



HAL
open science

Contribution à l'étude de la remise en suspension de particules générée par le pas humain au sein d'une ambiance du bâtiment

Ahmed Benabed

► **To cite this version:**

Ahmed Benabed. Contribution à l'étude de la remise en suspension de particules générée par le pas humain au sein d'une ambiance du bâtiment. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Université de La Rochelle; École Royale Militaire (Bruxelles), 2017. Français. NNT: 2017LAROS034 . tel-01804988

HAL Id: tel-01804988

<https://theses.hal.science/tel-01804988>

Submitted on 1 Jun 2018

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.



ÉCOLE ROYALE MILITAIRE DE BRUXELLES
Département de Mécanique

UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE
Laboratoire des Science de l'Ingénieur pour
L'environnement



THÈSE

Ahmed BENABED

pour obtenir le grade de :
Docteur de L'École Royale Militaire de Bruxelles
Et de l'Université de La Rochelle
Discipline : **Mécanique des Fluides**

Contribution à l'Étude de la Remise en Suspension de Particules Générée par le pas Humain au Sein d'une Ambiance du Bâtiment

Soutenue le 21 décembre 2017 devant la commission d'examen composée de :

E. ANTCZAK	Professeur, Université d'Artois, France	Rapporteur
M.R. VETRANO	Professeur, Catholic University of Leuven, Belgique	Rapporteur
W. BOUSSCHAERTS	Professeur, École Royale Militaire, Belgique	Examineur
L. RABET	Professeur, École Royale Militaire, Belgique	Examineur
K. LIMAM	MCF-HDR, Université de La Rochelle, France	Examineur
B. JANSSENS	Docteur, École Royale Militaire, Belgique	Examineur

Remerciements

C'est pour moi un réel plaisir de remercier toutes les personnes qui m'ont, de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre, permis, par leur collaboration, leur soutien et leur avis judicieux, de mener à bien ce travail.

En premier lieu, j'exprime ma plus profonde gratitude à mon directeur de thèse monsieur Karim LIMAM, MCF-HDR à l'université de La Rochelle, pour m'avoir dirigé dans mes travaux de recherche. Il m'a guidé dans mon travail et m'a aidé à trouver des solutions pour avancer. Je le remercie également pour ces multiples encouragements, notamment lors de mes participations aux congrès et le jour de ma soutenance. Enfin, j'ai été extrêmement sensible à ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail.

Ce travail n'aurait pu être mené à bien sans la collaboration avec l'École Royale Militaire (ERM) de Bruxelles. Je remercie donc mon codirecteur de thèse monsieur Walter BOUSSCHAERTS professeur et chef du département de Mécanique à l'ERM, mon encadrant monsieur Bart JANSSENS docteur et enseignant à l'ERM. Leurs conseils et leurs qualités humaines et scientifiques m'ont apportés une aide inestimable.

J'adresse mes sincères remerciements à monsieur Jan VERCAUTEREN, Ingénieur et enseignant à l'ERM pour m'avoir aidé dans la mise en place des bancs expérimentaux à l'ERM.

Je souhaiterais exprimer ma gratitude aux professeurs Luc RABET, Emmanuel ANTCZAK et Maria Rosaria VETRANO pour avoir accepté de participer au jury de thèse et pour leurs questions et conseil constructif.

Je souhaite remercier la région Poitou-Charentes et le CDA de La Rochelle pour le financement de cette thèse.

Mes remerciements vont également à M. Ahmad DEEB post doc au laboratoire LASIE à La Rochelle pour son soutien quotidien indéfectible et son enthousiasme contagieux à l'égard de mes travaux.

Je remercie M. Saad ALASSMAR, docteur de l'université de La Rochelle, et actuellement enseignant à l'université CNAM au Liban. Son aide pour le traitement des données PIV m'a permis d'avancer de façon considérable dans mes travaux.

Mes remerciements vont aussi à ma famille qui m'a permis de ne jamais dévier de mon objectif final. Merci à ma mère, mes frères, mes sœurs et ma femme.

À mon père Henni BENABED, ma mère Nakhla KADDOUR DJEBBAR, ma femme,
mes frères et mes sœurs,

Résumé

Ce travail de thèse s'inscrit dans la thématique de la pollution particulaire de l'air intérieure et concerne plus particulièrement les phénomènes de remise en suspension liés à l'impact, au niveau du sol, des pas d'une personne qui marche sur un plancher chargé en particules (issues de l'extérieure, ou des sources intérieures). La première partie présente un état de l'art des connaissances de la pollution particulaire. Les différents paramètres expérimentaux qui influencent la remise en suspension des particules ainsi que les coefficients utilisés pour la quantification du phénomène sont recensés. Les différentes perturbations mécaniques et aérodynamiques générées lors de l'impact d'un pied avec le sol pendant la marche d'une personne sont présentées et comparées. Nous terminons la première partie par une présentation des différents modèles de remise en suspension des particules émanant d'une surface. La seconde partie est consacrée à la présentation de la maquette qui a été mise au point au laboratoire LaSIE à La Rochelle afin d'étudier le dépôt et la remise en suspension des particules par un simulateur mécanique du pas humain depuis un sol chargé en particules. Cette étude a permis de classer les différents types de surfaces utilisées dans le bâtiment en fonction de leurs émissions en particules après l'impact mécanique d'un solide. La troisième partie du travail consiste à mesurer les vitesses de l'écoulement de l'air généré par un simulateur mécanique automatisé du pas humain en différents emplacements. Les mesures de la vitesse ont été effectuées par trois types de méthodes largement utilisées dans le domaine de la mécanique des fluides : deux méthodes de Vélocimétrie Laser (Vélocimétrie par Image des particules et Vélocimétrie Laser Doppler), mais également une méthode d'Anémométrie à Fil Chaud. Ces mesures nous ont permis de trouver la zone de forte vitesse qui correspond à la zone où nous avons une remise en suspension importante. Nous avons également étudié l'influence de l'état de la surface sur les vitesses de l'écoulement générées à proximité du sol suite au mouvement du simulateur mécanique. Ces mesures ont mis en évidence que l'influence de la rugosité de la surface sur la vitesse de l'écoulement généré par le pas est marginale. Finalement, nous avons étudié analytiquement le détachement des particules en utilisant un modèle basé sur le bilan des moments de forces. Des perspectives à la fois sur l'amélioration des deux maquettes mis en place au LaSIE et à l'ERM, ainsi que le développement d'un code numérique pour simuler le pas humain sont présentées et argumentées en conclusion.

Abstract

This thesis work is part of indoor particulate pollution theme and more particularly the phenomena of walking-induced particle resuspension. The first part presents a state of the art knowledge of particulate pollution. The different experimental parameters that influence the particles resuspension, as well as the coefficients used for the phenomenon quantification, are identified. The various mechanical and aerodynamic disturbances generated during person walking are presented and compared. We end the first part with a presentation of the different particles resuspension models. The second part is dedicated to present the experiment made on a small scale model developed at the LaSIE laboratory in La Rochelle to study particles deposition and resuspension by a mechanical simulator of the human step from a particle-laden soil. This study classified the different types of surfaces used in the building according to their particulate emissions after the mechanical simulator impact. The third part of the work consists of measuring the airflow velocities generated by an automated mechanical simulator of the human footstep at different locations. The velocity measurements have been done in the Royal Military Academy at Brussels (RMA) by three types of methods widely used in the field of fluid mechanics : two methods of Laser Velocimetry (Particle Image Velocimetry and Laser Doppler Velocimetry), but also a method of Wire Anemometry. These measurements allowed us to find the high-speed zone that corresponds to the area where we have a significant resuspension. We also studied the influence the surface roughness on the flow velocities generated near the ground following the movement of the mechanical simulator. We have shown that the influence of the surface roughness on the speed of the flow generated by the pitch is marginal. Finally, we analytically studied the detachment of particles using a model based on the momentum balance. Perspectives on both the improvement of the two models set up in LaSIE and the RMA, as well as the development of a numerical code to simulate the human step, are presented and argued in conclusion.

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	7
1.1 RmS des particules	7
1.2 La marche humaine	9
1.3 Effets aérodynamiques du pas humain	10
1.3.1 Solution analytique	15
1.4 Quantification de la remise en suspension	17
1.5 Pollution intérieure	19
1.5.1 Origines des particules	19
1.5.2 Dimensions et classification des particules	20
1.5.3 Formes et tailles des particules	20
1.6 Forces agissantes sur une particules	23
1.6.1 Forces d'adhérence	23
1.6.1.1 Forces de van der Waals	23
1.6.1.2 Force électrostatique	25
1.6.1.3 Force de tension superficielle	27
1.6.1.4 Force de cohésion	28
1.6.1.5 Force de gravité	29
1.6.1.6 Expression empirique de la force d'adhérence	30
1.6.1.7 Comparaison des forces d'adhérence	30
1.6.2 Forces d'entraînement	31
1.6.2.1 Force de vibration	31
1.6.2.2 Forces aérodynamiques	32
1.7 Modèles de remise en suspension	34
1.7.1 Modèles basés sur un bilan de forces	34

1.7.1.1	Modèles statistiques	35
1.7.1.2	Modèles cinématiques	37
1.7.1.3	Modèles lagrangiens	38
1.7.2	Modèles basés sur l'accumulation de l'énergie	40
1.7.2.1	Modèle RRH	41
1.7.2.2	Modèle VZFG	41
1.7.2.3	Modèle Rock'n'Roll	42
1.8	Conclusion du chapitre	43
2	ÉTUDE EXPERIMENTALE DE LA RmS DES PARTICULES	47
2.1	Présentation du dispositif expérimental	48
2.1.1	Revêtements du sol	51
2.1.2	Analyse de la rugosité des surfaces	52
2.2	Bilan de particules intérieure	54
2.2.1	Estimation des coefficients de décharge	55
2.2.2	Résultats de la remise en suspension	58
2.2.2.1	Ensemencement du sol en particules	58
2.2.2.2	Expérience de remise en suspension	59
2.2.2.3	Estimation des sources de remise en suspension	60
2.3	Conclusion du chapitre	64
3	PRESENTATION DES TECHNIQUES DE MESURE EXPERIMENTALES DE LA VITESSE	67
3.1	Vélocimétrie par Image de Particules	68
3.1.1	Principe de la technique	68
3.2	Vélocimétrie Laser Doppler	70
3.2.1	Principe de la technique	70
3.2.2	Vélocimétrie à Franges	72
3.3	Ensemencement dans les techniques de Vélocimétrie laser	73
3.4	Anémométrie à Fils Chaud	74
3.4.1	Principe de la technique	74
3.4.2	Anémométrie à température constante	79
3.4.3	Coefficient de surchauffe	81
3.5	Mesure en proche paroi	82

3.6	Conclusion du chapitre	84
4	MESURE PAR VÉLOCIMÉTRIE LASER	89
4.1	Chambre de mesure à l'ERM	89
4.2	Mesure expérimentale de la vitesse du pied	90
4.3	Simulateur mécanique du pas humain	91
4.4	Mesures par Vélocimétrie à Images de Particules PIV	92
4.4.1	Caractéristiques du montage PIV	93
4.4.2	Stratégie de Synchronisation	94
4.4.3	Post-traitement des résultats	96
4.4.4	Incertitudes de mesure en PIV	96
4.4.5	Test de répétabilité	97
4.4.6	Champs de vitesse moyenne de l'écoulement	98
4.5	Mesures par Vélocimétrie à effet Doppler LDV	102
4.5.1	Caractéristiques du montage LDV	102
4.5.2	Stratégie de synchronisation	105
4.5.3	Résultats des mesures LDV	106
4.5.3.1	Évolution de la vitesse en un point	108
4.5.3.2	Mesures verticales : comparaison avec la technique PIV	109
4.5.3.3	Mesures longitudinales	112
4.5.3.4	Erreur de mesure	114
4.5.3.5	Mesure en dessous de la plaque	115
4.5.3.6	Influence de la rugosité de la surface	117
4.6	Conclusion du chapitre	117
5	MESURE PAR ANÉMOMÉTRIE À FIL CHAUD	121
5.1	Banc expérimental	122
5.1.1	Caractéristiques de la sonde HWA	122
5.1.2	Système de déplacement des sondes	122
5.1.3	Estimation de la distance entre la surface et la sonde	123
5.1.4	Soufflerie de l'étalonnage	124
5.2	Étalonnage de la sonde CTA	126
5.2.1	Étalonnage à basses vitesses	128
5.2.2	Étalonnage de la sonde en proche paroi	130

5.2.2.1	Réponse d'une sonde HWA sans écoulement	130
5.2.2.2	Réponse de la sonde dans un écoulement	131
5.2.2.3	Comparaison avec la solution analytique	133
5.2.2.4	Correction de la vitesse proche de la surface	136
5.3	Erreurs de mesure par la technique HWA	137
5.4	Étude du l'écoulement généré par le simulateur du pas humain	139
5.4.1	Test de répétabilité	140
5.4.2	Analyse du signal de la sonde	141
5.4.3	Profils de la vitesse longitudinal	143
5.4.3.1	Profil vertical	143
5.4.3.2	Profil longitudinal	145
5.4.4	Incertitude sur les mesures par HWA	148
5.5	Modèle de détachement des particules	150
5.6	Conclusion du chapitre	155

Liste des figures

1.1	Évolution de la vitesse critique de détachement en fonction du diamètre de la particule pour différentes accélérations	12
1.2	Schéma du disque circulaire en mouvement vers le sol avec une vitesse V_d [110]	13
1.3	Schéma de deux plans inclinés qui s'approchent avec des vitesses constantes	16
1.4	Variation de la vitesse longitudinale de l'écoulement situé entre les deux plans formant le dièdre en fonction du temps, a) pour différentes vitesses de rotation, b) à différentes distances horizontales du point de rotation .	17
1.5	Variation de la taille des particules [41]	21
1.6	Diamètres caractéristiques d'une particule avec χ , le facteur de forme dynamique et V_{TS} la vitesse de sédimentation [41]	22
1.7	Schématization de a) deux sphères, b) une sphère et une surface	24
1.8	Schéma de deux charges électriques séparées par une distance $x_{q_1 q_2}$. . .	26
1.9	Contact entre une particule et une surface en présence d'un fil liquide .	28
1.10	Variation du rapport entre la force de van der Waals et la force de gravité	29
1.11	Variation des forces d'adhérence en fonction du diamètre de la particule	31
1.12	Variation de la force de gravité et la force de vibration en fonction du diamètre de la particule	32
1.13	Contact entre une surface et des particules de différents diamètres [38] .	40
1.14	Oscillation non linéaire d'une particule en contact avec une surface . . .	42
1.15	Schéma d'une particule posée sur deux aspérités P et Q et exposée à un écoulement d'air [85]	43
2.1	Enceinte utilisée pour l'étude	48
2.2	Photographie du générateur de particules modèle TOPAS SAG 410 . . .	49
2.3	Photographie du neutraliseur de particules modèle TOPAS EAN 581 . .	49

2.4	Photographie d'un capteur optique de particules modèle GRIMM 1.108	50
2.5	Centrale d'acquisition et capteur SHT75 de type Sensirion	51
2.6	Photographie de la cellule utilisée dans cette étude	51
2.7	Granulométrie de la poussière d'ORGASOL utilisée	52
2.8	Tracés tridimensionnelles des revêtements de sols utilisés	53
2.9	Coupes de niveaux des revêtements de sols utilisés	53
2.10	Décroissance de la concentration de particules en fonction du temps à l'intérieure de l'enceinte après l'injection	56
2.11	Variation des coefficients de décharge pour les différents cas étudiés en fonction des diamètres des particules. Les barres des erreurs sont les Écarts Types de la Moyenne	57
2.12	Schéma montrant la méthode utilisée pour charger le sol en particules .	59
2.13	Évolution en fonction du temps de la concentration en particules avant et après le mouvement de la plaque pour quelques diamètres de particules. Cas référence	61
2.14	Variation des sources de particules remises en suspension par le mouvement de la plaque dans les différents cas étudiés. Les barres d'erreur sont les Écarts Types de la Moyenne	63
3.1	Principe de la technique PIV [5]	68
3.2	Montage LDV à franges	71
3.3	Les différents parties d'un Vélocimètre Laser Doppler	72
3.4	Schématisation d'une sonde de mesure à Fil Chaud	75
3.5	Les différents types de sondes de mesure à Fil Chaud	75
3.6	Circuit de configuration de la technique CTA	80
3.7	La chaîne de mesure CTA (Documentation Dantec)	81
3.8	Zones de mesure pour les trois techniques utilisées pendant la thèse . .	85
4.1	Le mouvement d'un pas humain à deux instants pendant le mouvement descendant du pied	90
4.2	Variation en fonction du temps de l'angle entre le pied et le sol pendant la marche d'un étudiant pour les différents tests effectués	91
4.3	Schématisation du simulateur mécanique du pas humain utilisé pendant l'étude	92

4.4	Moyenne des variations de l'angle parcourue en fonction du temps a) par la plaque du simulateur mécanique, b) par le pied pendant la marche pour un test	93
4.5	Banc expérimental pour les mesures PIV	94
4.6	Fenêtre de visualisation dans les mesures PIV située sur la section transversale suivant l'axe de la plaque	95
4.7	a) Position moyenne des 30 points où la vitesse est maximale dans la fenêtre de visualisation, b) Position par rapport à l'origine	98
4.8	Champs de la composante longitudinale de vitesse devant la plaque obtenus par la technique PIV à différents instants, l'instant $t = 0$ s correspond au moment où la plaque commence le mouvement	98
4.9	Champs de la composante verticale de vitesse devant la plaque obtenus par la technique PIV à différents instants, l'instant $t = 0$ s correspond au moment où la plaque commence le mouvement	99
4.10	Lignes de courant des vitesses moyennes obtenues par la technique PIV à deux différents instants	100
4.11	Variation des vitesses extraites suivant la verticale à deux distances différentes, les positions longitudinales correspondent à la position du centre du vortex	101
4.12	Banc expérimental pour les mesures LDV	103
4.13	Système de déplacement 3D (documentation DANTEC)	104
4.14	Variation de la vitesse en un point devant la plaque montrant la non synchronisation des différents tests	105
4.15	Schématisation de l'obturateur placé devant la sonde LDV	106
4.16	Étapes de post-traitement des données LDV, N correspond au nombre de tests effectués dans chaque point et M le nombre de points de mesure dans chaque cas	107
4.17	Variation en fonction du temps de la vitesse longitudinale de l'écoulement en un point devant la plaque, a) Pour différents tests, b) Moyenne	108
4.18	a) Points d'extraction de la vitesse depuis un champ de vitesse obtenu par la technique PIV, b) Points de mesure du profil vertical pour les mesures LDV	109

4.19	Profils verticaux de la vitesse longitudinale obtenus par les deux techniques PIV et LDV, mesures effectuées à $x = 4.5$ cm à l'instant $t \approx 0.35$ s avec $t = 0$ s correspond au moment où la plaque commence le mouvement	110
4.20	Profils verticaux de la vitesse longitudinale obtenus par la technique LDV à $x = 4.5$ cm de la plaque à différents instant avec $t = 0$ s correspond au début du mouvement de la plaque	111
4.21	Points de mesure du profil horizontal	113
4.22	a) Variation de la vitesse maximale atteinte en fonction de la position longitudinale, b) Variation de l'accélération maximale atteinte en fonction de la position longitudinale	114
4.23	Variation de l'Écart Type de la Moyenne de la vitesse mesurée en différents points	115
4.24	Points de mesure de la vitesse en dessous de la plaque	115
4.25	a) Variation de la vitesse en dessous de la plaque en un point situé à une distance $x = 23.5$ cm de l'axe de rotation à $y = 1$ mm du sol, b) Variation de la vitesse maximale en différents points en dessous de la plaque à trois profondeurs différentes	116
5.1	Dimensions de la sonde CTA 55P15 utilisée pendant l'étude, avec L : la longueur du fil et d l'épaisseur (Documentation Dantec)	123
5.2	Système de déplacement de la sonde HW	124
5.3	La sonde CTA à proximité de la surface du sol	125
5.4	Photo de la soufflerie de l'ERM	125
5.5	Schéma de la soufflerie de l'ERM utilisée pour l'étalonnage de la sonde CTA (vue de coté)	126
5.6	Principe d'un calibreur DANTEC (Documentation DANTEC)	127
5.7	Outils de calibration des mesures de faible vitesse	129
5.8	Exemple d'un résultat de calibration ajusté avec la loi de la forme $E^2 = A + BU^n$	129
5.9	Variation de la tension moyenne de la sonde sur une échelle logarithmique en fonction de la distance entre la sonde et la surface pour différents revêtements (E_∞ est la tension loin de la surface)	131
5.10	Plaque plane en plexiglas lisse	131

5.11	Plaque plane recouverte de la surface en vinyle	132
5.12	Banc expérimental pour la calibration de la sonde en proche paroi	132
5.13	Comparaison du profil de la vitesse longitudinale moyenne obtenu sur la plaque plane en plexiglas à 36 cm du bord avec la solution analytiques de Blasius	133
5.14	Variation de la vitesse longitudinale moyenne de l'écoulement mesurée par la sonde sur une plaque en plexiglas inclinée avec la solution analytique, avec $\beta = 0.0417$, $x_c = 42$ cm et $U_{infty} = 5.7$ m/s, a) profil complet, b) zoom proche de la paroi, a) profil complet, b) zoom sur la zone proche du sol	135
5.15	Variation de la vitesse longitudinale moyenne de l'écoulement mesurée par la sonde sur la surface en vinyle inclinée avec la solution analytique, $\beta = 0.0417$, $x_c = 5.8$ cm, $U_\infty = 5.7$ m/s, a) profil complet, b) zoom sur la zone proche du sol	136
5.16	Fonctions de correction dans le cas d'une a) plaque plane couverte en vinyle, b) plaque plane en plexiglas lisse avec : Correction 1 en utilisant la solution de l'équation 5.5 et Correction 2 en utilisant l'interpolation	137
5.17	Variation de la tension mesurée dans la soufflerie avec vitesse moyenne d'écoulement constante $U_\infty = 5.3$ m/s	138
5.18	Variations de la tenions enregistrée par la sonde en un point devant la plaque pour différents tests	140
5.19	Évolution du signal en fonction du temps à différentes distances de la surface du sol	141
5.20	Évolution du signal en fonction du temps à différentes distances de la surface du sol avec les signaux lissés par la FFT	142
5.21	Évolution de la vitesse maximale en fonction de la distance par rapport à la paroi pour les deux techniques LDV et HWA à $x = 4.5$ cm du	143
5.22	Évolution de la vitesse de l'écoulement corrigée dans la zone proche du sol générée par le mouvement du simulateur à $x = 4.5$ cm	144
5.23	Évolution de l'accélération maximale de l'écoulement suivant la verticale à $x = 4.5$ cm après le mouvement de la plaque	144
5.24	Vue du haut de la plaque rectangulaire avec les points où les mesures ont été effectuées	145

5.25	Évolution de la vitesse longitudinale moyenne suivant la direction longitudinale à différents instants t du début du mouvement de la plaque . .	146
5.26	Évolution de la vitesse longitudinale moyenne suivant les deux directions longitudinale et transversale à différents instants t du début du mouvement de la plaque	147
5.27	Écart Type de la Moyenne du signal dans les mesures verticales à $x = 4.5$ cm	149
5.28	Géométrie d'une particule sphérique déposée sur une paroi rugueuse [110]	151
5.29	Particules déposées sur une surface et soumises à l'écoulement généré par le mouvement du simulateur mécanique	152
5.30	Variation des moments de forces aérodynamiques et d'adhérence agissantes sur la particule en fonction du diamètre de cette dernière pour deux couples particules-surface, a) Alumine-Vinyle, b) Silice-Vinyle . .	154

Liste des tableaux

1.1	Valeurs numériques des coefficients utilisés pour calculer la vitesse critique de détachement	13
1.2	Valeurs numériques des différents coefficients utilisés dans le calcul des forces	31
2.1	Valeurs de la température et de l'HR pendant les mesures	50
2.2	Échelle de dureté et valeurs du paramètre de rugosité des différents revêtements du sol utilisées	55
4.1	Les valeurs du pas d'espace des mesures verticales par la technique LDV	110
4.2	Les valeurs des vitesses maximales à différents y pour deux types de surfaces. Mesures à $x=3.5$ cm.	117
5.1	Les caractéristiques de la sonde de mesure	123
5.2	Les différents coefficients et facteurs utilisés pour l'estimation des moments de forces pour deux couples surface-particule	153

Liste des symboles

α	Angle formé entre la plaque et le plan horizontale ($^{\circ}$)
\dot{Q}	Chaleur transférée depuis le fil vers le fluide (W)
\dot{W}	Puissance apportée par effet Joule (W)
η	Distance adimensionnelle
γ	Tension superficielle (N/m)
λ	Le libre parcours moyen d'une particule (μm)
λ_{dec}	Coefficient de décharge (s^{-1})
λ_{dep}	Taux de dépôt (s^{-1})
λ_e	Longueur d'onde d'émission du laser (μm)
μ	Viscosité dynamique du fluide (Pa.s)
ν	Viscosité cinématique du fluide (m^2/s)
ν_i	Module de Young
ω	Vitesse angulaire ($^{\circ}/\text{s}$)
ϕ	Angle entre la direction de la vitesse et la normale du fluide
ρ	Densité de l'air
ρ_p	Densité de la particule
τ_w	Taux de cisaillement

XIV

A	Constante de Hamakar (J)
A_b	Amplitude de vibration (m)
a_c	Coefficient de surchauffe
a_r	Taux d'échange volumique (hr^{-1})
C	Fonction de correction
C_{in}^*	Concentration normalisée de la particule ($\#/m^3$)
C_c	Facteur de Cunningham
C_{in}	Concentration intérieure en particule ($\#/m^3$)
C_{out}	Concentration extérieure en particule ($\#/m^3$)
C_{PO}	Facteur correctif de la rugosité
d_f	Diamètre du fil (m)
D_i	Moyenne pondérée des vitesses maximales
d_p	Diamètre de la particule (m)
dt_1	Délais d'attente avant le mouvement du moteur (s)
dt_2	Délais d'attente de la plaque à la position finale (s)
E	Tension électrique (V)
E_∞	Tension électrique loin de la surface (V)
E_i	Coefficient de Poisson (MPa)
F_{adh}	Force d'adhérence (N)
f_a	Force d'adhérence de la particule au un point de contact (N)
F_G	Force de gravitation (N)
F_L	Force de portance (N)

F_p	Force due au gradient de pression (N)
F_T	Force de trainé (N)
f_v	Fréquence de vibration (Hz)
g	Accélération de la gravité (m/s^2)
Gr	Nombre de Grashof
Gr_d	Nombre de Grashof basé sur le diamètre du fil
h	Hauteur du disque (m)
HR	Humidité relative (%)
I	Courant électrique (A)
I_{th}	Inertie thermique (W)
K	Module d'élasticité (MPa)
Kn	Le nombre de Knudsen
l_f	Longueur du fil (m)
L_i	Concentration surfacique ($\#/m^2$)
M_{adh}	Moment d'adhérence d'une particule lié aux forces de van der Waals (N.m)
M_{det}	Moment de détachement de la particule (N.m)
Ma	Nombre Mach
n_p	Nombre de pulses laser
Nu	Nombre de Nusselt
p	Facteur de pénétration
P_e	Puissance électrique (W)
Pr	Nombre Prandtl

XVI

Q	Débit volumique (m^3/s)
r, z, θ	Coordonnées cylindriques du système (m)
r_c	Rayon de la surface de contact entre la particule et la surface (m)
R_e	Résistance électrique (Ω)
R_f	Résistance du fil (Ω)
R_i	Distance par rapport à l'origine dans la fenêtre de visualisation
r_{RS}	Taux de remise en suspension (Kg/s)
Re	Nombre de Reynolds
Re_d	Nombre de Reynolds basé sur le diamètre du fil
S_i	Source de particule ($\#/s$)
t	Temps (s)
T_{RS}	Temps de remise en suspension (s)
T_w	Température du fil ($^{\circ}\text{C}$)
U	Vitesse de l'écoulement (m/s)
u^*	Vitesse de frottement (m/s)
U^+	Vitesse adimensionnelle
U_{∞}	Vitesse loin de la paroi (m/s)
u_{cr}	Vitesse de détachement critique (m/s)
U_p	Vitesse de la particule (m/s)
U_x, U_y	Composantes de vitesse longitudinale et verticale (m/s)
V	Volume de l'enceinte (m^3)
V_r, V_{θ}	Composantes de vitesse radiale et tangentielle du fluide (m/s)

W_A Énergie de surface d'adhésion (J.m^2)

x_c Distance horizontale du bord d'attaque de la plaque (m)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans un contexte mondial actuel axé sur l'environnement, la volonté d'anticiper et de prévenir la dispersion des polluants dans les environnements intérieurs, avoir un confort thermique et une bonne qualité de l'air intérieure est à l'origine d'un grand nombre d'études scientifiques. Au fil des années, il a été mis en évidence qu'une mauvaise qualité de l'air intérieure crée des problèmes de santé et diminue la capacité des occupants à travailler ou à étudier [10, 71, 102]. Ces dernières décennies, ce problème suscite de plus en plus l'intérêt de la communauté scientifique et les décideurs car dans les sociétés développées, les citoyens passent plus de 80% de leurs temps dans des différents environnements intérieurs, comme les habitations, les bureaux et les moyens de transport [58]. L'un des résultats de ce mode de vie est l'exposition quasi permanente des occupants des ambiances habitables aux divers polluants intérieurs.

L'un des indicateurs importants de la qualité de l'air intérieure est la concentration en particules, qui devient de plus en plus élevée. En effet, suite au problème du réchauffement climatique et la crise énergétique, des nouvelles réglementations ont été imposées pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Le confinement des bâtiments lié à ces réglementations a entraîné une augmentation de la température et de l'humidité intérieure qui ont favorisé la production des allergènes intérieurs. En outre, en raison de la diminution du débit d'air de ventilation, la vitesse de l'air intérieure est réduite et il est plus difficile d'évacuer les particules vers l'extérieure. Ainsi, la concentration en particules à l'intérieure des bâtiments devient de plus en plus inquiétante.

Le but principal de ce travail de thèse est d'étudier expérimentalement la remise en suspension des particules due à la marche humaine sur un sol chargé en particules. A cet effet, une première étude a été effectuée au niveau du laboratoire LaSIE à La Rochelle et qui avait comme objectif la classification des revêtements des sols intérieurs par rapport à leurs pouvoirs d'émission de particules après l'impact d'un pied sur le sol. Les surfaces utilisées ont été choisies en fonction de leurs rugosités, leurs duretés et leurs caractéristiques électriques. Afin de mieux contrôler le phénomène étudié, un simulateur mécanique qui imite le mouvement descendant du pied pendant la marche a été utilisé. Un dispositif expérimental (ambiance de taille réduite) a été mis en place

et qui a permis d'étudier le phénomène de remise en suspension particulaire engendré par l'impact d'un pas humain sur le plancher en utilisant le simulateur mécanique de ce dernier.

Notre deuxième contribution s'est focalisée sur les effets aérodynamiques que génère un pas humain pendant la marche, et qui vont avoir un rôle déterminant sur le phénomène de remise en suspension des poussières. L'objectif premier que nous voulons atteindre par cette étude, est d'améliorer le niveau de connaissance des phénomènes. Dans cette optique une collaboration de recherche a été développée entre le Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) à La Rochelle, et l'École Royale Militaire de Bruxelles (ERM) en Belgique. La démarche consiste à mesurer les vitesses de l'écoulement de l'air en différents emplacements en dessous et autour d'un simulateur mécanique du pas humain. Les mesures de la vitesse ont été effectuées par trois types de méthodes largement utilisées dans l'industrie et en laboratoires de recherche : deux méthodes de Vélocimétrie laser (Vélocimétrie par Image des Particules et Vélocimétrie Laser Doppler), mais également la méthode d'Anémométrie à Fil Chaud.

Ce volet expérimental devrait nous permettre de mieux appréhender et pouvoir prédire par la suite les niveaux de concentrations particulières au niveau de l'air des ambiances intérieures occupées par des personnes amenées à se déplacer. Les résultats issus de cette partie pourront donc être utilisés comme données d'entrée pour les modèles de détachement et de remise en suspension des particules mais aussi pour les codes de calcul prédictif de l'évolution de la concentration en ambiance intérieure. De ce fait, notre étude présente un intérêt particulier pour toutes les personnes qui sont confrontées à la problématique de la remise en suspension de particules en liaison avec la marche humaine.

Dans le premier chapitre de ce travail, nous proposons tout d'abord une étude bibliographique réalisée sur le sujet. Cette étude expose en premier lieu le phénomène de la remise en suspension des particules par le déplacement humain, puis passe à une analyse de la marche humaine et les effets aérodynamiques qu'elle génère. Nous exposons ensuite les différents coefficients généralement utilisés pour quantifier la remise en suspension des particules par activité humaine. Ensuite nous présentons les caractéristiques des aérosols et les différentes forces qui agissent sur une particule déposée sur une sur-

face avant de finir par une exposition des différents modèles de remise en suspension.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude expérimentale de la remise en suspension à petite échelle réalisé au niveau du laboratoire LaSIE. Nous présentons tout d'abord dans la première section notre dispositif expérimental et les différents instruments utilisés. Ensuite, dans la deuxième section nous décrivons l'approche du mélange homogène et du bilan de particules dans un volume. Dans la même section nous présentons les différents résultats de mesures des coefficients de décharge ainsi que les sources de particules de remise en suspension. Nous terminons le chapitre par une analyse des résultats et une conclusion.

Dans le troisième chapitre nous décrivons les principes des différentes techniques que nous disposons pour l'évaluation des vitesses d'écoulement générées au sein du domaine étudié. Ces différentes techniques ont été utilisées à l'École Royale Militaire de Bruxelles. Nous exposons les points forts et les points faibles de chacune des techniques envisagées lors de ce travail, ainsi que les complémentarités qui existent entre elles justifiant notre motivation à les mener de front.

Le quatrième chapitre est consacré aux résultats expérimentaux issus des techniques de Vélocimétrie Laser PIV et LDV. Nous décrivons dans ce chapitre les caractéristiques des deux montages PIV et LDV ainsi que le simulateur mécanique du pas humain que nous avons mis en place. Soulignons que dans les deux cas (PIV et LDV), une phase de synchronisation entre le système de mesure et le dispositif mécanique (simulateur) est incontournable. Celles-ci ont été menées avec minutie pour garantir une optimisation des approches. A la suite de ces démarches, nous présentons les résultats obtenues avant de finir par une conclusion.

Dans le cinquième chapitre nous présentons les résultats des mesures obtenues par la technique d'Anémométrie à Fil Chaud (HWA). Après la mise en œuvre et la présentation du banc expérimental mis en place, nous mettons l'accent sur les mesures effectuées en proche paroi ainsi que la technique d'étalonnage que nous avons utilisé. Nous terminons la partie résultats par une application d'un modèle de détachement des particules en utilisant le profil des vitesses mesurées. Après l'analyse des différents résultats nous terminons le chapitre par une conclusion.

Nous terminons notre manuscrit par une conclusion générale où nous revenons sur nos objectifs de départ, nos choix et nos résultats. Les interprétations et la comparaison de tous nos résultats nous permettent finalement de définir les perspectives qui pourraient être envisagées suite à notre contribution.

Chapitre 1

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre présente un rappel des principaux résultats relevés dans la bibliographie permettant de poser les bases de notre travail. Dans la première section nous introduisons le phénomène de la remise en suspension intérieure des particules par le déplacement des humains et les différents paramètres qui l'influencent. Dans la deuxième section, nous présentons les effets générés par le pas humain pendant la marche. On s'intéresse en particulier aux perturbations aérodynamiques. Nous présentons dans cette section les travaux numériques et expérimentaux trouvés dans la littérature et qui se sont focalisés sur l'étude qualitative et quantitative du mouvement de l'air généré par le pas humain. La quatrième section est dédiée à un inventaire des principaux coefficients utilisés pour quantifier la remise en suspension des particules par la marche humaine. Dans la cinquième section nous présentons les différentes forces d'adhérence et de réentraînement qui agissent sur une particule déposée sur une surface. Dans l'avant dernière section nous exposons les différents modèles de remise en suspension des particules et les différents travaux qui l'ont mis en place. Nous terminons ce chapitre par une conclusion.

1.1 RmS des particules

Une particule à l'intérieure d'un volume clos, reste une longue période si cette dernière n'est pas évacuée à l'extérieure ou nettoyée [81]. Le temps de résidence d'une particule PM10¹ après sa remise en suspension est inférieur à 2 heures en fonction de

1. PM de l'anglais Particulate Matter, les PM10 sont des particules dont les diamètres sont inférieures à 10 μm

Chapitre1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

sa taille. Cependant, en considérant le volume intérieure et la surface comme un seul système, même avec un nettoyage par aspirateur avec une fréquence d'une seule fois par semaine, les particules persistent à l'intérieure de ce système pendant des mois [81].

Les différents scénarios qu'une particule peut suivre à l'intérieure d'une enceinte close sont les suivants : être évacuée à l'extérieure du volume par ventilation ou exfiltration à travers l'enveloppe, ou se déposer sur l'une des surfaces intérieures (meubles, parois de l'enceinte, vêtements ...). Comme nous l'avons signalé dans l'introduction, la diminution des vitesses de l'air intérieur augmente le temps de résidence des particules intérieures et par conséquent les particules ont tendance à se déposer sur les différentes surfaces et parois internes du bâtiment. Après leurs dépôts, ces particules peuvent être remises en suspension sous l'influence de certains phénomènes. Donc la concentration intérieure en particules est affectée par plusieurs facteurs :

- Les émissions directes provenant des sources intérieures comme la cuisine, la combustion, les produits chimiques...,
- L'échange avec le milieu extérieur,
- Les matériaux intérieurs,
- Le dépôts sur les surfaces intérieures,
- La RmS depuis les surfaces intérieures causée par les mouvements de l'air intérieur et/ou les activités humaines intérieures.

Parmi l'ensemble des facteurs qui influencent la concentration intérieure en particules, la RmS des particules par les activités humaines tel que le déplacement quotidien, contribuent de manière significative à augmenter la concentration de particules inhalables [63, 80, 88, 98]. Cette concentration générée par l'activité humaine est faible par rapport à d'autres sources de pollution directes comme la cuisine les bougies ou les cigarettes, cependant, l'activité humaine intérieure est un processus continu, et la concentration ainsi générée devient très importante. Pour avoir une idée sur l'ordre de grandeur de cette émission, une simple marche d'une personne à l'intérieure d'une pièce sur un sol chargé en microparticules peut augmenter de 100% la concentration intérieure [98].

Après la mise en évidence de l'impact des déplacements (de personnes) sur la RmS

des particules et par conséquent sur la concentration intérieure, les travaux de recherche se sont orientés vers la compréhension du phénomène de façon plus approfondie. Le but a été, en général de mettre en place un modèle global de prédiction de l'évolution de la concentration particulaire causée par la marche humaine (voir § 1.7). Cependant, malgré les nombreuses études réalisées, différentes incertitudes subsistent et à l'heure actuelle, aucune étude, n'a mis en place un modèle global de prédiction. Ceci est en partie dû à la nature complexe des particules, en termes de leurs sources, leurs mécanismes de formation et de leurs compositions chimiques. D'autre part, il est dû à la complexité du processus de RmS des particules lui-même et de la marche humaine. Il devient clair que d'autres travaux dans ce domaine sont encore nécessaires pour répondre à certaines questions.

Dans la littérature les différents travaux numériques et expérimentaux dédiés à l'étude du phénomène de la RmS se divisent en deux catégories : des études à l'échelle d'une activité réelle [26, 27, 75, 80, 81, 98] où le principe est en général la mise en évidence du phénomène et aussi l'étude des différents paramètres qui l'influencent. La démarche consiste à faire une activité quelconque comme marcher, ou faire le ménage sur une longue période (ça peut aller d'une minute à une journée), et de faire un suivi en temps de la concentration particulaire dans un ou plusieurs volumes. Des études à l'échelle élémentaire, soit on s'intéresse à l'impact d'un seul pas humain, soit on met le focus sur une seule phase de la marche humaine [13, 25, 35, 37, 47, 88]. L'objectif principal dans cette catégorie d'étude est la compréhension du mécanisme de la RmS et l'influence de différents paramètres sur le processus mais à petite échelle comme la vitesse du pas et le style de la marche. Des études dans cette catégorie ont mis en évidence qu'en général le processus intégral de la RmS d'une particule comprend son détachement de la surface dans laquelle elle est préalablement déposée, puis son transport dans l'environnement par l'écoulement généré par le mouvement du pied [35].

