : An experimental approach to measure particle deposition in large circular ventilation ducts. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(7):4873–4880, avril 2015. DOI 10.1007/s11356-014-2859-y. (Cité en pages 13, 14, 21, 32, 81 et 82.)
- Darwish, Z. A., Kazem, H. A., Sopian, K., Al-Goul, M. A. et Alawadhi, H. : Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41:735–744, janvier 2015. DOI 10.1016/j.rser.2014.08.068. (Cité en page 15.)
- Davies, C. N. : 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, janvier 1966. DOI 10.1098/rspa.1966.0009. (Cité en pages 2, 34, 36 et 37.)
- Davila, A. P., Jang, J., Gupta, A. K., Walter, T., Aronson, A. et Bashir, R. : Microresonator mass sensors for detection of Bacillus anthracis Sterne spores in air and water. *Biosensors and Bioelectronics*, 22(12):3028–3035, juin 2007. DOI 10.1016/j.bios.2007.01.012. (Cité en page 18.)
- DIN EN 12599 : Ventilation for buildings – Test procedures and measurement methods to hand over air conditioning and ventilation systems, janvier 2013. (Cité en page 95.)
- Ding, H., Zhang, Y., Sun, H. et Feng, L. : Analysis of PM_{2.5} distribution and transfer characteristics in a car cabin. *Energy and Buildings*, 127(1):252–258, septembre 2016. DOI 10.1016/j.enbuild.2016.06.004. (Cité en page 80.)

- Dohn, S., Svendsen, W., Boisen, A. et Hansen, O. : Mass and position determination of attached particles on cantilever based mass sensors. *Review of Scientific Instruments*, 78(10):103303, octobre 2007. DOI 10.1063/1.2804074. (Cité en page 18.)
- Duda, D., Bém, J., Yanovych, V., Pavlíček, P. et Uruba, V. : Secondary flow of second kind in a short channel observed by PIV. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 79:444–453, janvier 2020. DOI 10.1016/j.euromechflu.2019.10.005. (Cité en pages 45 et 94.)
- El-Shobokshy, M. S. : Experimental measurements of aerosol deposition to smooth and rough surfaces. *Atmospheric Environment (1967)*, 17(3):639–644, janvier 1983. DOI 10.1016/0004-6981(83)90138-5. (Cité en page 27.)
- El-Shobokshy, M. S. et Hussein, F. M. : Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells. *Solar Energy*, 51(6):505–511, décembre 1993. DOI 10.1016/0038-092X(93)90135-B. (Cité en pages 15 et 21.)
- Enayet, M., Gibson, M., Taylor, A. et Yianneskis, M. : Laser-Doppler measurements of laminar and turbulent flow in a pipe bend. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 3(4):213–219, décembre 1982. DOI 10.1016/0142-727X(82)90024-8. (Cité en page 44.)
- Feulner, M., Hagen, G., Müller, A., Schott, A., Zöllner, C., Brüggemann, D. et Moos, R. : Conductometric Sensor for Soot Mass Flow Detection in Exhausts of Internal Combustion Engines. *Sensors*, 15(11): 28796–28806, novembre 2015. DOI 10.3390/s151128796. (Cité en pages 19 et 21.)
- Fouchier, C., Laboureur, D., Lapebie, E., Mendez, M., van Beeck, J., Ginsburger, P., Courtiaud, S. et Buchlin, J.-M. : PIV à grande échelle appliquée sur la dispersion par explosif. In *Congrès Francophone de Techniques Laser (CFTL)*, page 9, Dourdan, 2018. (Cité en page 57.)
- Frei, M. et Kruis, F. : Image-based size analysis of agglomerated and partially sintered particles via convolutional neural networks. *Powder Technology*, 360:324–336, janvier 2020. DOI 10.1016/j.powtec.2019.10.020. (Cité en page 22.)
- Friedlander, S. K. et Johnstone, H. F. : Deposition of Suspended Particles from Turbulent Gas Streams. *Industrial & Engineering Chemistry*, 49(7):1151–1156, juillet 1957. DOI 10.1021/ie50571a039. (Cité en pages 2, 27, 34, 36, 37 et 48.)
- Gao, J., Zeng, L., Wu, L., Ding, X. et Zhang, X. : Solution for sudden contamination transport through air duct system : Under a puff release. *Building and Environment*, 100:19–27, mai 2016a. DOI 10.1016/j.buildenv.2016.01.024. (Cité en page 80.)
- Gao, N., Niu, J., He, Q., Zhu, T. et Wu, J. : Using RANS turbulence models and Lagrangian approach to predict particle deposition in turbulent channel flows. *Building and Environment*, 48:206–214, février 2012. DOI 10.1016/j.buildenv.2011.09.003. (Cité en page 26.)
- Gao, R., Chen, S., Zhao, J., Zhang, Y. et Li, A. : Coupling effect of ventilation duct bend with different shapes and sizes. *Building Simulation*, 9(3):311–318, juin 2016b. DOI 10.1007/s12273-015-0267-y. (Cité en page 47.)

- Gao, X. et Sundén, B. : PIV measurement of the flow field in rectangular ducts with 60° parallel, crossed and V-shaped ribs. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28(6):639–653, juin 2004. DOI 10.1016/j.expthermflusci.2003.10.005. (Cité en pages 44 et 45.)
- Garland, J. et Cox, L. : Deposition of small particles to grass. *Atmospheric Environment (1967)*, 16(11): 2699–2702, janvier 1982. DOI 10.1016/0004-6981(82)90352-3. (Cité en page 8.)
- Gessner, F. B. et Jones, J. B. : On some aspects of fully-developed turbulent flow in rectangular channels. *Journal of Fluid Mechanics*, 23(4):689–713, décembre 1965. DOI 10.1017/S0022112065001635. (Cité en pages 45 et 94.)
- Ghaffarpasand, O., Drewnick, F., Hosseiniebalam, F., Gallavardin, S., Fachinger, J., Hassanzadeh, S. et Borrmann, S. : Penetration efficiency of nanometer-sized aerosol particles in tubes under turbulent flow conditions. *Journal of Aerosol Science*, 50:11–25, août 2012. DOI 10.1016/j.jaerosci.2012.03.002. (Cité en pages 28 et 29.)
- Grant, I. : Particle image velocimetry : A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science*, 211(1):55–76, janvier 1997. DOI 10.1243/O954406971521665. (Cité en page 54.)
- Grondin, D., Westermann, A., Breuil, P., Viricelle, J. P. et Vernoux, P. : Influence of key parameters on the response of a resistive soot sensor. *Sensors and Actuators B : Chemical*, 236:1036–1043, novembre 2016. DOI 10.1016/j.snb.2016.05.049. (Cité en page 19.)
- Guha, A. : A unified Eulerian theory of turbulent deposition to smooth and rough surfaces. *Journal of Aerosol Science*, 28(8):1517–1537, 1997. (Cité en pages xxviii, 41 et 106.)
- Gupta, A., Akin, D. et Bashir, R. : Single virus particle mass detection using microresonators with nanoscale thickness. *Applied Physics Letters*, 84(11):1976–1978, mars 2004. DOI 10.1063/1.1667011. (Cité en page 18.)
- Hagen, G., Feulner, M., Werner, R., Schubert, M., Müller, A., Rieß, G., Brüggemann, D. et Moos, R. : Capacitive soot sensor for diesel exhausts. *Sensors and Actuators B : Chemical*, 236:1020–1027, novembre 2016. DOI 10.1016/j.snb.2016.05.006. (Cité en page 21.)
- Hagen, G., Müller, A., Feulner, M., Schott, A., Zöllner, C., Brüggemann, D. et Moos, R. : Determination of the Soot Mass by Conductometric Soot Sensors. *Procedia Engineering*, 87:244–247, 2014. DOI 10.1016/j.proeng.2014.11.646. (Cité en page 19.)
- Hagen, G., Spannauer, C., Feulner, M., Kita, J., Müller, A. et Moos, R. : Conductometric Soot Sensors : Internally Caused Thermophoresis as an Important Undesired Side Effect. *Sensors*, 18(10):3531, octobre 2018. DOI 10.3390/s18103531. (Cité en page 19.)
- Hajjam, A., Wilson, J. C. et Pourkamali, S. : Individual Air-Borne Particle Mass Measurement Using High-Frequency Micromechanical Resonators. *IEEE Sensors Journal*, 11(11):2883–2890, novembre 2011. DOI 10.1109/JSEN.2011.2147301. (Cité en pages 17, 18 et 21.)
- Hao, W.-c., Liu, J.-l., Liu, M.-h. et He, S.-t. : Development of a new surface acoustic wave based PM2.5 monitor. In *Proceedings of the 2014 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications*, pages 52–55, Beijing, China, octobre 2014. IEEE. ISBN 978-1-4799-6425-3 978-1-4799-6424-6. (Cité en page 16.)

- Hare, D., Costa, D., Mbaye, M., Radosavljevic, M. et Malet, J. : Mise en fonctionnement du banc DIESE-BEMOL. Rapport technique IRSN/2019-00865, IRSN, Saclay, 2019. (Cité en pages 2 et 54.)
- Herranz, L. E., Ball, J., Auvinen, A., Bottomley, D., Dehbi, A., Housiadas, C., Piluso, P., Layly, V., Parozzi, F. et Reeks, M. : Progress in understanding key aerosol issues. *Progress in Nuclear Energy*, 52(1):120–127, janvier 2010. DOI 10.1016/j.pnucene.2009.09.013. (Cité en page 80.)
- Hoagland, L. C. : *Fully developed turbulent flow in straight rectangular ducts : secondary flow, its cause and effect on the primary flow*. Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, 1962. (Cité en page 45.)
- Holopainen, R., Asikainen, V., Pasanen, P. et Seppänen, O. : The Field Comparison of Three Measuring Techniques for Evaluation of the Surface Dust Level in Ventilation Ducts : Evaluation of the Surface Dust Level in Ventilation Ducts. *Indoor Air*, 12(1):47–54, mars 2002. DOI 10.1034/j.1600-0668.2002.120106.x. (Cité en page 13.)
- Hossain, A. et Naser, J. : CFD investigation of particle deposition around bends in a turbulent flow. *Governing*, 13:17, 2004. (Cité en page 26.)
- Humphrey, J. A. C., Whitelaw, J. H. et Yee, G. : Turbulent flow in a square duct with strong curvature. *Journal of Fluid Mechanics*, 103:443, février 1981. DOI 10.1017/S0022112081001419. (Cité en page 47.)
- Ilori, T. A. : *Turbulent deposition of aerosol particles inside pipes*. University of Minnesota, 1971. ISBN 9798659215159. (Cité en page 27.)
- ISO 15767 :2009 : Workplace atmospheres — Controlling and characterizing uncertainty in weighing collected aerosols., 2009. (Cité en page 13.)
- Jiang, H., Lu, L. et Sun, K. : Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules. *Atmospheric Environment*, 45(25):4299–4304, août 2011a. DOI 10.1016/j.atmosenv.2011.04.084. (Cité en page 15.)
- Jiang, H., Lu, L. et Sun, K. : Experimental study and numerical investigation of particle penetration and deposition in 90° bent ventilation ducts. *Building and Environment*, 46(11):2195–2202, novembre 2011b. DOI 10.1016/j.buildenv.2011.04.033. (Cité en page 33.)
- Kasavan, J. et Doherty, R. W. : Use of fluorescein in aerosol studies. Rapport technique ADA384058, U.S. Army Edgewood Chemical Biological Center, septembre 2000. (Cité en pages 14 et 68.)
- Kazem, H. A., Chaichan, M. T., Al-Waeli, A. H. A. et Sopian, K. : A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*, 276:123187, décembre 2020. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.123187. (Cité en page 15.)
- Kondo, Y., Sahu, L., Moteki, N., Khan, F., Takegawa, N., Liu, X., Koike, M. et Miyakawa, T. : Consistency and Traceability of Black Carbon Measurements Made by Laser-Induced Incandescence, Thermal-Optical Transmittance, and Filter-Based Photo-Absorption Techniques. *Aerosol Science and Technology*, 45(2):295–312, février 2011. DOI 10.1080/O2786826.2010.533215. (Cité en page 19.)
- Kort, A., Ouf, F.-X., Gelain, T., Malet, J., Lakhmi, R., Breuil, P. et Viricelle, J.-P. : A Resistive Soot Sensor for Mass Quantification Through a Correlation Between Conductance and Soot Mass Loading. *In EAC 2019*, page 1, Gothenburg, Sweden, août 2019. (Cité en page 19.)