1.2 La marche humaine

Malgré son apparence simple, la marche humaine est en fait, d'une grande complexité. En cas normal, une marche humaine est composée de deux phases [4] :

- **Phase d'appui** qui commence quand le pied touche le sol et se termine au décollage de l'extrémité avant du pied (orteils). Les deux étapes de cette phase sont :

ped en rotation vers le sol avec talon posé et rotation du talon avec orteils posées aux sols.

- **Phase oscillante** où le pied n'est plus en contact avec le sol.

La marche humaine a été étudiée par un certain nombre de chercheurs dans différents domaines. Dans leurs enquête, Tianjian Ji et al [48] ont mis en évidence après l'observation et l'analyse de la marche de 800 personnes prises au hasard, dans différents lieux que la fréquence de la marche des individus varie entre 1.8 Hz et 2 Hz avec une vitesse moyenne de 1.3 m/s. Ils ont constaté que ces deux paramètres varient en fonction du sexe, de l'âge, de la condition physique de l'individu, du lieu, et des conditions météorologiques. Dans leur étude sur la biomécanique de la marche humaine, Cham et Redfern [11] ont trouvé qu'à partir du moment où le talon entre en contact avec le sol, le pied tourne pour atteindre la position horizontale (ped complètement posé par terre) avec une vitesse angulaire égale à peu près 224 °/s. Après que le talon est posé sur le sol, la vitesse angulaire diminue [40].

L'intensité et la fréquence du pas humain sont des paramètres qui influencent fortement la RmS des particules. Ainsi, afin d'améliorer la reproductibilité expérimentale et d'éliminer la variabilité causée par ces paramètres sur la RmS des particules, les chercheurs utilisent souvent des modèles mécaniques simplifiés de la marche humaine plutôt que des pas humains réels.

1.3 Effets aérodynamiques du pas humain

La marche humaine génère deux principales types de perturbations : des perturbations mécaniques, où l'énergie cinétique est transférée par les vibrations générées suite à l'impact du pied avec le sol et des perturbations aérodynamiques qui sont sous forme d'écoulement généré à proximité du pied pendant la marche [37, 44]. Malgré que la vitesse de la marche est modeste, de l'ordre du 1 m/s [34], la vitesse de l'écoulement généré entre le pied et le sol pendant la marche est assez élevée pour que des particules se trouvant à proximité vont être remises en suspension et transportées dans l'environnement intérieur, [35, 37, 60, 61]. Ces constatations ont été confirmées par les modèles de détachement analytiques de Soltani et Ahmadi [93] et de Zhang et all [110] et les résultats expérimentaux d'Ibrahim et al. [45] et de Maedler et Koch [68, 69]. Les vitesses de

1.3. Effets aérodynamiques du pas humain

l'écoulement ainsi généré et par conséquent la RmS des particules dépendent fortement de la vitesse du pied pendant la marche [13, 110]. Pendant le mouvement descendant du pied, la vitesse de l'écoulement est plus grande au niveau de l'avant du pied par rapport à la région près du talon [110]. Lorsque le pied quitte le sol et s'éloigne du plancher, l'écoulement d'air accompagnant le pied n'est plus suffisamment fort pour pouvoir arracher des particules déposées sur le sol, cependant, il est capable de transporter les particules remises en suspension dans l'air [35]. Pendant le mouvement ascendant du pied, d'avantage de particules peuvent être remises en suspension à cause de l'écoulement généré.

Les phénomènes aérodynamiques générés par le pas humain ont fait l'objet de plusieurs travaux expérimentaux, numériques et analytiques. Maedler et Koch [68, 69] ont utilisé un simulateur simplifié pour étudier la RmS des particules causée par le jet résultant d'un disque impactant. Le simulateur mécanique consiste en une plaque plane qui tombe verticalement sur une surface lisse chargée en particules. Leur démarche est basée sur le suivi de la variation de concentration en particules dans le temps dans un volume V . L'hypothèse d'une concentration uniforme à l'intérieur du volume a été considérée. Leurs travaux confirment l'influence de la vitesse de l'écoulement généré en dessous du disque sur la RmS des particules.

Khalifa et Elhadidi [55] ont étudié analytiquement l'écoulement résultant du mouvement descendant d'un disque circulaire vers une surface chargée en particules. Ces auteurs déterminent à partir du bilan de forces exercées sur la particule, une vitesse de frottement critique en dessus de laquelle des particules déposées sont arrachées.

$$u_{cr} = \left[0.357.C_c.C_{PO} \cdot \frac{(W_A/d_p)}{\rho_f.K^{1/3}} - 0.1052.d_p \cdot \frac{\partial U}{\partial t} \right] \quad (1.1)$$

Avec

- C_{PO} : le facteur correctif prenant en compte la rugosité de la surface (ici $C_{PO} = 0.1$),
- $\frac{\partial U}{\partial t}$: l'accélération du fluide ($m.s^{-2}$),
- K : le module d'élasticité composite $K = \frac{4}{3} \left[\frac{(1 - \nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \nu_2^2)}{E_2} \right]^{-1}$ où ν_i et E_i

Chapitre1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

sont respectivement le coefficient de poisson et le module d'Young (les indice 1 et 2 désignent les deux matériaux de la particule et la surface où elle est déposée),

- W_A : l'énergie surfacique d'adhésion en $J.m^{-2}$ (ici prise égale à $0.56 J.m^{-2}$ pour une particule d'aluminium sur une surface en acier)
- C_c : le facteur de Cunningham calculé à partir de la relation suivante :

$$C_c = 1 + Kn [1.257 + 0.4exp(-1.1/Kn)] \quad (1.2)$$

avec Kn le nombre de Knudson définie par $Kn = \frac{2.\lambda}{d_p}$ avec λ le libre parcours moyen et d_p le diamètre de la particule.

Comme les auteurs s'intéressaient à des particules de diamètres $< 25 \mu m$, la force de portance a été ignorée car pour cette gamme de tailles, elle est faible devant la force de trainé. La figure 1.1 montre l'évolution de la vitesse critique en fonction du diamètre de

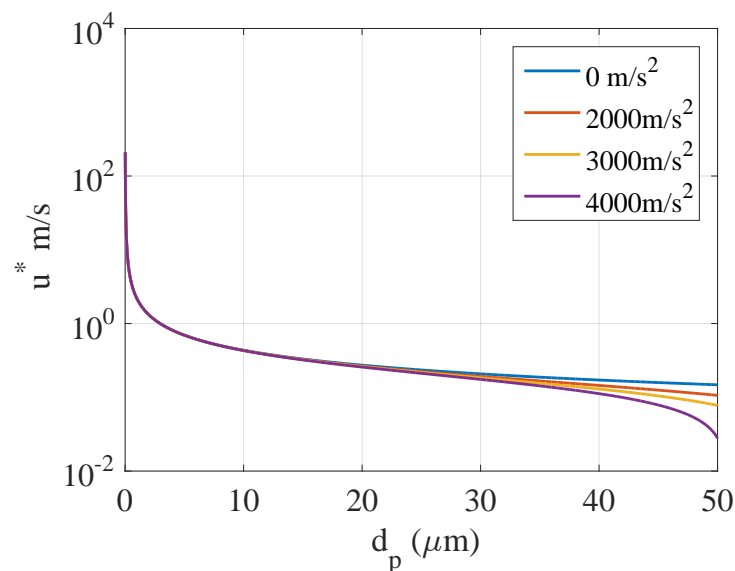


FIGURE 1.1 – Évolution de la vitesse critique de détachement en fonction du diamètre de la particule pour différentes accélérations

la particule et pour différentes accélérations. Le coefficient K a été calculé en considérant une particule en silice sur une surface en vinyle. Nous représentons dans le tableau 1.1 les différents coefficients utilisés pour calculer la vitesse de frottement. On constate d'après la figure 1.1 que plus le diamètre de la particule est grand plus la vitesse nécessaire à son arrachement est faible. L'influence de l'accélération de l'écoulement sur

1.3. Effets aérodynamiques du pas humain

W_A (J.m^{-2})	ν_1	ν_1	E_1 (MPa)	E_1 (MPa)
0.0105	0.16	0.41	72	420

TABLE 1.1 – Valeurs numériques des coefficients utilisés pour calculer la vitesse critique de détachement

la vitesse critique est négligeable pour des particules de tailles inférieures à $20\mu\text{m}$. Les auteurs suggèrent que les particules susceptible d’être remises en suspension sont uniquement celles situées à proximité du bout du disque.

Zhang et al [110] ont utilisé un simulateur mécanique du pas humain plus réaliste.

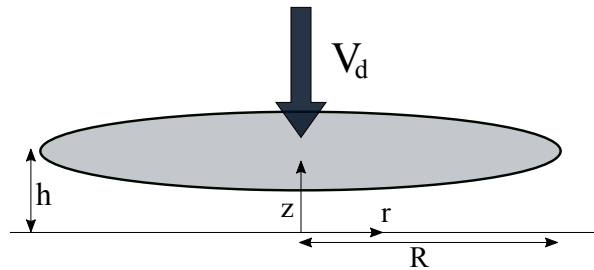


FIGURE 1.2 – Schéma du disque circulaire en mouvement vers le sol avec une vitesse V_d [110]

Le mouvement de l’avant du pied et du talon vers le bas et vers le haut ont été modélisés par une combinaison de deux disques. Les vitesses d’approche des deux disques sont différentes afin de mieux représenter la marche humaine. Leur simulateur mécanique permet d’étudier le détachement, la RmS et le transport des particules par un pas humain. Deux zones ont été définies, la zone interne est située entre le disque et le sol, et en dehors de cette zone est considéré comme zone externe. La vitesse de l’écoulement de l’air dans la zone interne a été évaluée analytiquement en supposant un écoulement laminaire et axisymétrique. Dans la zone externe, l’écoulement est modélisé en se basant sur la théorie du jet radial. Les deux solutions analytiques dans les deux zones sont données par les deux équations suivantes :

$$V_{r,in}(z, r) = \frac{3rV_d(zh - z^2)}{h^3} \quad (1.3)$$

$$V_{r,out}(z, r) = \frac{3RV_d(zh - z^2)}{h^3} \left(\frac{r}{R}\right)^{-2.75} \quad (1.4)$$

Avec : r et z sont les coordonnées du système, V_d la vitesse du disque, h la distance entre le disque et le sol, R le rayon du disque. L'équation 1.3 montre que la vitesse de l'air dans la zone interne est proportionnelle à la distance r , cependant dans la zone externe, la vitesse est inversement proportionnelle à la distance r .

Les auteurs définissent deux comportements de la particule : détachement et RmS. La particule est considérée comme détachée lorsqu'elle quitte sa position initiale, en revanche, elle est considérée comme RmS lorsqu'elle est portée par le fluide. La particule peut se trouver dans l'un des deux cas en fonction de sa position par rapport au disque. En adoptant un modèle de roulement, les auteurs ont défini des rayons critiques (position par rapport au centre du disque) de détachement et de RmS des particules déposées sur le sol pour les deux zones : interne et externe. Les auteurs ont également mis en évidence l'influence des types de matériaux qui constitue la particule et la surface sur la RmS.

D'autres moyens d'investigation ont été utilisés pour étudier plus profondément la RmS par le pas humain et aussi l'écoulement généré autour du pied pendant la marche humaine. Kubota et al [60], ont étudié expérimentalement par méthode de visualisation et par Vélocimétrie par Images de Particule, la RmS des particules par un disque circulaire en mouvement vertical vers le bas et vers le haut. Les mêmes auteurs dans [61] ont utilisé le même modèle de [60] pour étudier expérimentalement l'écoulement généré par le mouvement ascendant et descendant du disque par trois méthodes : visualisation, Vélocimétrie par Images de Particule et Visualisation par Colorant dans l'eau. Les deux mouvements ascendant et descendant verticalement et le mouvement de rotation du pied ont été pris en compte et modélisés. Les résultats confirment aussi le fait que la RmS des particules est le résultat de l'écoulement du jet généré en dessous et devant le pied.

Eisner et al [25] ont montré grâce à des simulations numériques selon une approche LES et des mesures expérimentales par les méthodes optiques PIV et PTV que pendant le mouvement de rotation du pied, un écoulement de coin est formé en dessus du pied. Cet écoulement est responsable du transport des particules. Dans ce travail, un pas humain a été modélisé par un pied mécanique qui imite les mouvements ascendant et de rotation du pied pendant la marche. D'après les mêmes auteurs, lors de la marche les

particules sont remises en suspension soit directement après l'impact du pied soit elles seront déposées sur le pied et remises en suspension par la suite par l'effet du mouvement de rotation de ce dernier.

1.3.1 Solution analytique

Nous trouvons dans la littérature quelques travaux où les auteurs ont essayé d'étudier analytiquement l'écoulement généré par un pas humain lors de la marche. Le caractère complexe de cet écoulement a toujours poussé les auteurs à faire des hypothèses simplificatrices. Parmi les différentes solutions analytiques qu'on trouve dans la littérature, nous avons celle de Khalifa et Elhadidi [55] ou celle de Zhang et al [110] (voir § 1.3) où le mouvement du pied a été simulé par le mouvement descendant d'un disque avec une vitesse constante. Cette approche et comme nous l'avons expliqué a permis d'étudier le détachement, la RmS des particules mais aussi de leurs transport en fonction de différents paramètres.

En examinant le mouvement du pied pendant la marche, nous pouvons constater que l'approche la plus réaliste est celle de la fermeture de deux plans inclinés. L'air situé entre ces derniers va ensuite être éjecté à l'extérieure. On trouve une solution de cette écoulement dans [72,95]. Dans ce dernier, la solution de l'écoulement entre deux plans de longueur L et qui se ferment avec des vitesses angulaires constante ω a été trouvée (cf. figure 1.3). L'auteur, a supposé que le fluide est incompressible et que les deux plans ont des longueurs infinies dans la direction transversale, l'intégration de l'équation de continuité a aboutie à la solution suivante :

$$V_r(r, \theta) = \frac{\pi}{4\alpha} \omega r \cos\left(\frac{\pi}{2\alpha} \theta\right), \quad V_\theta(r, \theta) = -\omega r \sin\left(\frac{\pi}{2\alpha} \theta\right) \quad (1.5)$$

avec α l'angle formé entre le plan et l'horizontale à un instant donné. Un résonnement semblable à celui trouvé dans [95] a été suivi par Mana Z. [65] où le mouvement du pied pendant la marche a été simulé par une demi droite de longueurs finie, formant un angle de départ α_0 et effectuant une rotation avec une vitesse ω constante vers un plan horizontal. Deux solutions ont été trouvées : une solution en dehors de la couche limite où le fluide est considéré comme parfait et une solution dans la couche limite où l'écoulement est visqueux. La solution générale est obtenue en effectuant un raccordement des deux solutions et en se basant sur le principe de Van Dyke [101]. La solution obtenue

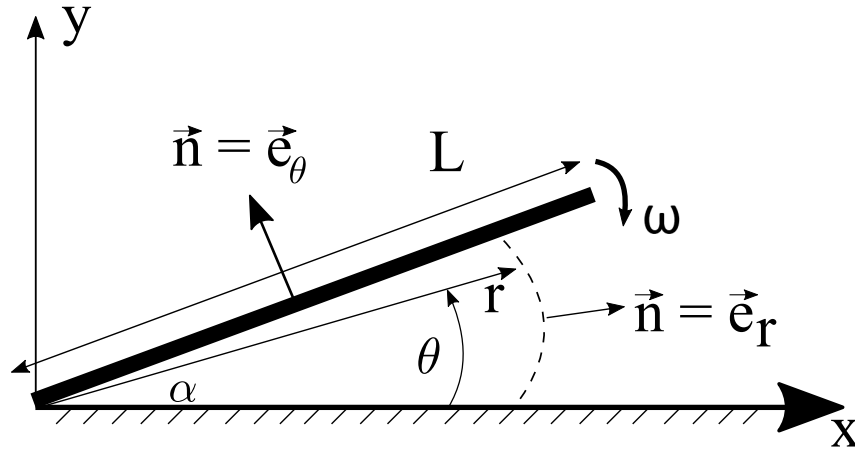


FIGURE 1.3 – Schéma de deux plans inclinés qui s'approchent avec des vitesses constantes

pour le cas du fluide parfait en utilisant le fait que l'écoulement est irrotationnel et la suivante :

$$V_r(r, \theta) = 2\omega r \frac{\cos(2\theta)}{\sin(2\alpha)}, \quad V_\theta(r, \theta) = -2\omega r \frac{\sin(2\theta)}{\sin(2\alpha)} - r\alpha \quad (1.6)$$

Dans la figure 1.4a, nous représentons la variation de la vitesse longitudinale de l'écoulement situé à l'intérieur de l'espace formé par les deux plans du dièdre suite à la fermeture de ce dernier. Les résultats ont été obtenues en prenant la longueur du dièdre égale à 25cm, un angle initial d'ouverture égale à 20° et une vitesse de rotation $\omega = 80$ °/s; le point considéré est situé à 23.5 cm du point de rotation à une hauteur égale à 1 mm. Ces paramètres correspondent à nos conditions expérimentales que nous allons exposer dans la suite de ce manuscrit. La figure montre donc que la fermeture du dièdre accélère l'écoulement et que la variation de la vitesse en un point augmente fortement en fonction de la vitesse de rotation. La figure 1.4b représente la variation de la vitesse de l'écoulement à différentes distances du point de rotation et à une hauteur $h = 1$ mm du sol et une vitesse de rotation de 80°/s.

Nous constatons que la vitesse de l'écoulement est aussi influencée par la distance par rapport au point de rotation.

1.4. Quantification de la remise en suspension

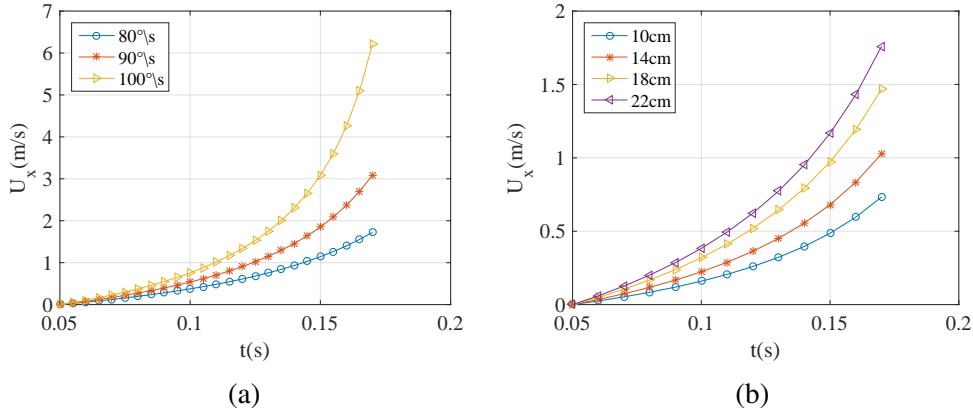


FIGURE 1.4 – Variation de la vitesse longitudinale de l'écoulement situé entre les deux plans formant le dièdre en fonction du temps, a) pour différentes vitesses de rotation, b) à différentes distances horizontales du point de rotation

1.4 Quantification de la remise en suspension

Différents travaux de recherche ont étudié le phénomène de RmS des particules par la marche humaine. Parmi ces différents travaux, certains se sont intéressés à la quantification du phénomène. Dans la suite, nous citons les différents indicateurs utilisés pour la quantification de la remise en suspension des particules par la marche humaine.

- **Flux massique** : cet indicateur correspond au débit de particules remises en suspension depuis une surface, il permet une caractérisation directe du phénomène.

$$J = \frac{\Delta m}{A_{RS} t \cdot S_{RS}} \quad (1.7)$$

Δm est la masse RmS (kg), T_{RS} , le temps de RmS (s) et A_{RS} , la surface de RmS (m^2). Ce terme n'est pas pratique dans le domaine de la RmS par la marche humaine étant donné que l'être humain est une source mobile et que la zone de la surface d'où les particules sont remises en suspension est difficile à définir.

- **Facteur de RmS** : cet indicateur est défini comme le rapport de la concentration volumique d'une particule et sa concentration surfacique.

$$F = \frac{C_{in,i}}{L_i} \quad (1.8)$$

Chapitre1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

avec $C_{in,i}$ la concentration intérieure en particule i ($\#.m^{-3}$), et L_i , la concentration en particule i sur la surface considérée ($\#.m^{-2}$). L'équation 1.8 est une relation linéaire entre concentration du volume et de surface. Cette relation est simpliste du fait qu'elle ne montre pas explicitement l'influence des autres facteurs comme le taux d'échange volumique, le facteur de pénétration ou encore le coefficient de dépôt.

- **Taux de RmS** : c'est la fraction des particules réentrainées par unité de temps. Cet indicateur est plus réaliste que le facteur de RmS.

$$r_{RS} = \frac{\Delta m}{m_0 T_{RS}} \quad (1.9)$$

Le taux de RmS a été utilisé dans plusieurs travaux [80, 81, 98]. Ce coefficient prend en compte l'aspect dynamique de la RmS et il est plus adapté aux études de la qualité de l'air cité le [82].

- **Intensité de la source** : ce terme est calculé en se basant sur le bilan massique du volume et en supposant que la concentration en volume est homogène [27]. Ce terme prend en compte les différents facteurs qui influencent la RmS. Cependant, il est propre au cas d'étude et il ne peut pas être utilisé pour une autre situation.

$$V \frac{dC_{in,i}}{dt} = apVC_{out,i} + r_{RS,i}A_{RS}L_i - (a + \lambda_{dep,i})VC_{in,i} + S_i \quad (1.10)$$

Avec

- $C_{out,i}$: la concentration extérieure en particule i ($\#/m^{-3}$),
- a_r : le taux d'échange volumique (h^{-1}) et p le facteur de pénétration (sans dimension),
- $r_{RS,i}$: le taux de RmS de la particule i (s^{-1}),
- $\lambda_{dep,i}$: le taux de dépôt de la particule i (s^{-1}),
- A_{RS} : la surface totale du sol (m^2),
- V : le volume (m^3),
- S_i : source interne de la particule i ($\#/s$).

L'équation 1.10 représente la variation de la concentration des particules dans le volume et dans le sol. Dans cette étude, ils supposent que la concentration à l'intérieur est homogène. Ce modèle prend en compte les différents facteurs qui influencent la concentration en particules comme le dépôt, l'infiltration et l'échange avec l'extérieure.

Un autre facteur utilisé est la **fraction RmS**. Ce coefficient adimensionnel a été introduit par Karlsson et al [53], qui définit comme la fraction de particules émises par la surface d'émission (surface couverte par le pas par exemple) après un cycle d'activité. Dans son étude basée sur un modèle de deux compartiments (variation du nombre de particules en surface et variation de la concentration en volume), Karlsson a pris en compte la fréquence d'activité (le nombre de pas par seconde).

Ces coefficients de RmS présentent un intérêt primordial dans le domaine . D'un côté, lorsqu'il s'agit de prédire la concentration en particules suite au déplacement des humains dans une configuration donnée mais aussi pour trouver le bon compromis entre les différents paramètres entrant en jeu pour réduire au maximum cet impact.

1.5 Pollution intérieure

Afin de mieux comprendre le comportement des particules il nous est apparu nécessaire de présenter leurs caractéristiques. L'environnement intérieure est extrêmement hétérogène et constitue un réservoir de multitude de types de particules à l'état solide, liquide ou gazeux. Une fois en suspension dans l'air, les particules forment avec l'air ce qu'on appelle *l'aérosol*. L'aérosol est l'un des corps les plus complexes qui se trouvent dans l'atmosphère. Une description complète des aérosols passe par la connaissance de leurs distributions en taille, de leurs compositions chimiques, de leurs morphologies externes et de leurs états physiques. Selon leurs types, les aérosols sont stables pour des durées de quelques secondes jusqu'à une année voir plus.

1.5.1 Origines des particules

Les particules qui constituent l'aérosol proviennent de différentes sources. Elles peuvent provenir de l'extérieure comme elles peuvent être émises à l'intérieure des bâtiments. Selon les sources d'émission, les particules sont classées selon deux catégories :

Chapitre1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Naturels Une part importante des particules atmosphériques est d'origine naturelle. La composante naturelle de l'aérosol représente, à elle seul plus de 80 à 95 % des émissions en flux de masse totale annuel d'aérosol. Nous trouvons dans cette catégorie les aérosols issues de : l'érosion de poussière sous l'action du vent, la formation d'aérosols marin libérés lors du déferlement des vagues, les particules issues des éruptions volcaniques, et bien d'autres particules issues de diverse activités de la planète. D'autres sources naturelles sont les matières organiques, les bactéries, les virus où les allergènes.

Anthropiques Les particules de cette catégorie proviennent essentiellement du trafic routier, des activités industrielles, des matériaux de construction, les composés organiques volatiles, cela peut être aussi des résidus de fumée et une multitude d'autres matériaux générés par des activités humaine intérieure ou extérieure [98].

1.5.2 Dimensions et classification des particules

Outre l'origine et l'état physique, la taille des particules est un paramètre très important dans le domaine de la mécanique des aérosols. En fonction de leurs sources, les tailles des particules formant l'aérosol peuvent varier de quelques nanomètres à une centaine de micromètres. Par exemple, des activités comme brûler les bougies ou cuisiner produisent des particules de tailles de l'ordre du μm [33]. Des grosses particules proviennent généralement des procédés mécaniques comme le broyage des matériaux secs. La figure 1.5 représente les domaines de variation de la taille pour différents particules d'aérosol et les échelles pour d'autres phénomènes. La classification de ces particules dépend donc du paramètre utilisé. Par exemple en terme de taille, 99.9% des particules qui forment l'aérosol ont des tailles inférieures à $1\mu\text{m}$, alors qu'en terme de masse, les particules de diamètres supérieures à $> 1\mu\text{m}$, représentent 70% du poids total [76]. La notion de diamètre d'une particule sera expliquée dans la suite.

1.5.3 Formes et tailles des particules

En réalité, les particules, constituent l'aérosol peuvent avoir des formes complexes très différentes parfois même difficiles à décrire. En général, on distingue trois grandes familles de formes :

- **Particules isométriques**, les particules de cette morphologie ont les mêmes dimensions dans les trois directions de l'espace, par exemple les particules sphé-

1.5. Pollution intérieure

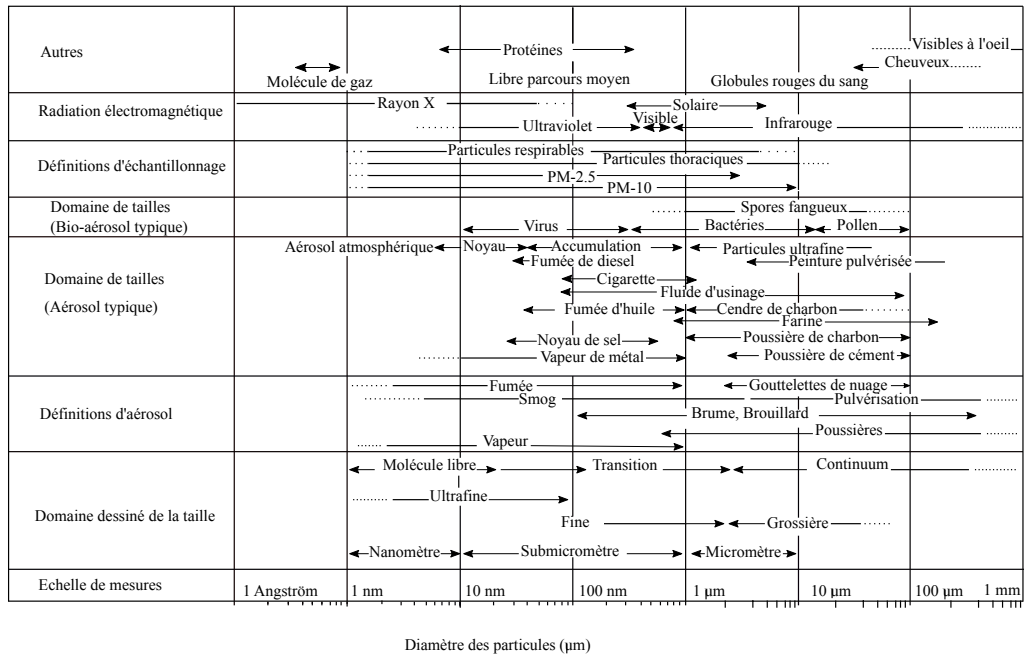


FIGURE 1.5 – Variation de la taille des particules [41]

riques ou particules ayant des formes qui s'approchent de la forme d'un polyèdre régulier.

- **Particules en forme de platelets**, les particules de cette forme ont deux directions grandes par rapport à la troisième formant ainsi une feuille,
- **Fibres**, ce type de particules ont une dimension plus grande que les deux autres directions. On trouve dans cette catégorie les verres d'amiante.

Il est clair que selon cette classification, la notion de taille de particule ne donne pas une bonne idée sur ces dimensions réelles. Dans le domaine de l'aérosol, comme nous l'avons évoqué au début de cette section, les études sont souvent faites sous l'hypothèse que les particules sont sphériques. Afin d'appliquer ces lois sur les particules ayant des formes non sphériques, nous faisons souvent recours à des facteurs de correction et parfois on raisonne en termes de *diamètre équivalent* des particules. En effet, on considère la particule comme étant de forme simple et qui aurait une même propriété que la particule elle-même.

- **Diamètre de volume équivalent** d_e est le diamètre d'une sphère qui a le même volume que la particule. La particule sphérique qui le diamètre d_e est appelée sphère à volume équivalent.
- **Diamètre aérodynamique** d_a le diamètre aérodynamique parfois appelé diamètre aéraulique est largement utilisé dans le domaine de la mécanique d'aérosol, est le diamètre d'une sphère de densité unitaire (1g/cm^3 qui est la densité de l'eau) ayant la même vitesse de sédimentation que la particule dans un fluide au repos.
- **Diamètre de Stokes équivalent** d_s , c'est le diamètre d'une particule sphérique qui a la même densité et la même vitesse de sédimentation que la particule réelle.

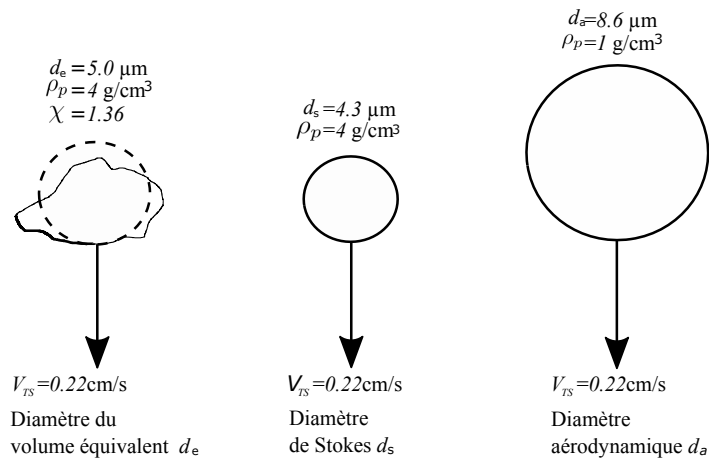


FIGURE 1.6 – Diamètres caractéristiques d'une particule avec χ , le facteur de forme dynamique et V_{TS} la vitesse de sédimentation [41]

La figure 1.6 représente une particule de forme irrégulière avec une comparaison entre ses diamètres équivalents aérodynamique et de Stokes. Dans les deux cas la vitesse de chute est V_{TS} , mais différents tailles et densités. Comme nous l'avons défini avant, ces deux diamètres représentent un comportement aérodynamique de la particule.

Compte tenu du caractère complexe et multidisciplinaire de la remise en suspension des particules, la compréhension du phénomène nécessite une participation interdisciplinaire des experts en sciences de l'aérosol, de la science textile, de la chimie de surface, de l'électrostatique et de la mécanique des fluides [82]. Afin de mieux comprendre le

mécanisme de la remise en suspension des particules depuis une surface donnée, il est nécessaire de connaître tout d'abord les différentes forces qui agissent sur la particule et leurs rayons d'influence. En effet, d'un point de vu quasi-statique, le réentraînement d'une particule est le résultat de la compétition entre plusieurs forces de natures différentes et qui agissent simultanément sur la particule. Ces forces se divisent en deux catégories : des forces d'adhérence qui maintiennent la particule en contact avec la surface et des forces de réentraînement qui contribuent au détachement de la particule de la surface. Dans la section suivante, nous exposons les différents types de forces qui agissent sur une particule en contact avec une surface donnée.

1.6 Forces agissantes sur une particules

Dans cette section nous exposons les différentes forces qui agissent sur une particule en contact avec une surface. Nous y définissons l'essentiel des lois qui régissent les comportements de ces forces et leurs rayons d'influences dans le domaine de la mécanique de l'aérosol.

1.6.1 Forces d'adhérence

Lorsqu'une particule en mouvement se met en contact avec une surface elle a des chances de s'y adhérer grâce à certaines forces appelées forces d'adhérence. Dans cette catégorie on trouve : la force de van der Waals, la force électrostatique, la force de capillarité et la force de gravitation. Ces forces agissent plus au moins sur la particule en fonction des caractéristiques de cette dernière, ainsi que de la surface et du milieu où se trouve la particule. En règle générale, pour des particules de tailles inférieures à $100\mu\text{m}$, la force de van der Waals est la plus dominante [2].

1.6.1.1 Forces de van der Waals

Ils existent deux types de forces de van der Waals : forces de courtes portés et forces de faibles portés. Le premier type concerne les forces qui agissent entre les atomes immédiatement voisins. Les forces appartenant au deuxième type sont relativement moins intenses mais possèdent des rayons d'action plus grands. Dans le domaine de la remise en suspension des particules, nous nous intéressons au deuxième type de force.

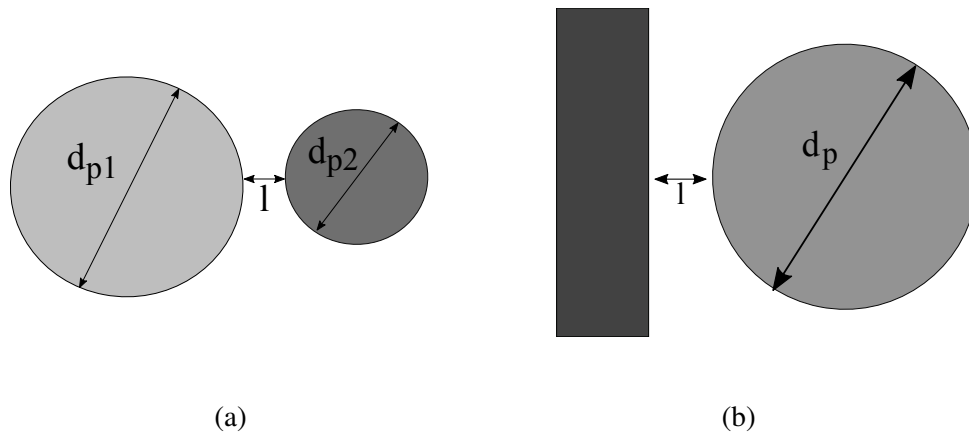


FIGURE 1.7 – Schématisation de a) deux sphères, b) une sphère et une surface

Cette force attractive est la somme des forces agissantes entre les molécules de la particule concernée et celles de la paroi où elle est déposée. Les molécules des deux corps se trouvent à une distance donnée l'une de l'autre. A cause de son caractère très complexe et de sa dépendance avec différents paramètres, il est difficile de trouver une relation générale qui représente cette force. Pour simplifier, on prend le cas de deux sphères de diamètres R_1 , R_2 , situées à une distance l l'une de l'autre (cf. figure 1.7a). En se basant sur une approche microscopique et sans prendre en compte les déformations des deux sphères, la force d'attraction de van der Waals entre ces deux dernières est calculée par intégration sur toutes les paires d'atomes et de molécules. De façon générale, pour deux sphères de diamètres d_{p1} et d_{p2} (cf. figure 1.7a), cette force s'écrit :

$$F_{s_1s_2} = \frac{Ad_{p_1}d_{p_2}}{12(d_{p_1} + d_{p_2})l^2} \quad (1.11)$$

Avec A , la constante de Hamaker. Cette constante est propre aux matériaux qui constituent les deux particules sphériques et le milieu où elles se trouvent et il dépend de la constante de London β par la relation :

$$A = \pi^2 n_1 n_2 \beta \quad (1.12)$$

avec n_1 et n_2 , le nombre de molécules dans les sphères 1 et 2 respectivement [99].

Si l'on fait tendre l'un des diamètres des deux sphères vers zéro, on va se retrouver dans le cas d'une interaction entre une sphère et une surface plane (cf. figure 1.7b). En partant

1.6. Forces agissantes sur une particules

de l'équation 1.11, on peut en déduire la force agissante sur une particule sphérique de diamètre d_p située à une distance l de la surface plane.

$$F_{VdW} = \frac{Ad_p}{12l^2} \quad (1.13)$$

La distance l qui sépare la particule et la surface où elle est déposée est dû aux irrégularités des surfaces (la surface de la particule et celle de la surface de la paroi). Cette distance varie en fonction du temps, en effet, à cause de la force d'attraction qui agit entre les deux corps, la distance diminue avec le temps et par conséquent, la force devient de plus en plus forte [99]. Cette distance est prise égale à $0.4\eta m$ dans le cas des surfaces lisses.

La force de van der Waals peut également être exprimée en fonction de la constante de Lifshitz – van der Waals notée h , reliée à la constante de Hamaker par l'équation [103] :

$$h_{lft} = \frac{4\pi A}{3} \quad (1.14)$$

La constante h_{lft} ne dépend que des matériaux qui entrent en contact et du milieu dans lequel ils se trouvent [2]. Sa valeur varie entre 0,6 eV pour les polymères et 9,0 eV pour les métaux comme l'or et l'argent [8].

1.6.1.2 Force électrostatique

La force électrostatique est une force d'attraction ou de répulsion (en fonction des signes des charges) entre particules portant de charges électriques. L'intensité de la force électrostatique entre deux particules portant de charges q_1 , q_2 respectivement est proportionnelle au produit de leurs charges et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare.

$$F_e = K_E \frac{q_1 q_2}{x_{q_1 q_2}^2} \quad (1.15)$$

La relation 1.15 est connue sous le nom de loi de Coulomb avec $x_{q_1 q_2}$, la distance entre les deux charges, la constante de proportionnalité K_E dépend du système d'unité [41]. Dans le système d'unité SI, la valeur de la constante est : $K_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.0 \times 10^9$ N.m²/C², avec ϵ_0 est la permittivité du vide, 8.85×10^{-12} C²/N.m.

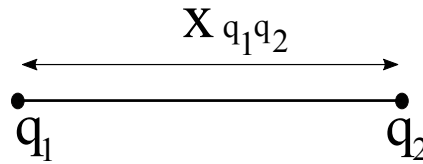


FIGURE 1.8 – Schéma de deux charges électriques séparées par une distance $x_{q_1 q_2}$

En règle générale, les particules constituent l'aérosol, sont électriquement chargées avec des signes négatifs ou positifs. Les origines de ces charges électriques sont différentes. Dans le bâtiment par exemple, lors d'une marche humaine, le corps humain peut être chargé due à l'effet triboélectrique. Le frottement entre le pied et le revêtement des sols peut créer des charges de signes opposées sur les chaussures et sur le sol. A titre d'exemple, le potentiel d'un corps humain qui marche sur une moquette peut atteindre une valeur allant de 10 à 20 kV [54]. Les tensions électriques ainsi créées, donnent lieu à des champs électriques élevés. La force électrique ainsi créée est donnée par :

$$F_e = q \cdot E_e \quad (1.16)$$

F est la force électrostatique, E_e le champ électrique induit par le frottement entre le pied et le sol, et q la charge portée par une particule.

La charge portée par une particule par induction peut être estimée par la relation 1.17 [106] :

$$q = \frac{\pi^3}{18} p \epsilon_0 d_p^2 E_e \quad (1.17)$$

avec p le coefficient de Pauthenier qui est donné par la relation 1.18 et ϵ_r la permittivité relative de la particule.

$$p = \frac{3\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} \quad (1.18)$$

1.6. Forces agissantes sur une particules

Jonassen [51] a mesuré la tension V_e créé entre les chaussures et le sol pendant une marche normale en utilisant un électromètre.

$$V_e = R_e f_p \Delta q \quad (1.19)$$

Avec : Δq est la charge générée entre les chaussures et le sol pour chaque pas. R_e est la résistance électrique du corps et f_p est la fréquence de la marche.

Dans ces expériences, Jonassen a trouvé des valeurs de la charge et de la résistance du corps égales en moyenne à $3.0 \times 10^{-8} \text{C}$, $1.0 \times 10^{11} \Omega$ respectivement. Ainsi, après une activité continue et pour une fréquence de marche de 2 pas par seconde, la tension maximale calculée peut atteindre 6 kV. Cependant, la valeur mesurée par Jonassen est 3.5 kV. Jonassen a expliqué cette surestimation du voltage donné par sa relation dans le fait que la résistance du corps diminue en augmentant la tension du corps.

La force électrostatique peut contribuer à arracher les particules de la surface si elle se crée entre chaussure et particule. Cependant, nous ne pouvons pas quantifier de façon exacte les particules remise en suspension par effets électrostatiques lors d'une marche, car une partie de ces particules vont être déposées sur les chaussures. Les phénomènes électrostatiques dépendent fortement de l'humidité (trop fort quand HR est faible). Outre l'humidité relative, ils existent d'autres facteurs influencent la force électrostatique comme les caractéristiques de la particule, les caractéristiques du revêtement du sol et des chaussures et d'autres paramètres liée à l'activité humaine.

1.6.1.3 Force de tension superficielle

La force de tension superficielle, appelée force de capillarité entre deux surfaces, apparaît quand il y a un film de liquide généralement l'eau entre ces deux surfaces. Il peut s'agir de deux particules ou une particule et une surface. Cette force a non seulement une influence sur le transport et la dispersion des particules mais aussi sur la cohésion des particules et l'adhérence de ces derniers sur les surfaces [84]. La présence d'humidité dans les bâtiments contribue à créer des films d'eau entre les surfaces [30]. De ce fait, la force de capillarité devient très importante dans notre étude.

L'origine de la force de capillarité est les interactions ou les forces d'attraction entre les molécules du liquide. Les molécules internes du liquide interagissent et un équilibre de forces s'établit. Tandis que les forces qui agissent sur molécules superficielles ne sont pas contrebalancées d'au moins d'un côté. Par conséquent, la résultante de ces forces

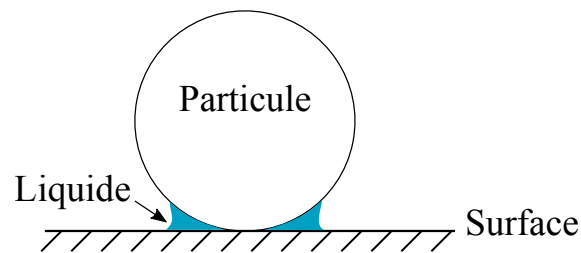


FIGURE 1.9 – Contact entre une particule et une surface en présence d’un fil liquide

est dirigée vers l’intérieure du liquide. En présence de surface de paroi ou d’une autre particule sur l’une des faces de ce film de liquide, ces forces vont jouer le rôle de force d’adhérence.

Dans le cas de contact entre une particule sphérique et un plan, ceci en présence d’un film liquide (cf. figure 1.9), lorsque l’épaisseur du film au point de contact est inférieure au diamètre de la particule, on peut exprimer la force d’adhérence due à ce film liquide comme :

$$F_{Cap} = 2\pi d_p \gamma \quad (1.20)$$

où γ est la tension superficielle.

1.6.1.4 Force de cohésion

Une autre force qui agit d’une façon indirecte sur l’adhérence des particules au niveau des surfaces est la force de cohésion. La force de cohésion est une force attractive entre les particules. On peut traiter cette force comme les forces d’adhérence entre les particules et surface (ceci a été exposées dans les paragraphes précédents), car elles sont générées par les mêmes processus physiques. L’origine principale des forces de cohésions sont la force de van der Waals et les forces de capillarité [2, 97], mais leur dépendance est différente en fonction de la taille des particules, du fait que la géométrie de contact entre les corps est modifiée. [78]. Un autre paramètre important est la concentration en particules [15]. En effet, une forte concentration intérieure en particules augmente le nombre de particules en contact formant ainsi des lits de particules près des surfaces. Le détachement d’une particule de la surface ou elle est déposée est influencée fortement du fait qu’elle est seule ou plutôt située dans un lit de particules.

1.6.1.5 Force de gravité

Contrairement aux différentes forces exposées précédemment, la force de gravité ne dépend que des caractéristiques de la particule. Pour une particule sphérique ayant un diamètre d_p et une densité ρ_p la force de gravité est donnée par la relation suivante :

$$F_G = \frac{4}{3}\pi d_p^3 \rho_p g \tag{1.21}$$

Avec g l'accélération de la pesanteur. Cette force est importante pour des particules de diamètres supérieures à $100\mu\text{m}$. Pour des particules de diamètre inférieures à 50μ , la force de gravité devient négligeable.

Dans figure 1.10 nous représentons à l'échelle logarithmique le rapport entre la force

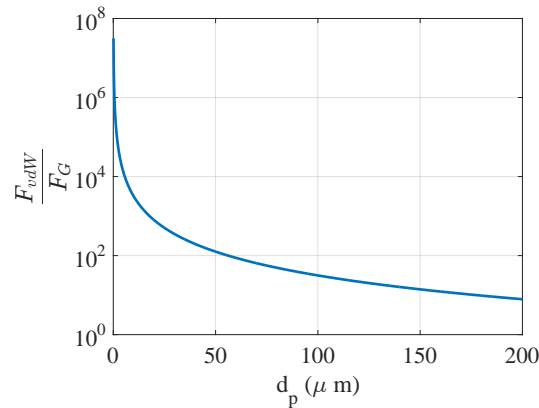


FIGURE 1.10 – Variation du rapport entre la force de van der Waals et la force de gravité

de van der Waals F_{vdW} calculée d'après la relation 1.13 et la force de gravité F_G pour des particules de diamètres allant de 0.1 à 200 μm . Dans le calcul de la force de van der Waals, la constante de Hamaker est prise égale à 1.0×10^{-19} J. La particule considérée est celle de l'alumine avec une masse volumique $\rho_p = 3.9 \text{ g/cm}^3$. La figure montre que pour des micros particules, la force de van der Waals est grande de plusieurs ordres de grandeurs que la force de gravité. Le modèle théorique utilisé pour estimer les forces de van der Waals surestime la valeur réelle à cause de la distance entre particule et la surface qui est beaucoup plus grande dans la réalité. Cette différence est comme nous l'avons évoqué précédemment, due aux irrégularités dans les surfaces de la particule et celle de la paroi.

1.6.1.6 Expression empirique de la force d'adhérence

Cet inventaire montre clairement les différentes forces d'adhérence qui agissent sur une particule en contact avec une surface. Cependant, il n'est pas facile de quantifier ces forces ou de comparer leurs effets dans différentes situations. Cela est due au fait que la force d'interaction entre une particule et une surface dépend à la fois des caractéristiques de la particule (les dimensions, la taille, les caractéristiques chimiques), de la surface et aussi des conditions environnementaux [46].

Ils existent différentes méthodes expérimentales pour quantifier les forces d'adhérence : méthode centrifuge, la méthode aérodynamique et la méthode par vibration. Ils existent aussi des modèles théoriques de calcul des forces d'adhérence, comme la théorie de JKR [50], celle de DMT [22] ou bien celle de Tsai et al. [99].

La théorie du phénomène d'adhérence a été établie pour des surfaces lisses et ne prend pas en compte la rugosité des surfaces réelles. William C. Hinds [41] a élaboré une corrélation empirique reliant l'humidité relative HR (%), le diamètre de la particule et la force d'adhérence. Cette corrélation montre l'influence de l'humidité relative sur la force d'adhérence.

$$F_{adh} = 0.063d_p(1 + 0.009(HR\%)) \quad (1.22)$$

1.6.1.7 Comparaison des forces d'adhérence

Les forces citées dans cette section contribuent, plus ou moins (selon plusieurs paramètres), sur l'adhérence des particules à une paroi. L'un des paramètres qui influencent le plus est le diamètre d_p de la particule. Dans la figure 1.11 nous représentons la variation des différentes forces d'adhérence en fonction du diamètre de la particule. Les différentes valeurs numériques utilisées dans le calcul sont représentées dans le tableau 1.2. La figure montre clairement l'influence relative des forces d'adhérence. Ainsi, pour des particules comprises entre 1 et 200 μ m, il ressort nettement de ce graphe que les premières forces qui retiennent les particules sur une surface sèche sont les forces de van der Waals et de capillarité. Dans cet intervalle, elles valent entre 10^{-7} et 10^{-5} N. La courbe montre également que l'humidité relative n'influence pas considérablement la force d'adhérence. Nous avons montré les cas d'une particule isolé sur une paroi. Dans le cas où plusieurs particules sont en contact, l'apparition des forces cohésives

1.6. Forces agissantes sur une particules

ρ_p	3.9g/cm ³
γ	72.8×10^{-3}
HR	40%
g	9.8 m/s ²
A	1.0×10^{-19} J
l	0.4 η m

TABLE 1.2 – Valeurs numériques des différents coefficients utilisés dans le calcul des forces

(non représentées ici) est source d'augmentation des forces de van der Waals.

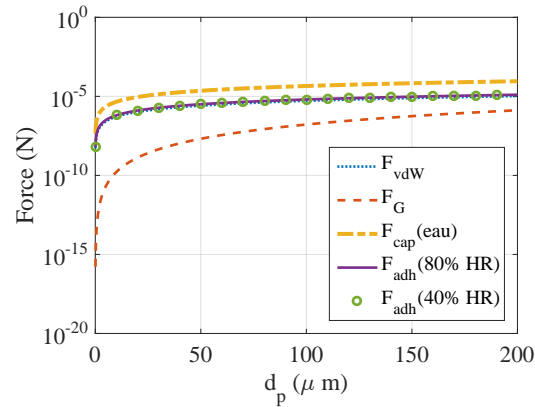


FIGURE 1.11 – Variation des forces d'adhérence en fonction du diamètre de la particule

1.6.2 Forces d'entraînement

Comme nous l'avons évoqué au premier chapitre de ce manuscrit, le réentraînement des particules déposées sur une surface est dû principalement à des perturbations mécaniques sous forme de vibrations et des perturbations aérodynamiques.

1.6.2.1 Force de vibration

Les effets de vibration générés par le déplacement des humains à l'intérieur d'un bâtiment dépendent généralement du type d'activité (marcher lentement, courir ou dan-

Chapitre1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

ser...etc...), de la fréquence de l'activité, mais aussi du type de sol existant (type de revêtement) [91]. Ce phénomène de vibration peut être modéliser par une sinusoïde [4], dans ce cas le mouvement du sol est gouverné par l'équation suivante :

$$y = A_v \sin(2\pi f_v t) \quad (1.23)$$

Avec A_v , f_v l'amplitude et la fréquence de vibration respectivement. Dans le bâtiment, les fréquences de vibration varient entre 4 et 8 Hz. Une particule déposée sur la surface d'un sol vibrant est influencée par une force appelée force de vibration normale à la surface du sol. La valeur maximale de cette force est donnée par la relation suivante [4] :

$$F_{v,max} = \frac{2}{3} \pi^3 d_p^3 \rho_p f_v^2 A_v \quad (1.24)$$

Dans la figure 1.12 nous comparons la force de vibration maximale et la force de gravité

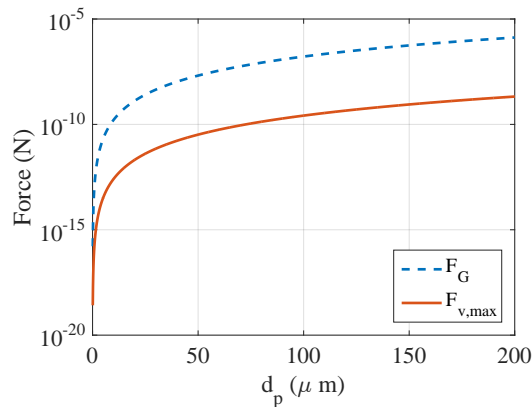


FIGURE 1.12 – Variation de la force de gravité et la force de vibration en fonction du diamètre de la particule

en fonction du diamètre de la particule (ici il s'agit d'alumine). Les particules d'alumine déposées au plancher sont soumises à des vibrations avec une fréquence $f_v = 8$ Hz et une amplitude de vibration $A_v = 50 \mu\text{m}$. Nous constatons d'après la figure que dans ces conditions, la force maximale de vibration est inférieure de plusieurs ordres de grandeurs à la force de gravité.

1.6.2.2 Forces aérodynamiques

Ils existent deux types de forces d'origines aérodynamiques et responsables au détachement d'une particule déposée sur une paroi : les forces de portance et les forces

1.6. Forces agissantes sur une particules

de traînée. Ils existent différentes expressions de cette force que nous allons en citer quelques une dans la suite :

Force de portance

La force de portance F_L est associée aux petits tourbillons générés au niveau d'une surface appelés "burst" et qui contribuent de façon aléatoire à la mise en suspension des particules.

- En assimilant la particule comme une sphère en contact avec une surface plane et submergée dans un écoulement de cisaillement, une expression de la force de portance a été donnée dans [64] :

$$F_L \cong 9.22 (\tau_w \mu d_p^2) \left(\frac{\tau_w d_p^2}{\nu} \right) \quad (1.25)$$

avec μ la viscosité dynamique du fluide et τ_w le tenseur de cisaillement à la paroi.

- Dans [14] les auteurs ont observé qu'à proximité d'une paroi, l'écoulement peut être assimilé à un courant ascendant, ainsi, une particule complètement submergée dans la sous couche visqueuse peuvent être soulevées par une force F_L . Il obtiennent alors pour la force de portance la relation suivante valable pour $d_p^+ < 1$:

$$F_L = 0.076 \rho \nu^2 (d_p^+)^3 \quad (1.26)$$

avec d_p^+ , le diamètre adimensionnel représenté par $d_p^+ = \frac{u^* d_p}{\nu}$, ρ la masse volumique du gaz porteur, ν la viscosité cinématique du gaz porteur et u^* la vitesse de frottement.

- Dans le cas où l'écoulement est limité par une paroi et où la particule se déplace le long de cette dernière, D. Hall [39] a abouti à une formule semi-empirique de la force moyenne de portance.

$$F_L = 4.2 \rho \nu^2 (d_p^+)^{2.31} \quad (1.27)$$

Force de traîné

La force de traîné exprime la résistance de l'air à la vitesse de la particule en mouvement. Pour un écoulement stable, cette force est horizontale et parallèle à la surface.

En assimilant la particule comme une sphère cette force est donnée par la relation suivante [74] :

$$F_T = 6\pi\mu\tau_w \left(\frac{d_p}{2}\right)^2 f_S \quad (1.28)$$

avec $f_S = 1.7$ la correction de la force de traînée de Stokes.

La particule peut aussi se trouver sous l'influence d'une autre force horizontale, F_P qui est due au gradient de pression, mais cette force reste négligeable pour des particules de taille $d_p < 25\mu\text{m}$ même dans un écoulement présentant des fortes accélérations [55].

1.7 Modèles de remise en suspension

La remise en suspension des particules est la compétition de plusieurs phénomènes : les forces d'adhérence qui gardent les particules déposées sur la surface et l'écoulement de l'air généré suite au mouvement du pied. Comme nous l'avons évoqué au début de ce manuscrit, l'objectif principal de l'étude de la remise en suspension est la prédiction de la concentration en particules en mettant en place un modèle de remise en suspension des particules. Ce sujet a suscité un grand intérêt dans la communauté scientifique dans différents domaines qui s'intéressent à la pollution de l'air. Ainsi, de nombreux modèles de remise en suspension ont été mis en place et que l'on peut classer dans deux catégories [111] :

- Modèles basés sur un bilan de forces,
- Modèles basés sur un bilan d'énergie.

Dans la sous-section suivante, nous allons faire un bref inventaire des différents modèles de remise en suspension mis en place et les principaux travaux qui les ont utilisés. Pour une synthèse plus détaillée vous pouvez référer au [109].

1.7.1 Modèles basés sur un bilan de forces

Le bilan de forces agissantes sur la particule est effectué en prenant en compte les différentes forces que nous avons présentées dans la section précédente (voir § 1.6). Donc, d'après ce modèle de prédiction, une particule peut être réentraînée si les forces de réentraînement d'origine aérodynamique sont supérieures aux forces d'adhérence.

1.7. Modèles de remise en suspension

Dans ces conditions, pour une particule appartenant à une classe granulométrique donnée, le rapport entre forces aérodynamiques et forces d'adhérence dépasse une valeur critique qui correspond à un seuil de vitesse de frottement de l'air [78]. Il existe trois types de modèle basés le principe du bilan de forces appliquées : le modèle statistique, le modèle cinétique et le Ma lagrangien. Nous allons dans la suite exposer les différents travaux qui ont adopté ces modèles.

1.7.1.1 Modèles statistiques

Dans les travaux de Cleaver et Yates [14], les forces aérodynamiques de réentraine-ment (trainé et portance) ont été prises fluctuantes d'une façon aléatoire autour d'une valeur moyenne. Le caractère fluctuant des forces vient de l'apparition occasionnelle de tourbillons "bursts" dans la sous couche visqueuse [20]. Les tourbillons ont un diamètre moyen égale à :

$$R_{burst} = 20 \frac{\nu}{u^*} \quad (1.29)$$

Les distances moyennes séparant deux tourbillons dans les deux sens longitudinal et transversal sont données par :

$$\begin{cases} L_{longueur} = 630 \frac{\nu}{u^*} \\ L_{largeur} = 135 \frac{\nu}{u^*} \end{cases} \quad (1.30)$$

Les deux distances $L_{longueur}$ et $L_{largeur}$ définissent une surface appelée surface de contrôle. Le temps séparant l'apparition de deux tourbillons est donnée par :

$$\Delta t = 75 \frac{\nu}{u^*} \quad (1.31)$$

La force de portance appliquée sur la particule a comme origine la différence de pression créée par l'écoulement autour de cette dernière. La force visqueuse est à l'origine de la force de trainé. Les forces de trainé et de portance sont données respectivement par :

$$\begin{cases} F_T = 8\rho\nu^2 \left(\frac{d_p u^*}{\nu} \right)^2 \\ F_P = 0.076\rho\nu^2 \left(\frac{d_p u^*}{\nu} \right)^3 \end{cases} \quad (1.32)$$

Chapitre1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Comme la particule va être exposée à un courant ascendant causé par les tourbillons, la force de trainé peut donc être négligée. La condition de la remise en suspension d'une particule est donc donnée par la relation suivante :

$$\frac{\rho\nu}{d_p} \left(\frac{du_\tau}{\nu} \right)^3 > const \Rightarrow \tau_w \cdot d_p^{4/3} > cst, \quad (1.33)$$

Les auteurs ont même définie la fraction de particule restant sur la surface à un instant t .

$$f_R(t) = \left[1 - \frac{a_p \times (\pi/4) \times (20\nu/u^*)^2}{135\nu/u^* \times 630\nu/u^*} \right] = \left[1 - \frac{a_p}{270} \right]^{(t/\Delta t)} \quad (1.34)$$

Avec a_p le rapport entre le nombre de particules sous le tourbillon et le nombre de particules présents sur la surface de contrôle.

Depuis, ce modèle a été adopté est réadapté selon le cas d'étude par plusieurs auteurs. Premièrement Philips [78] qui a étendu l'étude de remise en suspension pour différents régimes selon la taille des particules. Par exemple pour les grosses particules ($d_p > 200\mu\text{m}$) les forces prises en compte dans le bilan de forces sont le poids net de la particule et la trainé. Le bilan de forces conduit à la relation suivante :

$$\tau_w = 350d_p \quad (1.35)$$

Pour des petites particules ($d_p < 20\mu\text{m}$) qui sont complètement submergées dans la sous couche visqueuse, le détachement est dû à la compétition entre la force qui a pour origine la différence de pression générée sur la surface de la particules [14], et la force d'adhérence à la surface. Ainsi, le bilan de forces conduit à la relation suivante :

$$\tau_w d_p^{4/3} = 5 \times 10^{-8} \quad (1.36)$$

Ziskind et al [112] ont utilisé ce modèle pour le cas d'une surface rugueuse contenant deux aspérités en utilisant le modèle de forces d'adhérence JKR [50]. Ils ont défini une condition de détachement similaire à 1.33 :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \tau_w r^{4/3} > \frac{\gamma^{4/3}}{5.37\kappa^{1/3}} & \text{Surface lisse} \\ \tau_w r^3 > \frac{\gamma r^2}{35.7} & \text{Surface rugueuse} \end{array} \right. \quad (1.37)$$

1.7. Modèles de remise en suspension

Avec κ une constante d'élasticité de la particule et γ l'énergie de surface et r_a le rayon de l'aspérité.

Braaten et al [9] montrent expérimentalement la présence de deux régimes de remise en suspension qui se produisent progressivement dans le temps. La portion de particule remise en suspension décroît exponentiellement en fonction du temps. Ils ont proposé un autre modèle statistique de remise en suspension basé sur la méthode de Monte-Carlo qui prend en compte le caractère instable de la remise en suspension. Leur modèle est basé sur l'hypothèse que la remise en suspension des particules est associée à des structures cohérentes "burst" qui ont différentes tailles. Ils ont intégré une fonction de probabilité qui permet de déterminer la force appliquée par le fluide au niveau de la surface, ainsi, le nombre de particules remises en suspension est déterminé. Les auteurs montrent la présence de deux régimes lors de la remise en suspension. Dans le premier régime qui a lieu durant les premiers instants (environ 20 mn), plus de 50 % des particules sont remises en suspension. Les particules possédant une force d'adhérence plus importantes sont remises en suspension de façon aléatoire par la suite. Les résultats de cette étude ont montré que la fraction de particules restant sur la surface varie de façon exponentielle en fonction du temps.

1.7.1.2 Modèles cinématiques

Un modèle cinématique de réentraînement des particules a été mis en place par Wen et Kasper [104]. Le modèle assimile la remise en suspension d'une particule à la désorption moléculaire à partir d'une surface non homogène. Le taux de remise en suspension est donné par une loi semblable à la loi d'Arrhenius

$$a(r_F) = Ae^{-r_F} \quad (1.38)$$

avec r_F représente le rapport entre la force d'adhérence et les forces aérauliques. Le modèle permet de calculer la concentration en particule comme une fonction de temps. Ensuite, le nombre de particules remise en suspension à l'instant t est donnée par :

$$n(t) = \frac{1}{Q} \left(-\frac{dN}{dt} \right) \quad (1.39)$$

Avec Q le débit volumique, $N_0(r_F)$ la fonction de distribution de r_F et $\frac{dN}{dt}$ le flux de particules remise en suspension.

Chapitre 1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

La densité du nombre de particules présentes sur la surface à l'instant t est donnée par :

$$N_{RS}(r_F, t) = N_0(r_F)e^{-(r_F)t} \quad (1.40)$$

Connaissant la distribution initiale $N_0(r_F)$, et à partir des deux équations 1.39 et 1.40 le nombre en particules remise en suspension depuis la surface est donnée par :

$$n_{RS}(t) = \frac{1}{Q} \int_0^\infty N_0(r_F)a(r_F)e^{-a(r_F)t} dr_F \quad (1.41)$$

Ce modèle est en bon accord avec les résultats expérimentaux pour des particules de taille variant entre $0.5 - 0.6 \mu\text{m}$.

Matsusaka et Masuda [67] ont proposé un autre modèle cinématique de remise en suspension des particules depuis une fine couche de particules en prenant en compte l'accélération de l'écoulement. Ils ont aussi pris en compte l'effet de la compacité du lit de particules. Leurs expériences ont été menées dans un canal rectangulaire. Le flux de particules remises en suspension a été estimé en utilisant une méthode électrostatique. Ils ont pu montrer grâce à leurs expériences que plus l'accélération de l'écoulement est élevée, plus le flux de particules remises en suspension augmente rapidement avec l'augmentation de la vitesse. Leur étude montre également que la distribution de forces d'adhérence suit une loi log-normale. Suite à ces résultats, un modèle de remise en suspension des particules basé sur la distribution des forces d'adhérence a été mis en place. Leur modèle prend en compte le caractère non stationnaire du phénomène de la remise en suspension.

1.7.1.3 Modèles lagrangiens

Hontañón et al [43] ont développé un modèle basé sur un bilan de forces d'adhérence et de réentraînement en utilisant une méthode Lagrangienne de suivi de particules. Le modèle calcule les trajectoires des particules dans la sous-couche visqueuse. L'originalité de ce modèle se situe dans le fait qu'il prend en compte à la fois la diminution de la force adhésive due à la rugosité de la surface et à l'augmentation aléatoire de la force de portance aéraulique du au caractère turbulent de l'écoulement. Les particules sont supposées comme des sphères lisses et dures, déposées sur une surface rugueuse constituées d'aspérités avec le même rayon de courbure et une distribution de hauteur donnée par une approximation polynomiale.

1.7. Modèles de remise en suspension

Les forces attractives et répulsives entre une particule et une surface sont évaluées en intégrant respectivement les forces attractives et répulsives agissantes entre une molécule et la surface sur tout le volume de la particule. L'interaction entre la molécule et la surface est issue du potentiel de Lennard Jones, elle est calculée donc par l'intégration des forces attractives et répulsives entre une molécule et la surface sur tous le volume de la particule.

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{att}(b, y_p) = 2\pi \int_0^\infty x dx \int_{-y_p-b}^{y_p} \frac{-6\lambda_{LJ}}{s_c^7} n(y) dy \quad \text{Force attractive} \\ f_{rep}(b, y_p) = 2\pi \int_0^\infty x dx \int_{-y_p-b}^{y_p} \frac{12\theta_{LJ}}{s_c^{13}} P(y) dy \quad \text{Force répulsive} \end{array} \right. \quad (1.42)$$

r_c est la surface de contact entre particule et surface, b est la hauteur maximale des aspérités de la surface, x et y sont les deux coordonnées horizontale et verticale respectivement, $P(y)$ est la probabilité de présence d'une aspérité, avec λ_{LJ} et θ_{LJ} sont des coefficients liés aux paramètres de LJ.

La force incluant les deux effets répulsif et attractif est donnée par la relation suivante :

$$F(R, b, y_p) = \pi n_1 \int_0^{d_p} y(d_p - y) f_{att}(b, y_p + y) dy + \pi n_1 \int_0^{d_p} y(d_p - y) f_{rep}(b, y_p + y) dy \quad (1.43)$$

n_1 la densité atomique de la particule.

Quant à la force de portance agissant sur la particule dans la sous couche visqueuse, les auteurs ont utilisé les corrélations de Saffman [90] et de Cherukat et MacLaughlin [12].

Un autre modèle basé sur le même principe est proposé par Guingo et Minier [38] pour simuler la remise en suspension des particules sphériques dans un écoulement turbulent, en utilisant une méthode lagrangienne. La rugosité de la surface est prise en compte et modélisée par des aspérités de formes hémisphériques de tailles différentes. La force d'adhérence entre la particule et la surface dépend de la taille de la particule par rapport à l'élément de rugosité et de l'espace entre ces éléments. En fonction de la taille des particules par rapport à la taille des aspérités, la surface peut être considérée comme lisse ou rugueuse. Dans ce modèle, la remise en suspension se produit en deux étapes :

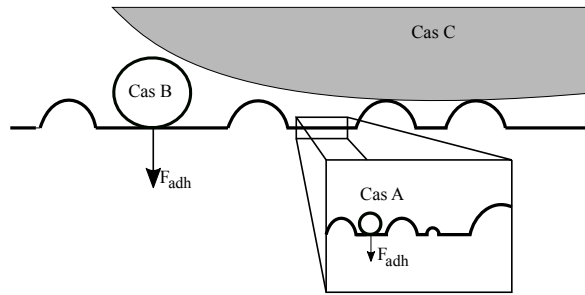


FIGURE 1.13 – Contact entre une surface et des particules de différents diamètres [38]

- **Etape 1** : Sous l'effet des forces longitudinales hydrodynamiques, et si le moment de ces dernières est supérieur au moment créé par les forces d'adhérence, la particule commence à rouler dans le sens de l'écoulement
- **Etape 2** : la particule peut atteindre un intervalle entre deux aspérités séparées par une distance plus grand que le diamètre de la particule. En heurtant la prochaine aspérité, la particule peut se remettre en suspension si elle accumule une énergie cinétique suffisante.

1.7.2 Modèles basés sur l'accumulation de l'énergie

Les modèles de remise en suspension basés sur un bilan de forces supposent qu'une particule est instantanément remise en suspension lorsque les forces aérodynamiques sont supérieures aux forces d'adhérence. Cependant, des résultats expérimentaux comme ceux de Sehmel [92] ont montré que la remise en suspension depuis une surface n'est pas instantanée mais elle se produit en fonction du temps. Quelques modèles appartenant à cette catégorie ont pris en compte l'évolution de la remise en suspension dans temps. D'autres observations expérimentales ont montré que certaines particules peuvent être remises en suspension alors que le bilan de forces indique que les forces d'adhérence entre ces particules et la surface sont supérieures aux forces aérodynamiques. Dans cette optique, un autre type de modèles a vu le jour et qui est basé sur le bilan d'énergie "une particule peut être remise en suspension lorsqu'elle accumule assez d'énergie qui lui permettra de se détacher de la surface. Trois modèles existent dans cette catégorie : le modèle RRH, le modèle VZFG et le modèle Rock'n Roll. Nous allons dans la suite exposer brièvement les différents travaux qui ont permis la mise en place de ces trois modèles.

1.7.2.1 Modèle RRH

Ce modèle de remise en suspension baptisé RRH a été développé par Reeks et al [86]. Cette approche prend en compte l'influence de l'énergie turbulente transférée à une particule depuis l'écoulement. Cette énergie maintient la particule en mouvement sur la surface dans un puits de potentiel formé par les forces d'adhérence. La particule est réentraînée si elle accumule assez d'énergie vibrationnelle franchissant ainsi le puits d'énergie. Ces considérations ont donné lieu à une formule concernant la probabilité par unité de temps pour qu'une particule soit mise en suspension par rapport à la surface :

$$p_{RS} \sim f_v \exp\left[\frac{-Q_p}{(2 < E_p >)}\right] \quad (1.44)$$

avec :

- f_v la fréquence de vibration,
- Q la hauteur de la barrière de potentiel de la surface adhésive,
- $< E_p >$ énergie potentielle moyenne d'une particule dans le puits.

L'interaction entre la particule et la paroi est représentée par un puits de potentiel issu de la force moyenne de portance et les forces de surfaces données par le modèle JKR [50]. Il a été montré après comparaison avec les résultats expérimentaux que le modèle RRH sous-estime la remise en suspension des particules. Cet écart revient au fait que dans ce modèle c'est uniquement la force de portance qui est prise en compte pour la remise en suspension [85].

1.7.2.2 Modèle VZFG

Vainshtein et al [100] ont proposé un modèle de remise en suspension des particules qui prend en compte la force de trainé. Le modèle est basé sur le principe du puits de potentiel de [86] cependant en plus des oscillations verticales il tient compte des oscillations horizontales liées à la force de traînée comme le montre la figure 1.14. Dans ce modèle, la remise en suspension de la particule dépend de l'énergie emmagasinée. Si cette dernière est suffisante, il y a alors rupture de l'oscillateur particule-surface et donc une remise en suspension de la particule. La condition du détachement peut être représentée par l'équation suivante :

$$\frac{M_{adh}}{M_{det}} = 0.3 \frac{W_A^{4/3}}{d_p^{4/3} k_r^{1/3} \tau_w} < 1 \quad (1.45)$$

Avec

- M_{adh} le moment d'adhérence lié aux forces de van der Waals. D'après le modèle JKR [50] ce moment est donnée par :

$$M_{adh} = F_{adh} \times r_c = \frac{3}{2}\pi W_A d_p \times 1.26(3\pi W_A d_p^2/k)^{1/3} \quad (1.46)$$

- M_{det} : est le moment de détachement de la particule

$$M_{det} = 1.399 \times F_L \times d_p = 1.399 \times (6\pi\tau_w d_p^3 f) \quad (1.47)$$

- r_c : le rayon de contact particule-surface,
- k : constante de raideur du ressort
- $f = 1.7$ est un terme correctif dû à la présence de la paroi

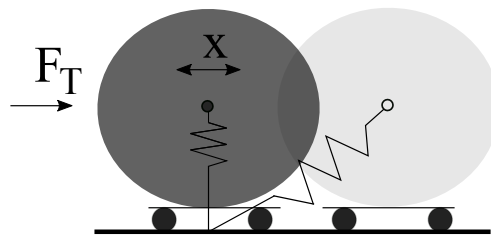


FIGURE 1.14 – Oscillation non linéaire d'une particule en contact avec une surface

1.7.2.3 Modèle Rock'n'Roll

Le modèle de remise en suspension Rock'n'Roll a été proposé par Reeks et Hall [85]. Ce modèle est en réalité une amélioration du modèle [86]. En plus de la force de portance, la force de trainé a été également intégrée dans ce modèle. La condition de remise en suspension dans ce modèle est basée sur le principe de bilan de moment de force :

$$M_{det} \approx \frac{a}{2}F_T + d_p.F_L > a.F_{adh} + \frac{a}{2}F_G \quad (1.48)$$

Avec f_a est la force d'adhérence de la particule au point de contact Q (cf. figure 1.15), F_G est la force de gravité. Dans le modèle RNR les forces d'adhérences sont estimées en utilisant une distribution log-normale alors que dans le modèle VZFG elles sont estimées en utilisant le rayon d'aspérité.

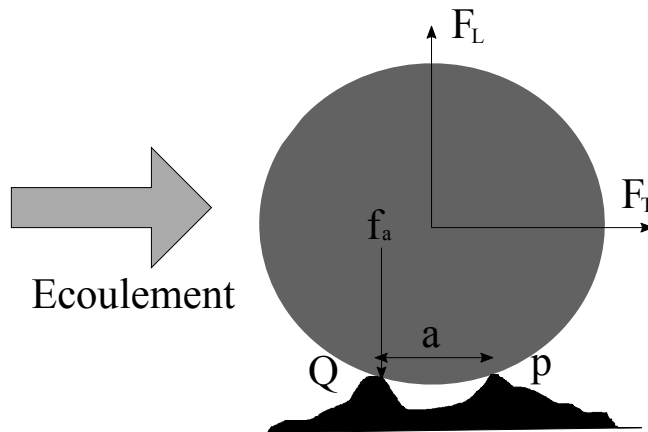


FIGURE 1.15 – Schéma d'une particule posée sur deux aspérités P et Q et exposée à un écoulement d'air [85]

1.8 Conclusion du chapitre

Les différents points traités dans ce chapitre ont mis en évidence l'existence du phénomène de la remise en suspension par la marche humaine et les différents paramètres qui l'influencent. Nous avons aussi présenté les différentes perturbations générées autour du pas humain pendant la marche. Les différents modèles qui ont comme objectif la quantification et la prévention de la remise en suspension des particules par un écoulement d'air ont été présentés en détails avec les points forts et les points faibles de chaque modèle. Cet état de l'art nous a permis surtout de montrer l'influence des caractéristiques du sol sur le phénomène étudié mais également l'importance des perturbations aérodynamiques sur la remise en suspension de particules.

Le premier point nécessite une étude globale et approfondie afin de mettre en place une classification claire traduisant le pouvoir d'émission des différents types de surfaces utilisées dans le bâtiment. Concernant les perturbations aérodynamiques liées à un écoulement d'air généré à proximité du pied humain pendant son mouvement, diverses études à la fois expérimentales, numériques et analytiques ont été menées dans différents laboratoires. Cependant, nous n'avons jusqu'à présent recensé aucun travail expérimental qui a pu étudier de façon approfondie les effets liés à l'environnement immédiat du pas et notamment à proximité du sol du domaine étudié. Suite à ces constatations nous avons

Chapitre1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

décidé de diviser notre travail en deux parties : la première partie est une étude expérimentale de la remise en suspension des particules par un pas humain dans différentes situations ; la deuxième partie est une étude approfondie de l'écoulement généré par le pas humain pendant la marche en utilisant un simulateur mécanique simplifié.

Chapitre 2

ÉTUDE EXPERIMENTALE DE LA RmS DES PARTICULES

Ce chapitre est dédié à l'étude expérimentale de la remise en suspension des particules par un pas humain. Comme nous l'avons évoqué dans le premier chapitre, ce phénomène est influencé par une multitude de paramètres difficiles à maîtriser dans le cas des mesures à grande échelle. Pour cette raison nous avons mis au point un dispositif expérimental qui permet de quantifier la fraction élémentaire de particules remise en suspension par un seul pas humain (modèle réduit). L'objectif final de cette partie du travail est la classification de différents types de revêtements du sol par rapport à leurs pouvoirs d'émission des particules après l'impact d'un pied avec le sol.

Dans la première section du chapitre nous présentons le dispositif expérimental et les différents instruments utilisés pendant cette étude. Nous présentons également dans cette section la méthode utilisée pour l'analyse des surfaces étudiées ainsi que la granulométrie des particules utilisées pour les mesures. Dans la deuxième section nous présentons les différents résultats obtenus, nous commençons par la méthode de prédiction des coefficients de décharge dans les enceintes de mesure, puis la technique utilisée pour charger les surfaces en particules et finalement la technique d'estimation des sources de remise en suspension. Nous terminons le chapitre par une conclusion.

2.1 Présentation du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental conçu pour cette étude a été mis en place au Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) à La Rochelle. Les différents instruments qui ont été utilisés sont les suivants :

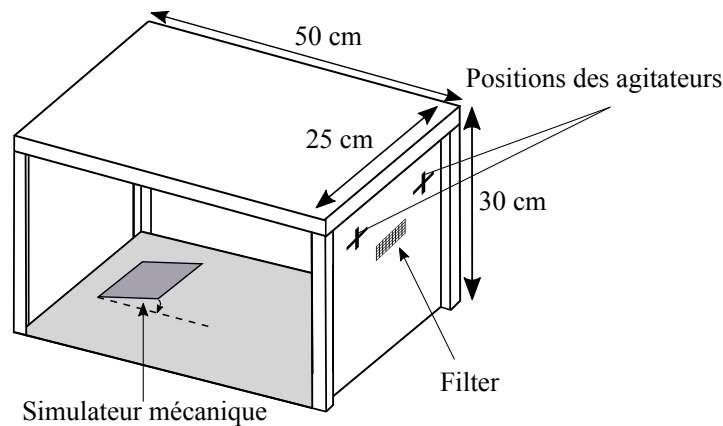


FIGURE 2.1 – Enceinte utilisée pour l'étude

- Deux enceintes en bois de dimensions $50 \times 25 \times 30$ cm dont les sols peuvent être recouverts de différents revêtements (cf. figure 2.1). Les parois supérieures des deux enceintes sont mobiles et permettant la mise en place des revêtements, le nettoyage et l'installation des instruments de mesures.
- Un générateur de particules modèle TOPAS SAG 410 (cf. figure 2.2). Ces générateurs utilisent la méthode de dosage de poudre par un tapis roulant. Cela assure un approvisionnement constant et reproductible de la poudre, même avec des taux d'alimentation faibles. La concentration en particules de l'aérosol à la sortie peut être facilement ajustée dans un large intervalle en modifiant la vitesse de la courroie.
- Un neutraliseur de particules TOPAS EAN 581 (cf. figure 2.3). Ce dernier repose sur le principe de décharge CORONA avec une chambre de mélange et deux têtes d'ionisation indépendantes. Les ions positifs et négatifs sont générés dans deux flux mélangés consécutivement au flux d'aérosol dans la chambre de mélange. Une source d'air comprimé propre est raccordée à chaque tête d'ionisation et le

2.1. Présentation du dispositif expérimental



FIGURE 2.2 – Photographie du générateur de particules modèle TOPAS SAG 410

bloc de commande branché au secteur assure l'alimentation électrique.

La conception exclusive de la chambre assure un mélange absolument parfait et une excellente efficacité de charge ou de décharge. L'échange d'ions sur la surface des particules change la charge résiduelle de la particule avant sa sortie.



FIGURE 2.3 – Photographie du neutraliseur de particules modèle TOPAS EAN 581

- Quatre Capteurs Optiques de Particules OPC modèle GRIMM 1.108 pour le suivi des concentrations. Le principe de fonctionnement des GRIMM 1.108 est le suivant : une sonde isocinétique prélève la poussière et envoie les particules directement dans une chambre optique intégrant le Laser. Chaque particule est comptée et classifiée par taille et la concentration est proportionnelle au temps collecté. Les résultats peuvent être donnés en continu toutes les secondes, 6 s, 1 mn ou 1 h. Le compteur fonctionne en deux modes de comptage : en nombre de particules par litre (#/l) et en concentration massique ($\mu\text{g/l}$). Les compteurs de particules sont posés à l'extérieure de la boîte et la mesure à l'intérieure se fait grâce à des tuyaux en Téflon de 4 mm de diamètre et d'une longueur de 500 mm,



FIGURE 2.4 – Photographie d'un capteur optique de particules modèle GRIMM 1.108

- Les enceintes sont aussi équipées de deux agitateurs de façon à assurer un brassage rapide continu de l'air intérieur de chaque boîte,
- Un ordinateur qui permet un suivi de la concentration, l'acquisition et l'enregistrement des résultats,
- Deux plaques rectangulaires et identiques de dimensions 8×25 cm fixées sur le sol de chaque boîte par deux charnières. Les plaques effectuent librement des rotations vers le bas pour imiter le mouvement descendant du pas humain pendant la marche (simulateur mécanique du pas humain),
- Des capteurs SHT75 de type Sensirion (cf. figure 2.5) pour le suivi de la température et l'humidité relative (HR). Ces capteurs ont été reliés directement à une centrale d'acquisition qui permet d'enregistrer, durant la période de mesure, la température et l'HR à l'intérieur des enceintes de mesure avec un intervalles de temps réguliers de 5 mn. Les données de mesure sont présentés dans le tableau 2.1.