- Kort, A., Ouf, F.-X., Gelain, T., Malet, J., Lakhmi, R., Breuil, P. et Viricelle, J.-P. : Quantification of soot deposit on a resistive sensor : Proposal of an experimental calibration protocol. *Journal of Aerosol Science*, 156:105783, août 2021. DOI 10.1016/j.jaerosci.2021.105783. (Cité en page 19.)
- Kuan, B., Yang, W. et Schwarz, M. : Dilute gas-solid two-phase flows in a curved 90° duct bend : CFD simulation with experimental validation. *Chemical Engineering Science*, 62(7):2068–2088, avril 2007. DOI 10.1016/j.ces.2006.12.054. (Cité en pages xxiii, 47, 110, 111, 112, 115 et 117.)
- Kuan, B., Yang, W. et Solnordal, C. : CFD simulation and experimental validation of dilute particulate turbulent flows in a 90° duct bend. *In Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, page 6, Melbourne, 2003. (Cité en page 47.)
- Kvasnak, W., Ahmadi, G., Bayer, R. et Gaynes, M. : Experimental investigation of dust particle deposition in a turbulent channel flow. *Journal of Aerosol Science*, 24(6):795–815, 1993. (Cité en page 28.)
- Lai, A. C. K. : Particle deposition indoors : a review. *Indoor Air*, 12(4):211–214, décembre 2002. DOI 10.1046/j.0905-6947.2002.11159a.x. (Cité en page 14.)
- Lai, A. C. K., Byrne, M. A. et Goddard, A. J. H. : Measured deposition of aerosol particles on a two-dimensional ribbed surface in a turbulent duct flow. *Journal of Aerosol Science*, 30(9):1201–1214, octobre 1999. DOI 10.1016/S0021-8502(99)00021-X. (Cité en page 31.)
- Lai, A. C. K., Byrne, M. A. et Goddard, A. J. H. : Experimental Studies of the Effect of Rough Surfaces and Air Speed on Aerosol Deposition in a Test Chamber. *Aerosol Science and Technology*, 36(10):973–982, octobre 2002. DOI 10.1080/02786820290092249. (Cité en page 7.)
- Lai, A. C. K. et Nazaroff, W. W. : MODELING INDOOR PARTICLE DEPOSITION FROM TURBULENT FLOW ONTO SMOOTH SURFACES. *Journal of Aerosol Science*, 31(4):463–476, avril 2000. DOI 10.1016/S0021-8502(99)00536-4. (Cité en page 41.)
- Lai, A. C. K. et Nazaroff, W. W. : Supermicron particle deposition from turbulent chamber flow onto smooth and rough vertical surfaces. *Atmospheric Environment*, 39(27):4893–4900, septembre 2005. DOI 10.1016/j.atmosenv.2005.04.036. (Cité en page 13.)
- Lai, A. C. K., Tian, Y., Tsoi, J. Y. L. et Ferro, A. R. : Experimental study of the effect of shoes on particle resuspension from indoor flooring materials. *Building and Environment*, 118:251–258, juin 2017. DOI 10.1016/j.buildenv.2017.02.024. (Cité en pages 13 et 21.)
- Landis, G. A., Jenkins, P., Flatico, J., Oberle, L., Krasowski, M. et Stevenson, S. : Development of a Mars dust characterization instrument. *Planetary and Space Science*, 44(11):1425–1433, novembre 1996. DOI 10.1016/S0032-0633(96)00042-6. (Cité en page 13.)
- Launder, B. E. et Ying, W. M. : Secondary flows in ducts of square cross-section. *Journal of Fluid Mechanics*, 54(2):289–295, juillet 1972. DOI 10.1017/S0022112072000680. (Cité en pages 44 et 45.)
- Lavoie, J., Gravel, R., Cloutier, Y. et Bahloul, A. : Critères de déclenchement du nettoyage des systèmes de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air d'édifices non industriels. Études et recherches R-525, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), Montréal, 2007. (Cité en pages 13 et 67.)

- Lavoie, J., Marchand, G., Cloutier, Y. et Lavoué, J. : Validation of the Criteria for Initiating the Cleaning of Heating, Ventilation, and Air-Conditioning (HVAC) Ductwork Under Real Conditions. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 8(8):467-472, août 2011. DOI 10.1080/15459624.2011.590740. (Cité en page 80.)
- Li, Q., Song, J., Li, C., Wei, Y. et Chen, J. : Numerical and experimental study of particle deposition on inner wall of 180° bend. *Powder Technology*, 237:241-254, mars 2013. DOI 10.1016/j.powtec.2012.11.008. (Cité en pages xxv, 44, 156 et 157.)
- Liatimi, N. et Prevost, C. : Etude du transport et de la sédimentation des aérosols en salle propre. Rapport technique PSN-RES/SCA/2013-54, IRSN, 2013. (Cité en page 68.)
- Licina, D. et Nazaroff, W. W. : Clothing as a transport vector for airborne particles : Chamber study. *Indoor Air*, 28(3):404-414, mai 2018. DOI 10.1111/ina.12452. (Cité en pages 13 et 21.)
- Lin, J., Yin, Z., Gan, F. et Yu, M. : Penetration efficiency and distribution of aerosol particles in turbulent pipe flow undergoing coagulation and breakage. *International Journal of Multiphase Flow*, 61:28-36, mai 2014. DOI 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.12.001. (Cité en pages 28, 36 et 38.)
- Liu, B., Chen, X., Cai, H., Mohammad Ali, M., Tian, X., Tao, L., Yang, Y. et Ren, T. : Surface acoustic wave devices for sensor applications. *Journal of Semiconductors*, 37(2):021001, février 2016. DOI 10.1088/1674-4926/37/2/021001. (Cité en page 16.)
- Liu, B. Y. H. et Agarwal, J. K. : Experimental observation of aerosol deposition in turbulent flow. *Journal of Aerosol Science*, 5(2):145-155, mars 1974. DOI 10.1016/0021-8502(74)90046-9. (Cité en pages 2, 27, 34, 36, 37 et 48.)
- Lu, D., Yuan, B., Wu, L., Ma, Z. et Chen, Y. : Research on the deposition model of particle-like corrosion product in SG tubes of PWR. *Annals of Nuclear Energy*, 81:98-105, juillet 2015. DOI 10.1016/j.anucene.2015.03.032. (Cité en pages 28 et 29.)
- Maeda, N., Hirota, M. et Fujita, H. : Turbulent flow in a rectangular duct with a smooth-to-rough step change in surface roughness. *Energy*, 30(2-4):129-148, février 2005. DOI 10.1016/j.energy.2004.04.050. (Cité en page 45.)
- Malet, J., Alloul, L., Michielsen, N., Boulaud, D. et Renoux, A. : DEPOSITION OF NANOSIZED PARTICLES IN CYLINDRICAL TUBES UNDER LAMINAR AND TURBULENT FLOW CONDITIONS. *Journal of Aerosol Science*, 31(3):335-348, mars 2000. DOI 10.1016/S0021-8502(99)00062-2. (Cité en page 28.)
- Malet, J. et Hare, D. : PLAN D'ACTION DU PROGRAMME DE RECHERCHE « DEPART » ASSOCIE AU BANC DIESE. Rapport technique PSN-RES/SCA/2018-133, IRSN, décembre 2018. (Cité en pages 26, 51 et 107.)
- Malet, J., Radosavljevic, M., Mbaye, M., Costa, D., Wiese, J. et Géhin, E. : Flow Characterization of Various Singularities in a Real-Scale Ventilation Network with Rectangular Ducts. *Building and Environment*, 2022. (Cité en pages xxiii, 43, 51, 99, 107, 109, 112, 132 et 203.)
- Mani, M. et Pillai, R. : Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance : Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9):3124-3131, décembre 2010. DOI 10.1016/j.rser.2010.07.065. (Cité en page 15.)

- Maro, D., Connan, O., Flori, J., Hébert, D., Mestayer, P., Olive, F., Rosant, J. M., Rozet, M., Sini, J. F. et Solier, L. : Aerosol dry deposition in the urban environment : Assessment of deposition velocity on building facades. *Journal of Aerosol Science*, 69:113–131, mars 2014. DOI 10.1016/j.jaerosci.2013.12.001. (Cité en pages 13 et 14.)
- Matsuda, K., Fujimura, Y., Hayashi, K., Takahashi, A. et Nakaya, K. : Deposition velocity of PM_{2.5} sulfate in the summer above a deciduous forest in central Japan. *Atmospheric Environment*, 44(36):4582–4587, novembre 2010. DOI 10.1016/j.atmosenv.2010.08.015. (Cité en page 8.)
- Mbaye, M. : Caractérisation par CFD de l'aérodynamique de l'installation DIESE de l'IRSN. Master thesis IRSN/2019-00865, UPEM, IRSN Saclay, août 2019. (Cité en pages xxv, 112, 156, 157 et 158.)
- McCready, D. I. : Wind Tunnel Modeling of Small Particle Deposition. *Aerosol Science and Technology*, 5(3):301–312, janvier 1986. DOI 10.1080/02786828608959095. (Cité en page 22.)
- McFarland, A. R., Gong, H., Muyschondt, A., Wente, W. B. et Anand, N. K. : Aerosol Deposition in Bends with Turbulent Flow. *Environmental Science & Technology*, 31(12):3371–3377, décembre 1997. DOI 10.1021/es960975c. (Cité en pages 28, 29, 40 et 81.)
- Menant, N. : *Etude des mécanismes de contamination particulaire et des moyens de détection : proposition et évaluation de solutions innovantes pour la détection en temps-réel de la sédimentation des particules sur les surfaces critiques*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 2016. (Cité en page 24.)
- Menant, N., Faye, D., Bourcier, F., Nouet, P., Latorre, L., Lafontan, X. et Lellouchi, D. : New development for particle deposition monitoring during space instrument integration in cleanroom. *In ISMSE 2015*, page 4, Pau, juin 2015. (Cité en page 24.)
- Miller, S. L., Nazaroff, W. W., Jimenez, J. L., Boerstra, A., Buonanno, G., Dancer, S. J., Kurnitski, J., Marr, L. C., Morawska, L. et Noakes, C. : Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event. *Indoor Air*, 31(2):314–323, octobre 2020. DOI 10.1111/ina.12751. (Cité en page 80.)
- Mokhtarzadeh-Dehghan, M. et Yuan, Y. : Measurements of turbulence quantities and bursting period in developing turbulent boundary layers on the concave and convex walls of a 90° square bend. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 27(1):59–75, décembre 2002. DOI 10.1016/S0894-1777(02)00213-3. (Cité en page 47.)
- Montgomery, T. et Corn, M. : Aerosol deposition in a pipe with turbulent airflow. *Journal of Aerosol Science*, 1(3):185–213, août 1970. DOI 10.1016/0021-8502(70)90034-0. (Cité en pages 31 et 36.)
- Moody, L. F. : Friction factors for pipe flow. *Transaction of the American Society of Mechanical Engineers*, 66:671–684, 1944. (Cité en page 12.)
- Morales-Baquero, R. et Pérez-Martínez, C. : Saharan versus local influence on atmospheric aerosol deposition in the southern Iberian Peninsula : Significance for N and P inputs : Saharan Versus Local Aerosol Deposition. *Global Biogeochemical Cycles*, 30(3):501–513, mars 2016. DOI 10.1002/2015GB005254. (Cité en page 14.)

- Nerisson, P. : *Modélisation du transfert des aérosols dans un local ventilé*. PhD diss., Institut National Polytechnique de Toulouse, février 2009. (Cité en pages xxiv, 2, 3, 36, 38, 48, 136, 140, 141, 142, 143, 146, 159 et 162.)
- NF ISO 2889 : Echantillonnage de substances radioactives en suspension dans l'air dans les émissaires de rejet et les conduits des installations nucléaires. Norme, Organisation Internationale de Normalisation, 2021. (Cité en page 68.)
- Nugaeva, N., Gfeller, K. Y., Backmann, N., Düggelin, M., Lang, H. P., Güntherodt, H.-J. et Hegner, M. : An Antibody-Sensitized Microfabricated Cantilever for the Growth Detection of *Aspergillus niger* Spores. *Microscopy and Microanalysis*, 13(01):13–17, février 2007. DOI 10.1017/S1431927607070067. (Cité en page 18.)
- Okazaki, K. et Willeke, K. : Transmission and Deposition Behavior of Aerosols in Sampling Inlets. *Aerosol Science and Technology*, 7(3):275–283, janvier 1987. DOI 10.1080/02786828708959164. (Cité en page 13.)
- Papavergos, P. G. et Hedley, A. B. : Particle deposition behaviour in fully developed turbulent flows. *Multiphase Transport : Fundamentals, Reactor Safety, Applications*, 4:1893–1920, 1980. (Cité en pages 34, 36 et 37.)
- Paprotny, I., Doering, F., Solomon, P. A., White, R. M. et Gundel, L. A. : Microfabricated air-microfluidic sensor for personal monitoring of airborne particulate matter : Design, fabrication, and experimental results. *Sensors and Actuators A : Physical*, 201:506–516, octobre 2013. DOI 10.1016/j.sna.2012.12.026. (Cité en page 16.)
- Park, K., Kim, N., Morissette, D. T., Aluru, N. R. et Bashir, R. : Resonant MEMS Mass Sensors for Measurement of Microdroplet Evaporation. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 21(3):702–711, juin 2012. DOI 10.1109/JMEMS.2012.2189359. (Cité en page 18.)
- Parker, S., Foat, T. et Preston, S. : Towards quantitative prediction of aerosol deposition from turbulent flows. *Journal of Aerosol Science*, 39(2):99–112, février 2008. DOI 10.1016/j.jaerosci.2007.10.002. (Cité en page 26.)
- Peillon, S., Dougniaux, G., Payet, M., Bernard, E., Pieters, G., Feuillastre, S., Garcia-Argote, S., Gensdarmes, F., Arnas, C., Miserque, F., Herlin-Boime, N., Grisolia, C. et Pluchery, O. : Dust sampling in WEST and tritium retention in tokamak-relevant tungsten particles. *Nuclear Materials and Energy*, 24:100781, août 2020. DOI 10.1016/j.nme.2020.100781. (Cité en page 13.)
- Peters, T. M. et Leith, D. : Measurement of particle deposition in industrial ducts. *Journal of Aerosol Science*, 35(4):529–540, avril 2004. DOI 10.1016/j.jaerosci.2003.10.004. (Cité en pages 31 et 33.)
- Phares, D. J. et Sharma, G. : A DNS Study of Aerosol Deposition in a Turbulent Square Duct Flow. *Aerosol Science and Technology*, 40(11):1016–1024, novembre 2006. DOI 10.1080/02786820600919416. (Cité en page 26.)
- Phillips, S. : Ammonia flux and dry deposition velocity from near-surface concentration gradient measurements over a grass surface in North Carolina. *Atmospheric Environment*, 38(21):3469–3480, juillet 2004. DOI 10.1016/j.atmosenv.2004.02.054. (Cité en page 8.)

- Prévost, C. : Etude d'un dispositif de comptage en continu d'un aérosol fluorescent. Master thesis CEA-R-5763, CEA, Saclay, 1997. (Cité en page 8.)
- Pui, D. Y. H., Romay-Novas, F. et Liu, B. Y. H. : Experimental Study of Particle Deposition in Bends of Circular Cross Section. *Aerosol Science and Technology*, 7(3):301–315, janvier 1987. DOI 10.1080/02786828708959166. (Cité en pages 6 et 40.)
- Reche, I., D'Orta, G., Mladenov, N., Winget, D. M. et Suttle, C. A. : Deposition rates of viruses and bacteria above the atmospheric boundary layer. *The ISME Journal*, 12(4):1154–1162, avril 2018. DOI 10.1038/s41396-017-0042-4. (Cité en page 14.)
- Reynaud, A., Leblanc, M., Zinola, S., Breuil, P. et Viricelle, J.-P. : Responses of a Resistive Soot Sensor to Different Mono-Disperse Soot Aerosols. *Sensors*, 19(3):705, février 2019. DOI 10.3390/s19030705. (Cité en page 19.)
- Riffat, S. et Lee, S. : Turbulent flow in a duct : Measurement by a tracer gas technique. *Building Services Engineering Research and Technology*, 11(1):21–26, février 1990. DOI 10.1177/014362449001100104. (Cité en page 45.)
- Rodríguez-López, E., Bruce, P. J. K. et Buxton, O. R. H. : A robust post-processing method to determine skin friction in turbulent boundary layers from the velocity profile. *Experiments in Fluids*, 56(4):68, avril 2015. DOI 10.1007/s00348-015-1935-5. (Cité en page 104.)
- Rondeau, A. : *Study of the aeraulic particle resuspension applied to the dust issue in the future ITER tokamak*. PhD diss., Université Paris-Saclay, décembre 2015. (Cité en page 15.)
- Rossignol, R. : Simulation CFD d'écoulements d'air chargé en particules dans un réseau de gaines de ventilation. Stage, IRSN, Polytech Orléans, 2021. (Cité en pages xxiii, 113 et 116.)
- Roupsard, P. : *Etude phénoménologique du dépôt sec d'aérosols en milieu urbain : Influence des propriétés des surfaces, de la turbulence et des conditions météorologiques*. PhD diss., INSA de Rouen, janvier 2013. (Cité en page 9.)
- Roupsard, P., Amielh, M., Maro, D., Coppalle, A., Branger, H., Connan, O., Laguionie, P., Hébert, D. et 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, janvier 2013. DOI 10.1016/j.jaerosci.2012.07.006. (Cité en pages 30 et 32.)
- SAC : PDM, 2018. (Cité en page 24.)
- Saidan, M., Albaali, A. G., Alasis, E. et Kaldellis, J. K. : Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment. *Renewable Energy*, 92:499–505, juillet 2016. DOI 10.1016/j.renene.2016.02.031. (Cité en page 15.)
- Sanmiguel Vila, C., Vinuesa, R., Discetti, S., Ianiro, A., Schlatter, P. et Örlü, R. : On the identification of well-behaved turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 822:109–138, 2017. DOI 10.1017/jfm.2017.258. (Cité en page 104.)
- Sato, S., Chen, D.-R. et Pui, D. Y. H. : Particle transport at low pressure : particle deposition in a tube with an abrupt contraction. *Journal of Aerosol Science*, 33(4):659–671, avril 2002. DOI 10.1016/S0021-8502(01)00198-7. (Cité en pages 13 et 14.)

- Schlichting, H. et Kestin, J. : *Boundary-layer theory*. McGraw-Hill series in mechanical engineering. McGraw-Hill, New York St Louis Paris [etc.], 7th ed édition, 1979. ISBN 978-0-07-055334-7. (Cité en page 12.)
- Schmid, S., Kurek, M., Adolphsen, J. Q. et Boisen, A. : Real-time single airborne nanoparticle detection with nanomechanical resonant filter-fiber. *Scientific Reports*, 3(1):1288, décembre 2013. DOI 10.1038/srep01288. (Cité en pages 18 et 21.)
- Schneider, T., Petersen, O. H., Kildeso, J., Kloch, N. P. et Lobner, T. : Design and Calibration of a Simple Instrument for Measuring Dust on Surfaces in the Indoor Environment. *Indoor Air*, 6(3):204–210, septembre 1996. DOI 10.1111/j.1600-0668.1996.t01-1-00007.x. (Cité en page 13.)
- Schultz, M. P. : The Relationship Between Frictional Resistance and Roughness for Surfaces Smoothed by Sanding. *Journal of Fluids Engineering*, 124(2):492–499, juin 2002. DOI 10.1115/1.1459073. (Cité en page 104.)
- Sehmel, G. A. : Aerosol Deposition from Turbulent Airstreams in Vertical Conduits. Rapport technique, Battelle-Northwest, Richland, Wash. Pacific Northwest Lab., 1968. (Cité en page 27.)
- Sippola, M. R. : *Particle deposition in ventilation ducts*. PhD diss., University of California, Berkeley, 2002. (Cité en pages xxiv, 2, 3, 36, 38, 48, 136, 143, 144, 145, 146, 161 et 162.)
- Sippola, M. R. et Nazaroff, W. W. : Experiments Measuring Particle Deposition from Fully Developed Turbulent Flow in Ventilation Ducts. *Aerosol Science and Technology*, 38(9):914–925, septembre 2004. DOI 10.1080/027868290507213. (Cité en pages xxii, xxiv, 13, 14, 21, 31, 34, 81, 84, 89, 94, 95, 96, 132, 134, 135 et 136.)
- Sippola, M. R. et Nazaroff, W. W. : Particle Deposition in Ventilation Ducts : Connectors, Bends and Developing Turbulent Flow. *Aerosol Science and Technology*, 39(2):139–150, février 2005. DOI 10.1080/027868290908795. (Cité en page 33.)
- Smith, S. et Pretorius, W. : The conservative behaviour of fluorescein. *Water SA*, 28(4):403–406, avril 2002. DOI 10.4314/wsa.v28i4.4913. (Cité en page 85.)
- Sow, M., Leblais, Y. et Gensdarmes, F. : Experimental study of aerosol release following liquid leaks of fission products concentrates simulants. *Nuclear Engineering and Design*, 341:46–55, janvier 2019. DOI 10.1016/j.nucengdes.2018.09.034. (Cité en pages 14 et 21.)
- Soysal, U., Géhin, E., Algré, E., Berthelot, B., Da, G. et Robine, E. : Aerosol mass concentration measurements : Recent advancements of real-time nano/micro systems. *Journal of Aerosol Science*, 114:42–54, décembre 2017. DOI 10.1016/j.jaerosci.2017.09.008. (Cité en pages 8 et 17.)
- Spedding, P., Benard, E. et McNally, G. : Fluid Flow through 90 Degree Bends. *Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing*, 12(1-2):107–128, mai 2008. DOI 10.1002/apj.5500120109. (Cité en page 44.)
- Speziale, C. G. : On turbulent secondary flows in pipes of noncircular cross-section. *International Journal of Engineering Science*, 20(7):863–872, janvier 1982. DOI 10.1016/0020-7225(82)90008-8. (Cité en pages xxi et 44.)

- Stenger, J. B. et Bajura, R. A. : Deposition in sampling tubes. Technical Report DOE/MC/11284-T12, West Virginia Univ., Morgantown (USA). Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, United States, mars 1982. (Cité en page 81.)
- Sudo, K., Sumida, M. et Hibara, H. : Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degree bend. *Experiments in Fluids*, 25(1):42–49, juin 1998. DOI 10.1007/s003480050206. (Cité en page 44.)
- Sudo, K., Sumida, M. et Hibara, H. : Experimental investigation on turbulent flow through a circular-sectioned 180° bend. *Experiments in Fluids*, 28(1):51–57, janvier 2000. DOI 10.1007/s003480050007. (Cité en page 44.)
- Sudo, K., Sumida, M. et Hibara, H. : Experimental investigation on turbulent flow in a square-sectioned 90-degree bend. *Experiments in Fluids*, 30(3):246–252, mars 2001. DOI 10.1007/s003480000157. (Cité en pages xxiii, 47, 110 et 111.)
- Sun, K., Lu, L., Jiang, H. et Jin, H. : Experimental Study of Solid Particle Deposition in 90° Ventilated Bends of Rectangular Cross Section with Turbulent Flow. *Aerosol Science and Technology*, 47(2):115–124, février 2013. DOI 10.1080/02786826.2012.731094. (Cité en pages 32 et 33.)
- SYLVIA v11 : Modèles physiques du logiciel SYLVIA v11. Rapport technique. (Cité en page 1.)
- Taheri, A., Khoshnevis, A. B. et Lakzian, E. : The effects of wall curvature and adverse pressure gradient on air ducts in HVAC systems using turbulent entropy generation analysis. *International Journal of Refrigeration*, 113:21–30, mai 2020. DOI 10.1016/j.ijrefrig.2020.01.014. (Cité en page 8.)
- Taylor, A. M. K. P., Whitelaw, J. H. et Yianneskis, M. : Curved Ducts With Strong Secondary Motion : Velocity Measurements of Developing Laminar and Turbulent Flow. *Journal of Fluids Engineering*, 104(3):350–359, septembre 1982. DOI 10.1115/1.3241850. (Cité en pages 47, 118 et 156.)
- Technology of Sense : APMON, 2018. (Cité en page 24.)
- Thatcher, T. L., Lai, A. C. K., Moreno-Jackson, R., Sextro, R. G. et Nazaroff, W. W. : Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors. *Atmospheric Environment*, 36(11):1811–1819, avril 2002. DOI 10.1016/S1352-2310(02)00157-7. (Cité en pages 6, 14, 21 et 81.)
- Thomas, S., Cole, M., Villa-López, F. H. et Gardner, J. W. : High frequency surface acoustic wave resonator-based sensor for particulate matter detection. *Sensors and Actuators A : Physical*, 244:138–145, juin 2016. DOI 10.1016/j.sna.2016.04.003. (Cité en page 16.)
- Tian, L. et Ahmadi, G. : Particle deposition in turbulent duct flows—comparisons of different model predictions. *Journal of Aerosol Science*, 38(4):377–397, avril 2007. DOI 10.1016/j.jaerosci.2006.12.003. (Cité en page 26.)
- Tovena Pecault, I., Godefroy, P. et Escoubas, L. : Qualification testing of an innovative system for monitoring particle contamination fallout. *Sensors and Actuators A : Physical*, 253:181–187, janvier 2017. DOI 10.1016/j.sna.2016.12.002. (Cité en page 24.)
- Tunstall, M. J. et Harvey, J. K. : On the effect of a sharp bend in a fully developed turbulent pipe-flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 34(3):595–608, décembre 1968. DOI 10.1017/S0022112068002107. (Cité en pages 44 et 46.)

- Venters, R., Helenbrook, B. et Ahmadi, G. : DRAFT : NUMERICAL SIMULATIONS OF TURBULENT FLOW THROUGH A 90°. page 5, 2019. (Cité en pages xxv, 158 et 159.)
- Verloo, E., Belval, S., Saldo, V., Albiol, T. et Sabathier, F. : Study of aerosol deposition in large pipes : TRANSAT programme. *Journal of Aerosol Science*, 27:S453-S454, septembre 1996. DOI 10.1016/0021-8502(96)00299-6. (Cité en pages 31 et 33.)
- Vidal, A., Vinuesa, R., Schlatter, P. et Nagib, H. : Reprint of : Influence of corner geometry on the secondary flow in turbulent square ducts. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 67:94-103, octobre 2017. DOI 10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.09.011. (Cité en page 94.)
- Wagner, J. et Leith, D. : Passive Aerosol Sampler. Part II : Wind Tunnel Experiments. *Aerosol Science and Technology*, 34(2):193-201, janvier 2001. DOI 10.1080/027868201300034826. (Cité en page 22.)
- Wang, Y., Dong, Q. et Wang, P. : Numerical Investigation on Fluid Flow in a 90-Degree Curved Pipe with Large Curvature Ratio. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015:1-12, 2015. DOI 10.1155/2015/548262. (Cité en pages xxv et 158.)
- Wasisto, H. S., Merzsch, S., Stranz, A., Waag, A., Uhde, E., Salthammer, T. et Peiner, E. : Silicon resonant nanopillar sensors for airborne titanium dioxide engineered nanoparticle mass detection. *Sensors and Actuators B : Chemical*, 189:146-156, décembre 2013. DOI 10.1016/j.snb.2013.02.053. (Cité en page 18.)
- Wells, A. C. et Chamberlain, A. C. : Transport of small particles to vertical surfaces. *British Journal of Applied Physics*, 18(12):1793-1799, décembre 1967. DOI 10.1088/0508-3443/18/12/317. (Cité en pages 27 et 36.)
- Wilson, W. E., Chow, J. C., Claiborn, C., Fusheng, W., Engelbrecht, J. et Watson, J. G. : Monitoring of particulate matter outdoors. *Chemosphere*, 49(9):1009-1043, décembre 2002. DOI 10.1016/S0045-6535(02)00270-9. (Cité en pages 8 et 14.)
- Winlight System : Cleart-100 - Particle Deposition Monitoring Device. (Cité en page 23.)
- Wood, N. : A simple method for the calculation of turbulent deposition to smooth and rough surfaces. *Journal of Aerosol Science*, 12(3):275-290, janvier 1981. DOI 10.1016/0021-8502(81)90127-0. (Cité en pages 36, 37, 48 et 140.)
- Wu, Y.-L., Davidson, C. I. et Russell, A. G. : Controlled Wind Tunnel Experiments for Particle Bounceoff and Resuspension. *Aerosol Science and Technology*, 17(4):245-262, janvier 1992. DOI 10.1080/02786829208959574. (Cité en page 13.)
- Wu, Z. et Young, J. B. : The deposition of small particles from a turbulent air flow in a curved duct. *International Journal of Multiphase Flow*, 44:34-47, septembre 2012. DOI 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2012.03.011. (Cité en pages 14, 28 et 29.)
- XCAM : PFO 1000 MONITOR, 2016. (Cité en page 24.)
- Xu, M., Nematollahi, M., Sextro, R. G., Gadgil, A. J. et Nazaroff, W. W. : Deposition of Tobacco Smoke Particles in a Low Ventilation Room. *Aerosol Science and Technology*, 20(2):194-206, janvier 1994. DOI 10.1080/02786829408959676. (Cité en page 7.)