Température (°)	HR (%)
22 ± 0.3	40 ± 1.8

TABLE 2.1 – Valeurs de la température et de l'HR pendant les mesures

- Afin d'éviter la contamination des enceintes, le banc expérimental (cf. figure 2.1) est posé dans une cellule de 9 m^3 . Cette dernière est maintenue à très faible concentration de polluant en injectant en continu de l'air propre à faible débit (ambiance en surpression).

2.1. Présentation du dispositif expérimental



FIGURE 2.5 – Centrale d'acquisition et capteur SHT75 de type Sensirion



FIGURE 2.6 – Photographie de la cellule utilisée dans cette étude

- Les expériences ont été toutes effectuées avec de la poudre industriel d'*ORGASOL* avec des tailles allant de $0.5 \mu\text{m}$ à $> 20 \mu\text{m}$ (cf. figure 2.7). Celles-ci sont représentatives des particules habituellement rencontrées à l'intérieur des bâtiments et qui sont susceptibles de présenter un danger pour la santé.

2.1.1 Revêtements du sol

L'interprétation des comportements des particules vis à vis la marche humaine, nécessite dans un premier temps l'évaluation de certains paramètres de la surface où elles

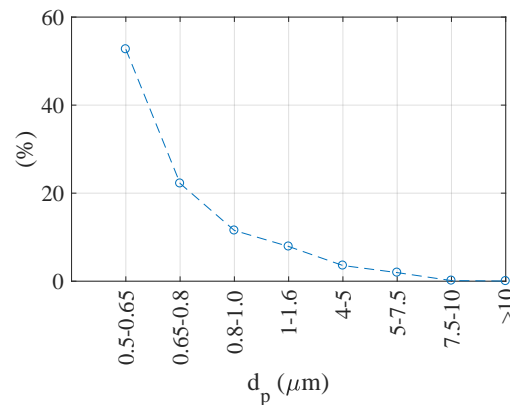


FIGURE 2.7 – Granulométrie de la poussière d'ORGASOL utilisée

sont déposées. Dans le présent travail, nous avons utilisé six types de revêtements largement utilisés dans les bâtiments : deux surfaces linoléum, une surface PCV adhésif semi rigide, une surface en vinyle semi rigide, du parquet en bois et du carrelage. Les revêtements ont des superficies identiques et ils couvrent toute la paroi inférieure de l'enceinte. Ces surfaces ont été choisies selon trois critères : la dureté, la rugosité et les comportements électrostatiques. Le premier paramètre est important au moment du premier impact du pied sur le sol. La génération des vibrations du sol, la profondeur de pénétration du pied et aussi de la particule dans la surface sont des paramètres influencés par ce critère. La rugosité de la surface influence largement l'écoulement de l'air généré par le pied au voisinage du sol et aussi la surface de contact entre la particule et la surface. Quant aux effets électrostatiques, ils jouent un rôle très important dans l'adhérence des particules aux surfaces.

2.1.2 Analyse de la rugosité des surfaces

Dans le domaine de l'aérodynamique, la rugosité de la surface stabilisent l'évolution du coefficient de friction ce qui engendre des pertes de charge qui diffèrent selon la qualité des surfaces en friction. Ce dernier paramètre correspond à l'énergie dissipée par le frottement du fluide. Les deux paramètres les plus utilisés pour introduire l'influence de la rugosité dans les expériences hydrodynamiques sont : la hauteur moyenne de la rugosité et l'espacement des éléments rugueux [70].

Dans cette étude, nous avons disposé des analyses de trois surfaces uniquement parmi

2.1. Présentation du dispositif expérimental

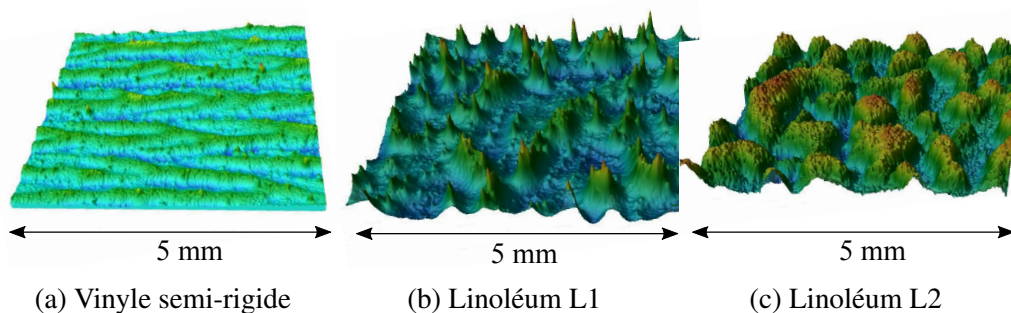


FIGURE 2.8 – Tracés tridimensionnelles des revêtements de sols utilisés

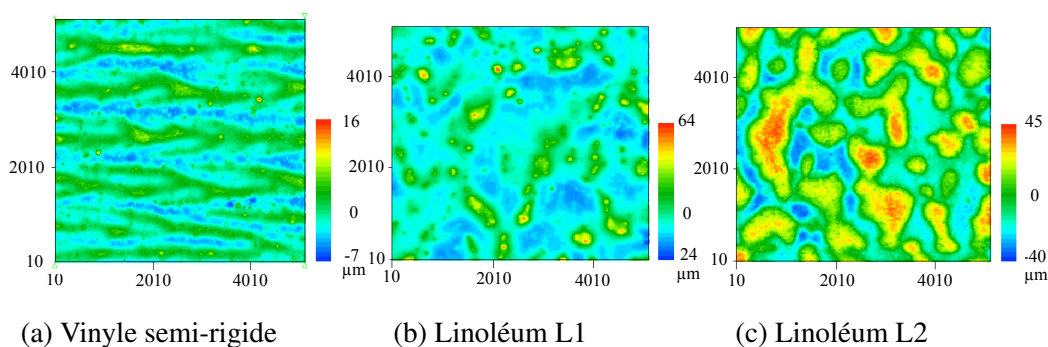


FIGURE 2.9 – Coupes de niveaux des revêtements de sols utilisés

les six utilisées, la surface en vinyle semi rigide et les deux surfaces en linoléum. Les analyses ont été effectuées pendant la thèse par la société Akilog. Deux types de cartographies ont été effectués :

- Des tracés tridimensionnels (cf. figure 2.8),
- Des représentations sous forme de coupe de niveau (cf. figure 2.9).

D'après le rapport d'Akilog, les relevés topographiques sont obtenus à l'aide d'un capteur de rugosité avec contact mesurant ponctuellement la surface et d'un système de moteurs pas à pas croisés assurant le déplacement suivant deux axes de l'échantillon. Les surfaces présentant une grande disparité en termes de topographie macroscopique, il a été réalisé une acquisition tridimensionnelle de $5,11 \times 5,11$ mm avec une résolution latérale de $10 \mu\text{m}$. Afin d'illustrer différents types de caractérisation d'état de surface, il a été calculé successivement sur chaque échantillon les différents paramètres d'ampli-

tude de rugosité correspondant à des critères macro géométriques compte tenu du grain de la surface.

2.2 Bilan de particules intérieure

Comme nous l'avons mentionné dans le premier chapitre, à l'intérieure d'un volume fermé, la concentration en particules dépend de plusieurs paramètres : l'échange avec le milieu extérieur par ventilation (mécanique ou naturelle) ou par infiltration, les sources de particules présentes à l'intérieure, le dépôt sur les différentes parois intérieures et finalement la remise en suspension des particules depuis les surfaces internes. Dans le cas d'un mélange homogène, c'est-à-dire une concentration interne uniforme (le gradient de concentration est nul suivant toutes les directions de l'espace) le bilan de particules intérieures peut être représenté en tout point du volume par l'équation 1.10.

Comme dans le cas de nos mesures nous n'avions pas de source interne de particules d'une part, et d'autre part la concentration extérieure est considérée négligeable, car les mesures ont été effectuées dans un local décontaminé, le bilan de particules 1.10 devient :

$$V \frac{dC_{in,i}}{dt} = r_i A_{RS} L_i - (a + k_i) V C_{in,i} \quad (2.1)$$

On rappelle que $C_{in,i}$ et L_i représentent les concentrations en particules i à l'intérieure du volume et sur la surface. Le coefficient $\lambda_{dec,i} = (a + k_i)$ qualifie la décroissance globale de la concentration que nous appelons *coefficient de décharge*. Cette décroissance est due principalement à deux phénomènes : le dépôt de particules sur les différentes parois intérieures de l'enceinte de mesure et l'évacuation des particules vers le milieu extérieur. En reprenant l'équation 2.1 et en négligeant le terme de remise en suspension on trouve :

$$\frac{dC_{in,i}}{dt} = -\lambda_{dec,i} C_{in,i} \quad (2.2)$$

si tout les paramètres de l'équation 2.2 sont constants (exceptée la concentration intérieure) la résolution est donnée par :

$$C_{in,i} = cste^{-\lambda_{dec,i}t} \quad (2.3)$$

La constante de la solution dépend des conditions initiales. Le coefficient de décharge $\lambda_{dec,i}$ peut être estimé expérimentalement en injectant des particules dans l'enceinte

2.2. Bilan de particules intérieure

et en suivant la décroissance de la concentration en particules à l'intérieure pendant un moment. Ainsi, le coefficient de décharge est le résultat d'ajustement de la courbe par une fonction exponentielle. Dans la suite, nous présentant en détails les démarches expérimentales pour estimer ce coefficient. Dans le tableau 2.2 nous représentons les différents cas étudiés.

Surface du sol	Échelle de dureté	paramètre de rugosité (R_t)
Carrelage	8 Mohs	0.1
Parquet en bois	3.00 Brinell	10.2
PVC	96.6 Shore D	102.3
Vinyle	51.0 Shore D	23.3
Linoléom (L1)	68.0 Shore A	88.7
Linoléum (L2)	78.0 Shore A	27.6

TABLE 2.2 – Échelle de dureté et valeurs du paramètre de rugosité des différents revêtements du sol utilisées

2.2.1 Estimation des coefficients de décharge

La démarche expérimentale suivie pour estimer les coefficients de décharge des différents cas étudiés est semblable à celle utilisée par Marc Abadie [1]. Les différentes étapes de cette démarche sont les suivants :

- a. Mis en place d'un revêtement du sol,
- b. Nettoyage de la chambre par soufflage d'air comprimé et par aspiration,
- c. Fermeture de l'enceinte, la mise en marche des différents appareils de mesure et ensuite la mise en marche des agitateurs afin d'homogénéiser la concentration intérieure. Nous passons à l'étape suivante une fois la concentration intérieure enregistrée par les compteurs devient constante,
- d. Injection des particules d'Orgasol dans l'enceinte à l'aide du générateur TOPAS. Nous évitant toujours d'atteindre des concentrations élevées (2×10^6 #/l) qui risquent de saturer les compteurs de particules.

Chapitre2. ÉTUDE EXPERIMENTALE DE LA RmS DES PARTICULES

- e. Nous continuons l'enregistrement de la variation des concentrations intérieures pendant environs 20 mn avec un pas de temps de 6 s,

La mesure de la concentration a été effectuée dans quatre points différents à l'intérieure de l'enceinte, ensuite nous avons moyenné les résultats issus de chaque compteur. Le suivie de la concentration en particules se fait grâce au logiciel Dustmonitor installé sous un ordinateur. En moyenne, 20 mesures ont été effectuées pour chaque cas étudié.

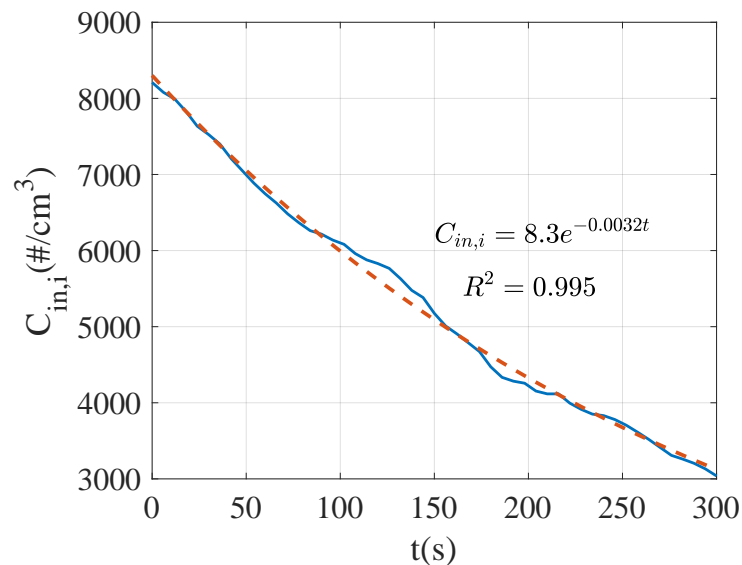


FIGURE 2.10 – Décroissance de la concentration de particules en fonction du temps à l'intérieure de l'enceinte après l'injection

Dans la figure 2.10, nous présentons, pour un cas donné, une partie de la décroissance de la concentration des particules de différentes tailles à l'intérieure de l'enceinte après l'injection en fonction du temps. Les courbes montrent de façon qualitative le phénomène de décharge dans l'enceinte pour des particules de différent diamètres.

Dans la figure 2.11 nous présentons les coefficients de décharge moyens pour les différents cas étudiés. D'après la figure, nous constatons que pour des particules de diamètres allant de $0.5 \mu m$ à $1.6 \mu m$ et pour tous les cas étudiés, les coefficients de décharge moyens sont identiques. Pour des particules de tailles supérieures à $4 \mu m$, les coefficients de décharge augmentent en fonction de la taille.

En comparant les résultats des différents revêtements nous remarquons plusieurs points :

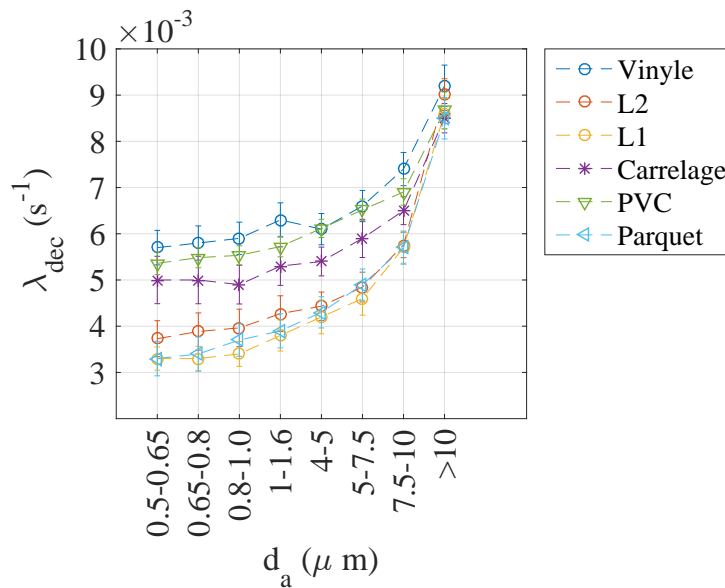


FIGURE 2.11 – Variation des coefficients de décharge pour les différents cas étudiés en fonction des diamètres des particules. Les barres des erreurs sont les Écarts Types de la Moyenne

- Premièrement les profils dégagent des tendances bien marquées et très similaires (les lois de comportement semblent assez « propres »).
- Chacune des courbes présente une première phase durant laquelle la variation du dépôt est faible en fonction de la taille des particules, puis à partir d'un certain seuil, la variation du coefficient de décharge s'accélère de façon similaire.
- Pour des particules de diamètres allant $0.5 \mu\text{m}$ à $10 \mu\text{m}$ les variations des coefficients de décharge se divisent en deux groupes : le groupe avec un grand pouvoir attractif qui contient la surface en PCV, le Vinyle et le carrelage et un groupe avec un pouvoir attractif relativement faible et qui contient les deux surfaces en linoléum et le parquet en bois.
- Pour les particules de diamètres supérieurs à $10 \mu\text{m}$ nous constatons que les coefficients de décharge ne présentent pas une grande différence entre les différents revêtements (convergence des valeurs au niveau de la partie haute des profils respectifs). Ce comportement peut être expliqué par le fait que pour des grosses particules, la force de gravité devient importante et homogène pour tous les types

de surfaces, gommant la ségrégation des profils, qui existait en amont de $10 \mu\text{m}$.

Nous n'avons pas représenté les résultats des particules de tailles $1.6 - 3 \mu\text{m}$ car celles-ci présentent un comportement particulier, et cela est probablement dû à un problème technique au niveau des compteurs de particules. En effet, comme les compteurs Grimm utilisent deux lasers différents en fonction des tailles des particules, le basculement d'un laser à l'autre fait que les particules dans cette gamme ne sont pas quantifiées de façon optimale. Nous avons signalé ce problème à la société INTERTEK qui s'est occupée de l'étalonnage de nos compteurs, cependant le problème n'a pas été résolu.

Les coefficients de décharge ainsi trouvés vont être injectés dans l'équation 2.1 pour l'estimation des sources de remise en suspension.

2.2.2 Résultats de la remise en suspension

L'étude de la remise en suspension a été effectuée dans le même banc expérimental utilisé pour l'estimation des coefficients de décharge. Nous avons rajouté un autre composante à l'intérieure des enceintes, il s'agit du simulateur mécanique du pas humain. Uniquement le mouvement descendant du pas humain pendant la marche a été pris en compte. Le simulateur mécanique utilisé à cette fin est une plaque rectangulaire et rigide de dimensions $8 \times 22 \text{ cm}$ qui effectue un mouvement de rotation vers le bas sous son propre poids avec un angle de départ de 20° .

2.2.2.1 Ensemencement du sol en particules

Différents tests ont été effectués où nous avons essayé d'ensemencer la surface du sol en particules en utilisant le générateur de particules, cependant les résultats n'ont pas été satisfaisants. Ainsi, une méthode particulière a été développée et qui consiste à ensemençer « localement » une partie élémentaire de la surface étudiée. Nous avons utilisé une enceinte en bois de taille $10 \times 30 \times 40 \text{ cm}$ avec la partie inférieure ouverte (cf. figure 2.12). L'enceinte est équipée d'une ouverture sur la paroi supérieure qui permet d'injecter les particules et une autre ouverture sur une paroi latérale pour l'évacuation. Une attention particulière a été apporté à la mise à la terre électrique de la boîte, ce qui permet de supposer que la plupart des particules injectées se déposent sur le sol par sédimentation, gardant ainsi sa distribution de taille inchangée [37].

La démarche réalisée est la suivante : toutes les expériences ont été commencées sur

2.2. Bilan de particules intérieure

une base propre, donc, avant chaque mesure nous commençons par nettoyer la boîte, la plaque et l'enceinte avec un aspirateur. Ensuite, nous mettons la boîte exactement à l'endroit qu'on veut charger en particules (la surface en dessous de la plaque) et nous introduisons le tuyau du générateur. Nous mettons en marche le générateur de particules avec un débit constant pendant 10 s. Nous enlevons les tuyaux du générateur et nous fermons toutes les ouvertures. Nous laissons la boîte sur place pendant une durée de 3 heures, pour que les particules injectées se déposent sur les différentes parois intérieures et notamment sur le sol. Nous enlevons les boîtes avec précaution et ensuite nous enchainons sur l'expérience de remise en suspension.

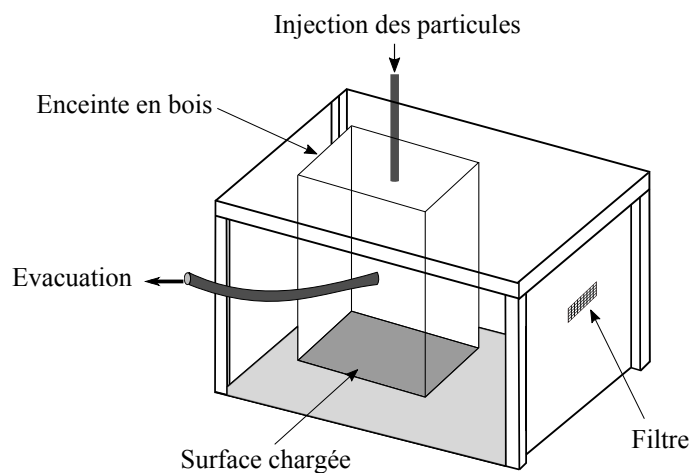


FIGURE 2.12 – Schéma montrant la méthode utilisée pour charger le sol en particules

2.2.2.2 Expérience de remise en suspension

La démarche expérimentale suivie pour estimer les intensités de source pour un cas donné est la suivante :

- Mise en place du simulateur de sorte que la plaque forme un angle égale à 20° avec le sol,
- Mise en marche de l'agitateur, la sonde de température et d'HR et les compteurs de particules,
- Nous commençons l'enregistrement, et une fois que la concentration est constante nous laissons la plaque tomber sous son propre poids,

Chapitre2. ÉTUDE EXPERIMENTALE DE LA RmS DES PARTICULES

- d. Nous continuons l'enregistrement après la chute de la plaque pendant 10 minutes. L'enregistrement est effectué avec un pas de temps de 6 secondes pendant toute l'étude.

Pour chaque surface étudiée, nous avons répété 20 fois la mesure, nous avons ensuite calculé les moyennes des intensités moyennes des sources de remise en suspension. Nous présentons dans la figure 2.13 l'évolution de la concentration en particules pour quelques tailles à l'intérieure de l'enceinte d'essais avant et après le mouvement de la plaque pour un cas d'étude donné. Les valeurs des concentrations présentées sont normalisées par rapport aux concentrations initiales $C_{in,i}(0)$ à l'intérieure de la boîte.

$$C_{in,i}^*(t) = C_{in,i}(t) - C_{in,i}(0) \quad (2.4)$$

Les courbes montrent globalement trois phases différentes : avant le mouvement de la plaque les concentrations des différentes gammes sont constantes et égales à 0 #/m³. Après le mouvement de la plaque, les concentrations des différentes gammes augmentent fortement de plusieurs ordres de grandeurs. Cette augmentation est due au nuage de particules remises en suspension après l'impact de la plaque sur le sol. Ce nuage de particules va ensuite se disperser dans toute l'enceinte grâce au brassage assuré par les agitateurs. Ensuite, les valeurs des concentrations internes restent constantes pendant une période donnée. Cela indique que le mélange à l'intérieure de l'enceinte est homogène. À ce stade, nous pouvons appliquer l'équation 1.10. Après cette phase nous enregistrons une décroissance exponentielle des concentrations. Pour un cas donné et comme nous l'avons constaté dans la section 2.2.1, la décroissance dépend bien évidemment de la taille des particules.

2.2.2.3 Estimation des sources de remise en suspension

Dans cette partie de notre travail nous avons estimé les intensités des sources de remise en suspension des particules par un pas humain représentées par le terme $r_i AL_i$ dans l'équation du bilan massique 2.1. L'indice i indique la gamme de taille des particules. Nous nous sommes basés sur les mêmes hypothèses que pour l'estimation du coefficient de décharge.

Premièrement on considère le terme de remise en suspension comme une source de particule et on le note S_i . L'équation 2.1 s'écrit donc :

$$V \frac{dC_{in,i}(t)}{dt} = S_i(t) - \lambda_{dec} V C_{in,i}(t) \quad (2.5)$$

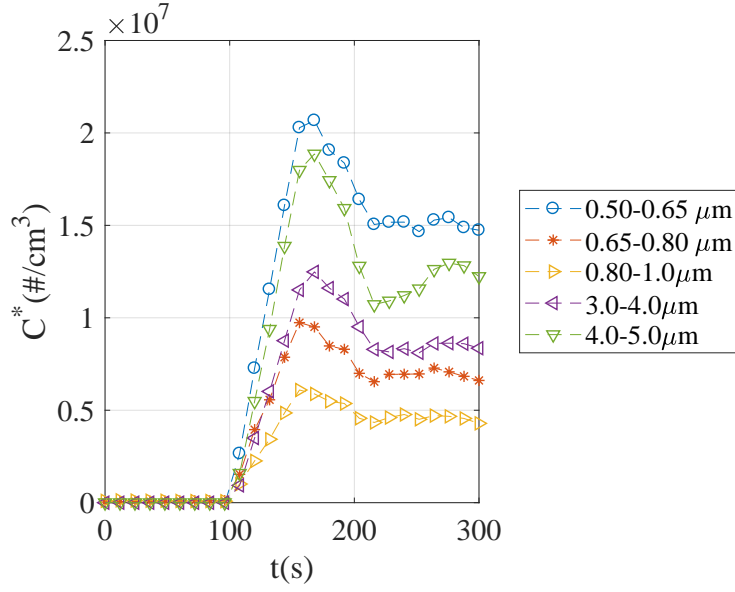


FIGURE 2.13 – Évolution en fonction du temps de la concentration en particules avant et après le mouvement de la plaque pour quelques diamètres de particules. Cas référence

La source de particules par remise en suspension est donc donnée par :

$$S_i(t) = V \frac{dC_{in,i}(t)}{dt} + V \lambda_{dec} C_{in,i}(t) \quad (2.6)$$

Les valeurs des termes source sont estimées en calculons la moyenne en temps des deux termes à droite de l'équation. Dans un premier temps nous intégrons l'équation 2.6 sur une période T_{RS} . Cette période représente le temps entre le début de l'activité (le mouvement de la plaque) et le temps où la concentration intérieure est uniforme.

$$\int_0^{T_{RS}} S_i(t) dt = \int_0^{T_{RS}} V \frac{dC_{in,i}(t)}{dt} dt + \int_0^{T_{RS}} V \lambda_{dec} C_{in,i}(t) dt \quad (2.7)$$

En divisant les termes de l'équation 2.7 par T_{RS} :

$$\frac{1}{T_{RS}} \int_0^{T_{RS}} S_i(t) dt = V \left[\frac{1}{T_{RS}} \int_0^{T_{RS}} \frac{dC_{in,i}(t)}{dt} dt + \frac{\lambda_{dec}}{T_{RS}} \int_0^{T_{RS}} C_{in,i}(t) dt \right] \quad (2.8)$$

La valeur de la source moyenne pour une particule de taille i est donnée donc par l'équation :

$$\bar{S}_i = V \left[\frac{C_{in,i}(T_{RS}) - C_{in,i}(0)}{T_{RS}} + \lambda_{dec} \overline{C_{in,i}} \right] \quad (2.9)$$

La figure 2.14 présente les termes sources moyens de l'équation 2.6 pour les différents

Chapitre2. ÉTUDE EXPERIMENTALE DE LA RmS DES PARTICULES

cas étudiés et pour différentes tailles de particules. Nous constatons que pour les différents types de revêtement, la valeur du terme source est maximale pour les particules de taille $0.5 - 0.65 \mu\text{m}$. Ensuite nous enregistrons une diminution des termes source jusqu'au pallier horizontal situé au voisinage de la valeur d_p valant $1 - 1,6 \mu\text{m}$, avant de présenter un nouveau pic des valeurs de S pour la valeur de d_p valant $5 - 7,5 \mu\text{m}$. Pour des d_p dépassant $7,5 \mu\text{m}$; nous constatons une diminution significative du terme source.

En examinant les comportements des différents revêtements nous pouvons faire les constatations suivantes : pour des particules de diamètres inférieures à $10 \mu\text{m}$, nous distinguons quatre groupes dont les pouvoirs émissifs vis-à-vis des particules, se superposent en amplitude. Dans l'ordre décroissant, nous listons, un premier groupe constitué du carrelage et du parquet en bois, dans le deuxième groupe la surfaces en PVC rigide et le vinyle et finalement dans les deux derniers groupes nous avons les surfaces en linoléum L1 et L2 respectivement. Ce résultat a mis en évidence de façon claire, l'influence de la dureté du revêtement du sol sur la remise en suspension des particules. Nous constatons également qu'une surface avec un pouvoir attractif élevé n'est pas forcément la moins émettrice de particules après l'impact du pied.

Nous pouvons dire, que pour une meilleure qualité de l'air au sein d'une ambiance, le revêtement au plancher doit à l'idéal, conjuguer une forte attractivité et une faible émissivité lors de l'impact d'un pas.

En comparant les deux surfaces en linoléum, nous constatons que la rugosité de la surface n'a pas une grande influence sur la remise en suspension des particules.

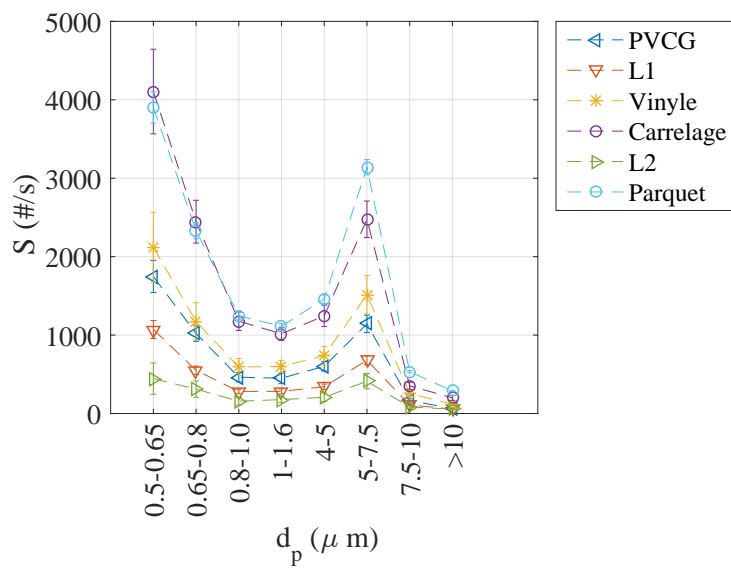


FIGURE 2.14 – Variation des sources de particules remises en suspension par le mouvement de la plaque dans les différents cas étudiés. Les barres d'erreur sont les Écarts Types de la Moyenne

2.3 Conclusion du chapitre

Dans cette partie de notre travail le phénomène de la remise en suspension des particules due la marche humaine a été expérimentalement étudiée. Le mouvement de rotation libre d'une plaque plane, rectangulaire et rigide a été utilisé pour simuler le mouvement descendant du pas humain pendant la marche. L'étude a été effectuée dans une enceinte ventilée de taille réduite. L'hypothèse principale de cette démarche est de considérer que le mélange à l'intérieure de l'enceinte est homogène. Ainsi, le bilan de conservation de masse a été utilisé afin d'estimer les coefficients de décharge pour chaque cas étudié. Différents revêtements de sol standards du bâtiment ont été testés.

La variation du coefficient de décharge en fonction des tailles des particules a présenté des profils ayant des tendances bien marquées et très similaires permettant ainsi une classification aisée des types de revêtement vis-à-vis de leur impact sur la qualité de l'air intérieur.

Toujours sous l'hypothèse d'un mélange homogène, nous avons également réussi à atteindre une classification des revêtements étudiés vis-à-vis de leur pouvoir émissif. L'idée principale de cette partie est de considérer la remise en suspension des particules par le simulateur mécanique comme un terme source dans l'équation de bilan. Nous avons trouvé en première place les surfaces dures comme le carrelage et le parquet en bois, puis viennent les surfaces semi-rigides telles que le PVC et le vinyle, et enfin arrivent les surfaces relativement molles comme le linoléum. L'étude a aussi mis en évidence que l'influence de la rugosité des surfaces est marginale.

Chapitre 3

PRESENTATION DES TECHNIQUES DE MESURE EXPERIMENTALES DE LA VITESSE

Dans le domaine de la remise en suspension des particules par la marche humaine, la technique de mesure qui a été utilisée pour mesurer la vitesse de l'écoulement générée par le mouvement du pas humain est la Vélocimétrie par Image de Particules (PIV). Cette technique a été choisie par rapport à son caractère non intrusif [61] et aussi car elle permet de mesurer deux composantes de la vitesse (parfois trois avec un montage spécial) sur toute une fenêtre de l'écoulement. Cette technique permet donc de visualiser le développement de l'écoulement généré par le pas pendant la marche humaine. Dans notre travail, en plus de la technique PIV, deux autres techniques de mesure ont été sélectionnées pour effectuer ce travail : La Vélocimétrie Laser Doppler et l'Anémométrie à Fil Chaud.

Dans ce chapitre nous présentons brièvement les techniques de mesure de la vitesse utilisées au cours de nos travaux de thèse. La première section du chapitre est consacrée à la présentation de la technique de Vélocimétrie par Image de Particules. Nous présentons dans la deuxième section la technique de Vélocimétrie Laser Doppler où nous mettons l'accent sur l'Anémométrie à Franges qui est le montage utilisée pour nos mesures. La troisième section est dédiée à la technique d'Anémométrie à Fil Chaud. Nous exposons en détails le principe du montage à Température Constante CTA utilisée. Nous terminons le chapitre par une discussion sur les différents problèmes de mesure rencontrés en mesurant proche d'une surface et des différents techniques proposées pour détourner

ces problèmes.

3.1 Vélocimétrie par Image de Particules

3.1.1 Principe de la technique

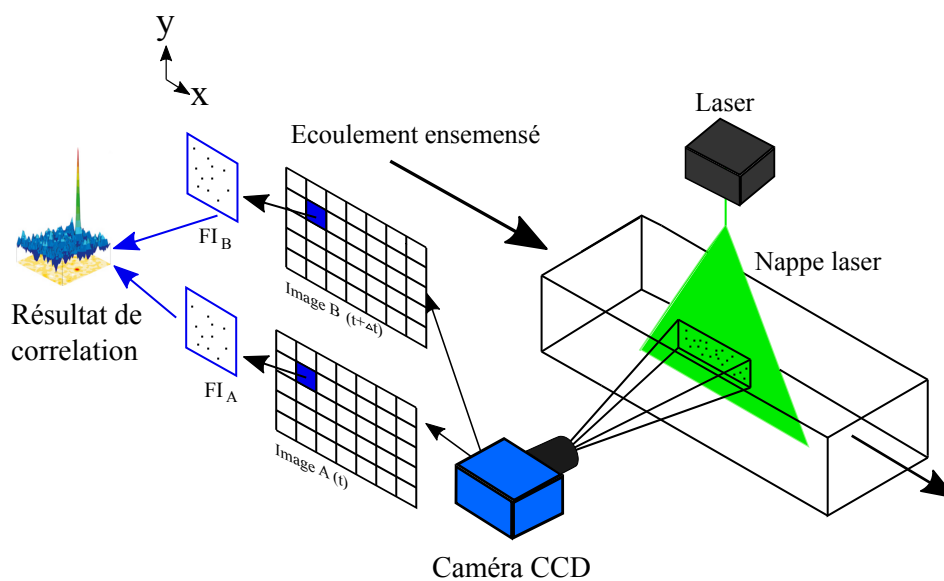


FIGURE 3.1 – Principe de la technique PIV [5]

L'idée de base de la technique sous sa forme actuelle est d'ensemencer un écoulement fluide par des microparticules (traceurs) avec une concentration raisonnable et une distribution uniforme. La partie du fluide qu'on veut étudier est éclairée par une nappe laser d'une épaisseur de l'ordre du millimètre. Grâce à des caméras CCD on enregistre deux images dans deux temps différents et très proches. Dans le cas d'un laser à pulse, les deux images 1 et 2 sont prises au moment de l'envoi de deux pulses successifs. Cela s'effectue automatiquement grâce à des boîtes de synchronisation. Après cette étape, on obtient deux images de la zone étudiée, qui contiennent les positions des particules dans

3.1. Vélométrie par Image de Particules

deux temps successifs. En théorie, si on compare les deux positions successifs d'une particule dans les deux images et en connaissant le délai Δt entre les deux images et avec l'hypothèse que pendant ce temps Δt le mouvement de la particule est rectiligne uniforme, La vitesse de la particule est tout simplement :

$$U = \frac{d}{\Delta t} \quad (3.1)$$

Avec d la distance parcourue par la particule pendant le temps Δt . Dans la pratique, l'obtention d'un champs de vitesse par la technique PIV est un peu compliqué car les fenêtres analysées contiennent un nombre important de particules. En comparant les deux images, et pour chaque particules plusieurs probabilité sont possibles. A ce stage nous avons recours à des techniques statistiques. En fait le traitement classique des deux images successives et le suivant :

- On applique un maillage aux images par découpage en un certain nombre de fenêtres carrées et de tailles identiques appelée fenêtre d'interrogations FI . Chaque FI_A dans l'image A a une fenêtre correspondante FI_B dans l'image B .
- On réalise une corrélation entre toutes les FI correspondantes. Les résultats des corrélations pour toutes les déplacements possibles entre deux FI est une carte qui contient un pic dont la position par rapport au centre correspond au déplacement global le plus probable des particules d'une FI . Cette démarche est illustré dans la figure 3.1.

La position du pic principal par rapport au centre de l'imagerie correspond au déplacement d des particules entre t et $t + \Delta t$, ce qui permet d'en déduire la vitesse $V = d/\Delta t$. Pour l'inter-corrélation, il peut s'avérer utile de décaler les imagerie mises en correspondance pour tenir compte de la vitesse moyenne et donc augmenter la précision.

Un bon compromis doit être fait quand on choisit le délai Δt car c'est un paramètre très important. Premièrement, il faut que le déplacement des particules entre les deux images d'une même paire soit suffisamment important, pour que l'incertitude sur la position du pic de corrélation impacte peu le calcul de ce déplacement. Ceci sera aussi fonction de la taille des FI . En règle générale, le Δt est fixé de manière à ce que le déplacement des particules n'excède pas le quart de la taille de la FI pour que le résultat de la corrélation représente bien le déplacement. Par ailleurs, le Δt doit être choisi assez

Chapitre3. PRESENTATION DES TECHNIQUES DE MESURE EXPERIMENTALES DE LA VITESSE

petit afin d'éviter que les particules sortent de la nappe du fait de leur composante de vitesse hors plan. Malgré tout, il est préférable que l'écoulement étudié soit fortement 2D, et que cette composante hors plan soit faible [62].

Les études consacrées à l'étude par la technique PIV de la marche humaine dans le domaine de la remise en suspension des particules sont très peu nombreuses en comparaison de l'abondante littérature consacrée à l'application de cette technique dans les différents domaines de la mécanique des fluides.

3.2 Vélocimétrie Laser Doppler

La Vélocimétrie Laser Doppler en anglais Laser Doppler Velocimetry LDV ou encore Laser Doppler Anemometry LDA est une technique optique non intrusive pour mesurer de la vitesse instantanée en un point d'un écoulement basée sur le principe de l'effet Doppler. Cette technique constitue un moyen robuste pour l'investigation des écoulements dans plusieurs domaines de la mécanique des fluides. Cependant, à l'heure actuelle il n'existe aucun travail dans la littérature qui étudie l'écoulement généré par le pas humain en utilisant la LDV.

3.2.1 Principe de la technique

Dans la configuration classique de la technique LDV on utilise un seul faisceau laser. Les lasers sont utilisés comme sources de lumière pour plusieurs raisons. En plus de leurs fortes puissance, les faisceaux laser émettent des raies avec une très faible dispersion spectrale et il ont de très faibles divergences [7]. La partie du fluide dont on veut mesurer la vitesse est illuminée par le faisceau laser dont on connaît la fréquence. Comme le fluide contient des micros-particules traceurs, ces dernières vont diffuser la lumière reçue avec une fréquence légèrement différente, "c'est l'effet Doppler". Le résultat est une relation linéaire entre la vitesse de la particule, la fréquence du laser et la fréquence émise par la particule.

$$f_p = f_0 \left\{ 1 - \frac{U_p(r_0 - r_d n)}{c} \right\}. \quad (3.2)$$

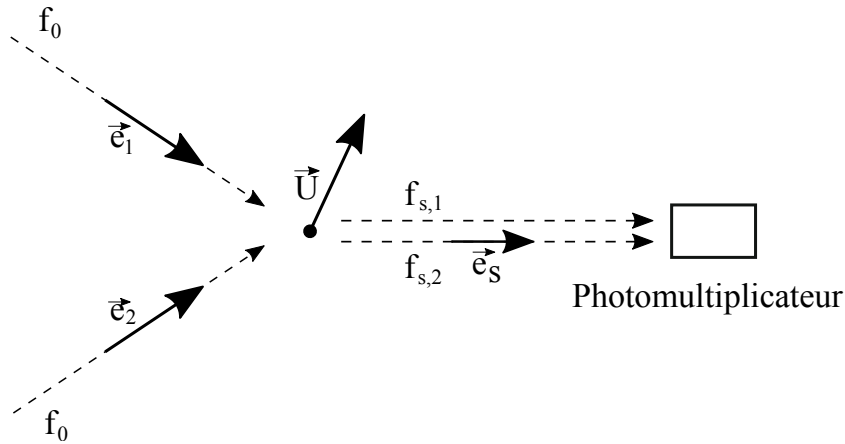


FIGURE 3.2 – Montage LDV à franges

Avec U_p , la vitesse de la particule ensemencée dans le fluide qui joue le rôle d'une particule-traceur, f_p et f_0 sont les fréquences du laser et celle émise par la particule respectivement, r_0 et r_d , sont les vecteurs unitaires le long du faisceau laser et le long de la direction d'observation respectivement, n est l'indice de réfraction du milieu, c est la vitesse de la lumière dans le milieu entourant la particule. La LDV est donc une technique de mesure indirecte de la vitesse d'un écoulement car elle mesure la vitesse des particules ensemencées avec l'hypothèse que ces particules suivent correctement l'écoulement (cf. section précédente). L'inconvénient de cette technique est l'élargissement instrumental : historiquement sa faisabilité fut démontrée, mais elle n'a eu aucun développement [7].

Dans la pratique, Une autre configuration de la technique LDV consiste à utiliser deux faisceaux laser. Les deux lasers sont obtenus par la division d'un seul laser pour avoir une cohérence entre les deux. Ils existent plusieurs configurations qui font partie de cette catégorie [7], dans notre étude le vélocimètre mis en place est de type "à franges" qui est basé sur le modèle de franges d'interférences proposé par Rudd [89]. Dans ce modèle, la mesure de la vitesse n'est pas basée sur le décalage entre les fréquences émises par le laser et par la particule, mais plutôt sur les fréquences émises par la particule traversant un réseau de franges. Dans la suite, nous présentons le principe de la Vélométrie à Franges.

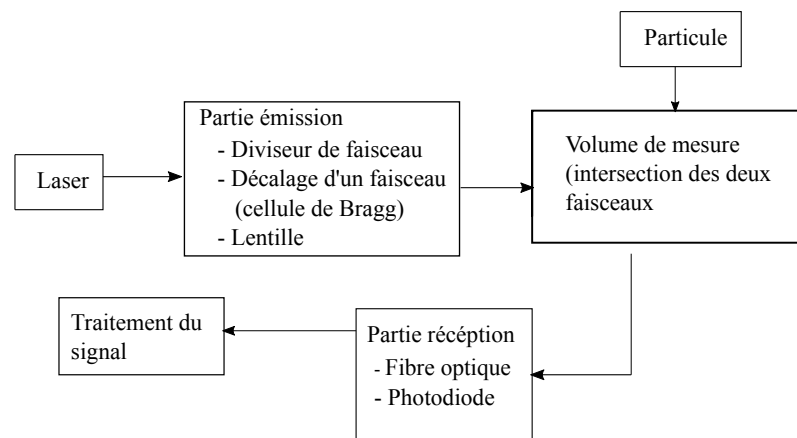


FIGURE 3.3 – Les différents parties d’un Vélocimètre Laser Doppler

3.2.2 Vélocimétrie à Franges

Le principe de ce montage est le suivant : tout d’abord le faisceaux laser est créé, ce dernier est divisé en deux faisceaux au niveau de la partie *émission*. Ces deux faisceaux sont parallèles, de même intensité et de polarisation linéaire de même direction. Un système optique de focalisation (lentilles ou objectif) va permettre de faire croiser les deux faisceaux. L’intersection de ces deux faisceaux qui est appelé aussi volume de mesure, contient un réseau de franges. Ce réseau est composé de plusieurs plans parallèles, équidistants et alternativement noirs et brillant : ces plans sont parallèles à la bissectrice intérieure de l’angle entre les deux faisceaux et perpendiculaires au plan formé par ces faisceaux. Le réseau de franges ainsi crée est espacé de D appelés interfranges.

$$D = \frac{\lambda_e}{2n \sin(\frac{\theta_n}{2})} \quad (3.3)$$

avec λ_e la longueur d’onde l’émission du laser dans le vide ; n , l’indice du milieu où se croisent les faisceaux, θ_n , l’angle de séparation des deux faisceaux du laser dans le milieu d’indice n . Une particule traceur traversant cette zone d’interférence va croiser alternativement des franges sombres et brillantes et donc, elle va envoyer des impulsions de lumière de façon périodique et avec une fréquence donnée en passant d’une frange à l’autre. La composante de la vitesse de la particule perpendiculaire aux franges est proportionnelle à cette fréquence.

3.3. Ensemencement dans les techniques de Vélométrie laser

Afin de déterminer le signe de la vitesse on utilise le principe de défilement des franges [6]. Ce dernier est occasionné par le décalage en fréquence d'un laser par rapport à l'autre. Le décalage est effectué dans les cellules de Bragg. C'est un modulateur acousto-optique (MAO) qui utilise l'effet acousto-optique pour changer la fréquence de la lumière. En changeant la fréquence d'un faisceau on crée un défilement de franges avec une vitesse v_d . La vitesse d'une particule en mouvement dans ce réseau de franges en défilement, s'ajoutera ou se retranchera de la vitesse v_d . De cette façon nous pouvons connaître le signe de la vitesse de la particule.

La partie réception est composée d'un système optique qui collecte le flux diffusé par les particules traversant le volume de mesure et qui concentre ce flux sur le récepteur. Les signaux électriques issus de la partie réception entrent dans une unité de traitement du signal [66].

3.3 Ensemencement dans les techniques de Vélométrie laser

Le choix des particules traceurs pour les mesures par Vélométrie Laser est conditionné par leur capacité à suivre parfaitement l'écoulement fluide. De cette manière, les particules seront capables à bien représenter l'écoulement. Cette condition est assurée si le nombre de Stokes qui représente l'apport entre l'énergie cinétique de la particule et l'énergie dissipé par frottement avec le fluide, est très inférieur à 1. C'est à dire l'énergie cinétique de la particule doit être négligeable devant l'énergie dissipé par frottement. Le nombre de Stokes est donné par la relation suivante :

$$St = \frac{\tau_p}{\tau_f} \quad (3.4)$$

avec τ_p , le temps caractéristique de la particules et τ_f , le temps caractéristique du fluide.

Une autre condition à prendre en compte est la capacité des particulesensemencées à rediffuser (diffusion de Mie) la lumière du laser [83]. Souvent, des grosses particules, rediffusent mieux les rayons laser, cependant, cela ne va pas assurer la première condition. Donc un compromis doit être fait entre ces deux conditions.

Chapitre3. PRESENTATION DES TECHNIQUES DE MESURE EXPERIMENTALES DE LA VITESSE

Ces particules peuvent être de différents types et tailles (bulles d'air, particules solides, fumée d'huile ...) et leurs choix dépend de l'étude, de l'écoulement et bien d'autres paramètres. Dans l'application de la technique PIV dans le cas de l'écoulement d'air, le Laskin Nozzle Generators et la fumée de l'huile sont les plus utilisés. En effet, cela est dû au fait qu'elle respecte les conditions citées précédemment d'une part, et d'autre part ne sont pas toxiques et ne changent pas de formes dans différentes conditions [83].

3.4 Anémométrie à Fils Chaud

Malgré les progrès réalisés récemment dans les deux techniques de Vélocimétrie Laser PIV et LDV, la technique d'Anémométrie à Fil Chaud (HWA) reste le premier choix pour les mesures de turbulences pour de nombreux chercheurs [56]. Les raisons pour lesquelles cette technique prend l'avantage sont les suivantes : d'un côté le diamètre de la sonde du fil chaud relativement petit (de l'ordre du micromètre) permet de faire des mesures avec une excellente résolution spatiale. D'un autre côté, le temps caractéristique de la mise à l'équilibre de la température (inertie thermique) est très petit ; ce qui rend la réponse de la sonde très rapide, permettant ainsi de suivre des fluctuations turbulentes à haute fréquence.

3.4.1 Principe de la technique

L'Anémométrie à Fil Chaud (HWA) de l'anglais Hot Wire Anemometry, est une technique de mesure permettant de déterminer la vitesse instantanée en un point d'un fluide généralement un gaz [17]. Bien que son application expérimentale en tant que technique de mesure remonte au début du siècle dernier, son principe général a été étudié un peu plus avant Boussinesq en 1905 [57] ou même par Newton (1882).

Une sonde de mesure HWA est composée d'un fil métallique (tungstène, platine ou certains alliages) d'un diamètre de $0.5 - 10 \mu\text{m}$ et d'une longueur de $\sim 1 \text{ mm}$. Le fil de la sonde dont la résistance R_w dépend de sa température T_w [77] est chauffé par un courant électrique I par effet Joule à une température plus élevée que la température ambiante du fluide. Placé dans un écoulement fluide ayant une vitesse donnée U , le fil est refroidi par différents phénomènes d'échange thermique. Le bilan de puissance dans

3.4. Anémométrie à Fils Chaud

ce fil peut être écrit sous la forme suivante :

$$\frac{dP_e}{dt} = \dot{W} - \dot{Q} + I_{th} \quad (3.5)$$

Le premier terme à droite de l'équation 3.5 est la puissance apportée par effet Joule,

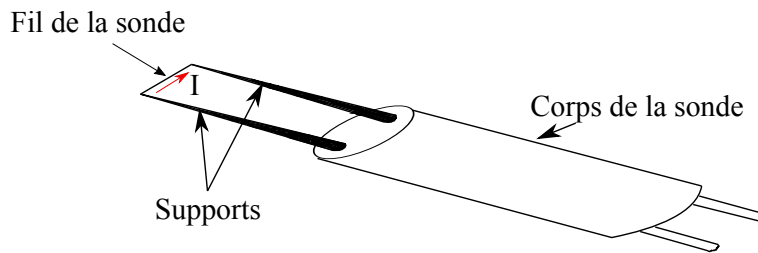


FIGURE 3.4 – Schématisation d'une sonde de mesure à Fil Chaud

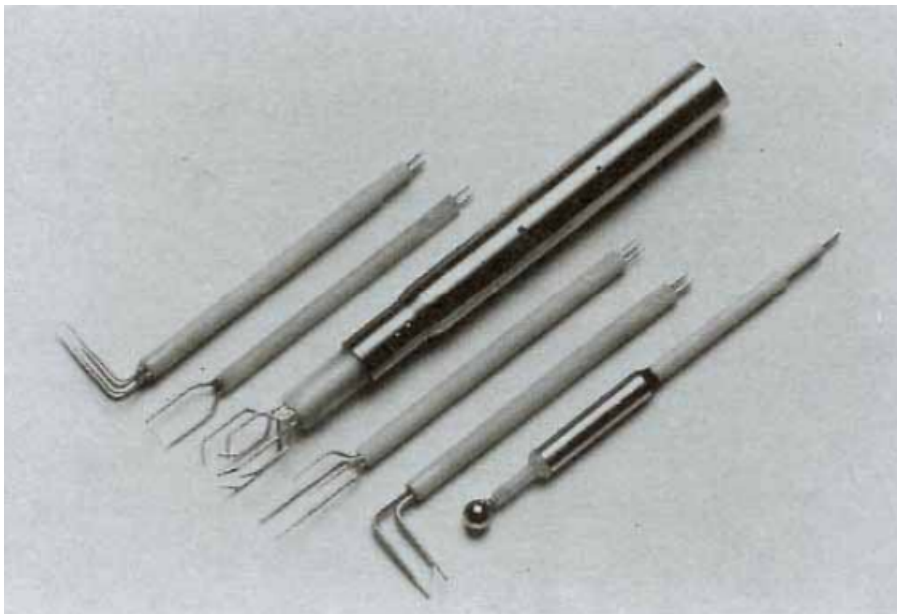


FIGURE 3.5 – Les différents types de sondes de mesure à Fil Chaud

elle est égale à $R_w I^2 > 0$, le deuxième terme à droite est la chaleur transférée depuis le fil vers le fluide alors que le troisième terme est l'inertie thermique qui représente le

Chapitre3. PRESENTATION DES TECHNIQUES DE MESURE EXPERIMENTALES DE LA VITESSE

stockage de l'énergie dans le fil.

Dans un cas général, l'échange de chaleur est la compétition de plusieurs effets : convection forcée, convection naturelle, rayonnement et conduction. Ces différents effets contribuent plus au moins à la dissipation de la chaleur depuis le fil. L'effet du rayonnement thermique est généralement négligeable (environ 10^{-4} fois la chaleur reçue par chauffage électrique [17]). Quant à la convection naturelle, elle est caractérisée par le nombre de Grashof Gr , elle agit généralement dans les cas de basses vitesses (faible convection forcée). D'après Collis et Williams [16], ce terme peut être négligé pour des sondes HWA avec un grand rapport de forme, si $Re > Gr^{1/3}$.

Finalement, on peut représenter les différents échanges thermiques entre le fil et l'environnement par l'équation suivante :

$$\dot{Q} = \overbrace{\pi l_f d_f h (T_f - T_g)}^I + \overbrace{\frac{\pi}{4} d_f^2 l_f \rho_f c_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} \right)}^{II} + \overbrace{\frac{\pi}{4} d_f^2 l_f k_f \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial X^2} \right)}^{III} \quad (3.6)$$

où l_f est la longueur du fil chaud, T_f la température du fil, T_g la température du support, d_f le diamètre du support, h le coefficient de transfert de chaleur, ρ_f la masse volumique du fil, c_f la chaleur spécifique du fil par unité de masse, et k_f conductivité thermique du fil. Les différents termes de l'équation 3.6 représentent :

- I : la convection forcée, la chaleur transportée par l'écoulement,
- II : l'effet de l'inertie thermique du fil, cette effet est négligeable si le fil est infiniment petit,
- III : la conduction au niveau des broches (la diffusion de chaleur vers le support) dues à l'écart de température entre le fil et le support.

La résolution de cette équation différentielle montre que la prise en compte du terme de conduction (III) fait intervenir une nouvelle longueur l_c appelée longueur froide correspondant à la portion du fil du support effectivement refroidie par celui-ci. Cette longueur l_c est proportionnelle au diamètre du fil d_f [42]. Plus le rapport l_f/l_c est grand, plus la distribution de température le long du fil peut être considérée comme uniforme. Il en résulte qu'en prenant un fil chaud ayant un rapport l_f/d_f suffisamment important ($l_f/d_f > 200$), le terme de conduction dans l'équation 3.6 peut être négligé. Dans ce

3.4. Anémométrie à Fils Chaud

cas l'effet dominant est la convection forcée, le bilan 3.5 s'écrit donc :

$$\frac{dE}{dt} = R_f I^2 - \pi l_f k_g (T_f - T_0) Nu \quad (3.7)$$

où k_g la conductivité du gaz, Nu est le nombre de Nusselt.

En supposant que la température du fil T_f est indépendante du temps, $\frac{dE}{dt} = 0$, donc la relation 3.7 donne :

$$R_w I^2 = \pi l k (T_w - T_0) Nu \quad (3.8)$$

Dans la relation 3.8, la vitesse de l'écoulement est représentée implicitement à travers le nombre de Nusselt.

Dans le cas général et après une analyse dimensionnelle ce nombre est une fonction de plusieurs paramètres [17] :

$$Nu = Nu(Re_d, Gr_d, Ma, Pr, \gamma_c, l_f/d_f, \phi, a_c) \quad (3.9)$$

avec :

Re_d : le nombre de Reynolds basé sur le diamètre du fil d ,

Gr_d : le nombre de Grashof basé sur le diamètre du fil,

Ma : le nombre de Mach,

Pr : le nombre de Prandtl du fluide,

γ_c : le rapport des chaleurs spécifiques du fluide,

l_f/d_f : le rapport de la longueur du fil à son diamètre de l'ordre de 100,

ϕ : l'angle définissant la direction de la vitesse par rapport à la normale au fil,

a_c le coefficient de surchauffe du fil, $a = \frac{T_f - T_0}{T_0}$.

En fonction des caractéristiques du fluide et de l'écoulement, ils existent des expressions empiriques pour la relation 3.9. Comme nous venons de le mentionner, dans la plupart des cas pratiques, en fluide incompressible, la loi d'échange correspond à une loi d'échange de convection forcée car ce dernier effet est prépondérant [18]. Donc, les

Chapitre3. PRESENTATION DES TECHNIQUES DE MESURE EXPERIMENTALES DE LA VITESSE

deux paramètres Gr_d et Ma n'interviennent pas dans l'équation 3.9. Dans ces conditions et pour un fluide à nombre de Prandtl $Pr \simeq 1$ (gaz où la diffusion visqueuse = diffusion thermique), avec l'hypothèse d'un écoulement 2D ($l \gg d$), King (1914) a proposé la loi :

$$Nu = 1 + \sqrt{2\pi Re_d} \quad (3.10)$$

Une autre loi largement utilisée et avec d'autres hypothèses est la loi Kramers (1946), qui fait intervenir le nombre de Prandtl Pr avec $0.01 > Re_d > 10000$ et $0.71 > Pr > 1000$.

$$Nu = 0.42Pr^{0.26} + 0.57Pr^{0.33}Re_d^{0.5} \quad (3.11)$$

Nous constatons d'après les relations 3.10 et 3.11 que la fonction Nu peut s'écrire de façon générale sous la forme :

$$Nu = A + B\sqrt{Re_d} \quad (3.12)$$

Les coefficients A et B ne sont pas des fonctions de la vitesse U . En reportant la relation 3.12 dans 3.8 nous obtenons la nouvelle équation du bilan en fonction de Re .

$$R_f I^2 = \pi l_f k (T_f - T_0) (A + B\sqrt{Re_d}) \quad (3.13)$$

D'autre part, et comme le nombre de Reynolds est proportionnel à la vitesse de l'écoulement et que la température est fonction de la résistance on peut réécrire l'équation précédente de cette façon :

$$R_f I = \sqrt{\pi l k R_f (R_f - R_0)} f(U) \quad (3.14)$$

avec $f(U) = (A' + B'\sqrt{U})$ et R_0 est une résistance de référence et elle correspond généralement à la résistance du fil en absence de chauffage.

Afin de relier les variations d'intensité dans le fil et les fluctuations de vitesse de l'écoulement, différents systèmes électroniques ont été mis au point. Deux types de montage sont opérationnels :

- **Anémométrie à Courant constante (CCA)** : dans cette technique on garde le courant I constant et on mesure la vitesse U donnée par la fluctuation de la température (résistance R_f). Cette technique a été très employée jusqu'aux années 1960. Cependant, la fluctuation de la température ne correspond pas à hypothèse

prise pour la mise en place des lois de transferts. Comme par exemple l'hypothèse de stationnarité qui est valable pour une température constante ou encore la conductivité thermique et la viscosité cinématique qui sont basées sur la température du film.

- **Anémométrie à Température Constante ATC** : dans cette technique on garde la résistance et par conséquent la température du fil T_f constante et on mesure la vitesse de l'écoulement U à travers les fluctuations du courant I . C'est cette deuxième technique que nous avons utilisé pendant nos travaux. Le principe de cette technique est détaillé dans la sous-section suivante.

3.4.2 Anémométrie à température constante

Cette stratégie de montage consiste à placer le fil de la sonde dans un pont de Wheatstone¹ maintenu en équilibre par un asservissement ; l'intensité du courant d'alimentation (ou de la différence de potentiel aux bornes du pont $\delta e = e_2 - e_1$) traduit les fluctuations de vitesse cherchées. Dans le montage CTA, les lois d'échange dépendent en général de la forme de la sonde HWA, c'est pourquoi elles sont le plus souvent déterminées par un étalonnage préalable effectué dans les mêmes conditions (température de l'environnement et caractéristiques du fluide étudié) que celles des mesures.

Le circuit est composé de deux résistances de valeurs connues R_1 et R_2 et une troisième résistance variable R_3 . Le pont est complété par la résistance R_f du fil de la sonde de mesure. L'avantage du circuit CTA est le fait que la résistance du fil R_f est une fonction de la température du fil T_f . L'équilibre du pont est vérifié quand $R_1/R_f = R_2/R_3$ ce qui donne une différence de voltage $\delta e = e_2 - e_1 = 0$. Le principe du circuit est le suivant : lorsque la température et la résistance du fil sont à un certain point de fonctionnement initial, la résistance variable R_f peut être ajustée pour équilibrer le pont. Si la vitesse U de l'écoulement où le fil est plongé augmente ou diminue, la température du fil change, tout comme sa résistance. A cet effet le pont se déséquilibre, ce qui entraîne une différence de tension entre les points 1 et 2. L'amplificateur détecte cette différence et ajuste le courant en introduisant une rétroaction (feedback) négative : cette rétroaction est effectuée en bouclant la mesure du pont sur l'alimentation du pont lui-même (voir le schéma 3.6). Ainsi, la température et par conséquent la résistance du fil est maintenue

1. Un instrument de mesure utilisé pour mesurer une résistance électrique inconnue par équilibrage de deux branches d'un circuit en pont, avec une branche contenant le composant inconnu.

Chapitre3. PRESENTATION DES TECHNIQUES DE MESURE EXPERIMENTALES DE LA VITESSE

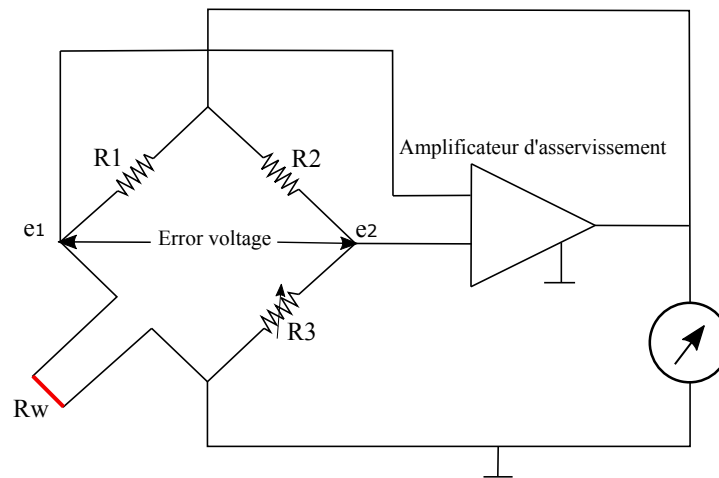


FIGURE 3.6 – Circuit de configuration de la technique CTA

constante. Ces changements de courant peuvent être mesurés et utilisés pour calculer la vitesse d'écoulement U .

En reprenant l'équation 3.14, le courant traversant le fil vérifie la relation :

$$I^2 = \left(1 - \frac{R_0}{R_f}\right)(A' + B'U^n) \quad (3.15)$$

L'un des points forts de la technique HWA est son excellente résolution temporelle. C'est pour cette raison qu'elle est choisie pour l'étude des fluctuations turbulentes [31]. Les points faibles de la technique sont les suivants :

- la non distinction entre les vitesses positives et négatives.
- dans la configuration la plus simple la limitation de la mesure à une seule composante de la vitesse. Ce problème peut être détourné par plusieurs techniques comme par exemple l'utilisation de deux ou trois sondes croisées pour la mesure de deux ou trois composantes de la vitesse respectivement (figure 3.5).
- son caractère intrusif. Malgré que la sonde de mesures à des faibles dimension, le support de la sonde peut dans quelques conditions perturber l'écoulement [19]. En pratique, ce problème est aussi détourné en choisissant des positions qui perturbe le moins possible l'écoulement étudié.

3.4. Anémométrie à Fils Chaud

- une sonde HWA est très fragile et des mauvaises manipulations peuvent l'endommager. Soulignons ici qu'en cas de changement de sonde pendant une campagne de mesure, une nouvelle calibration est nécessaire.

Malgré ces points faibles, l'utilisation de la technique du fil chaud dans les mêmes conditions de température, de composition du fluide, etc ... que lors de l'étalonnage permet des mesures pouvant être répétitives et par conséquent occasionnant un gain de temps considérable.

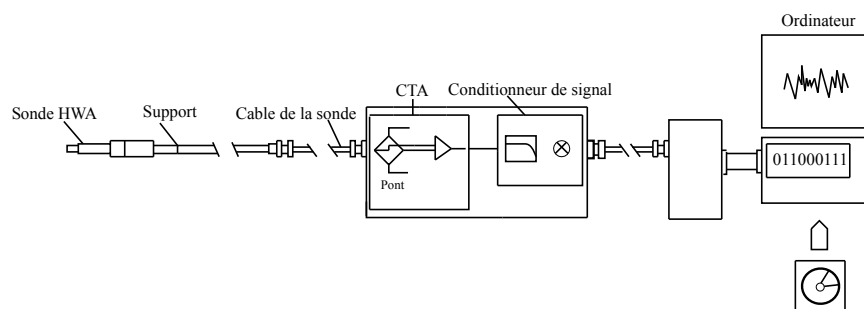


FIGURE 3.7 – La chaîne de mesure CTA (Documentation Dantec)

3.4.3 Coefficient de surchauffe

Le coefficient de surchauffe a_c est un paramètre adimensionnel qui permet en pratique de choisir la température de fonctionnement du fil T_f . En fonction du cas étudié, deux méthodes de réglages sont possibles [52] :

- la température ne varie pas durant les étapes du réglage, de la calibration et l'acquisition des datas ($\Delta T < 0.5^\circ$), le coefficient de surchauffe est réglé une seule fois au début, et on le garde constant durant toute l'opération. L'option du Si la température varie durant les trois étapes, deux choix sont possibles, soit on mesure la température du fil avant la calibration et avant toute acquisition, et on estime dans la suite le coefficient de surchauffe, soit on fixe le coefficient de surchauffe et on mesure la température pour corriger la tension mesurée avant de la convertir en vitesse.

Dans des mesure dans l'air, un coefficient de surchauffe recommandé est de l'ordre de 0.8 et qui donne un surchauffe $T_w - T_0$ de l'ordre 200 et 300 C° .

3.5 Mesure en proche paroi

Les mesures en proche paroi ont toujours été un point de grand intérêt pour la communauté scientifique et ceci dans différents domaines [49]. Parmi les techniques mises à notre disposition, pour explorer expérimentalement cette région, il est préférable d'utiliser une technique permettant d'approcher de cette dernière sans être influencée et sans perturber l'écoulement. Les deux techniques LDV et HWA sont les deux techniques souvent sollicitées pour ce types d'investigation [24], [29]. Cependant, ce type de mesure nécessite des bancs expérimentaux bien conçus et des précautions doivent être prises en compte. Dans la suite nous allons parler de différentes sources d'erreur qu'on rencontre en utilisant les deux techniques LDV et HWA.

Lorsqu'on mesure par la technique LDV proche d'une paroi et à une certaine distance (en fonction du volume de mesure [73]), l'amplitude du bruit augmente ce qui génère des erreurs de mesure non négligeables. Cela est dû à la diminution du nombre de particules dans le volume de mesure lorsqu'une partie de ce dernier est immergée dans la surface et aussi aux différentes réflexions des faisceaux lumineux sur les parois [28], [73]. Des corrections de la vitesse mesurée près de la surface sont donc nécessaires [7]. D'après [28], les différentes réflexions des particules génèrent principalement une erreur stochastique, qui peut être réduite en faisant des moyennes. Contrairement à cela, la diffusion au niveau du milieu entraîne une erreur systémique relative, qui est directement proportionnelle au rapport entre la puissance lumineuse diffusée par le milieu et la puissance lumineuse totale.

En mesurant par la technique HWA proche d'une paroi, cette dernière crée avec le fil de la sonde un espace confiné avec des caractéristiques influencées par la surface elle-même. Plusieurs phénomènes rentrent en jeu. Dans cette région les vitesses de l'air sont faibles, par conséquent les transferts thermiques par convection forcée deviennent faibles, les transferts par conduction thermique quant à eux deviennent importants et dominants. Ces constatations sont confirmées par les travaux expérimentaux de Zanoun et al Dans [107]. Les auteurs ont étudié les réponses d'une sonde CTA à différentes distances d'une paroi plane d'aluminium dans le cas avec et sans écoulement. Leurs résultats montrent que pour des distances de la paroi inférieures à 100 mm, la réponse de la sonde est identique dans les deux cas. Ce résultat confirme le fait que dans cette

région l'échange par convection forcée est négligé. D'après le même travail, la distance en dessous de laquelle la conduction thermique devient dominante dépend de la taille du fil et des caractéristiques de la sonde de mesure. Cette distance dépend aussi des caractéristiques de la surface [24]. Un résultat de ce phénomène est la surestimation de la vitesse réelle de l'écoulement [108], [107]. Pour cette raison, une calibration particulière est nécessaire afin de prendre en compte cet effet.

La plupart des recherches sur les corrections requises pour les mesures du fil chaud à proximité des parois ont été effectuées expérimentalement, et les premières tentatives de suggérer des corrections proviennent des premières expériences de Van der Hegge-Zijnen et Dryden (travaux mentionnés par Zaric 1972 [108]), qui ont utilisé des Anémomètres à Courant Constant ACC dans leur étude. Ils ont conclu à partir de leurs mesures que l'influence de la paroi peut être interprétée comme une différence de vitesse, qui peut être obtenue à partir de la perte de chaleur à la paroi à vitesse nulle. Reichhardt (1940) a suggéré l'étalonnage d'une sonde HWA dans des conduites dans lesquels la vitesse est connue et qui s'écrit selon une fonction de la distance entre la sonde et la paroi. Il a suggéré l'utilisation de la courbe d'étalonnage issue de ces mesures pour des mesures dans des couches limites.

Willis 1962 [105] a proposé une calibration en utilisant un montage CTA pour un écoulement laminaire dans un canal. Il a également suggéré que les données d'étalonnage utilisées pour des expériences des écoulements dans des conduites peuvent être utilisées pour des mesures dans des écoulements de couches limites turbulentes pour la même vitesse de frottement U . Dans ce cas-là, des étalonnages très détaillés sur une large gamme de vitesses de frottement sont nécessaires. L'étalonnage par Willis 1962 pour un écoulement laminaire dans un canal a donné une correction trop importante (surestimation de la vitesse) lorsqu'il est appliqué aux valeurs moyennes dans les écoulements de la couche limite turbulente. Afin de détourner cette sur-correction inattendue, Willis a suggéré que uniquement 50 % de la correction laminaire doit être prise en compte pour obtenir un accord raisonnable avec le profil de la sous-couche. Cependant, il n'a pas fourni d'explication physique à cette proposition.

Plus récemment, Durst et al [24], ont utilisé une technique in-situ pour calibrer la sonde CTA en proche paroi. Leur démarche consiste à effectuer des mesures de vitesse dans

Chapitre3. PRESENTATION DES TECHNIQUES DE MESURE EXPERIMENTALES DE LA VITESSE

un tunnel de dimensions $W \times H \times L = 230 \times 175 \times 340\text{mm}$ en utilisant les deux techniques LDV et CTA simultanément. L'écoulement généré à l'intérieure du tunnel est d'une intensité inférieure à 0.4% avec une plaque plane en aluminium. La distance entre la sonde CTA et la surface a été déterminée avec précision à l'aide d'un microscope. Ils ont constaté que la vitesse de l'écoulement varie linéairement en fonction de la distance par rapport à la paroi dans la région loin de la paroi ($y^+ > 4$), avec $y^+ = yu^*/\nu$ représente la distance adimensionnelle, où y est la distance par rapport à la paroi, et $u^* = \sqrt{\nu(\frac{\partial U_x}{\partial y})}$ est la vitesse de frottement basée sur les résultats de la technique LDV, ρ , μ sont respectivement la densité et la viscosité dynamique du fluide. L'influence de la surface sur la réponse de la probe CTA commence à une distance $y^+ \leq 4$. Pour des mesures près de la surfaces, des travaux numériques et expérimentaux, ont mis en évidence l'influence des caractéristique de la surface comme la conductivité thermique et l'épaisseur sur la réponse de la sonde [107], [56], [105], [3], [24].

3.6 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons exposé les différents moyens de mesure sélectionnés pour étudier les effets aérodynamiques générés par un pas humain. Le choix de ces techniques est motivé par nos objectifs de départ : une étude globale et approfondie de l'écoulement généré par le pas humain en différents points au voisinage de ce dernier. Ces trois techniques sont complémentaires du fait que chacune apporte des informations indispensables. La PIV nous permettra d'un coté de visualiser un champ de vitesse global de l'écoulement étudié et de se positionner par rapport aux résultats de la littérature. Les différents points faibles de la technique PIV comme la sensibilité aux réflexions laser et la limitation en termes de fréquence sont palliées par la technique LDV. Cette dernière, malgré qu'elle soit ponctuelle elle nous permettra grâce à une stratégie de synchronisation de trouver les profils de vitesse suivant une direction donnée, de s'approcher encore plus du sol et finalement de mesurer en dessous de ce dernier.

Comme nous nous intéressons à la remise en suspension des particules micrométrique, nous avons besoin de la vitesse proche de la surface du sol. Cette information constitue l'une des limites des deux dernières techniques. Nous avons à ce stade fait recoure la HWA. Cette dernière avec un une bonne stratégie d'étalonnage en proche paroi, nous permettra de trouve un profil de vitesse complet et ainsi réponde à nos questions de dé-

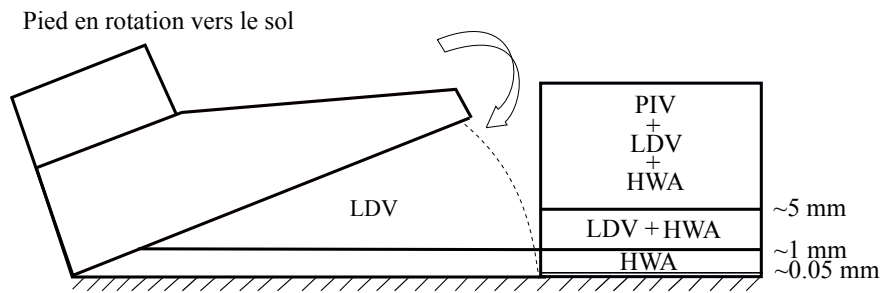


FIGURE 3.8 – Zones de mesure pour les trois techniques utilisées pendant la thèse

part. Nous présentons dans la figure 3.8 les zones de mesure des trois techniques PIV, LDV et HWA.

Chapitre 4

MESURE PAR VÉLOCIMÉTRIE LASER

L'objectif principal de cette thèse rappelons-le consiste à étudier le phénomène de la remise en suspension intérieure des particules causée par le déplacement des personnes. Comme nous l'avons évoqué précédemment, ce phénomène est d'une partie dû aux perturbations aérodynamiques générées par le mouvement du pied pendant la marche. Ainsi, dans cette étude nous allons nous intéresser à l'écoulement généré en dessous et autour du pied pendant son mouvement. Les deux techniques de mesure par Vélocimétrie Laser présentées dans le chapitre 3 vont être utilisées à cette fin.

Dans la première section de ce chapitre nous présentons l'enceinte de mesure mise en place à l'ERM de Bruxelles en Belgique. Dans la deuxième section nous présentons l'analyse effectuée sur la marche humaine et les mesures de vitesses du mouvement du pied pendant la marche. Ensuite nous présentons le modèle mécanique développé au sein de l'ERM pour imiter le mouvement du pied pendant la marche. Dans la troisième et la quatrième section nous présentons les résultats de mesures obtenues par les techniques de mesure par Vélocimétrie Laser PIV et LDV respectivement.

4.1 Chambre de mesure à l'ERM

Les mesures expérimentales par Vélocimétrie Laser ont été réalisées à l'École Royale Militaire (ERM) de Bruxelles en Belgique au département MECA. Les instruments de mesure PIV et LDV se trouvent dans un grand volume, cependant, pour nos mesures et

Chapitre 4. MESURE PAR VÉLOCIMÉTRIE LASER

afin d'éviter toutes les perturbations venant de l'extérieur nous avons utilisé une enceinte cubique transparente en plexiglas de dimensions $56 \times 56 \times 56$ cm. Les parois transparentes permettent l'introduction de la nappe laser et la réception des images dans le cas des mesures par Vélocimétrie par Image de Particules et aussi l'introduction des rayons laser et la réception des données dans le cas des mesures par Vélocimétrie Laser Doppler. Une paroi latérale de la boîte est amovible afin de faciliter le nettoyage à l'intérieur de la boîte, le changement des revêtements du sol et la mise en place des instruments.

4.2 Mesure expérimentale de la vitesse du pied



FIGURE 4.1 – Le mouvement d'un pas humain à deux instants pendant le mouvement descendant du pied

Nous avons commencé notre travail par une étude sur le mouvement du pas humain pendant la marche. Le mouvement pris en compte est celui où le talon est posé par terre et le pied en rotation vers le sol. L'enregistrement est effectué à l'ERM en utilisant une caméra rapide de marque *Photron*. La fréquence de la caméra est 500 images/seconde et elle permet des séquences d'enregistrement de 12 s. Nous avons demandé l'aide de deux étudiants qui ont bien voulu faire des allers retours de façon spontanée. Leurs chaussures ont été toutes marquées avec une tache blanche réfléchissante pour faciliter le traitement et le suivi du mouvement. Nous avons effectué plusieurs essais afin de trouver la séquence la plus représentative de la marche. Ensuite nous avons analysé les séquences enregistrées sous le logiciel *Photron Fastcam Viewer*. Le principe du traitement de ce logiciel

4.3. Simulateur mécanique du pas humain

consiste à suivre la tache blanche dans le temps. Après l'analyse nous obtenons les coordonnées (dans le repère de l'image) de la tâche en fonction du temps.

Nous présentons dans la figure 4.2 la variation de l'angle parcouru par le pied pendant la marche en fonction du temps pour différents tests. Les résultats montrent que le pied effectue une rotation avec une vitesse constante et varie en moyenne entre 80 et 140. Suite à ces résultats le modèle du pas humain que nous avons choisi dans un premier temps est la rotation d'une plaque rectangulaire rigide. Ce modèle sera présenté en détails dans la section suivante.

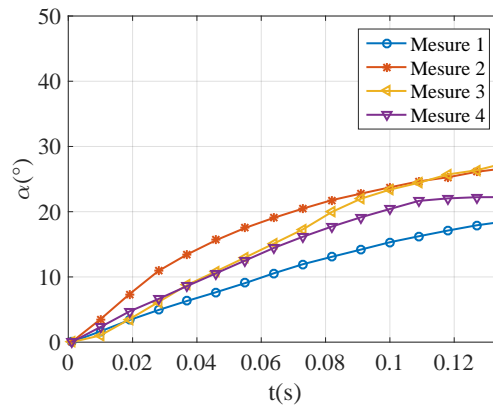


FIGURE 4.2 – Variation en fonction du temps de l'angle entre le pied et le sol pendant la marche d'un étudiant pour les différents tests effectués

4.3 Simulateur mécanique du pas humain

Comme nous l'avons évoqué précédemment, pour effectuer nos mesures nous avons besoin d'un simulateur mécanique du pas humain afin d'assurer la précision et la répétabilité des résultats. Suite à l'étude du mouvement du pas humain (voir § 1.2) le mouvement descendant du pied pendant la marche a été modélisé par la rotation d'une plaque rectangulaire rigide. La plaque est en bois et de dimensions $longueur \times largeur \times hauteur = 25 \times 8 \times 1.2$ cm qui correspondent aux dimensions d'un pas humain de taille moyenne. La plaque est fixée au sol avec deux charnières qui lui permettent de faire des rotations dans les deux sens.