- Yang, Y. T., Callegari, C., Feng, X. L., Ekinci, K. L. et Roukes, M. L. : Zeptogram-Scale Nanomechanical Mass Sensing. *Nano Letters*, 6(4):583–586, avril 2006. DOI 10.1021/nl052134m. (Cité en page 18.)
- Yeh, H. : Use of a heat transfer analogy for a mathematical model of respiratory tract deposition. *Bulletin of Mathematical Biology*, 36:105–116, février 1974. DOI 10.1016/S0092-8240(74)80014-5. (Cité en page 40.)
- Zhang, J. et Li, A. : CFD simulation of particle deposition in a horizontal turbulent duct flow. *Chemical Engineering Research and Design*, 86(1):95–106, janvier 2008. DOI 10.1016/j.cherd.2007.10.014. (Cité en page 26.)
- Zhang, P., Gros, Y., Roberts, R. M. et Bénard, A. : Modeling of turbulent flow with particle deposition in curved pipes. In *7th International Conference on Multiphase Flow, Tampa, FL, 2010*. (Cité en pages xxi et 46.)
- Zhang, P., Roberts, R. M. et Bénard, A. : Computational guidelines and an empirical model for particle deposition in curved pipes using an Eulerian-Lagrangian approach. *Journal of Aerosol Science*, 53:1–20, novembre 2012. DOI 10.1016/j.jaerosci.2012.05.007. (Cité en page 40.)
- Zhao, B. et Wu, J. : Modeling particle deposition onto rough walls in ventilation duct. *Atmospheric Environment*, 40(36):6918–6927, 2006. (Cité en pages 26 et 41.)
- Zielinski, A. T., Kalberer, M., Jones, R. L., Prasad, A. et Seshia, A. A. : Particulate mass sensing with piezoelectric bulk acoustic mode resonators. In *2016 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS)*, pages 1–6, New Orleans, LA, USA, mai 2016. IEEE. ISBN 978-1-5090-2091-1. (Cité en page 18.)

Annexes

Base de données PIV

Sommaire

A.1 Image brute et champ post-traité	183
A.2 Obtention des profils moyennés et profils bruts	185
A.3 Comparaison des profils à différentes hauteurs	194
A.3.1 25 et 50% de la hauteur du coude	194
A.3.2 25 et 50% de la hauteur du tronçon droit	195
A.3.3 25 et 50% de la largeur du tronçon droit	196
A.4 Comparaison des profils à différents débits	197

A.1 Image brute et champ post-traité

La Figure A.1 à gauche la Figure A.1 à droite présentent respectivement l'image brute prise par la caméra et l'image après application du filtre de soustraction du minimum du signal local sur 7 images. On peut constater que l'échelle d'intensité lumineuse est plus restreinte sur l'image de droite. L'exemple est obtenu à partir du champ d'observation horizontal à 45° dans le coude à 50% de la hauteur au débit Q3.

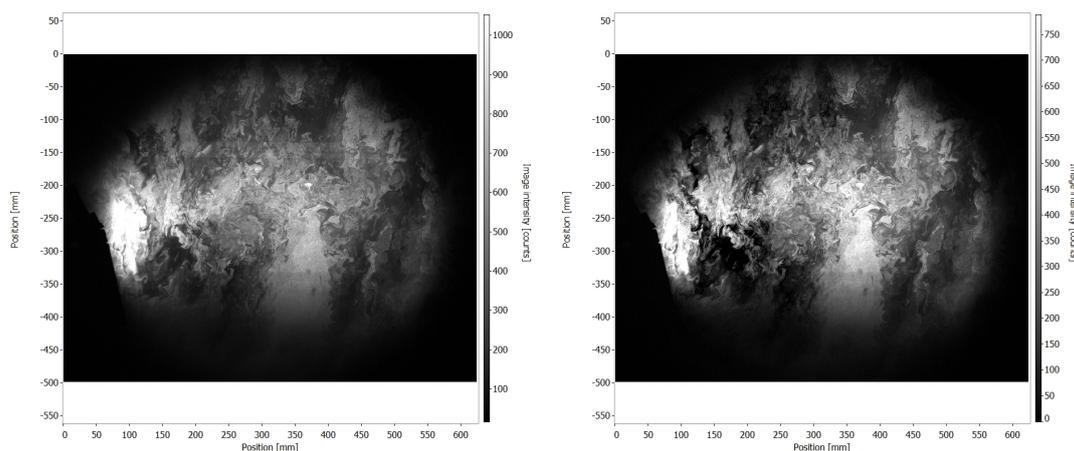


Figure A.1 – Image brute (à gauche) et à laquelle le filtre de soustraction du minimum du signal local a été appliqué (à droite) obtenues à 45° dans le coude à 50% de la hauteur au débit Q3

La Figure A.2 présente les valeurs de taux de corrélation sur le champ observé.

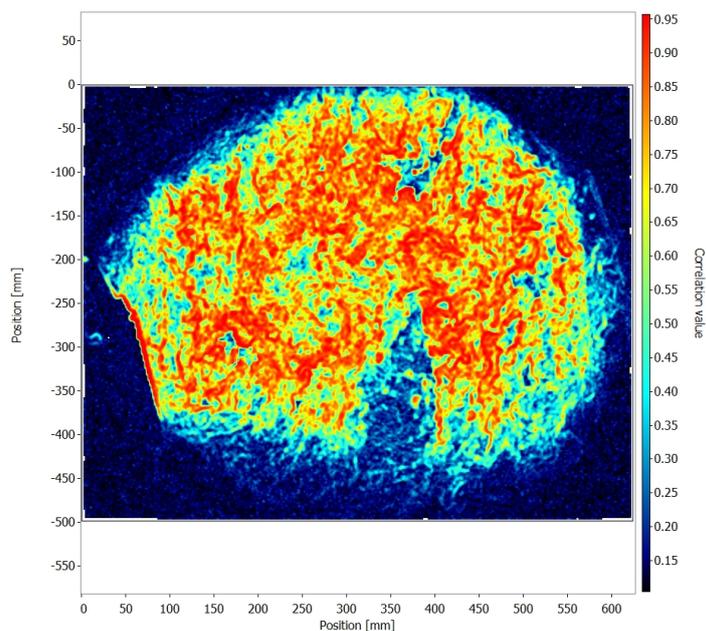


Figure A.2 – Valeurs des taux de corrélation sur le champ observé à 45° dans le coude à 50% de la hauteur au débit Q3

La Figure A.3 présente le champ après post-traitement. Dans ce cas, les vecteurs dont le taux de corrélation est inférieur à 0,9 ont été supprimés. Le champ en couleur correspond à la norme de vitesse. On observe l'accélération de l'écoulement en zone intérieure du coude.

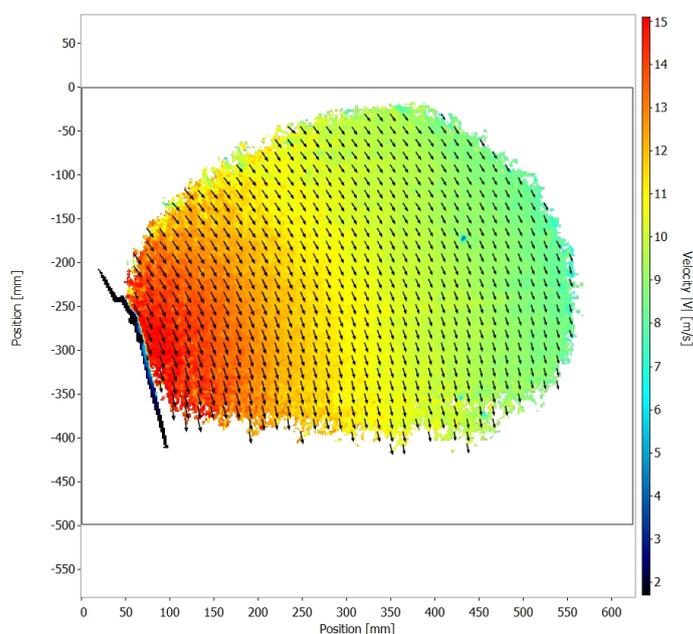


Figure A.3 – Champ post-traité de la norme de la vitesse d'air avec les vecteurs vitesse, observé à 45° dans le coude à 50% de la hauteur au débit Q3

A.2 Obtention des profils moyennés et profils bruts

Les profils utilisés pour l'adimensionnement et la comparaison des quatre débits d'étude à 50% de la hauteur du coude sont présentés sur la Figure A.4 comme exemple. Ce sont tout d'abord des profils moyennés : on moyenne deux ou trois profils obtenus dans les mêmes configurations (même hauteur/profondeur, même débit) mais pour des dt différents. Les barres d'erreur correspondent à l'écart-type obtenu en comparant les deux ou trois acquisitions. En haut de chaque graphique, la localisation (C pour coude dans cet exemple), le pourcentage de la hauteur/largeur du champ (50% pour la mi-hauteur), le débit et le taux de corrélation minimum indiqué lors du post-traitement sont précisés.

Ensuite, les points dont l'écart-type est supérieur à 10 ou 20% de la moyenne (noté $\sigma < xx\%$ par la suite) sont supprimés (Figures A.6 et A.7 pour le même exemple que précédemment). Le critère est fixé à 10 ou 20% selon les cas, pour assurer un minimum de points sur les profils.

Les mesures présentées sur les profils obtenus dans le coude à 45° subissent une transformation (rotation) pour adopter le repère du profil, repère qui n'est pas celui d'origine dans le logiciel de traitement DaVis. Les profils présentés dans ce chapitre n'ont pas encore subi la transformation ; ceux présentés dans le Chapitre 4 l'ont subie.

En abscisse des graphiques est toujours présentée la distance à la paroi et en ordonnée, la vitesse mesurée.

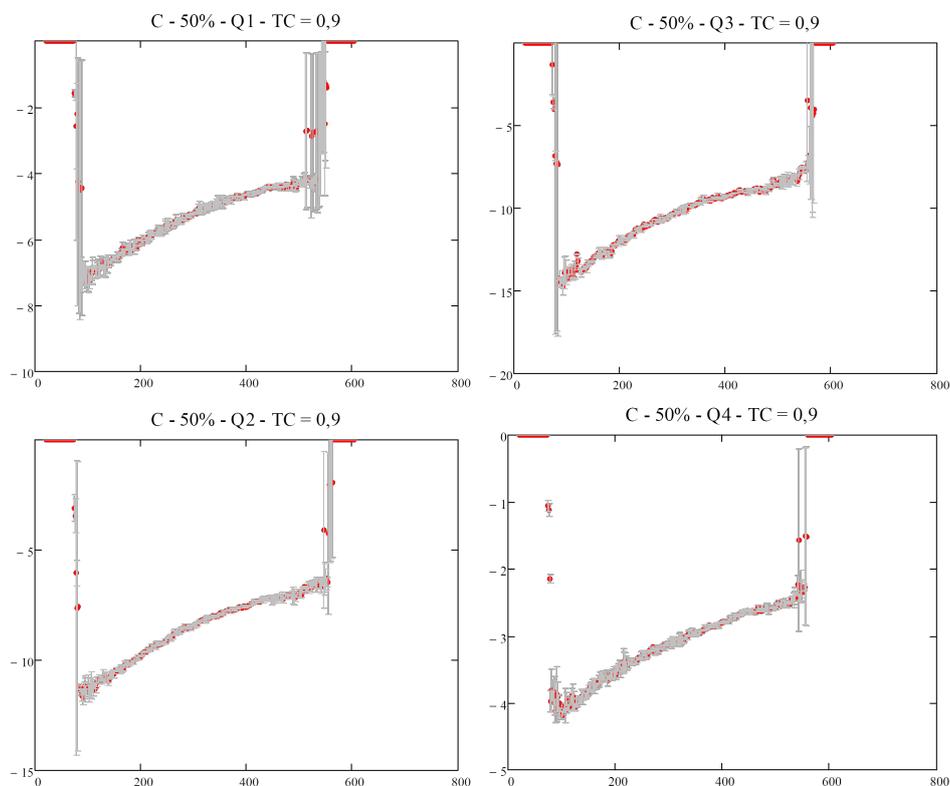


Figure A.4 – Profils horizontaux de vitesse longitudinale aux quatre débits d'étude à 45° dans le coude à 50% de la hauteur de la gaine