Les deux mouvements de rotation de la plaque vers le bas et vers le haut sont impo-

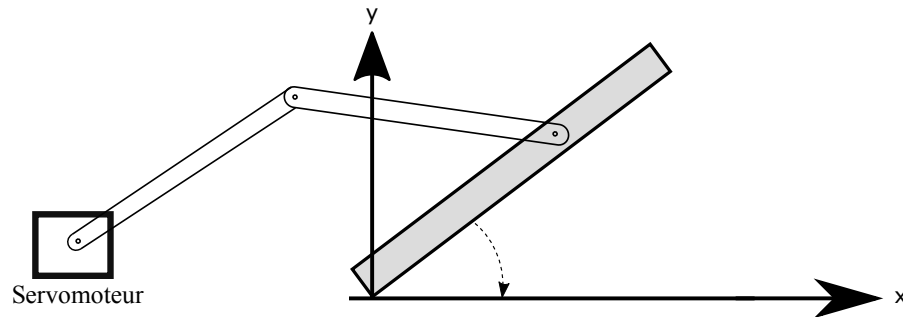


FIGURE 4.3 – Schématisation du simulateur mécanique du pas humain utilisé pendant l'étude

sés par un ServoMoteur Parallax. Ce dernier fait tourner la plaque dans les deux sens à l'aide d'un bras (figure 4.3). Le mouvement de la plaque vers le bas dure 0.25 s et s'effectue avec une vitesse constante et égale à 80 °/s (cf. figure 4.4a). Nous avons imposé une vitesse inférieure en moyenne à la vitesse du pas mesurée (cf. figure 4.4b) à cause des limites de nos moyens expérimentaux. En effet la vitesse de la caméra CCD utilisée pendant les mesures par Vélocimétrie par Image des particules est 6.1Hz en double frame et avec une telle vitesse la caméra ne nous permet pas d'enregistrer des images où l'écoulement est dans la fenêtre de visualisation. Cette constatation a été faite suite à plusieurs mesures préliminaires effectuées dans la première partie du travail avec des vitesses plus importantes.

4.4 Mesures par Vélocimétrie à Images de Particules PIV

Dans cette section nous allons présenter les résultats obtenus par la technique de mesure PIV. L'objectif principal derrière l'utilisation de cette technique est la validation de notre modèle mécanique du pas humain en comparant les résultats obtenus avec ceux trouvés dans la littérature. Les résultats sont essentiellement des champs de vitesse (dans une fenêtre située devant la plaque) de l'écoulement généré par la plaque.

4.4. Mesures par Vélocimétrie à Images de Particules PIV

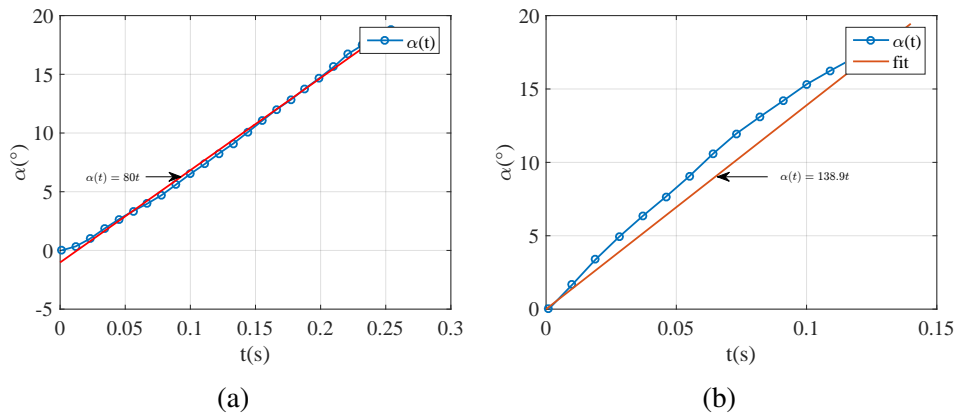


FIGURE 4.4 – Moyenne des variations de l’angle parcourue en fonction du temps a) par la plaque du simulateur mécanique, b) par le pied pendant la marche pour un test

4.4.1 Caractéristiques du montage PIV

Le système PIV mis en place dans le cadre de notre travail est le suivant : un laser pulsé Nd-Yag de marque Litron et de puissance 2×200 mJ par pulse synchroniser à une fréquence maximale de 20 Hz émettant une lumière monochromatique de longueur d’onde $\lambda_e = 532$ nm. Le système optique délivre une nappe laser d’une épaisseur d’environ 1mm. La nappe laser coupe la plaque exactement au milieu et suivant la direction longitudinale comme c’est schématisé dans la figure 4.5. La zone de mesure PIV (la fenêtre de visualisation éclairée par la nappe laser) se situe devant la plaque sur une section transversale selon l’axe de cette dernière (cf. figure 4.6). L’acquisition des images successives est effectuée au moyen d’une caméra équipée d’un capteur CCD (Charging Couple Device) d’une résolution 1344×1023 (horizontale \times verticale) pixels et qui permet d’avoir 6 images/s en mode double frames. La caméra est équipée d’une optique Canon de focale 100 mm et d’un filtre interférentiel passe bande centré sur la longueur d’onde 532 nm. Le plan de la caméra est perpendiculaire à la nappe laser.

Le banc expérimental PIV est piloté par deux ordinateurs : un ordinateur pour le lancement des acquisitions des images (laser + caméra) et un PXI de National Instruments pour contrôler le mouvement de la plaque. Le mouvement de la plaque est contrôlé par un code programmé sous le logiciel de conception de système *LabVIEW*.

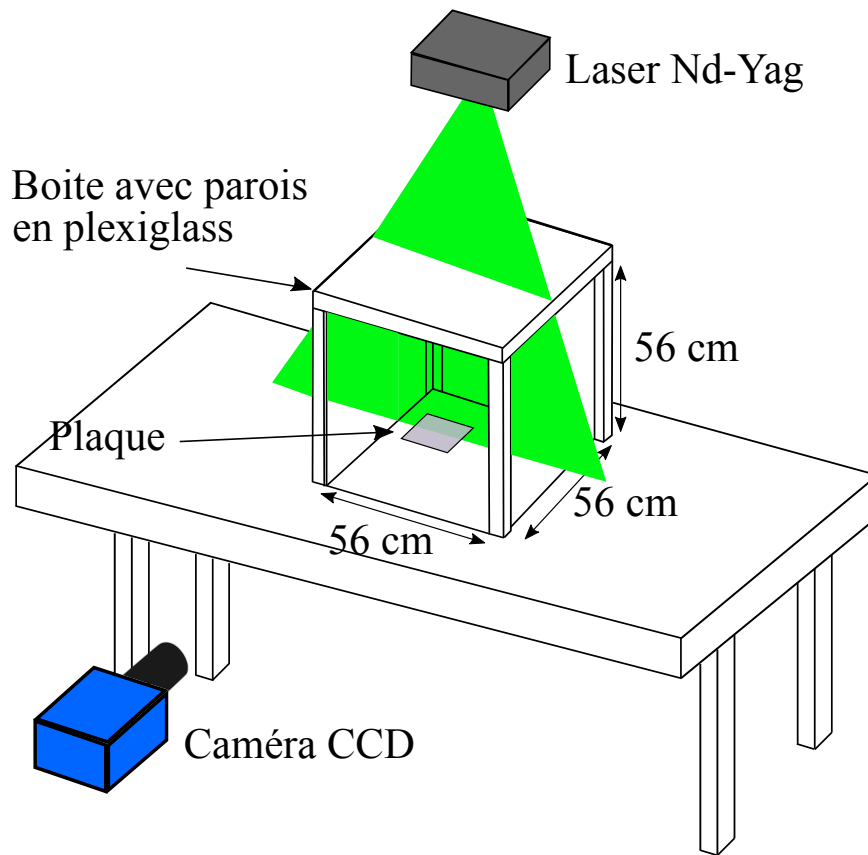


FIGURE 4.5 – Banc expérimental pour les mesures PIV

La calibration, l'acquisition des images et le traitement sont effectués sous le logiciel DynamicStudio. Ensuite, le post-traitement est effectué grâce à un algorithme développé par nos soins sous le langage Matlab.

4.4.2 Stratégie de Synchronisation

A cause du caractère instationnaire du phénomène, nous avons mis en place une technique de synchronisation entre l'acquisition des images PIV et le mouvement du moteur. L'organigramme du code de synchronisation est le suivant :

- Après le lancement du programme, la plaque est soulevée par la rotation du ServoMoteur jusqu'à un angle 20° . Cet angle correspond à l'angle initial formé entre

4.4. Mesures par Vélocimétrie à Images de Particules PIV

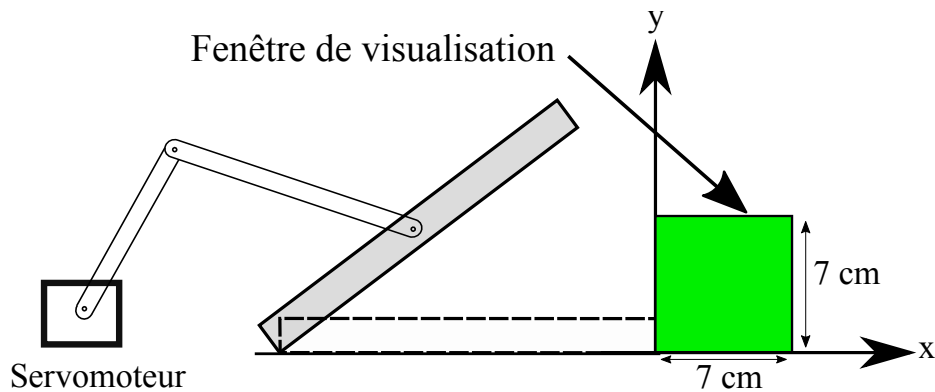


FIGURE 4.6 – Fenêtre de visualisation dans les mesures PIV située sur la section transversale suivant l'axe de la plaque

le pied et le sol pendant la phase de rotation du pied.

- b. Après le lancement d'acquisition laser, le programme fait un comptage des pulses laser. Après un certain nombre n_p de pulses, le moteur tourne d'un angle donnée après un délais dt_1 . Ainsi, la plaque fait la rotation avec une vitesse bien contrôlée jusqu'à atteindre le sol,
- c. La plaque est maintenue à cette position pendant un délai dt_2 , ensuite, le moteur reviens à la position initiale. Pendant le délais dt_2 l'ordinateur fais l'acquisition d'un nombre donnée d'images.
- d. Retour à l'étape *a* pour une nouvelle acquisition.

Grâce à ce mécanisme mis en place et au code de synchronisation, nous avons réussi à effectuer un nombre important de mesures avec une excellente répétabilité (voir § 4.4.5) et en un temps réduit. Pour chaque mesure, nous avons fait l'acquisition des 11 images qui correspondent aux différents instants du phénomène avant, pendant et après le mouvement de la plaque. Après l'exploitation des premiers résultats, uniquement 3 images ont été sélectionnées pour l'analyse. Ces 3 images correspondent à une image pendant le mouvement de la plaque, et deux images après le mouvement.

4.4.3 Post-traitement des résultats

Les étapes d'une analyse sous *Dynamic Studio* sont les suivantes :

- Pré-traitement : application de la technique *Image Dewarping* pour l'application des calibrations corriger les distorsions optiques. D'après la documentation DANTEC, pour les images souffrantes de distorsions, il est possible de les reformer (Dewarp) avant d'appliquer l'algorithme de corrélation. Nous avons constaté d'après les premiers tests PIV que nous avons effectué qu'en traitant les images sans l'application du Dewarping, la vitesse de l'écoulement est sur-estimée. Cet algorithme est appliqué systématiquement au début de chaque traitement.
- Analyse PIV : les champs de vitesse sont obtenus en appliquant une Adaptive Correlation avec des fenêtres d'interrogation initiales et finales de tailles 128×128 et 32×32 pixels respectivement. Pour la validation de la corrélation, la technique Local Neighborhood Validation est appliquée pour corriger les vecteurs aberrants. Cette technique de validation consiste à comparer les vecteurs individuels avec les vecteurs voisins. Une correction des vecteurs erronés est appliquée par une interpolation.

Après l'acquisition et le traitement des images, nous transférons les résultats sous forme de tableaux en format *.dat*. Les résultats ainsi obtenus seront ensuite traités sous Matlab. Notre traitement consiste à sélectionner pour toutes les mesures effectuées une image correspondant à l'instant où l'agitation causée par le mouvement de la plaque et dans la fenêtre de visualisation. Les images sélectionnées seront ensuite traitées en utilisant un autre algorithme pour tester la répétabilité de nos mesures (voir § 4.4.5). Après la vérification de la répétabilité des mesures nous écartons toutes les mesures erronées ou qui ne sont pas représentatives. Pour les 210 mesures effectuées, seulement 5 mesures n'ont pas été retenues. Les 205 mesures retenues sont ensuite moyennées.

4.4.4 Incertitudes de mesure en PIV

La précision des mesures en PIV est une combinaison de plusieurs aspects s'étendant de la capture des images jusqu'au post-traitement en passant par la technique d'évaluation. La plupart des sources d'erreurs courantes liées à la PIV classique ont été discutées par Raffel et al. [83], dans leur guide pratique dédié à cette technique. Nous allons dans la suite exposer les différentes sources d'incertitude dans notre étude :

4.4. Mesures par Vélocimétrie à Images de Particules PIV

- Les deux sources importantes d'incertitude dans notre étude sont le simulateur mécanique et la synchronisation entre l'acquisition des données et le mouvement de la plaque.
- L'impact de la plaque sur le sol génère des vibrations qui influencent la distance entre les particules dans une paire d'image.
- La calibration spatiale qui permet de convertir des pixels en mètre. Ce paramètre qui dépend bien évidemment des équipements utilisés et comme le précédent influence directement la vitesse mesurée.
- L'erreur d'échantillonnage aléatoire est d'autant plus importante que le nombre d'échantillons est faible. Comme nous allons le préciser dans les différentes techniques utilisées, le phénomène étudié nous impose une stratégie de travail que ne permet d'effectuer qu'un nombre limité d'essais pour chaque cas étudié.

Dans la suite, nous allons présenter la stratégie utilisée afin d'étudier la répétabilité des mesures.

4.4.5 Test de répétabilité

Afin de vérifier la répétabilité de nos mesures, nous avons calculé la moyenne pondérée des 30 valeurs maximales de la vitesse longitudinale dans un champs en prenant en compte leurs positions par rapport à l'origine (cf. équation 4.1).

$$D_i = \frac{\sum_{i=0}^{30} R_i \times U_i}{30} \quad (4.1)$$

Avec D_i la moyenne pondérée des n vitesses maximales sur une image i correspondant à un instant donné, R_i comme c'est montré dans la figure 4.7b est la distance par rapport à l'origine (l'origine comme s'est montré dans la figure 4.6, est pris au bout de la plaque quand cette dernière est en contact avec le sol), U_i est la i -ème plus grande vitesse normalisée par rapport à la vitesse maximale. Ensuite nous avons comparé les résultats des différents tests. Dans la figure 4.7b nous représentons les positions des moyennes pondérées de 210 mesures pour un cas d'étude donné. La figure montre que les moyennes sont relativement proches. Pour les 210 mesures effectuées, nous avons en moyenne 190 mesures où les paramètres D_i se trouvent dans un rayon de 10mm. Nous avons sélectionné ces mesures pour le calcul de la moyenne des champs de vitesse.

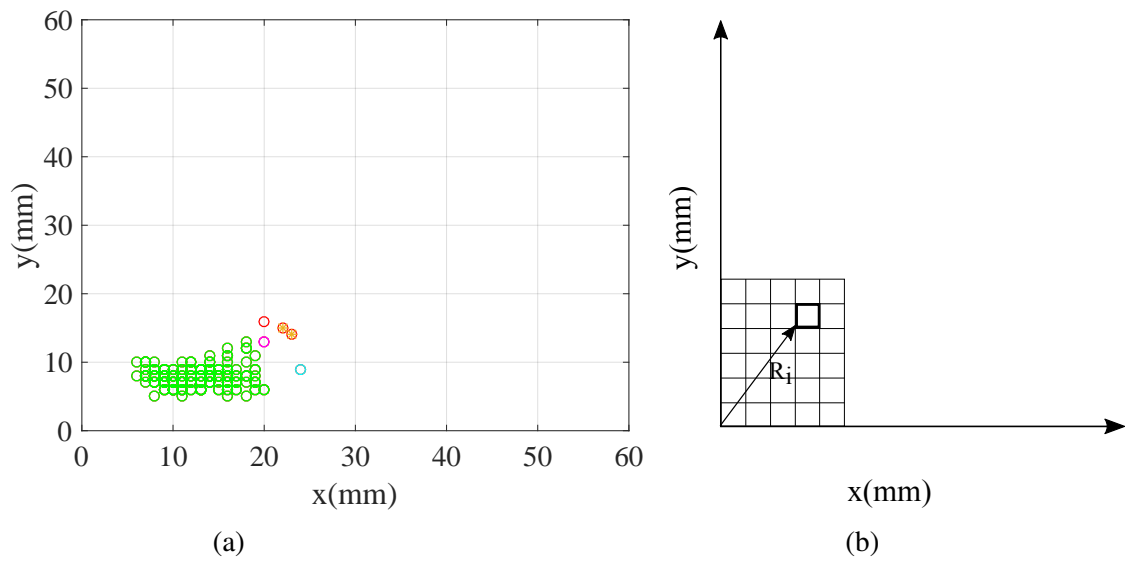


FIGURE 4.7 – a) Position moyenne des 30 points où la vitesse est maximale dans la fenêtre de visualisation, b) Position par rapport à l'origine

4.4.6 Champs de vitesse moyenne de l'écoulement

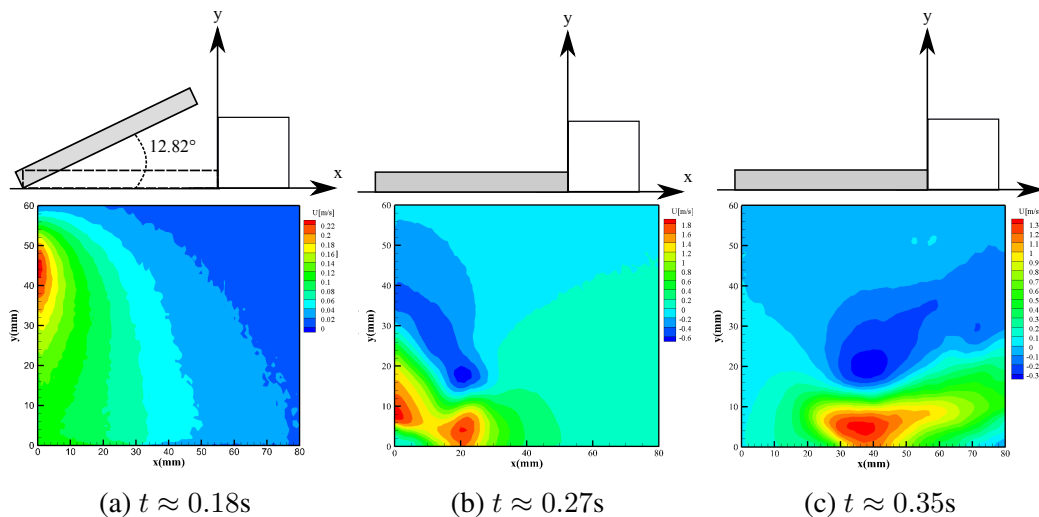


FIGURE 4.8 – Champs de la composante longitudinale de vitesse devant la plaque obtenus par la technique PIV à différents instants, l'instant $t = 0$ s correspond au moment où la plaque commence le mouvement

4.4. Mesures par Vélométrie à Images de Particules PIV

Les résultats obtenus dans cette section sont représentés dans les figures 4.8, 4.9. Les figures montrent les champs des composantes de la vitesse longitudinales et verticales moyens dans la fenêtre de visualisation à trois instants différents. Comme la vitesse de la caméra est relativement lente par rapport au mouvement de la plaque et de l'écoulement, pour chaque acquisition nous obtenons deux images exploitables et qui montrent les champs de vitesse à un instant où la plaque est en mouvement et à un autre instant où la plaque a touché le sol. Pour avoir une image supplémentaire à un instant différent, nous avons effectué d'autres mesures en rajoutant un délai dt avant le début du mouvement de la plaque. Il s'agit du temps d'attente après le comptage des pulses laser et avant l'exécution du mouvement de la plaque dans le l'algorithme de synchronisation (voir § 4.4.2).

La figure 4.8a représente le champ de la composante longitudinale de la vitesse de l'écoulement à l'instant où la plaque forme un angle 12.82° avec le sol. Comme la fréquence de la caméra est de 6.1 Hz, à l'instant correspondant à la figure 4.8b, 4.9b la plaque est arrivée au niveau du sol. Nous constatons aussi d'après ces résultats que la vitesse de l'écoulement est maximale après que la plaque atteint le sol, ensuite la vitesse diminue après le passage du vortex.

Les figures 4.10 représentent les lignes de courant dans la fenêtre de visualisation après

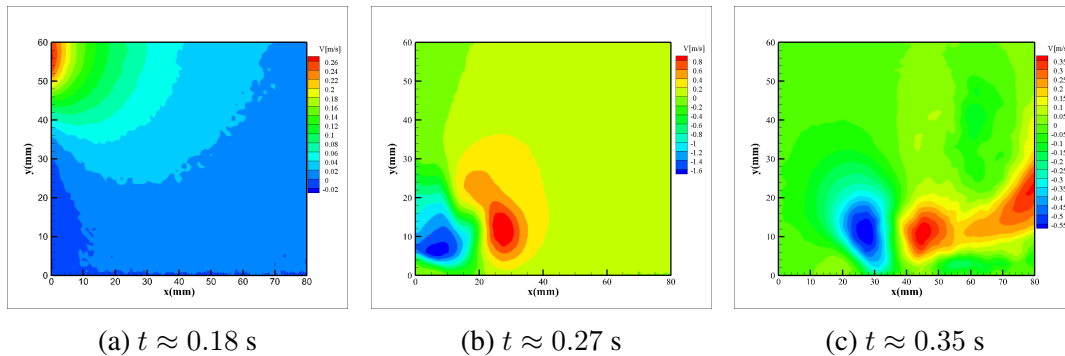


FIGURE 4.9 – Champs de la composante verticale de vitesse devant la plaque obtenus par la technique PIV à différents instants, l'instant $t = 0$ s correspond au moment où la plaque commence le mouvement

le mouvement de la plaque aux deux derniers instants. Les figures montrent la formation de deux vortex contrarotatifs. Le vortex inférieur est formé suite à l'écrasement de l'air

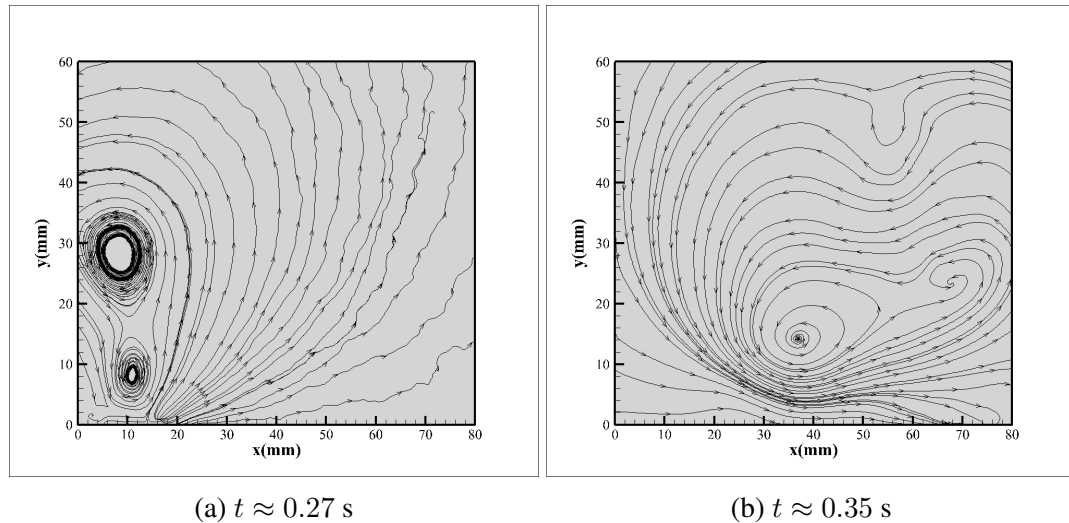


FIGURE 4.10 – Lignes de courant des vitesses moyennes obtenues par la technique PIV à deux différents instants

situé en dessous de la plaque, alors que le vortex supérieur est un tourbillon marginal. Après que la plaque touche le sol, les deux vortex formés se combinent pour donner un seul vortex qui continue à avancer suivant la direction longitudinale. En comparant les figures correspondants aux deux derniers instants nous constatons que la hauteur du centre du vortex n'augmente pas considérablement contrairement au résultats de simulation numérique Khalifa et Elhadidi [55]. Cela est probablement dû au fait que dans leurs études, la plaque descend verticalement.

Au cours de leurs étude expérimentale par la technique de visualisation et la technique PIV, Kubota et Higuchi [61] ont mis en évidence que le mouvement vertical vers le sol d'une plaque plane crée un vortex qui avance en translation vers l'avant. D'après les auteurs, le vortex est le résultat de l'écrasement de l'air situé en dessous de la plaque. La plaque utilisée pendant leur étude est de dimension 7.17 cm de largeur et 26.98 cm de longueur avec une forme de cercle aux deux extrémités. Ces résultats ont été également confirmés par les résultats analytiques et numériques de Khalifa et Elhadidi [55].

La figure 4.11 montre les profils verticaux de la composante de vitesse longitudinale de l'écoulement extraits du champ de vitesse à une position longitudinale x correspond à la position longitudinale du milieu du vortex à deux différents instants. Les profils

4.4. Mesures par Vélocimétrie à Images de Particules PIV

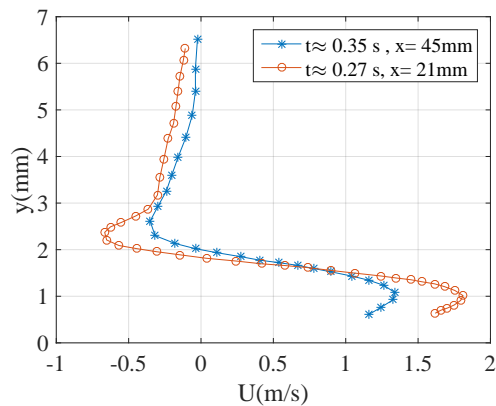


FIGURE 4.11 – Variation des vitesses extraites suivant la verticale à deux distances différentes, les positions longitudinales correspondent à la position du centre du vortex

montrent que la vitesse de l'écoulement générée par le passage du vortex est égale à 1.2 m/s et 1.6 m/s aux deux instants 0.05 s, 0.1 s aux premiers points de mesure (le premier point de mesure est à une hauteur 5 mm du sol dans les deux cas). Pour les deux instants, en s'éloignant du sol, les valeurs des composantes de la vitesse de l'écoulement augmentent fortement jusqu'à atteindre des maximums de 1.35 m/s et 1.8 m/s respectivement. Ces maximums sont situés à une hauteur de $y \simeq 10$ mm du sol. Ensuite, la vitesse diminue fortement jusqu'à atteindre des valeurs négatives de -0.5 m/s et -0.35 m/s aux deux instants 0.05 s, 0.1 s respectivement. La position des deux minimums est située à 23 mm du sol. Loin de la surface, la valeur absolue de la vitesse diminue jusqu'à atteindre des valeurs qui tendent vers zéro pour les deux instants.

Les résultats obtenus par la technique PIV nous ont permis en particulier d'appréhender la morphologie de l'écoulement généré par un simulateur mécanique du pas humain et de valider ce dernier. Cependant, la technique présente différents problèmes techniques et elle ne permet pas de répondre à tous nos objectifs fixés au départ :

- Le premier problème est lié aux diverses réflexions qui empêchaient l'accès aux mesures en proche paroi.
- Un autre problème lié aux réflexions est la mesure du champ de vitesse en dessous de la plaque. Bien que ce point fasse parti de nos objectifs de départ, nous l'avons abandonné car il s'est avéré que de telles mesures peuvent endommager l'optique de la caméra.

Chapitre4. MESURE PAR VÉLOCIMÉTRIE LASER

- Le troisième problème vient du fait que la caméra que nous avons utilisée est relativement lente par rapport au phénomène étudié. Les champs de vitesse enregistrés ne montrent pas le développement dans le temps de l'écoulement généré par le mouvement de la plaque. Un tel manque d'information ne nous permet pas par exemple de connaître quelle est la zone de forte vitesse d'écoulement.

Suite à ces constatations nous avons décidé d'étudier le phénomène plus profondément en utilisant d'autres moyens de mesure mis à notre disposition à l'ERM. Dans la section suivante nous présenterons les résultats obtenues par la technique de Vélocimétrie Laser Doppler.

4.5 Mesures par Vélocimétrie à effet Doppler LDV

Dans cette section nous allons présenter les résultats obtenues par la technique LDV. Cette partie est un complément de l'étude effectuée dans la section précédente. Nous allons dans un premier temps présenter les caractéristiques du montage expérimental mis au point. Nous allons ensuite présenter la procédure de traitement et mettre l'accent sur la technique de synchronisation car notre objectif actuel est d'obtenir des profils de la vitesse de l'écoulement généré par le mouvement du simulateur mécanique du pas humain suivant les deux directions de l'espace x et y .

4.5.1 Caractéristiques du montage LDV

L'enceinte de mesure en plexiglas et le simulateur mécanique du pas humain que nous avons présentés dans la section 4.4 ont été utilisés pour effectuer les mesures LDV. Le Vélocimètre Laser Doppler utilisé pendant cette étude est un système à deux composantes qui utilise les longueurs d'onde bleues ($488 \mu\text{m}$) et vertes ($514.5 \mu\text{m}$) d'un laser argon-ion modèle Innova 70 C de 40 W de puissance. Le montage est de type rétro-diffusion, c'est-à-dire que le système de diffusion et de réception sont situés du même côté. Un décalage de fréquence de 40 MHz entre chaque paire de faisceaux est imposé dans la cellule de Bragg. La sonde utilisée a un diamètre 60 mm équipée de sa lentille standard qui permet de mesurer à une distance égale à 400mm. Le volume de mesure a une longueur de 3.97 mm et un diamètre de $189 \mu\text{m}$. Le déplacement du volume de mesure est assuré en utilisant un système de déplacement mécanique conçue par DANTEC

4.5. Mesures par Vélométrie à effet Doppler LDV

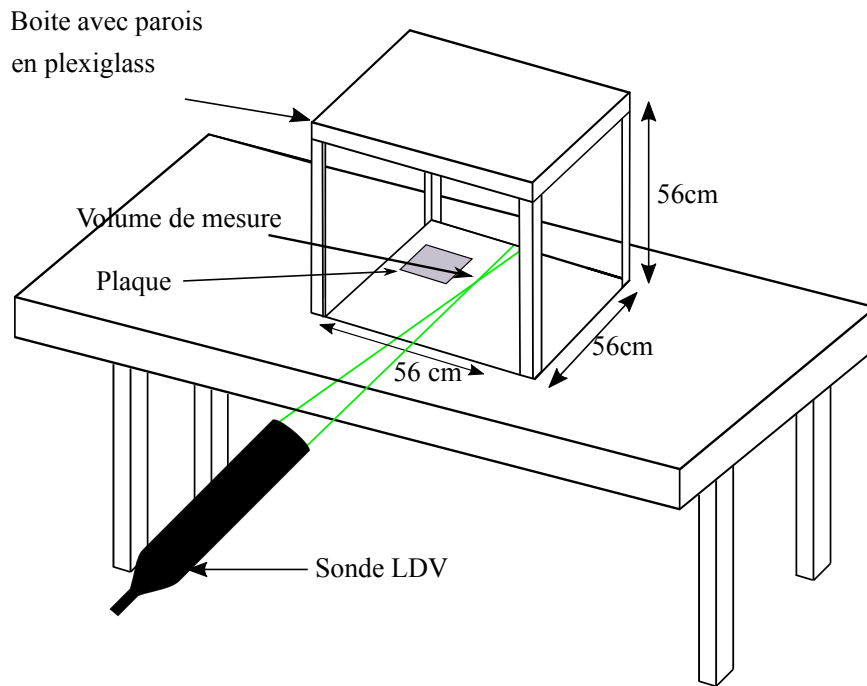


FIGURE 4.12 – Banc expérimental pour les mesures LDV

(cf. figure 4.13). Ce dernier est équipé de trois railles qui permettent de déplacer la tête optique en translation selon les trois axes (x, y, z) . Une étape importante avant chaque mesure est l'estimation de la distance initiale entre le volume de mesure et la surface. La technique utilisée à cette fin est la suivante : un trou ayant des dimensions légèrement supérieur au volume de mesure est percé dans une plaque fine, cette dernière est positionnée devant le faisceau laser dans le plan où on veut mesurer la vitesse. A l'aide du système de déplacement nous positionnons le volume de mesure de sorte que les quatre faisceaux laser sortent du trou. De cette façon, la position initiale du volume est estimée. Le système de coordonnées utilisé est un repère cartésien. Comme le montre la figure 4.18b, l'origine est placée au point de rotation de la plaque avec la direction longitudinale au milieu de cette dernière.

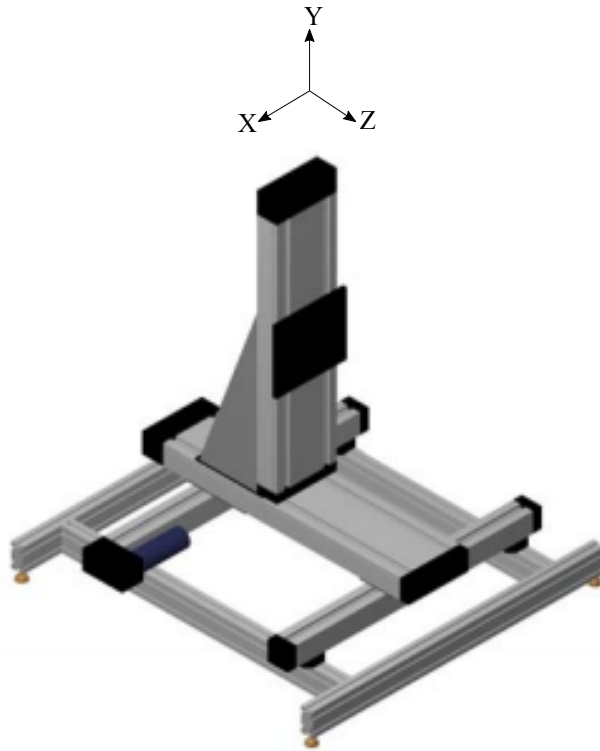


FIGURE 4.13 – Système de déplacement 3D (documentation DANTEC)

Comme dans les mesures par la technique PIV, nous mettons en place le simulateur mécanique du pas humain, puis nous fermons la boîte. L'écoulement estensemencé par la fumé d'huile avec une concentration de particules traceurs relativement faible comparant avec la technique PIV. Le dispositif expérimental LDV contient aussi un ordinateur pour contrôler le système d'acquisition, effectuer les mesures et enregistrer les résultats et aussi pour contrôler le système de déplacement, et un PXI de National Instruments pour contrôler le mouvement du simulateur mécanique et de l'obturateur. Ce dernier composant sera exposé dans la section suivante. A cause d'un problème technique au niveau du laser, nous avons la possibilité de mesurer une seule composante de la vitesse à la fois. Durant toute l'étude, nous n'avons mesuré que la composante longitudinale de la vitesse U_x .

4.5.2 Stratégie de synchronisation

L'un des problèmes majeurs rencontrés lors de nos premières campagnes de mesure était lié à la non synchronisation entre le mouvement du simulateur et l'acquisition des vitesses, une condition cruciale pour assurer la répétabilité des résultats. De même, cette condition nous permet d'avoir un profil de vitesse suivant une direction donnée et reproduire l'évolution temporelle de la vitesse suivant une direction donnée.

Lors de nos premiers essais, en absence d'un signal déclencheur dans le dispositif LDV

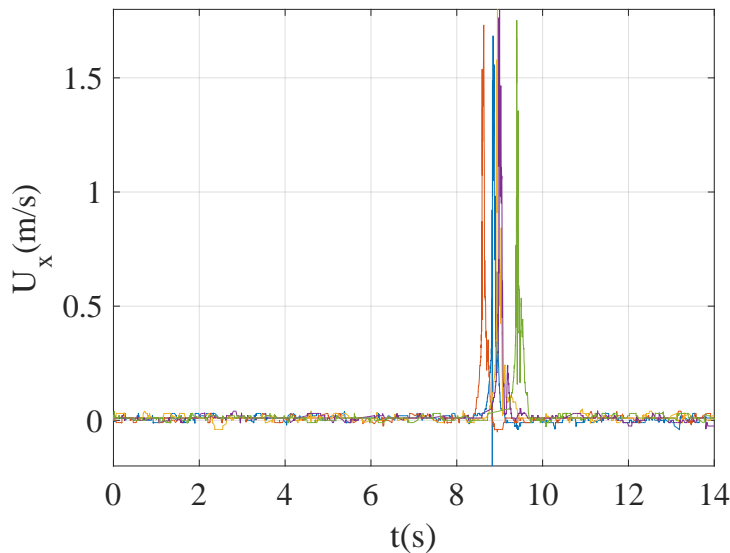


FIGURE 4.14 – Variation de la vitesse en un point devant la plaque montrant la non synchronisation des différents tests

utilisé, nous avons effectué des mesures LDV sans synchronisation. Le début du mouvement de la plaque noté t_0 a été estimé en traitant les résultats à posteriori en supposant que l'instant t_0 correspond à une augmentation brusque de la vitesse de l'écoulement. Cependant, les signaux acquis lors des mesures LDV sont fortement bruités, cette technique ne nous a donc pas permis de trouver d'une façon efficace le début du mouvement de la plaque et les résultats n'ont par conséquent pas été satisfaisants (cf. figure 4.14).

La technique que nous avons finalement utilisée consiste à ajouter un composant à notre dispositif expérimental. Il s'agit d'un obturateur que nous avons placé entre la plaque

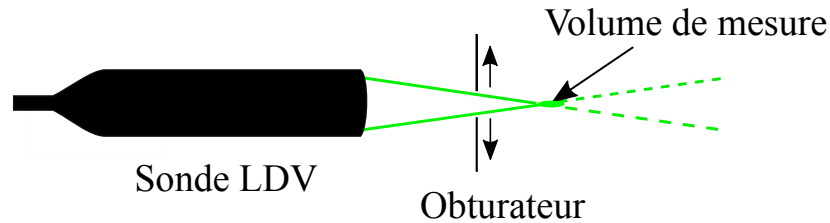


FIGURE 4.15 – Schématisation de l'obturateur placé devant la sonde LDV

et le photo-détecteur. De cette façon, tant que l'obturateur est fermé, le photo-détecteur ne reçoit pas de signal, et donc nous n'enregistrons pas de vitesse. Au moment du début du mouvement de la plaque, l'obturateur s'ouvre, laissant ainsi le passage du laser et donc le début de l'acquisition des données. En procédant de cette façon, les tableaux enregistrés contiennent la variation de la vitesse en un point en fonction du temps qui commence au moment où la plaque commence le mouvement.

L'erreur commise est due d'un côté au retard au niveau de l'ouverture et la fermeture de l'obturateur et d'un autre côté au retard causée par notre système d'acquisition. Dans la suite nous allons étudier la répétabilité de notre démarche expérimentale.

4.5.3 Résultats des mesures LDV

Les points de mesure de la vitesse ont été choisis en fonction de deux objectifs :

- Valider la technique de synchronisation dans un premier temps,
- Mesure de la composante longitudinale de la vitesse suivant la direction longitudinale à une distance y de la surface,
- Répondre aux besoins initiaux de ce travail c'est-à-dire l'étude de l'écoulement généré par le mouvement de la plaque, détecter la zone de forte vitesse et dans la

4.5. Mesures par Vélocimétrie à effet Doppler LDV

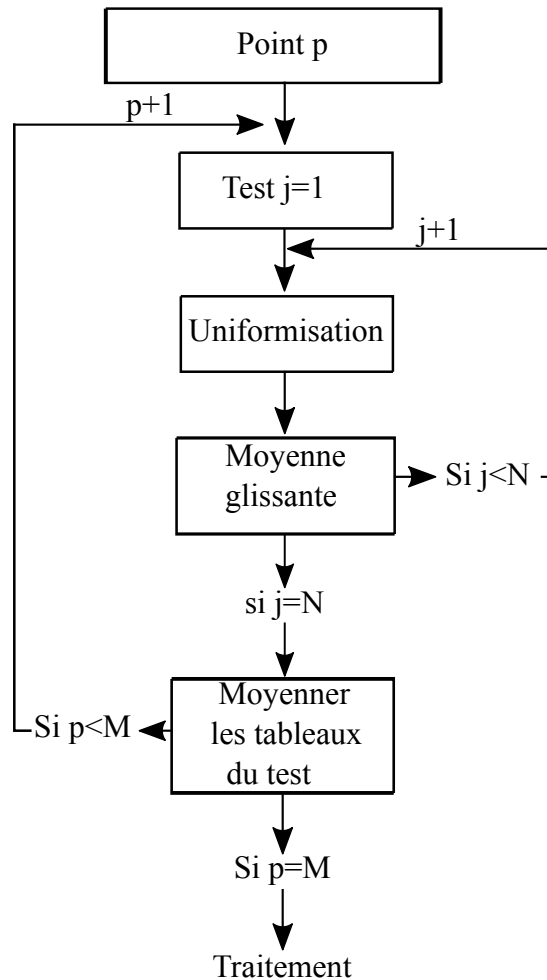


FIGURE 4.16 – Étapes de post-traitement des données LDV, N correspond au nombre de tests effectués dans chaque point et M le nombre de points de mesure dans chaque cas

suite étudier l'influence de l'état de la surface sur l'écoulement.

Les résultats LDV ont été traités en prenant en compte le pas de temps non uniforme des mesures. En effet, comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 3, un Vélocimètre Laser LDV ne fournit la vitesse en un point d'un écoulement qu'à l'instant où une particule traverse le volume de mesure d'une part et d'autre part, qu'à la condition que la chaîne électronique de traitement du signal Doppler soit prête à effectuer une

Chapitre4. MESURE PAR VÉLOCIMÉTRIE LASER

mesure qui sera validée [7]. Le signal représentant la vitesse de l'écoulement est donc échantillonné de façon aléatoire. Une étape primordiale est donc l'uniformisation du pas d'échantillonnage pour pouvoir moyenniser les différents tests. Cette étape a été réalisée grâce une fonction d'interpolation entre les points d'échantillonnage. Après l'uniformisation des tableaux nous appliquons une moyenne mobile arithmétique MMA aux différents vecteurs de vitesse. Nous moyennons ensuite les résultats pour obtenir un tableau final qui représente la variation de la valeur de la composante de vitesse en un point donné. L'algorithme de traitement utilisé est schématisé dans la figure 4.16.

4.5.3.1 Évolution de la vitesse en un point

Nous avons dans un premier temps vérifié la validité de la technique de synchronisation utilisée. Dans la figure 4.17, nous présentons la variation de la vitesse en fonction du temps en un point devant la plaque pour différents tests. Nous constatons d'après la figure que notre technique de synchronisation est fiable car elle permet de commencer l'enregistrement au même instants pour chaque mesure. Les ordres de grandeurs des erreurs de mesure seront exposés dans la section 4.5.3.4.

Les courbes montrent bien l'évolution de la vitesse en deux étapes : à l'instant $t = 0$ s

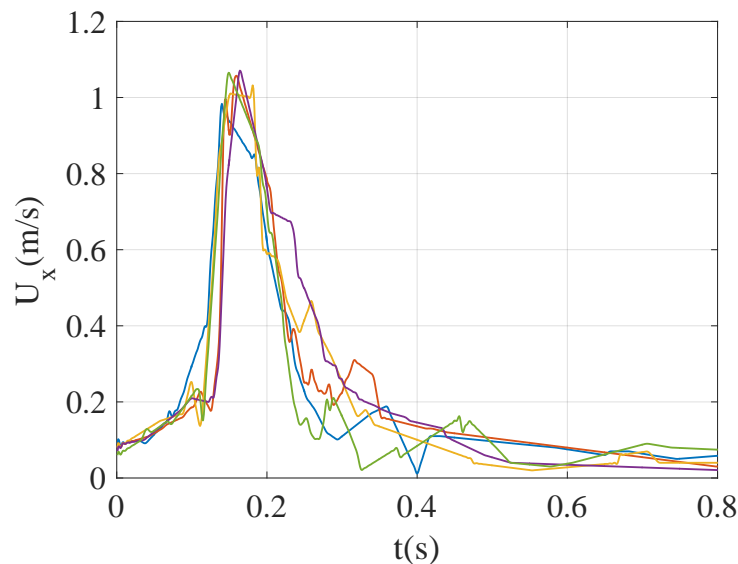


FIGURE 4.17 – Variation en fonction du temps de la vitesse longitudinale de l'écoulement en un point devant la plaque, a) Pour différents tests, b) Moyenne

4.5. Mesures par Vélocimétrie à effet Doppler LDV

la vitesse de l'écoulement est égale à 0.04 m/s, cette valeur représente le bruit de fond. Entre $t = 0$ s et $t = 0.15$ s nous constatons que la vitesse de l'écoulement augmente légèrement jusqu'à une valeur $U_x \simeq 0.25$ m/s. Cet intervalle $[0 \ 0.15]$ s correspond au temps de rotation de la plaque entre le moment où l'obturateur s'ouvre et la position finale où elle est totalement posée sur le sol. Ensuite on remarque une forte augmentation de la vitesse jusqu'à une valeur ~ 1 m/s. Cette augmentation brusque correspond au passage du vortex par le point de mesure. Ensuite la vitesse diminue fortement jusqu'à atteindre de nouveau la valeur $U_x \simeq 0.2$ m/s puis légèrement jusqu'à la valeur initiale avant la chute de la plaque.

4.5.3.2 Mesures verticales : comparaison avec la technique PIV

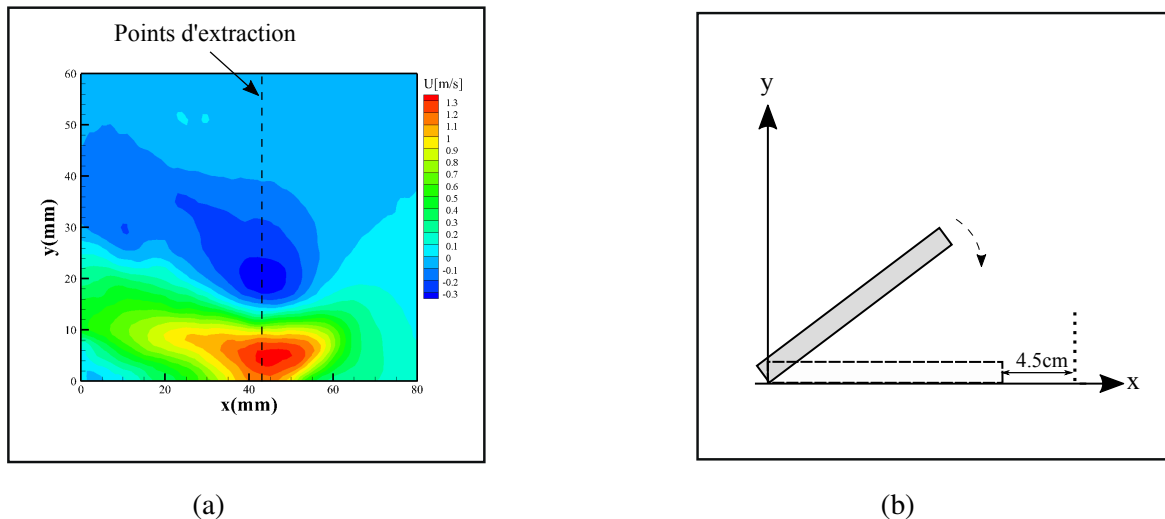


FIGURE 4.18 – a) Points d'extraction de la vitesse depuis un champ de vitesse obtenu par la technique PIV, b) Points de mesure du profil vertical pour les mesures LDV

Une première campagne de mesures LDV a été lancée afin de vérifier la validité de notre technique de synchronisation entre le mouvement de la plaque et l'acquisition des données LDV. Nous avons à cet effet comparé le profil vertical de la vitesse longitudinale à une distance horizontale $x = 4.5$ cm du bout de la plaque obtenu par la technique LDV (figure 4.18b) avec celui obtenu par extraction des vitesses depuis le champs de vitesse longitudinale (figure 4.18a). Comme pour les mesures PIV, les points de mesures par la technique LDV sont suivants la verticale qui appartient au plan qui passe

Chapitre 4. MESURE PAR VÉLOCIMÉTRIE LASER

par le milieu de la plaque. Les résultats des deux techniques correspondent à un instant $t = 0.064$ s après que la plaque touche le sol. Les mesures LDV ont été effectuées en

Pas d'espace Δy (mm)	Distance mesurée (mm)
0.5	12
1	10
2	10
5	45

TABLE 4.1 – Les valeurs du pas d'espace des mesures verticales par la technique LDV

commençant par un point à proximité de la surface $y = 1$ mm (voir § 4.5.1), ensuite nous déplaçons le volume de mesure suivant la verticale avec des pas d'espaces Δy qui varient selon la zone de mesure (cf. tableau 4.1).

Les résultats des deux techniques sont représentés dans la figure 4.19. Nous consta-

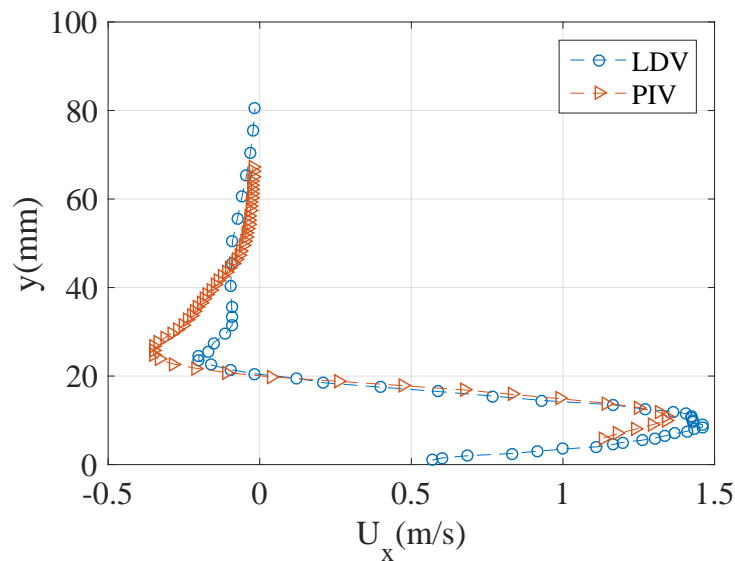


FIGURE 4.19 – Profils verticaux de la vitesse longitudinale obtenus par les deux techniques PIV et LDV, mesures effectuées à $x = 4.5$ cm à l'instant $t \approx 0.35$ s avec $t = 0$ s correspond au moment où la plaque commence le mouvement

tons premièrement que la technique LDV nous a permis de s'approcher encore plus de la surface du sol comparant avec la technique PIV. D'après la technique LDV, la vitesse

4.5. Mesures par Vélométrie à effet Doppler LDV

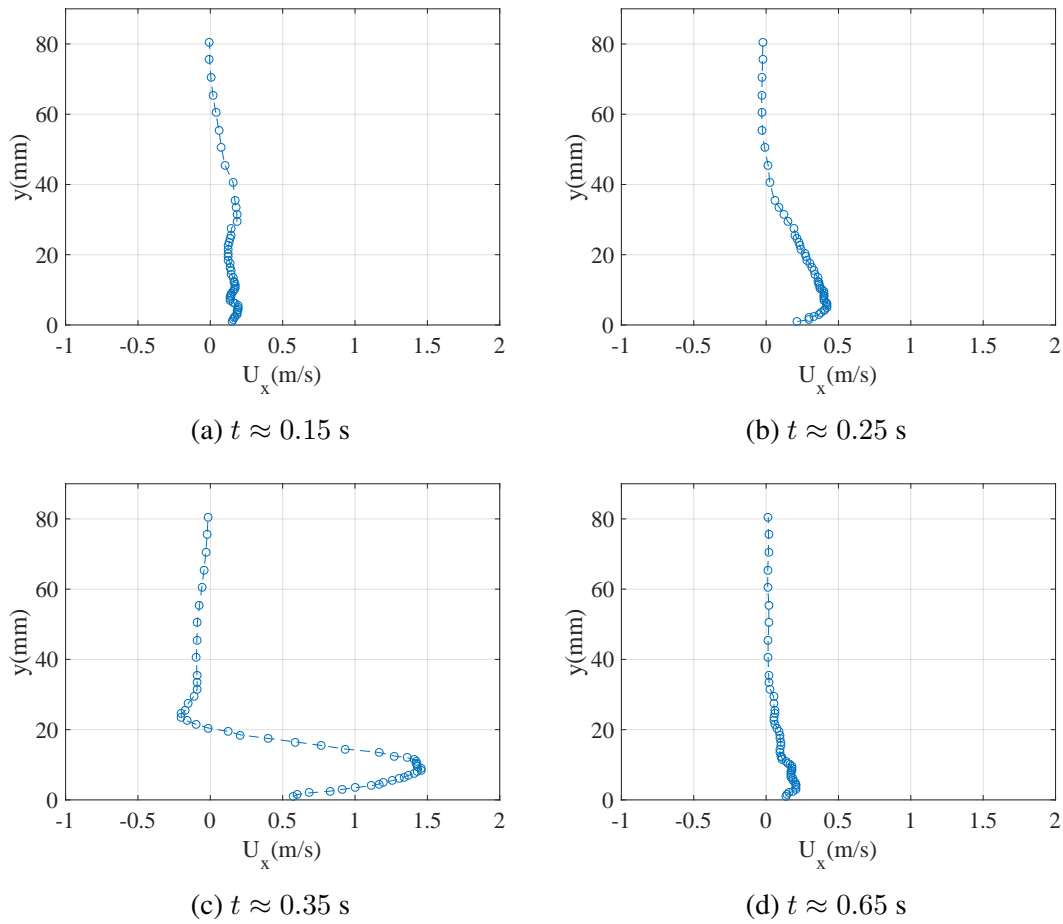


FIGURE 4.20 – Profils verticaux de la vitesse longitudinale obtenus par la technique LDV à $x = 4.5$ cm de la plaque à différents instant avec $t = 0$ s correspond au début du mouvement de la plaque

Chapitre 4. MESURE PAR VÉLOCIMÉTRIE LASER

longitudinale de l'écoulement à une distance égale à 1 mm du sol est égale à 0.56 m/s. La figure montre aussi une bonne correspondance entre les profils obtenus par les deux techniques. La vitesse de l'écoulement mesurée à une distance $y = 5$ mm du sol est égale 1.13 m/s dans la technique PIV et 1.2 m/s dans la technique LDV. A une distance $y = 10$ mm de la surface du sol, la vitesse longitudinale atteinte par la technique PIV est environ 1.34 m/s et celle enregistrée par la technique LDV est environ 1.42 m/s.

Ces résultats montrent que la technique de synchronisation utilisée nous a permis d'obtenir le profil vertical de la vitesse de l'écoulement à partir de mesures ponctuelles.

Les figures 4.20, représentent les profils verticaux de la vitesse longitudinale mesurée par la technique LDV à une distance $x = 4.5$ cm du bout de la plaque à différents instants après le mouvement de la plaque. Les quatre figures présentent toutes une forte augmentation de la vitesse puis un pic à $y = 10$ mm de la surface du sol. Cette augmentation est due au jet radial formé par la fermeture du volume situé entre le sol et la plaque pendant le mouvement de rotation de cette dernière. La valeur du pic augmente en fonction du temps jusqu'à atteindre une valeur maximale qui correspond au moment du passage du vortex.

4.5.3.3 Mesures longitudinales

En suivant les mêmes procédures nous avons effectué des mesures de la composante longitudinale de la vitesse selon la direction longitudinale x à une hauteur $y = 1$ mm de la surface du sol. Les mesures ont été effectuées en dessous et devant la plaque. Les points de mesure sont représentés dans la figure 4.21. La figure 4.22a représente la variation de la vitesse maximale atteinte aux différents points. La ligne en verticale représente la position longitudinale du bout de la plaque. On constate d'après la figure que la variation de la vitesse présente deux différents comportements. En effet dans le volume formé par la plaque et le sol, en s'éloignant de l'axe de rotation de la plaque la vitesse maximale atteinte aux différents points de mesure augmente en fonction de la distance par rapport à l'axe. Dans la zone externe, la vitesse maximale augmente jusqu'à atteindre un maximum où la valeur de la vitesse est égale à 2.6 m/s. La position du pic correspond au point situé à 2.7 cm du bout de la plaque quand cette dernière forme un angle 0° avec le sol. Ensuite, loin de cette position, la valeur de la vitesse maximale diminue fortement.

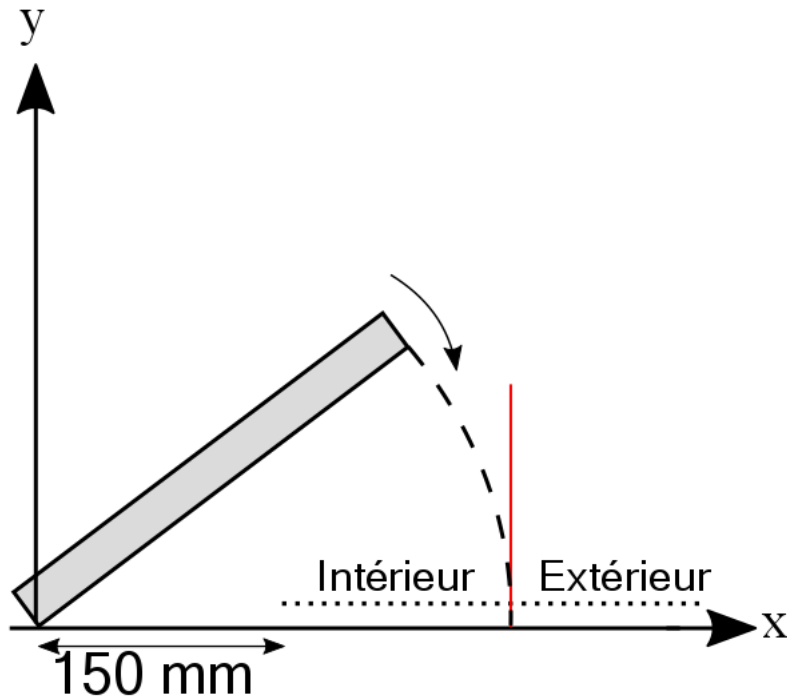


FIGURE 4.21 – Points de mesure du profil horizontal

Ces résultats sont en accord avec les résultats analytiques de [110] sur le fait que la vitesse de l'écoulement est proportionnelle à la distance par rapport au centre de la plaque (dans notre cas par rapport au point de rotation de la plaque) dans la zone formée par la plaque et le sol et inversement proportionnelle à cette distance à l'extérieur de cette zone (cf. équations 1.3, 1.4). Ces résultats mettent en évidence que la zone de forte vitesse de l'écoulement générée par le mouvement du simulateur du pas humain se situe devant la plaque. En termes de remise en suspension, nous pouvons en conclure que pendant le mouvement du pied, la zone de forte remise en suspension se situe devant la plaque sur un rayon donné. Cette constatation sera vérifiée à la fin du chapitre suivant.

Nous représentons dans la figure 4.22b la variation de l'accélération maximale de l'écoulement dans les mêmes points de mesure représentés dans la figure 4.21. La variation de l'accélération maximale de l'écoulement suit le même comportement que la variation de la vitesse maximale. Loin de l'axe de rotation, l'accélération maximale augmente jusqu'à atteindre un maximum de 5 m/s^2 . Ensuite l'accélération diminue fortement jusqu'à

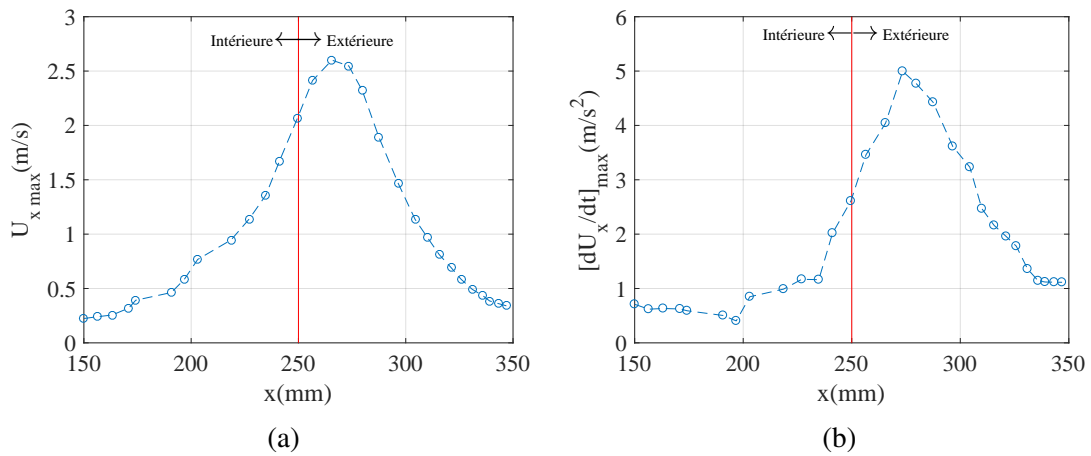


FIGURE 4.22 – a) Variation de la vitesse maximale atteinte en fonction de la position longitudinale, b) Variation de l'accélération maximale atteinte en fonction de la position longitudinale

une valeur égale à 1 m/s^2 .

4.5.3.4 Erreur de mesure

Le signal reçu du montage LDV qui représente la vitesse de l'écoulement est entaché d'incertitudes qui proviennent de deux principales sources : le montage LDV qui comprend les composants optiques et électroniques ; et le simulateur du pas humain. Les premières sources d'erreur sont connues et largement citées dans les travaux où la technique LDV a été utilisée et aussi leurs ordres de grandeur [59], [87]. Des précautions au niveau de la mise en place, le traitement et l'acquisition sont nécessaires afin de réduire ces erreurs. Quant à la deuxième source, elle est propre à notre étude et une intention particulière doit être faite à son propos.

Afin de donner un ordre de grandeur nous avons estimé l'Écart Type de la Moyenne ETM des résultats. Cette erreur dépend fortement du traitement statistique et un grand nombre d'échantillons est nécessaire afin de la réduire [96]. Nous représentons dans les figures 4.23 la variation de l'Écart Type de la Moyenne de la vitesse mesurée dans les différents points de mesure devant la plaque en fonction des deux distances verticale et longitudinale. Pour les mesures suivant la direction longitudinale, la figure 4.23a montre

4.5. Mesures par Vélocimétrie à effet Doppler LDV

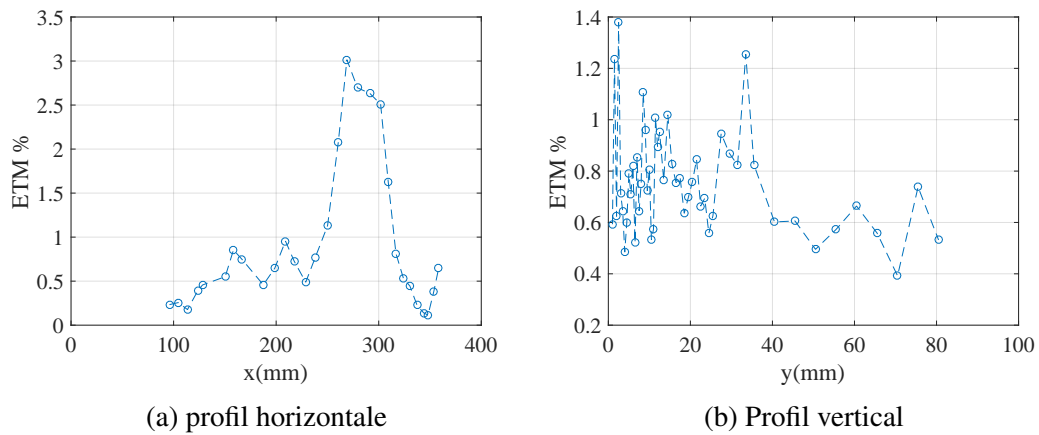


FIGURE 4.23 – Variation de l'Écart Type de la Moyenne de la vitesse mesurée en différents points

que l'erreur est en moyenne égale à 1.5 %. L'erreur maximale atteinte est égale à environ 3 % et elle correspond à la zone de forte vitesse. La figure 4.23b montre que l'Écart Type de la Moyenne pour les différents points de mesure dans la direction longitudinale est en moyenne égale à 0.8 %.

4.5.3.5 Mesure en dessous de la plaque

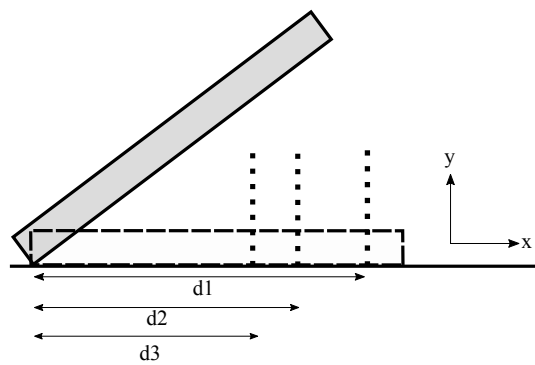


FIGURE 4.24 – Points de mesure de la vitesse en dessous de la plaque

Dans cette partie du travail, des mesures de la composante longitudinale de la vitesse de l'écoulement ont été effectuées en dessous de la plaque. Nous avons utilisé la

Chapitre4. MESURE PAR VÉLOCIMÉTRIE LASER

même démarche utilisée dans la section précédente avec le même dispositif de synchronisation. Nous présentons dans figure 4.25a un exemple de la variation en temps de la vitesse moyenne de l'air en un point en dessous de la plaque ainsi que deux solutions analytiques (voir § 1.3.1). Le point est situé à 23.5 cm de l'axe de rotation du simulateur et à une hauteur $y = 1$ mm. Les trois courbes montrent que l'air situé dans le volume formé par la plaque et le sol est accéléré à cause du mouvement de cette dernière. En comparant les trois courbes on constate qu'il y a une différence importante entre les résultats des mesures par LDV et les deux solutions analytiques mais également entre ces deux dernières. Nous pouvons expliquer cette différence importante par le fait que les solutions analytiques sont basées sur l'hypothèse d'un écoulement 2D.

Nous présentons dans la figure 4.25b la variation de la vitesse suivant la verticale à trois profondeurs différentes $x_1 = 23.5$ cm, $x_2 = 22$ cm et $x_3 = 21$ cm (cf. figure 4.24). Ces résultats sont en accord avec les résultats de mesures longitudinales sur le fait que la vitesse en dessous de la plaque diminue en s'approchant de l'axe de rotation et cela à toutes distances du sol.

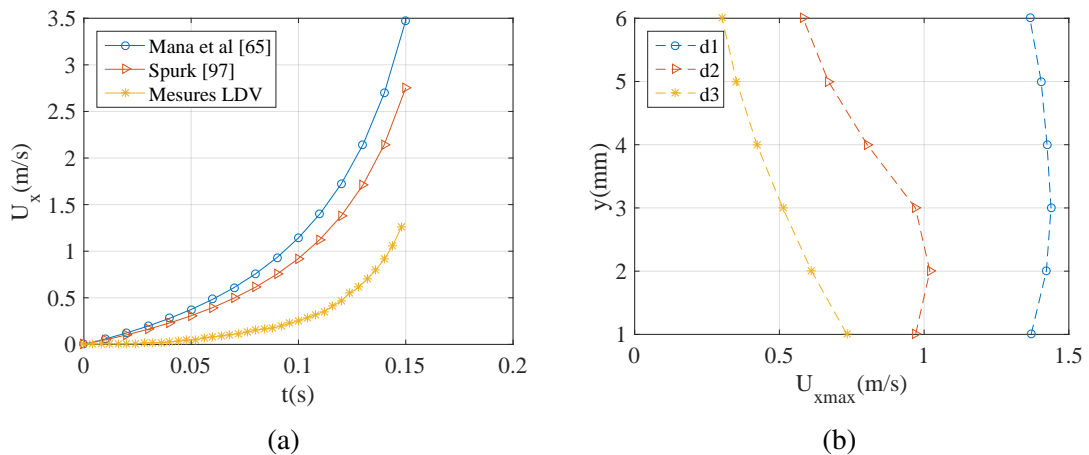


FIGURE 4.25 – a) Variation de la vitesse en dessous de la plaque en un point situé à une distance $x = 23.5$ cm de l'axe de rotation à $y = 1$ mm du sol, b) Variation de la vitesse maximale en différents points en dessous de la plaque à trois profondeurs différentes

4.5.3.6 Influence de la rugosité de la surface

Dans cette partie du travail, nous avons mesuré la variation de la vitesse longitudinale de l'écoulement à proximité de la plaque. Les mesures ont été effectuées à une distance horizontale $x = 3.5$ cm devant la plaque et à trois hauteurs de la surface du sol. Deux types de surface ont été utilisés. La surface rugueuse est la surface en vinyle utilisée dans les mesures présentées dans le chapitre 2 alors que la surface lisse a été collée directement sur la première surface en vinyle afin d'opérer dans les mêmes conditions. Les mesures ont été effectuées en alternant entre la surface en vinyle et la surface lisse et dans la même journée afin d'éviter toutes probabilités de changement de conditions de mesure. Pour chaque surface étudiée et pour chaque point, nous avons effectué en moyenne 150 mesures pour en calculer la moyenne.

Le tableau 4.2 donne les valeurs de la vitesse longitudinale maximale atteinte à trois

h(mm)	Surface PCV	Surface lisse
1	0.66 ± 0.004 (m/s)	0.60 ± 0.005 (m/s)
2	0.91 ± 0.005 (m/s)	0.88 ± 0.005 (m/s)
3	1.00 ± 0.01 (m/s)	0.99 ± 0.007 (m/s)

TABLE 4.2 – Les valeurs des vitesses maximales à différents y pour deux types de surfaces. Mesures à $x=3.5$ cm.

hauteurs différentes pour les deux types de surface. Les erreurs sont les Écarts Types de la Moyenne des vitesses. On constate d'après le tableau que les vitesses maximales atteintes au niveau des deux surfaces sont quasiment identiques au niveau des trois hauteurs.

4.6 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre l'écoulement généré par le mouvement d'un simulateur mécanique du pas humain a été expérimentalement étudié par deux techniques de Vélocimétrie Laser; la PIV et la LDV. Ces deux techniques ont été sélectionnées d'une part pour leurs caractères non intrusifs est d'autre part car elles permettent d'avoir la vitesse dans différentes zones au voisinage du simulateur. Les principaux objectifs de départ sont les suivant : visualiser le développement de l'écoulement, repérer la zone de forte vitesse

Chapitre4. MESURE PAR VÉLOCIMETRIE LASER

qui correspond à la zone de forte remise en suspension et enfin étudier l'influence de la rugosité de la surface sur l'écoulement.

Les mesures par la technique PIV ont permis surtout de visualiser la structure de l'écoulement généré par ce dernier mais aussi de connaître l'ordre de grandeur des vitesses atteintes par l'écoulement. Cependant, la technique présente certains points faibles et elle n'a pas permis d'étudier l'écoulement dans sa globalité. Les différents points faibles de la technique sont d'une part liés au principe de la technique et d'autre part au matériel utilisé dans le laboratoire. En effet, du fait de la sensibilité de la technique envers les réflexions au niveau des surfaces, les mesures ont été limitées à une distance de $y = 5$ mm de la surface. En ce qui concerne le matériel, la faible fréquence de la caméra par rapport au phénomène étudié ne permet pas de suivre l'écoulement dans le temps. Ainsi, le deuxième objectif n'a pas été atteint, et l'autre technique de mesure (LDV) a été utilisée.

Les mesures effectuées par la technique LDV ont permis d'étudier l'écoulement généré par le mouvement du simulateur dans deux zones : en dessous et devant la plaque. La bonne résolution temporelle de la technique et la technique de synchronisation développée ont permis de suivre l'écoulement généré par le mouvement de la plaque et de mettre en évidence que la variation de la vitesse et de l'accélération de l'écoulement le long de la direction longitudinale suit deux comportements dans deux différentes régions : à l'intérieure et à l'extérieure du volume formé par la plaque et le sol. Dans la zone intérieure, la vitesse et l'accélération de l'écoulement décroît en s'approchant du point de rotation de la plaque. Dans la zone extérieure, les deux variables présentent des maximums devant la plaque puis elles diminuent en s'éloignant de cette dernière. Comme la technique est moins sensible aux réflexions des rayons laser sur les surfaces, des mesures proches du sol ont été effectuées et ainsi un profil de vitesse vertical a été obtenu à une distance donnée du simulateur.

Les mesures effectuées à des distances supérieures à 1 mm de la paroi n'ont pas permis de comparer les comportements de l'écoulement dans les deux surfaces.

Chapitre 5

MESURE PAR ANÉMOMÉTRIE À FIL CHAUD

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus par la technique HWA. En effet, un banc expérimental a été conçu à l'École Royale Militaire (ERM) de Bruxelles pour les mesures de vitesses d'écoulement générées par le simulateur mécanique du pas humain en utilisant la technique HWA. Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les résultats de mesure obtenus par deux techniques de mesure basées sur la Vélocimétrie Laser : la LDV et la PIV. Chaque technique de mesure a apporté des informations sur le phénomène. Cependant, nous avons sollicité la technique du Fil Chaud d'un côté pour son excellente résolution temporelle et d'un autre côté pour sa capacité à mesurer dans l'environnement proche d'une surface.

Ce chapitre est organisé comme suite : Dans la première section nous présentons les différents moyens utilisés pendant cette partie de thèse. Dans la deuxième section nous présentons les techniques d'étalonnage de la sonde dans différents environnements, ensuite la technique utilisée pour la correction de la réponse de la sonde dans le voisinage d'une surface. Dans la troisième section nous discutons les différentes sources d'erreurs dans les mesures par HWA. La quatrième section est consacrée aux résultats de mesure. La dernière section du chapitre est une application des résultats obtenus sur l'étude du détachement des particules en utilisant un modèle approprié.

5.1 Banc expérimental

Dans cette section nous présenterons les différentes instrumentations qui constituent le banc expérimental conçu à l'ERM pour les mesures par la technique HWA. Les mesures ont été effectuées dans un grand volume fermé afin d'éviter toutes perturbations venant de l'extérieur. Contrairement aux deux techniques de mesure par Vélocimétrie Laser, nous n'avons pas effectué les mesures HWA à l'intérieure d'une enceinte à cause du système de déplacement de la sonde. En plus, les sondes HWA sont très fragiles et une simple fausse manipulation peut les endommager.

5.1.1 Caractéristiques de la sonde HWA

La sonde employée dans la présente étude (cf. figure 5.1) est conçue pour des mesures de vitesse dans les couches limites. La forme des dents permet des mesures proches d'une paroi solide sans perturbation de l'écoulement. L'axe de la sonde est parallèle à la direction du flux. La sonde est constituée d'un fil en tungstène platiné de $d_f = 5 \mu\text{m}$ de diamètre et de 1.25 mm de longueur soudée aux extrémités de deux broches solidaires d'un support en céramique. La géométrie de la sonde est représentée dans la figure 5.1. Le coefficient de surchauffe appliqué pendant toutes l'étude est $a_c = 0.8$. Les caractéristiques de la sonde de mesure sont présentées dans le tableau 5.1.

5.1.2 Système de déplacement des sondes

Un système de déplacement 2D a été conçu et qui permet de déplacer la sonde de mesure dans deux directions de l'espace en toute sécurité et sans que le support perturbe l'écoulement (figure 5.2). Le déplacement est assuré par deux moteurs à pas dans les deux directions de l'espace. Cet outil est facile à utiliser et entièrement automatisé grâce à un code sous Labview. Ce système nous a permis d'effectuer plusieurs mesures en différents points autour de la plaque.

Les différents éléments de la chaîne de mesure HWA sont pilotés à partir d'un ordinateur à l'aide d'un logiciel spécifique. L'acquisition des données et le mouvement de la plaque se font à partir d'un PXI sous des programmes mis en place par nous même.

5.1. Banc expérimental

Sensor resistance	3.35 Ω
Leads resistance	0.5 Ω
Temperature coefficient of resistance	0.36%
Max. sensor temperatur	300°
Max. ambient temperatur	150°
Min. velocity	0.05 m/s
Max. velocity	500 m/s

TABLE 5.1 – Les caractéristiques de la sonde de mesure

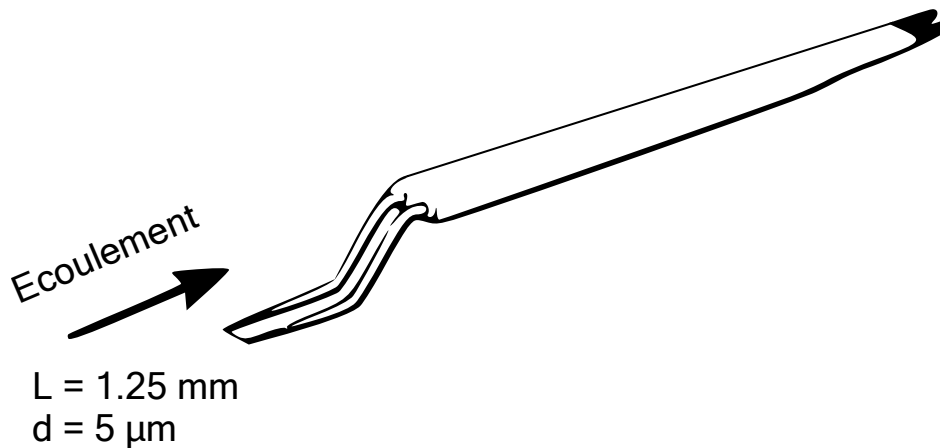


FIGURE 5.1 – Dimensions de la sonde CTA 55P15 utilisée pendant l'étude, avec L : la longueur du fil et d l'épaisseur (Documentation Dantec)

5.1.3 Estimation de la distance entre la surface et la sonde

Il est d'une importance capitale de connaître la distance entre le fil de la sonde HWA et la surface notamment dans le cas d'une mesure en proche paroi. Nous avons essayé

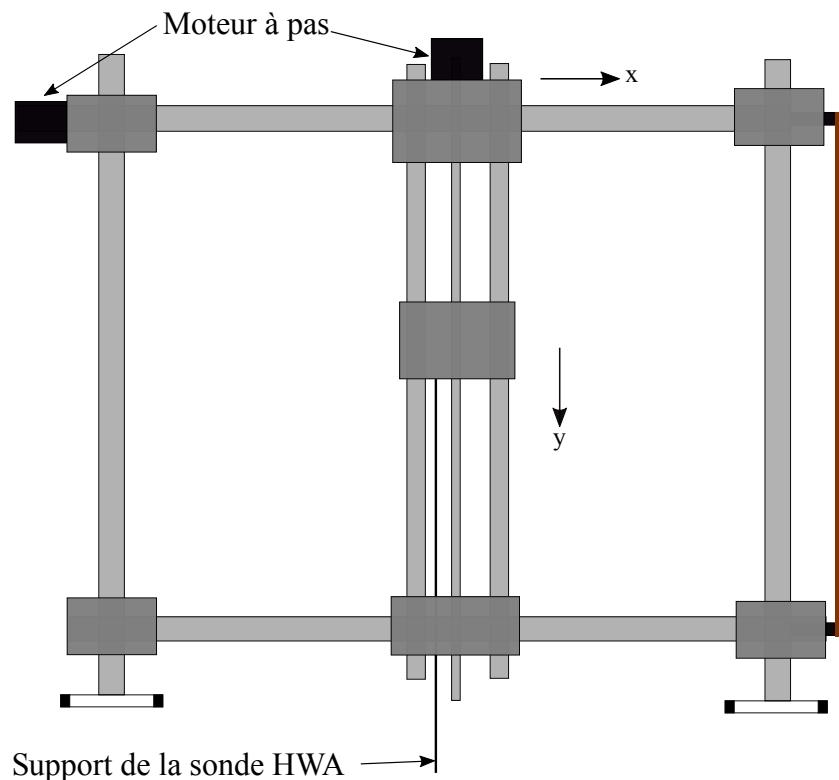


FIGURE 5.2 – Système de déplacement de la sonde HW

plusieurs techniques mais celle retenue est la plus précise et qui ne perturbe pas l'écoulement étudié. Le principe de la technique utilisée est le suivant : nous positionnons la sonde CTA à une distance donnée d'une surface plane puis, grâce à une caméra, nous enregistrons l'image montrant le fil de la sonde HWA et la surface (cf. figure 5.3). La distance entre le fil et la surface est ensuite estimée par un traitement d'image sous Matlab. Cette démarche est utilisée systématiquement pour chaque position de la sonde avant de commencer la mesure.

Concernant la surface en vinyle qui présente une certaine rugosité, nous considérons la distance zéro, le pic de la surface.