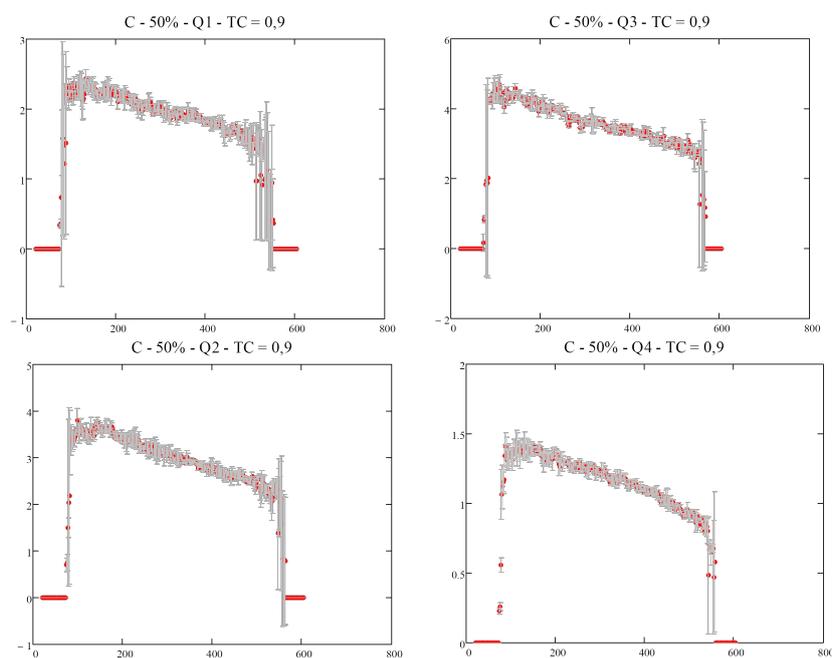


Figure A.5 – Profils horizontaux de vitesse transverse aux quatre débits d'étude à 45° dans le coude à 50% de la hauteur de la gaine

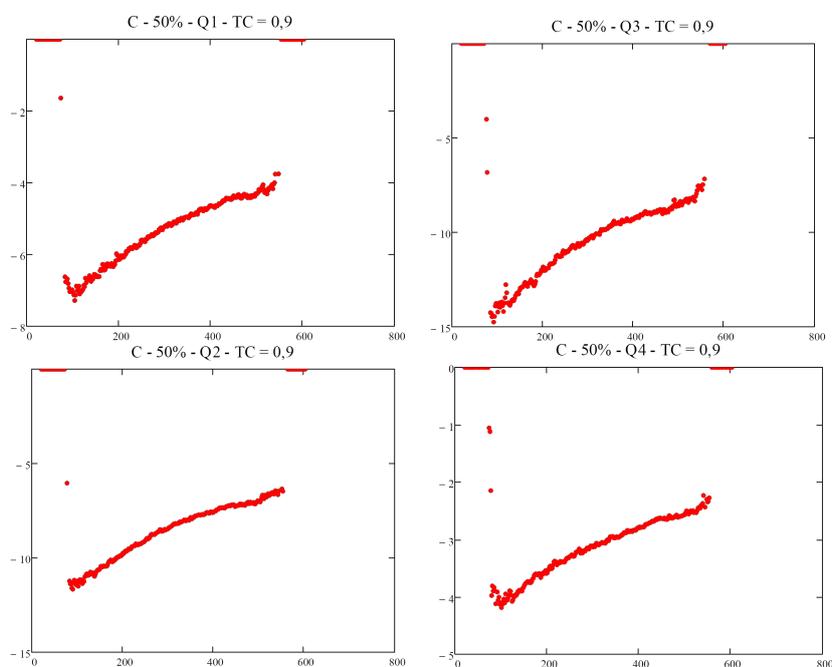


Figure A.6 – Profils horizontaux de vitesse longitudinale aux quatre débits d'étude, obtenus à 50% de la hauteur du coude à 45°, après traitement sur l'écart-type ($\sigma < 10\%$)

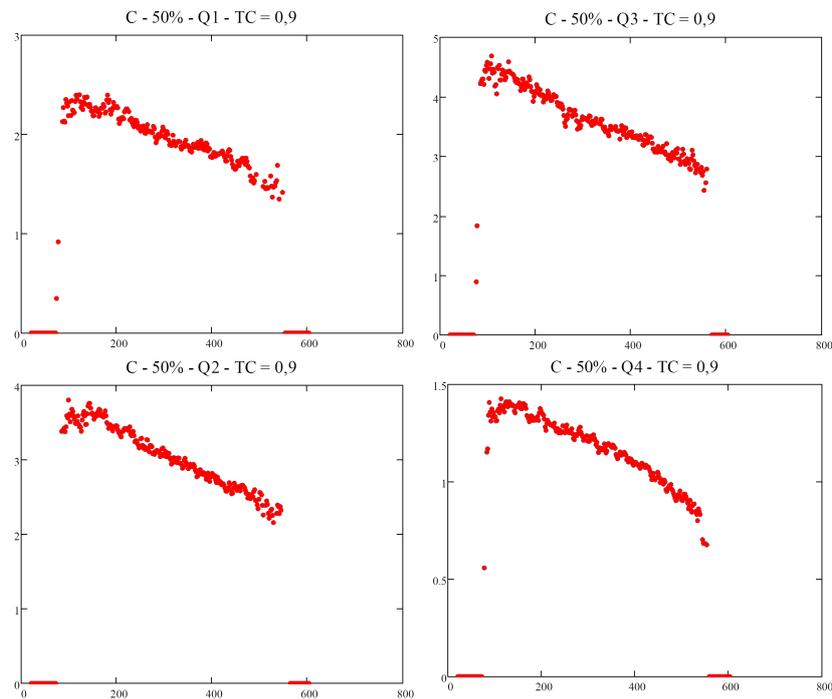


Figure A.7 – Profils horizontaux de vitesse transverse aux quatre débits d'étude, obtenus à 50% de la hauteur du coude à 45°, après traitement sur l'écart-type ($\sigma < 10\%$)

Ce traitement est appliqué à tous les profils mesurés. Les figures qui suivent présentent les profils sans traitement sur l'écart-type :

- 25% de la hauteur du coude : vitesse longitudinale (Figure A.8) et transverse (Figure A.9) ;
- 75% de la hauteur du coude : vitesse longitudinale et transverse (Figure A.10) ;
- 25% de la hauteur du tronçon droit en aval du coude : vitesse longitudinale (Figure A.11) et transverse (Figure A.12) ;
- 50% de la hauteur du tronçon droit en aval du coude : vitesse longitudinale (Figure A.13) et transverse (Figure A.14) ;
- 75% de la hauteur du tronçon droit en aval du coude : vitesse longitudinale et transverse (Figure A.15) ;
- 25% de la largeur du tronçon droit en aval du coude : vitesse longitudinale (Figure A.16) et transverse (Figure A.17) ;
- 50% de la largeur du tronçon droit en aval du coude : vitesse longitudinale (Figure A.18) et transverse (Figure A.19).

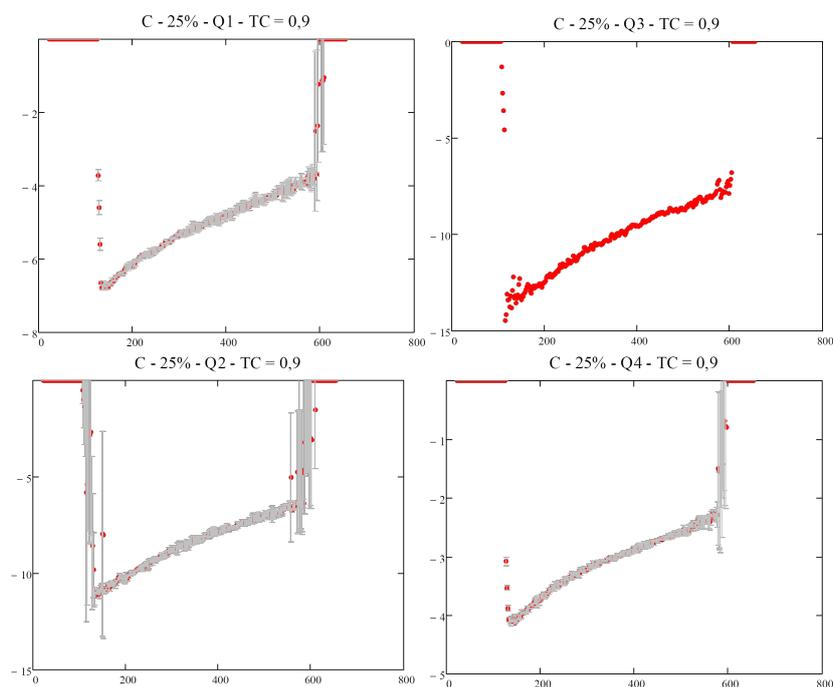


Figure A.8 – Profils horizontaux de vitesse longitudinale aux quatre débits d'étude, obtenus à 25% de la hauteur du coude à 45°

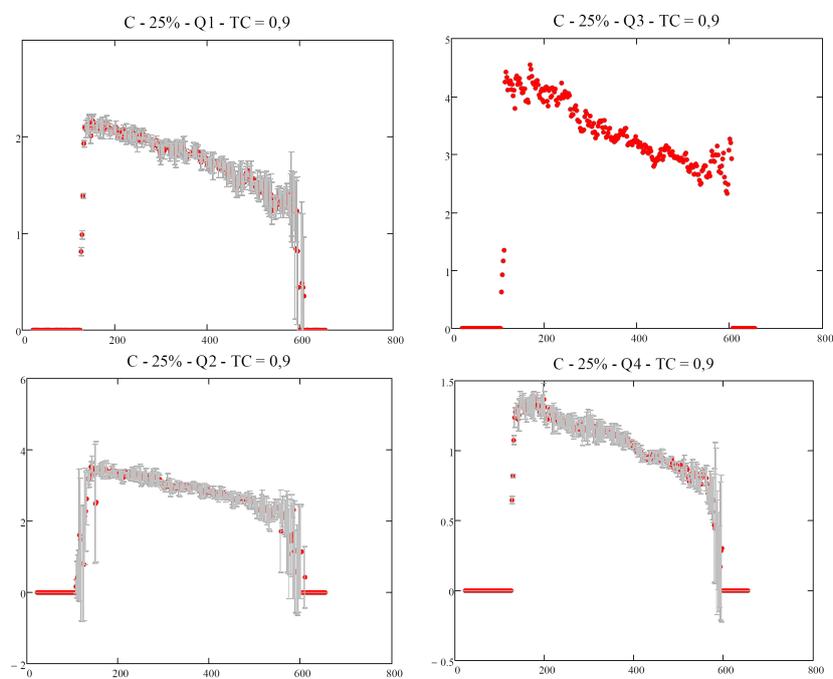


Figure A.9 – Profils horizontaux de vitesse transverse aux quatre débits d'étude, obtenus à 25% de la hauteur du coude à 45°

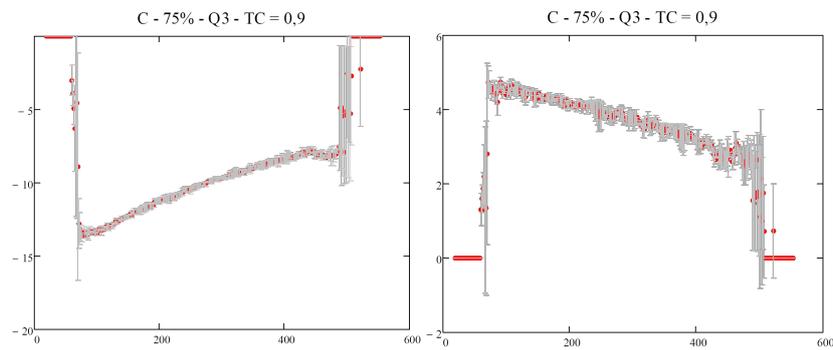


Figure A.10 – Profils horizontaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) à Q3, obtenus à 75% de la hauteur du coude à 45°

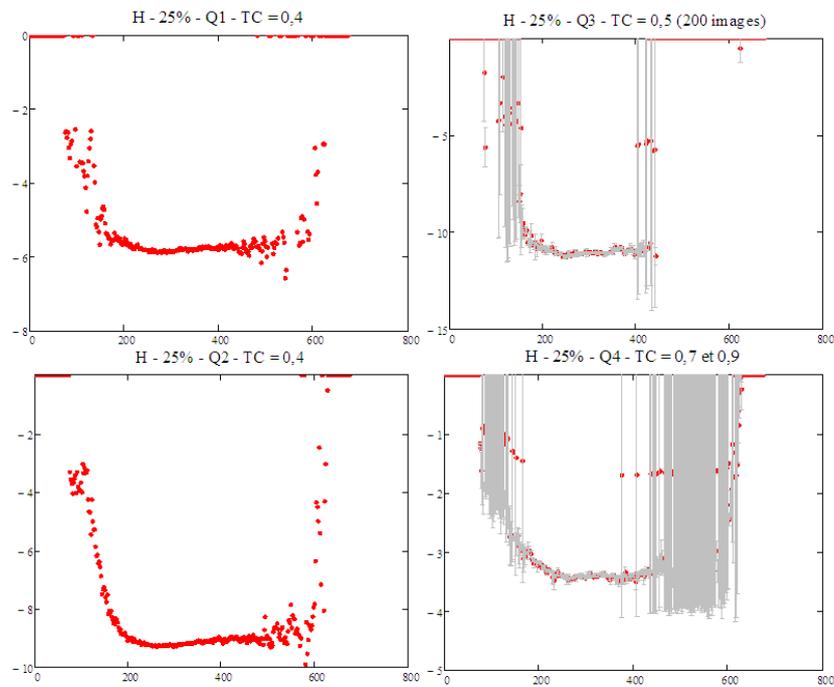


Figure A.11 – Profils horizontaux de vitesse longitudinale aux quatre débits d'étude, obtenus à 25% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude

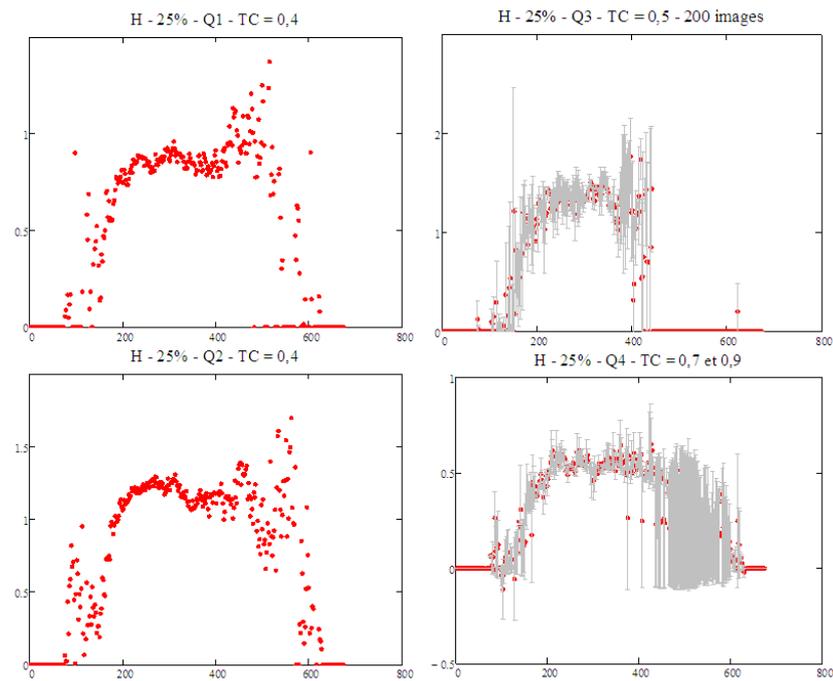


Figure A.12 – Profils horizontaux de vitesse transverse aux quatre débits d'étude, obtenus à 25% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude

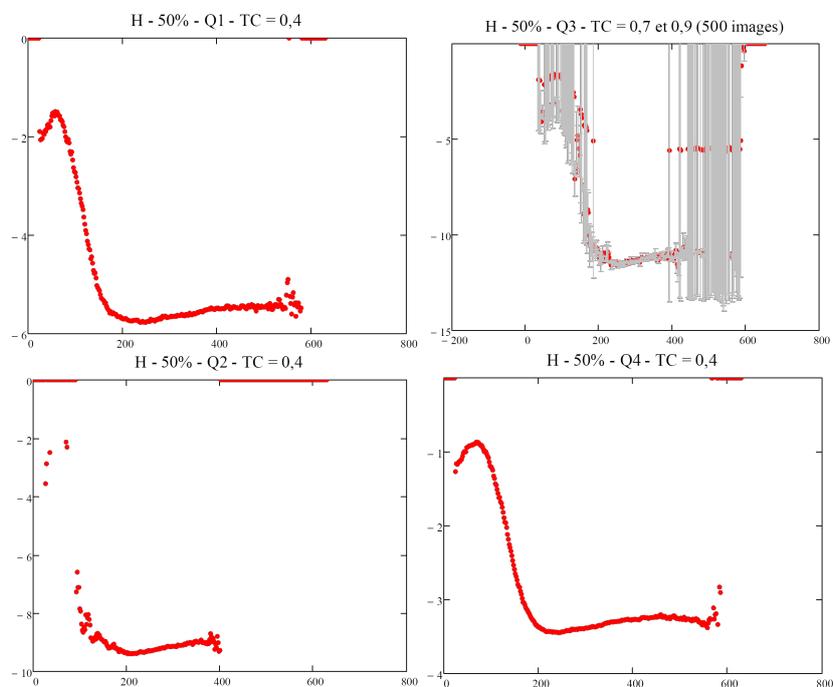


Figure A.13 – Profils horizontaux de vitesse longitudinale aux quatre débits d'étude, obtenus à 50% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude

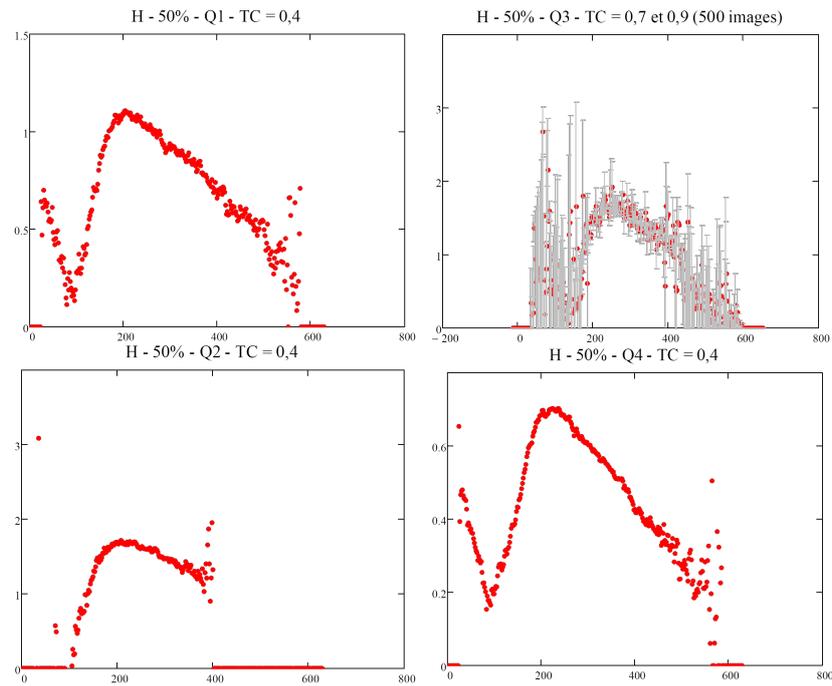


Figure A.14 – Profils horizontaux de vitesse transverse aux quatre débits d'étude, obtenus à 50% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude

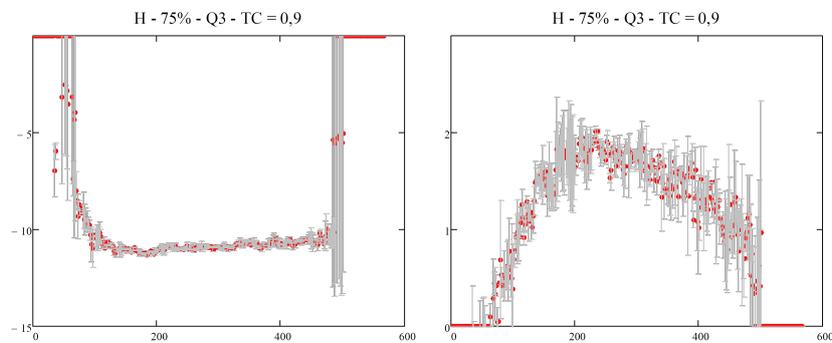


Figure A.15 – Profils horizontaux de vitesses longitudinale et transverse à Q3, obtenus à 75% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude

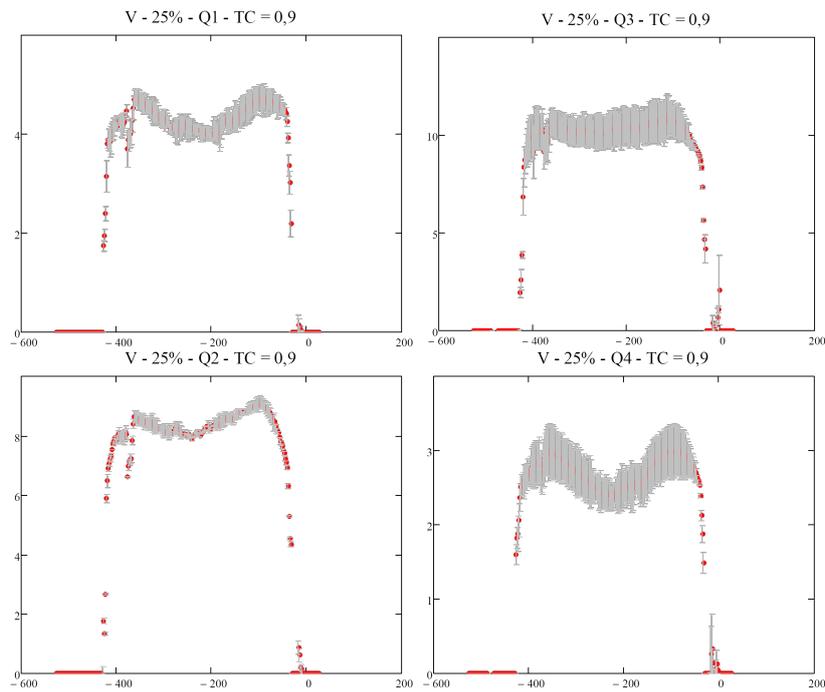


Figure A.16 – Profils verticaux de vitesse longitudinale aux quatre débits d'étude, obtenus à 25% de la largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude

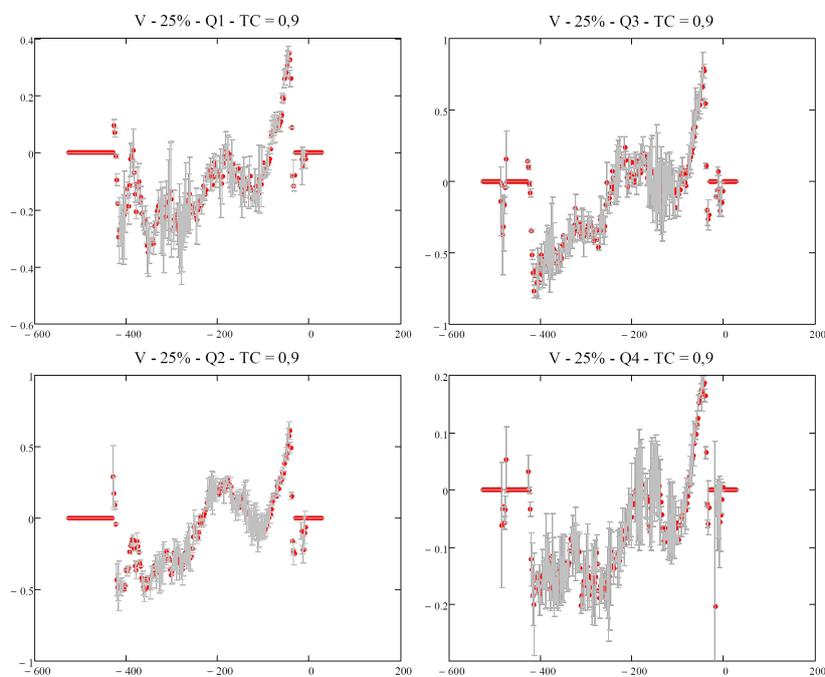


Figure A.17 – Profils verticaux de vitesse transverse aux quatre débits d'étude, obtenus à 25% de la largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude

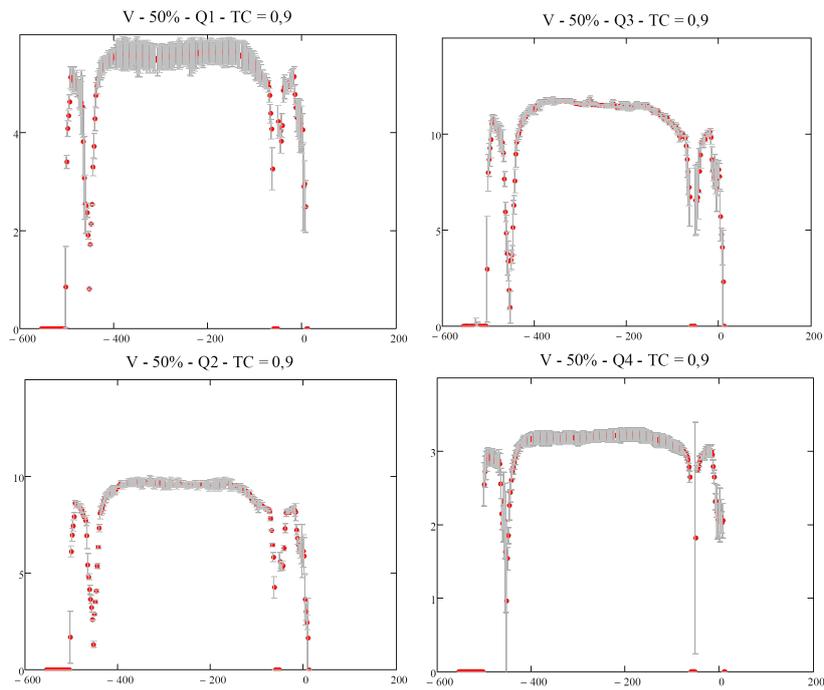


Figure A.18 – Profils verticaux de vitesse longitudinale aux quatre débits d'étude, obtenus à 50% de la largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude

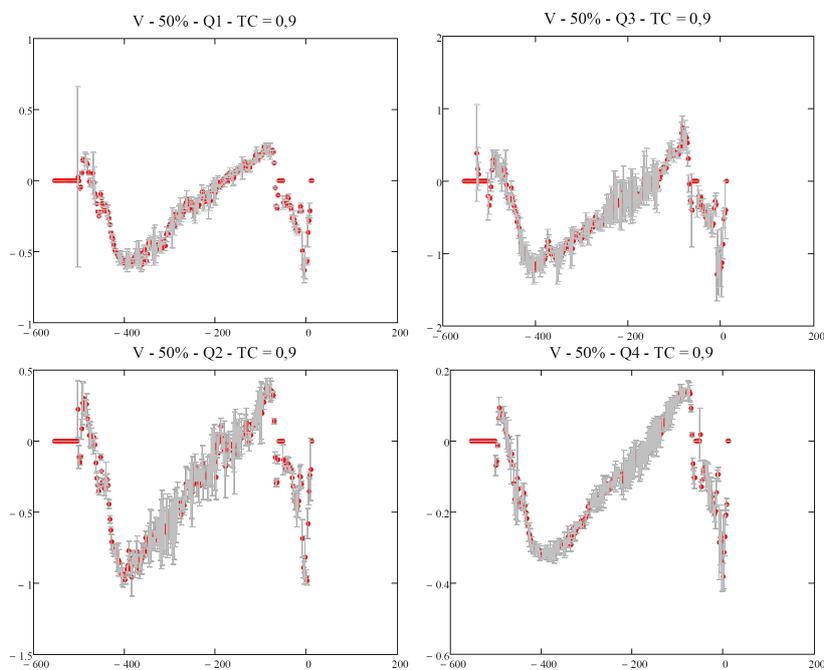


Figure A.19 – Profils verticaux de vitesse transverse aux quatre débits d'étude, obtenus à 50% de la largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude

A.3 Comparaison des profils à différentes hauteurs

A.3.1 25 et 50% de la hauteur du coude

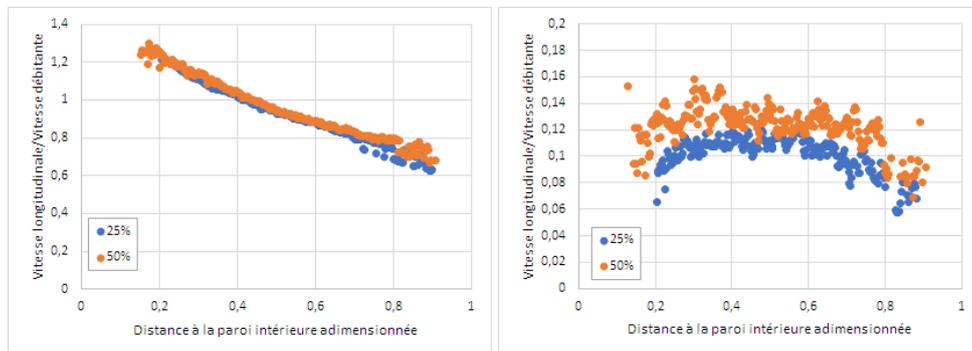


Figure A.20 – Profils horizontaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q1 à 25 et 50% de la hauteur du coude à 45° ($\sigma < 10\%$)

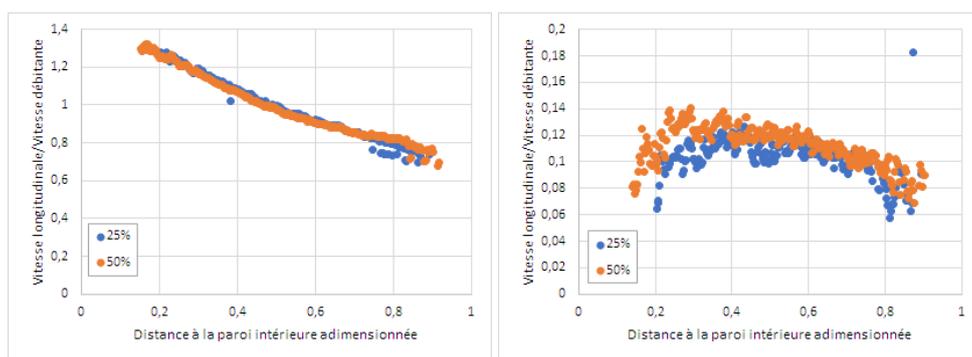


Figure A.21 – Profils horizontaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q2 à 25 et 50% de la hauteur du coude à 45° ($\sigma < 10\%$)

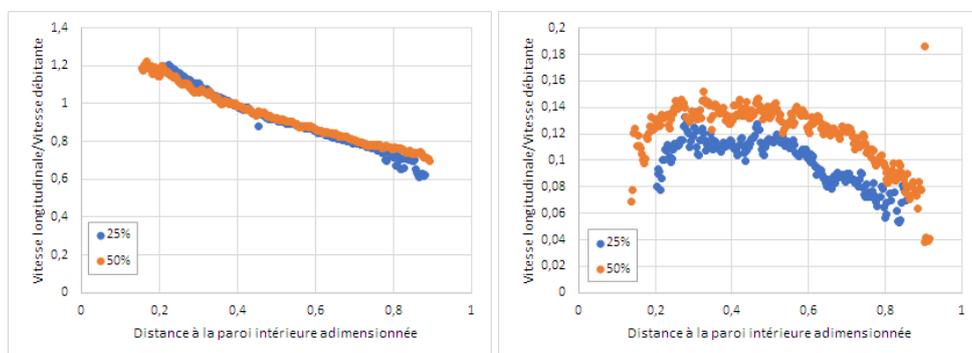


Figure A.22 – Profils horizontaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q4 à 25 et 50% de la hauteur du coude à 45° ($\sigma < 10\%$)

A.3.2 25 et 50% de la hauteur du tronçon droit

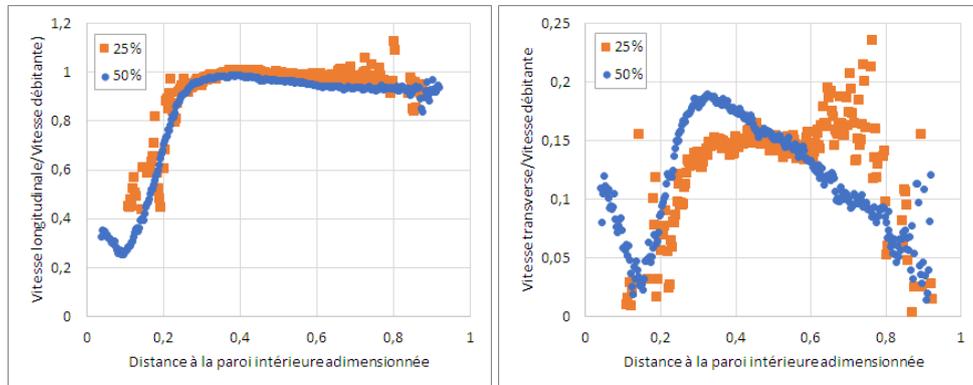


Figure A.23 – Profils horizontaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q1 à 25 et 50% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude

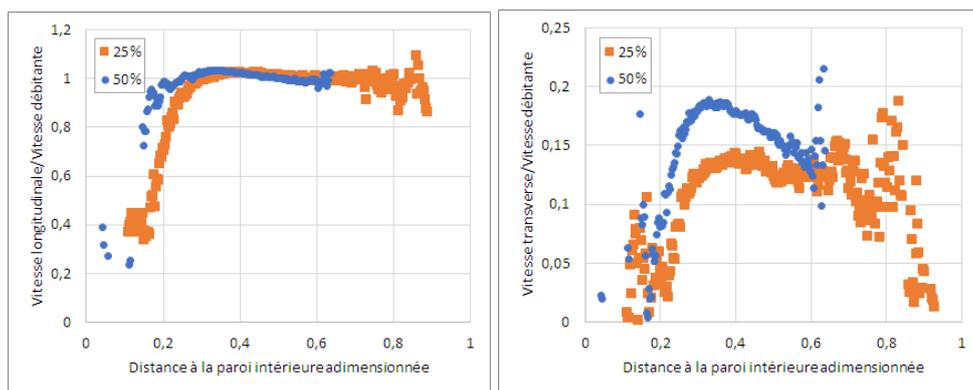


Figure A.24 – Profils horizontaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q2 à 25 et 50% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude

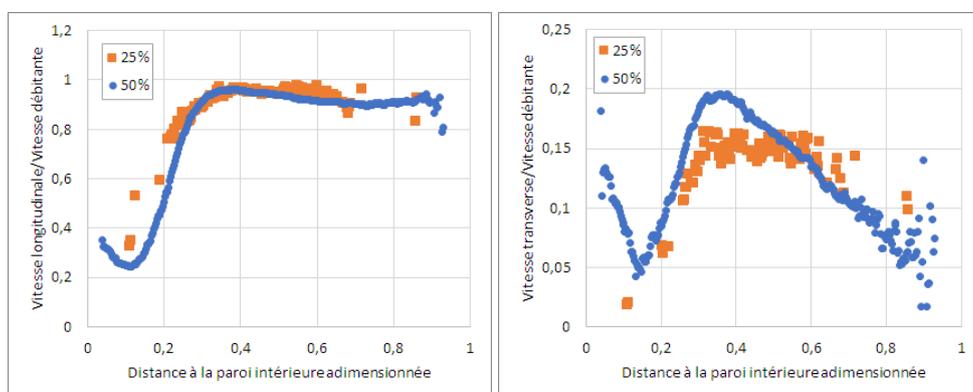


Figure A.25 – Profils horizontaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q4 à 25 et 50% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude

A.3.3 25 et 50% de la largeur du tronçon droit

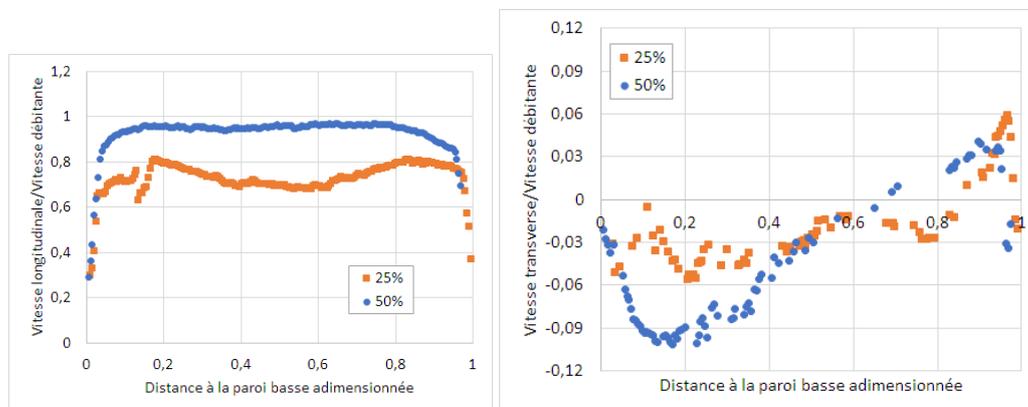


Figure A.26 – Profils verticaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q_1 à 25 et 50% de la largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude

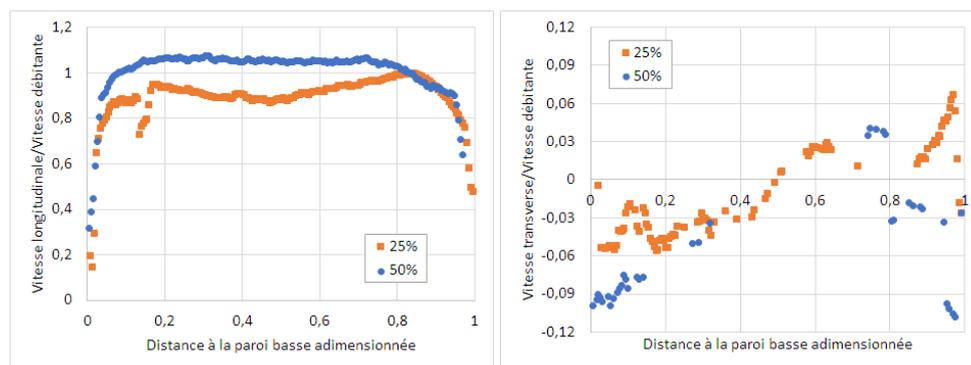


Figure A.27 – Profils verticaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q_2 à 25 et 50% de la largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude

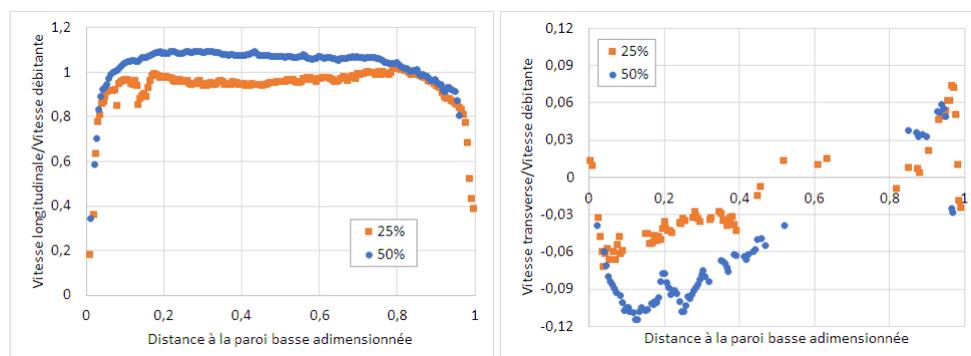


Figure A.28 – Profils verticaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q_3 à 25 et 50% de la largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude

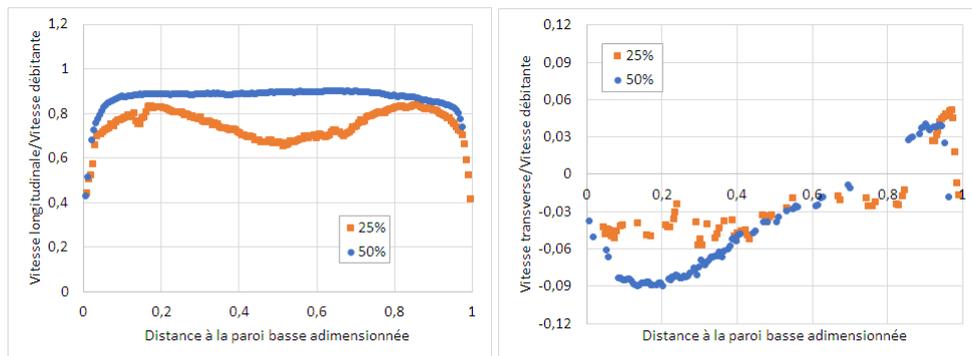


Figure A.29 – Profils verticaux de vitesses longitudinale (à gauche) et transverse (à droite) obtenus au débit Q4 à 25 et 50% de la largeur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude

A.4 Comparaison des profils à différents débits

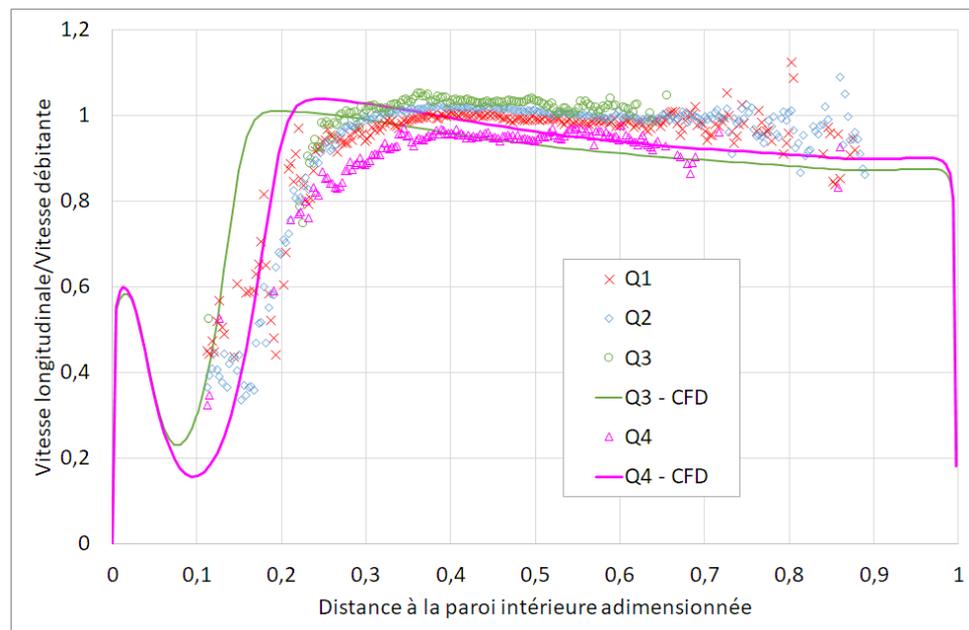


Figure A.30 – Profils horizontaux de vitesse longitudinale obtenus aux quatre débits d'étude à 25% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude ($\sigma < 10\%$ pour Q4 et 20% pour Q3)

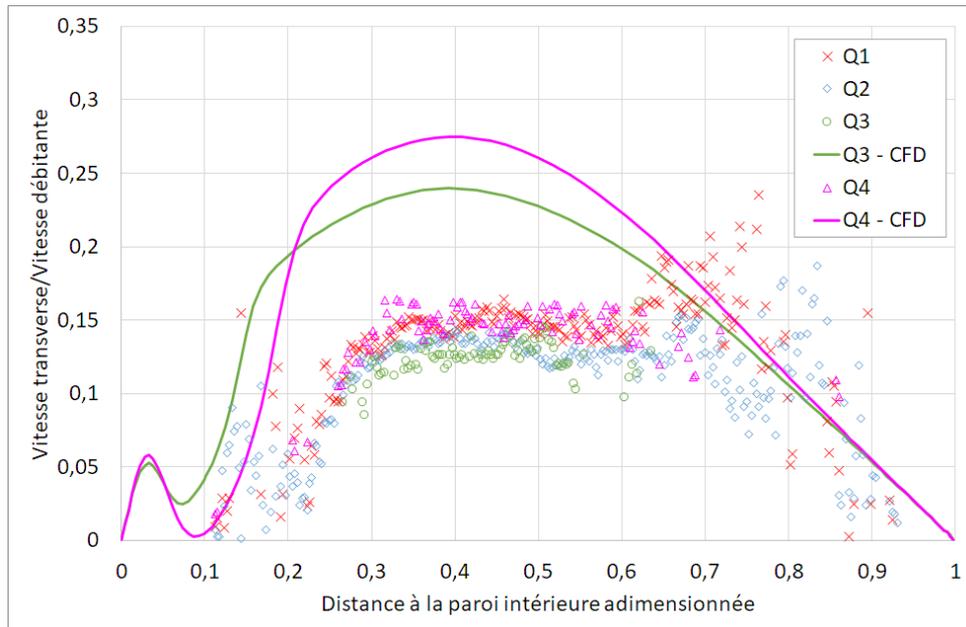


Figure A.31 – Profils horizontaux de vitesse longitudinale obtenus aux quatre débits d'étude à 25% de la hauteur de la gaine à $0,47D_h$ en aval du coude ($\sigma < 10\%$ pour Q4 et 20% pour Q3)

Mesures brutes de dépôt dans les coudes

La Figure B.1 et la Figure B.2 présentent graphiquement les mesures brutes des concentrations déposées (C_d en ng/cm^2), avec les incertitudes associées, pour un intervalle de confiance de 95% (coefficient d'élargissement égal à 2). Les concentrations déposées sont indiquées pour chaque surface de dépôt étudiées, pour les quatre coudes.

On peut constater que le dépôt se fait majoritairement sur la paroi du sol et qu'il est minimal sur la paroi du plafond. Pour mieux comparer les résultats entre les quatre coudes, les deux sections qui suivent s'intéressent respectivement aux mesures de concentration surfacique par rapport au débit massique injecté au cours de l'expérience et à la répartition du dépôt.

Figure B.1 – Mesures des concentrations d'aérosol déposées (ng/cm^2) dans les quatre coudes d'étude pour les parois du sol et du plafond

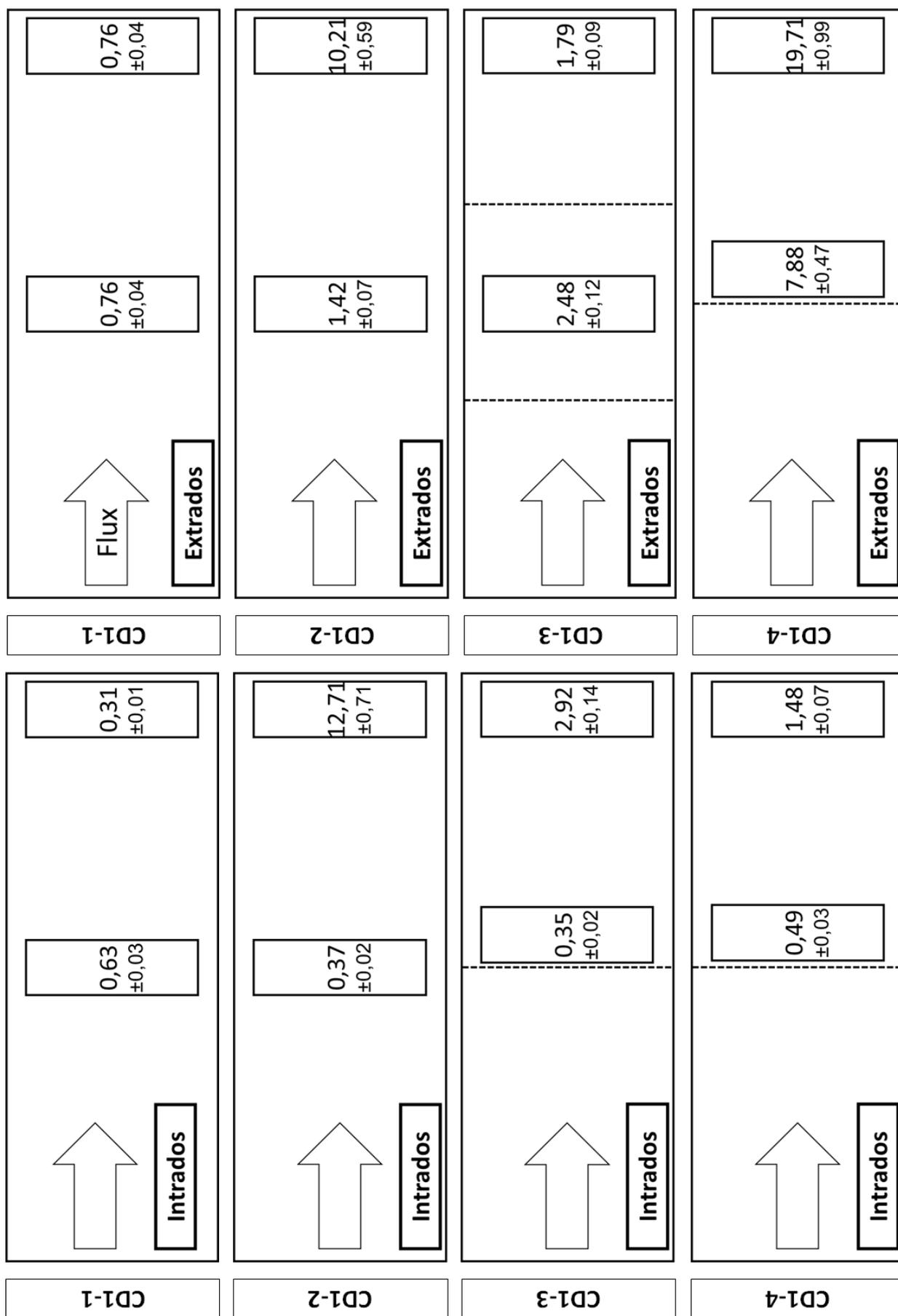


Figure B.2 – Mesures des concentrations d'aérosol déposées (ng/cm²) dans les quatre coudes d'étude pour les parois verticales

Liste des travaux et présentations

Publications

Costa *et al.* (2022a) — Costa, D., Malet, J. et Géhin, E. : Dry aerosol particle deposition on indoor surfaces : Review of direct measurement techniques. *Aerosol Science and Technology*, 56(3) :261–280, mars 2022b. DOI [10.1080/02786826.2021.2013431](https://doi.org/10.1080/02786826.2021.2013431).

Costa *et al.* (2022b) — Costa, D., Malet, M. et Gehin, E. : An experimental protocol for measuring aerosol deposition in industrial-sized ventilation ducts. *Measurement Science and Technology*, 33(9), avril 2022c. DOI [10.1088/1361-6501/ac68d3](https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac68d3).

Malet *et al.* (2022) — Malet, J., Radosavljevic, M., Mbaye, M., Costa, D., Wiese, J. et Géhin, E. : Flow Characterization of Various Singularities in a Real-Scale Ventilation Network with Rectangular Ducts. *Building and Environment*, 2022. DOI [10.1016/j.buildenv.2022.109223](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109223).

Communications

Costa *et al.* (2021) — Costa, D., Malet, J. et Géhin, E. : 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, Webconference, 2021. Association Française d'Etudes et de Recherches sur les Aérosols (ASFERA). DOI [10.25576/ASFERA-CFA2021-24837](https://doi.org/10.25576/ASFERA-CFA2021-24837)

Costa *et al.* (2021) — Costa, D., Malet, J. et Géhin, E. : Experimental measurement protocol of aerosol deposition relating to a bend in a large ventilation network with rectangular ducts. In 12th International Conference on "Instrumental Methods of Analysis", Webconference, 2021.

Costa *et al.* (2021) — Costa, D., Malet, J. et Géhin, E. : Preliminary measurements of aerosol deposition in a ventilation network of industrial size. In European Aerosol Conference 2021, Webconference, 2021.

Costa *et al.* (2022) — Costa, D., Malet, J. et Gehin, E. : Validation de mesures de dépôt d'aérosols dans des gaines rectangulaires de réseau de ventilation de grande taille. In Congrès Français sur les Aérosols 2022, Paris, France, 2022. Association Française d'Etudes et de Recherches sur les Aérosols (ASFERA). DOI [10.25576/ASFERA-CFA2022-28818](https://doi.org/10.25576/ASFERA-CFA2022-28818)

Costa *et al.* (2022) — Costa, D., Malet, J. et Géhin, E. : Local aerosol deposition in industrial bends of various geometries used in ventilation networks. In International Aerosol Conference 2022, Athènes, Grèce, 2022.