5.1.4 Soufflerie de l'étalonnage

La soufflerie à section ouvert du laboratoire MECA de l'ERM a été utilisée pour l'étalonnage de la sonde HWA près de la surface. Une photographie ainsi qu'un schéma

5.1. Banc expérimental

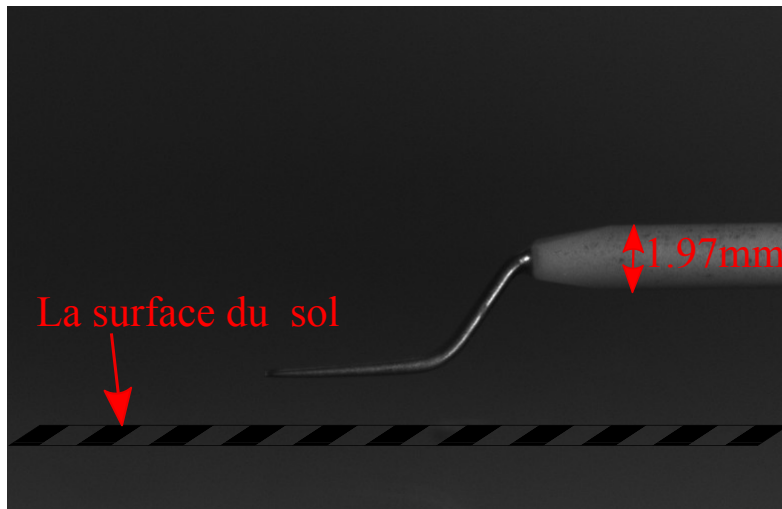


FIGURE 5.3 – La sonde CTA à proximité de la surface du sol



FIGURE 5.4 – Photo de la soufflerie de l'ERM

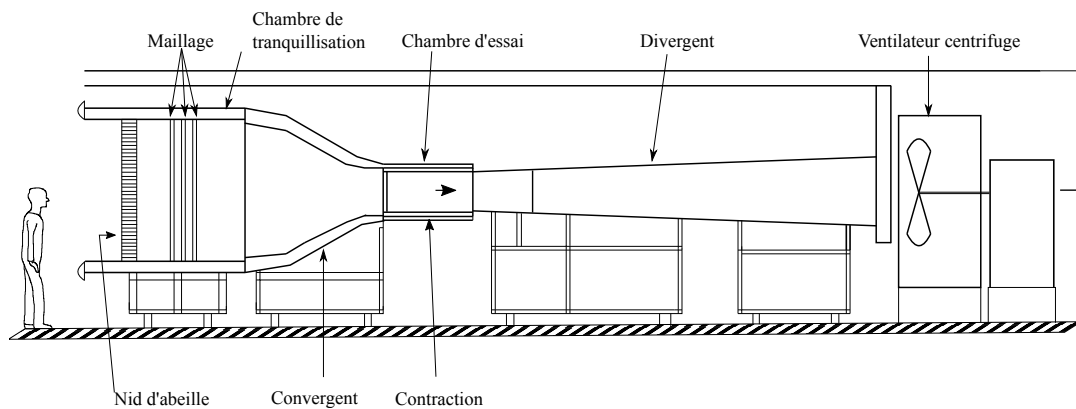


FIGURE 5.5 – Schéma de la soufflerie de l'ERM utilisée pour l'étalonnage de la sonde CTA (vue de côté)

montrant les différents composants de la soufflerie sont présentés respectivement dans les figures 5.4 et 5.5. La longueur totale de la soufflerie est 13 m, les dimensions de la section d'essais sont $0.6 \times 0.6 \times 1.2$ m alors que le diamètre de l'entrée du convergent est de 1.8 m ce qui donne un rapport de contraction de 9. La paroi latérale de la section d'essais est mobile pour permettre la mise en place des instruments et de placer la sonde de mesure. La soufflerie comprend un ventilateur centrifuge de puissance 45 kW. L'écoulement est rendu homogène par des grillages et des nids d'abeilles. La soufflerie produit des vitesses dans l'intervalle $[0 - 45]$ m/s.

5.2 Étalonnage de la sonde CTA

Le système d'étalonnage ne fait pas partie de la chaîne de mesure CTA, mais il joue un rôle très important dans la précision et la validation des mesures (documentation DANTEC). Dans ce travail, l'étalonnage de la sonde a été effectué dans un calibre DANTEC (figure 5.6) qui génère un jet avec une faible intensité de turbulence, dont la vitesse est calculée sur la base de la chute de pression sur sa sortie. Le principe de l'étalonnage est le suivant : la sonde CTA est exposée systématiquement à des écoulements avec des vitesses moyennes connues. Pour chaque vitesse de l'écoulement U_i , la réponse du système CTA est donnée sous la forme d'une tension E_i . Nous traçons ensuite

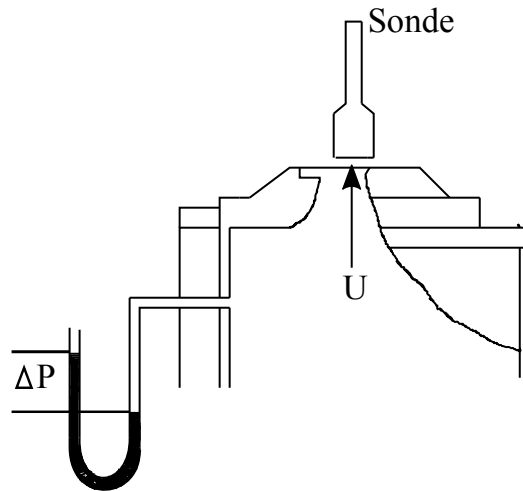


FIGURE 5.6 – Principe d'un calibre DANTEC (Documentation DANTEC)

la variation de E en fonction de la vitesse de l'écoulement U . Deux façon s'offre à nous pour ajuster la courbe et obtenir la fonction de calibration :

- En utilisant la loi de King sous la forme :

$$E^2 = A + BU^n \quad (5.1)$$

$$U = \left(\frac{E^2 - A}{B} \right)^{1/n} \quad (5.2)$$

Les constantes A et B sont obtenues par la calibration. A est un coefficient qui représente la tension à vitesse nulle, B est un coefficient qui dépend des propriétés physiques du fluide utilisé et de la sonde CTA, quant à n , il dépend de la géométrie de la sonde et du domaine des vitesses. Pour des conditions expérimentales données et pour un domaine de vitesse donné, les coefficients B et n sont des constantes.

- En utilisant une fonction polynomiale d'ordre 4 :

$$U = P(E) = a_1E^4 + a_2E^3 + a_3E^2 + a_4E + a_5 \quad (5.3)$$

Les coefficients a_i sont trouvés par la calibration. L'utilisation systématique de la loi de King et d'un polynôme dans notre cas est uniquement à titre de vérification.

Chapitre 5. MESURE PAR ANÉMOMÉTRIE À FIL CHAUD

Toute la démarche d'une mesure par CTA est faite grâce à la chaîne de mesure présentée précédemment (cf. figure 3.7) et par l'intermédiaire d'un programme réalisé par nos soins sous le logiciel Labview.

Avant la mise en place de la sonde CTA quelques points doivent être pris en compte :

- Comme notre technique est basée sur un montage CTA, l'orientation de la sonde par rapport à l'écoulement doit être la même pendant la calibration et pendant les mesures,
- Les calibrations sont effectuées avant et après les mesures pour vérifier la stabilité de la sonde. Dans le cas où les fonctions de transferts avant et après les mesures ne sont pas les mêmes, nous moyennons les deux fonctions,
- Les mesures sont effectuées dans les mêmes conditions de température. Dans notre travail, la température dans le volume tout au long des mesures est restée constante et égale à 22 ± 1 °C.

5.2.1 Étalonnage à basses vitesses

Les techniques d'étalonnage classiques comme celle présentée dans la section précédente présentent des limites lorsqu'on mesure des vitesses relativement faibles. Comme la vitesse de l'écoulement générée par le mouvement du simulateur s'étend sur une large gamme (résultats de la technique LDV), en plus de l'étalonnage précédent, nous avons suivi une procédure d'étalonnage particulière pour les faibles vitesses. En effet, sur le calibre DANTEC, nous avons rajouté un cylindre de 1 m de long et d'un diamètre plus grand que le diamètre de la sortie du calibre. L'augmentation de la section de la conduite fait que la vitesse à la sortie de la deuxième conduite soit plus faible que celle à la sortie du calibre (cf. figure 5.7). Ce dispositif nous a permis finalement d'obtenir un rapport $A_2/A_1 = 63.3$ entre la vitesse d'entrée et celle de sortie avec A_1 et A_2 représentant la section intérieure de la sortie du tube du calibre DANTEC et du cylindre respectivement. Dans la figure 5.8 nous représentons la variation de la réponse de la sonde (la tension en V) en fonction de la vitesse de l'écoulement ajustée avec une loi de la forme 5.1. Les coefficients de la loi d'ajustement du cas présenté sont : $A = 1.255$, $B = 0.3371$, $n = 0.4058$.

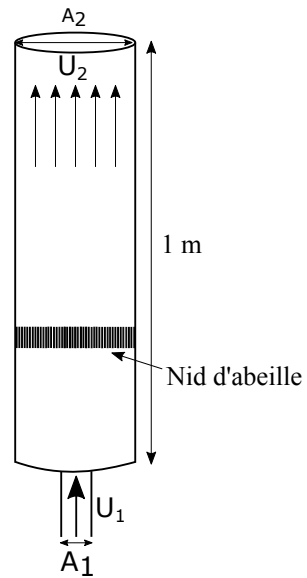


FIGURE 5.7 – Outils de calibration des mesures de faible vitesse

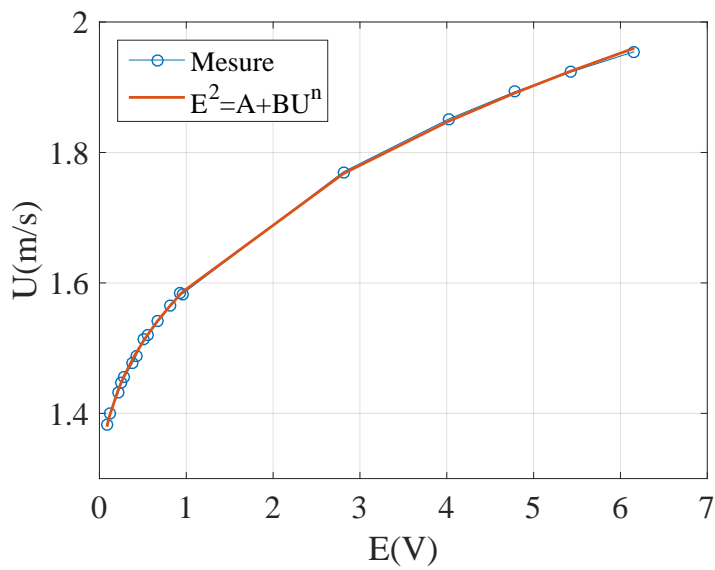


FIGURE 5.8 – Exemple d'un résultat de calibration ajusté avec la loi de la forme $E^2 = A + BU^n$

5.2.2 Étalonnage de la sonde en proche paroi

Durant la présente étude, nous avons éprouvé certaines difficultés pour étalonner la sonde pour les mesures en proche paroi. Après une longue recherche bibliographique sur le sujet nous avons constaté qu'il existe des divergences importantes entre les techniques d'étalonnages utilisées. Nous allons dans cette section présenter la procédure d'étalonnage en proche paroi que nous avons suivie.

Nous allons dans un premier temps montrer l'influence de la surface sur la réponse de la sonde HWA dans le cas avec et sans écoulement. Dans la suite, nous présenterons la technique que nous avons adoptée afin de corriger la réponse de la sonde proche d'une paroi.

5.2.2.1 Réponse d'une sonde HWA sans écoulement

Dans un premier temps nous avons réalisé des mesures de la tension par le montage présenté précédemment à différentes distances du sol et sans écoulement. La tension électrique E moyenne ainsi enregistrée représente donc le bruit de fond. Les mesures ont été effectuées dans un grand volume à proximité d'une surface plane. Des plaques de différents matériaux ont été utilisées : plexiglas lisse, aluminium et surface en vinyle. Pour réaliser les mesures dans la partie la plus proche de la plaque, la sensibilité de la sonde nécessite d'être prudent et d'appliquer une procédure stricte de telle sorte à placer la sonde correctement sans qu'elle touche la plaque, ce qui peut engendrer un dommage certain voir même une rupture du filament. En moyenne 100 points de mesure ont été effectués pour chaque cas étudié.

La figure 5.9 représente la variation en échelle logarithmique de la tension électrique enregistrée en un point donné normalisée par rapport à la tension loin de la surface en fonction de la distance y entre le fil et la surface pour trois types de surface : le plexiglas lisse, l'aluminium et la surface en vinyle. Les courbes montrent clairement l'influence de la surface sur la réponse de la sonde HWA à partir d'une distance égale à environ 2.5 mm. Nous avons utilisé des surfaces avec des conductivités thermiques différentes, et comme dans le travail de Durst et Zanoun [23], nous constatons que ce paramètre influence la réponse de la sonde proche de la surface. Dans la section suivante et afin de corriger la réponse de la sonde, nous allons étudier cette influence dans le cas où la sonde est mise dans un écoulement.

5.2. Étalonnage de la sonde CTA

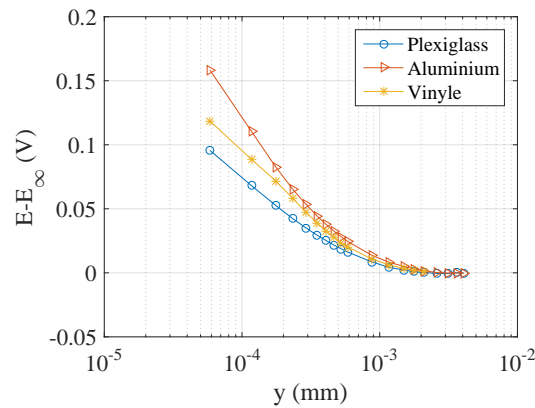


FIGURE 5.9 – Variation de la tension moyenne de la sonde sur une échelle logarithmique en fonction de la distance entre la sonde et la surface pour différents revêtements (E_∞ est la tension loin de la surface)

5.2.2.2 Réponse de la sonde dans un écoulement

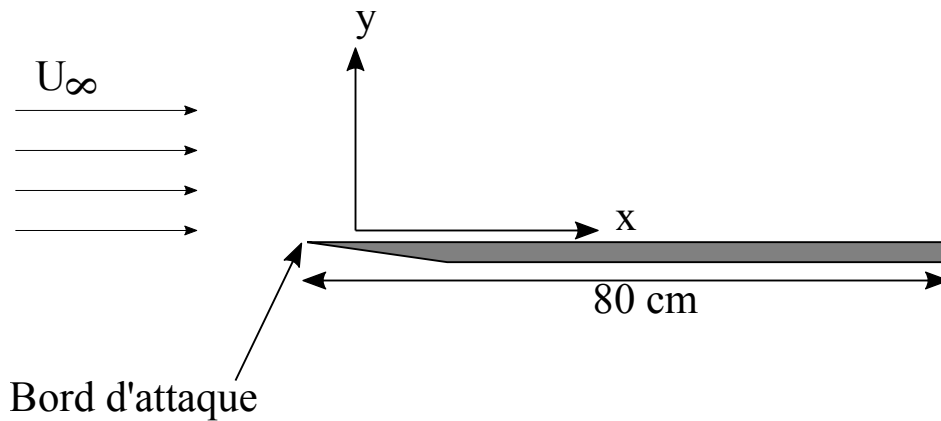


FIGURE 5.10 – Plaque plane en plexiglas lisse

La technique que nous allons montrer dans un premier temps et qui est généralement utilisée pour corriger la réponse de la sonde en proche paroi consiste à comparer le profil de vitesse obtenue sur une plaque plane lisse, horizontale et parallèle à l'écoulement avec une solution analytique de couche limite (solution de Blasius). La solution correspond à la sous couche laminaire, $U^+ = U_x/U_\infty = F(\eta)$, avec η représente la coordonnée adimensionnelle, $\eta = y\sqrt{(U_\infty/x_c\nu)}$, x_c est la distance horizontale entre le

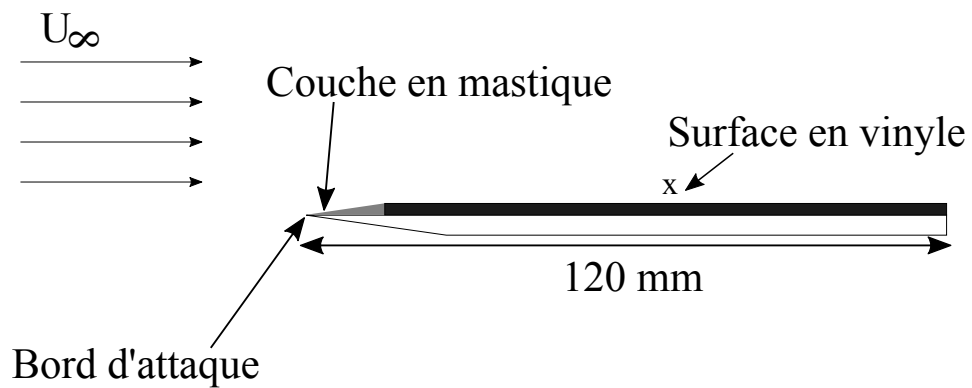


FIGURE 5.11 – Plaque plane recouverte de la surface en vinyle



FIGURE 5.12 – Banc expérimental pour la calibration de la sonde en proche paroi

bord de la plaque et le point de mesure et ν la viscosité cinématique.

La procédure de mesure de vitesse dans la soufflerie est effectuée en suivant les étapes ci-après :

5.2. Étalonnage de la sonde CTA

- Mise en place de la plaque plane en plexiglas de façon qu'elle soit horizontale à l'écoulement.
- Après la mise en place de la sonde à une certaine distance de la surface de la plaque plane (le point le plus proche de la surface), on met en marche la soufflerie avec une vitesse connue (nous avons utilisé un fichier d'étalonnage qui a été effectué dans le laboratoire lors d'une étude précédente),
- On estime la distance entre la sonde et la surface (voir § 5.1.3),
- On mesure la tension donnée par la sonde pendant une minute,
- On déplace la sonde avec un pas d'espace donné vers une position plus grande grâce au système de déplacement mis en place, ensuite on revient à la troisième étape.

5.2.2.3 Comparaison avec la solution analytique

La solution analytique de Blasius est obtenue en résolvant l'équation différentielle suivante :

$$f''' + f f'' = 0 \quad (5.4)$$

Avec les conditions aux limites $f(0) = f'(0) = 0$, $f'(\infty) = 1$. Les différentes hypo-

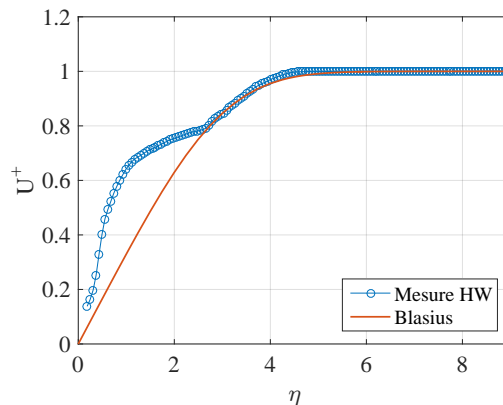


FIGURE 5.13 – Comparaison du profil de la vitesse longitudinale moyenne obtenu sur la plaque plane en plexiglas à 36 cm du bord avec la solution analytiques de Blasius

thèses et démarches conduisant à l'obtention de cette équation différentielle ainsi que

Chapitre 5. MESURE PAR ANÉMOMÉTRIE À FIL CHAUD

les techniques de résolution sont largement exposées dans les ouvrages de la Mécanique des Fluides.

Les mesures de vitesse ont été effectuées dans la grande soufflerie de l'ERM. Dans la figure 5.12, nous représentons le banc expérimentale utilisée à cette fin. Nous avons utilisé une surface en plexiglas (cf. figure 5.10). Les différents tests effectués (nous avons opéré avec différentes vitesses de l'écoulement et mesuré à différentes distances du bord d'attaque) montrent qu'à partir d'une certaine distance $\eta \simeq 2.5$ de la surface, nous enregistrons une déviation de la loi de Blasius. Les résultats d'un des cas étudié sont présentés dans la figure 5.13. La figure correspond au cas de mesure sur la plaque plane en plexiglas à 36 cm du bord. Cette déviation est probablement due au bord d'attaque des plaques utilisées qui ne sont pas parfaitement fins et qui génère probablement de la turbulence.

Nous avons donc vite abandonné cette stratégie pour une autre qui consiste à effectuer les mêmes mesures mais cette fois sur une plaque inclinée d'un angle α . Dans le cas d'une plaque inclinée, le terme de gradient de pression devient non nul. Dans ce cas, la solution analytique est obtenue en résolvant l'équation différentielle suivante :

$$f''' + f f'' + \beta(1 - f'^2) = 0 \quad (5.5)$$

avec

$$\beta = \frac{2\alpha}{\pi} \quad (5.6)$$

Cette équation a été obtenue et résolue pour la première fois par Falkner et Skan(1930). Comme pour le cas de la solution analytique de Blasius, le lecteur peut se référer aux ouvrages de mécanique des fluides pour plus de détails concernant l'obtention de cette équation. Nous avons suivi le même protocole expérimental que dans le cas avec plaque horizontale mais dans ce cas, la plaque a été inclinée d'un angle donnée. Nous avons commencé dans un premier temps par des mesures sur plaque lisse en plexiglas. Nous avons effectué plusieurs tests en inclinant graduellement la plaque jusqu'à l'obtention d'un angle ($\alpha = 3.75^\circ$) qui donne des résultats qui correspondent à la solution analytique.

Les figures 5.14 représentent la variation de la vitesse moyenne mesurée sur la plaque en plexiglas inclinée comparé avec la solution analytique. Le point de mesure se trouve

5.2. Étalonnage de la sonde CTA

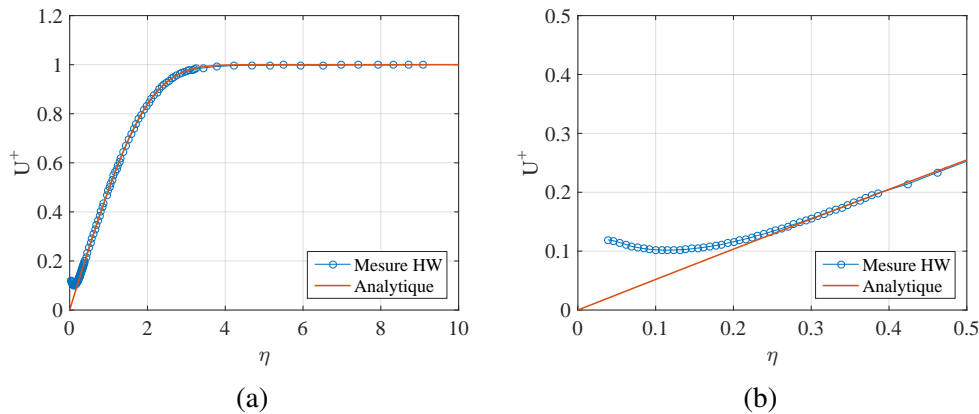


FIGURE 5.14 – Variation de la vitesse longitudinale moyenne de l'écoulement mesurée par la sonde sur une plaque en plexiglas inclinée avec la solution analytique, avec $\beta = 0.0417$, $x_c = 42$ cm et $U_{infty} = 5.7$ m/s, a) profil complet, b) zoom proche de la paroi, a) profil complet, b) zoom sur la zone proche du sol

à 42 cm du bord de la plaque. Nous constatons d'après la figure que les mesures sont en concordance avec le résultat de la solution analytique. A partir d'une distance $y = 0.2$ mm de la paroi, nous remarquons une déviation du profil de la vitesse mesurée. Cette déviation traduit l'influence de la paroi sur la vitesse. Nous remarquons aussi que cette distance est inférieure à la distance d'influence trouvée dans la section précédente par les mesures sans écoulement. Cette différence est due à la présence de la convection forcée causée par l'écoulement.

Dans un deuxième temps, nous avons effectué les mêmes mesures dans les mêmes conditions expérimentales sur une plaque recouverte d'une surface en vinyle (figure 5.11). Nous avons posé la surface dans ce cas sur une plaque en bois, ensuite nous avons rempli l'espace avec du mastic afin de rendre le bord le plus fin possible. Un polissage de la couche rajoutée a été effectué après son dépôt pour avoir une surface lisse pour ne pas déclencher la turbulence (cf. figure 5.11). Les figures 5.15a, 5.15a. Les figures montrent que le profil de vitesse obtenue correspond au profil analytique avec une déviation du à une distance $\eta = 0.25$. Nous constatons aussi que pour une distance de la paroi $\eta > 0.25$, la rugosité de la surface n'a pas joué un rôle sur le profil de vitesse.

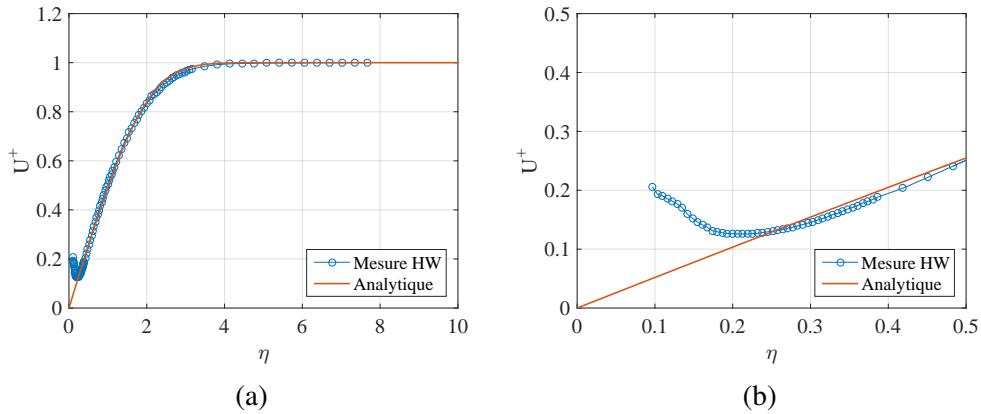


FIGURE 5.15 – Variation de la vitesse longitudinale moyenne de l'écoulement mesurée par la sonde sur la surface en vinyle inclinée avec la solution analytique, $\beta = 0.0417$, $x_c = 5.8$ cm, $U_\infty = 5.7$ m/s, a) profil complet, b) zoom sur la zone proche du sol

5.2.2.4 Correction de la vitesse proche de la surface

Cette dernière investigation a mis en évidence qu'en présence d'un écoulement la réponse d'une sonde HWA proche d'une surface est aussi influencée par cette dernière. La correction de la réponse de la sonde dans cette zone consiste à trouver une fonction qui permet de convertir les valeurs de la vitesse mesurées proche de la paroi et qui sont des valeurs erronées (par l'effet de la paroi) à des valeurs correctes. La fonction de correction est donnée par la relation suivante :

$$C = \frac{U_x}{U_{analytique}} \quad (5.7)$$

Avec U les valeurs de la vitesse issues de la mesure et $U_{analytique}$ une solution analytique. Dans le cas d'une surface lisse comme le plexiglas, $U_{analytique}$ est la solution de l'équation 5.5. Cependant, dans le cas de la surface en vinyle (surface présentant une certaine rugosité) et en absence d'une solution analytique, nous utilisons les conditions aux limites (la vitesse est nulle au niveau du sol) et ensuite nous interpolons les valeurs de la vitesse en utilisant une fonction polynôme ou de type Padé.

Nous représentons dans la figure 5.16 les fonctions de correction C des deux cas étudiés (la plaque en plexiglas lisse et la surface en vinyle). Dans le cas de la surface en plexiglas lisse (cf. figure 5.16b) nous représentons deux fonctions de correction : la première en utilisant la solution de l'équation 5.5 et une en utilisant en fonction issue de

5.3. Erreurs de mesure par la technique HWA

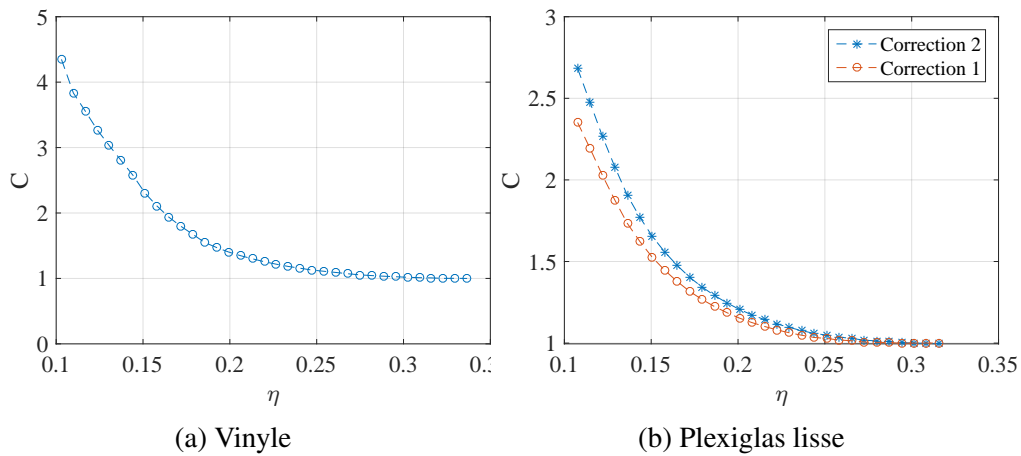


FIGURE 5.16 – Fonctions de correction dans le cas d’une a) plaque plane couverte en vinyle, b) plaque plane en plexiglas lisse avec : Correction 1 en utilisant la solution de l’équation 5.5 et Correction 2 en utilisant l’interpolation

l’interpolation. Nous constatons donc qu’en utilisant une fonction d’interpolation, nous pouvons retrouver un profil de vitesse corrigé avec une erreur $< 8 \%$.

La fonction C ainsi trouvée sera utilisée dans la suite pour corriger le profil de la vitesse de l’écoulement générée par le mouvement du simulateur du pas humain dans la zone proche de la paroi.

5.3 Erreurs de mesure par la technique HWA

Comme chaque mesure expérimentale, notre mesure de la vitesse de l’écoulement par HWA est entachée d’erreurs de différents types. Pour l’analyse des résultats il est très important de connaître les différentes sources d’incertitudes. Ces incertitudes sont de deux natures : des incertitudes liées au montage HWA dans son ensemble, et des incertitudes liées à notre simulateur mécanique du pas humain. Dans la suite, nous allons citer brièvement les différentes sources d’incertitude ainsi que leurs ordres de grandeurs.

- Incertitude sur la tension CTA : L’incertitude sur la mesure de la tension en sortie de l’anémomètre est constituée par le bruit de la mesure, l’erreur commise en moyennant la tension et l’erreur de quantification de la chaîne d’acquisition. Les résultats expérimentaux correspondant sont représentés sur la figure 5.17. L’erreur

Chapitre 5. MESURE PAR ANÉMOMÉTRIE À FIL CHAUD

commise en moyennant la tension est de l'ordre du mV. La carte d'acquisition codant sur 16 bits et les tensions étant mesurées sur une plage $-5v,+5v$, l'erreur de quantification est de 0.15 mV. On prend comme écart-type pour les mesures de tension, le maximum de l'incertitude obtenue pour les différentes valeurs de vitesse.

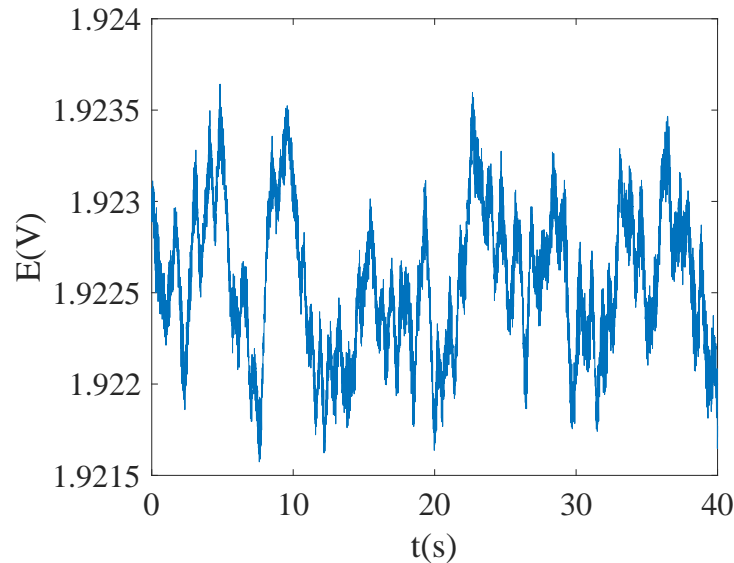


FIGURE 5.17 – Variation de la tension mesurée dans la soufflerie avec vitesse moyenne d'écoulement constante $U_{\infty} = 5.3$ m/s

- Incertitude au niveau de la calibration : Dans cette catégorie la source d'erreur la plus importante est au niveau de la mesure de tension (voir § 5.2) et la régression de la courbe de calibration. La vitesse réelle est donnée en fonction de la vitesse donnée par le calibre :

$$U = \frac{1}{100} \cdot STDV(U_{calibreur}(\%)) \quad (5.8)$$

avec :

$$STDV(U_{calibreur}) = \pm a_{cal}(\%) + b_{cal}(m/s) \quad (5.9)$$

Les constantes a_{cal} et b_{cal} sont respectivement $\pm 1m/s$ et $\pm 0.02\%$

- Erreurs du niveau des conditions de mesure : Cette erreur est due principalement au principe de la technique CTA qui est sensible à la température ambiante.

5.4. Étude du l'écoulement généré par le simulateur du pas humain

D'après la documentation DANTEC l'erreur dans la mesure de la vitesse avec une sonde HWA est environ 2% pour un changement de température de 1°C. La vitesse mesurée décroît quand la température de l'environnement et vice versa. Nous avons minimisé cette erreur en effectuant des calibrations avant et après chaque mesure et dans les mêmes conditions. La calibration ainsi que la mesure ont été généralement effectuées le même jour est dans une période relativement courte,

- Erreur due à la contamination de la sonde : La contamination de la sonde est une source importante d'erreur car dans ces conditions, les caractéristiques de la sonde peuvent être changées et par conséquent elles influencent la réponse de la sonde. Dans nos travaux, les mesures ont été généralement effectuées dans un temps très court et dans l'air ambiant, ce qui diminue le risque de contamination,
- Erreurs de mesures de faibles vitesses : Dans cette catégorie, la convection naturelle constitue une source importante d'erreur [79],
- Le faible nombre d'échantillons (en moyenne 20 mesures pour chaque point) fait que l'erreur de traitement statistique devient importante.
- Erreur induite par le simulateur mécanique du pas : Ce dernier est une source importante d'incertitude dans nos mesures. Les vibrations générées par l'impact de la plaque sur le sol sont une source importante d'erreurs. En effet, comme notre simulateur du pas humain est fixé sur une plaque en bois, des vibrations trop importantes sont générées à chaque impact. Ce point sera traité plus en détails dans la suite de ce manuscrit.

5.4 Étude du l'écoulement généré par le simulateur du pas humain

Nous avons dans cette partie du travail étudié l'écoulement de l'air généré par le mouvement du simulateur du pas humain. Pour chaque point, nous avons effectué en moyenne 20 mesures afin de vérifier la répétabilité de notre processus et aussi pour en calculer la moyenne de la vitesse. Le système de coordonnées utilisé est un repère cartésien, il est schématisé dans la figure ???. L'origine est placée au bout de la plaque

lorsque cette dernière est posée sur le sol. La direction longitudinale (Ox) est celle parallèle à l'écoulement. La direction verticale (Oy) est ascendante, perpendiculaire au sol et appartenant au plan coupant la plaque au milieu et dans la direction longitudinale.

5.4.1 Test de répétabilité

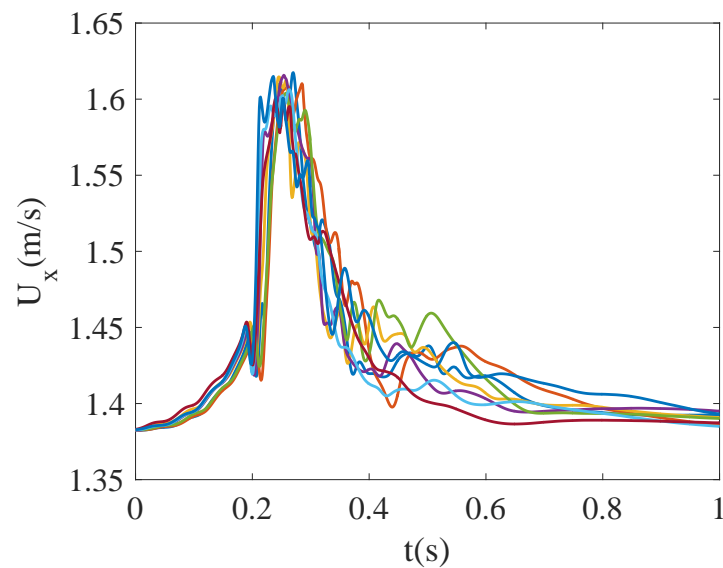


FIGURE 5.18 – Variations de la vitesse enregistrée par la sonde en un point devant la plaque pour différents tests

Contrairement à la technique LDV, pendant les mesures par la technique HWA nous avons réussi à synchroniser la mesure et le mouvement de la plaque grâce au signal reçu depuis la sonde de mesure CTA. La figure 5.18 représente la variation de la vitesse de l'écoulement enregistrée en un point donné devant la plaque du simulateur mécanique pendant le mouvement descendant pour différents tests effectués dans les mêmes conditions. La figure montre un résultat semblable à celui donné par la technique LDV ; une légère augmentation de la vitesse de l'écoulement pendant le mouvement de la plaque suivi par une forte augmentation qui caractérise le passage du vortex, ensuite une forte diminution de la vitesse. On constate aussi que nous avons une excellente répétabilité grâce à la technique de synchronisation utilisée.

5.4.2 Analyse du signal de la sonde

Dans cette partie nous avons effectué une étude sur les incertitudes de mesure par la technique HWA. Comme pour les mesures par technique LDV, nous avons mis l'accent sur les incertitudes causées par le simulateur mécanique et l'inhomogénéité de l'écoulement. Nous avons constaté après une première analyse que les signaux enregistrés

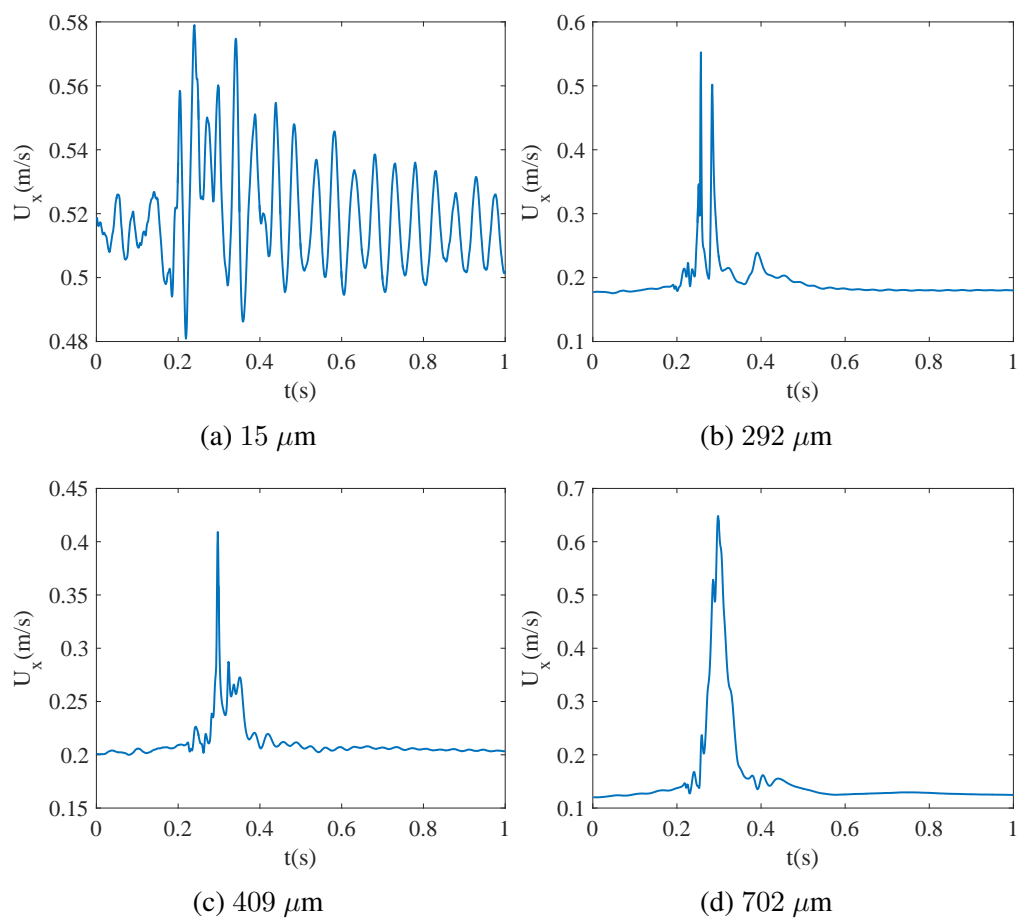


FIGURE 5.19 – Évolution du signal en fonction du temps à différentes distances de la surface du sol

présentent un certain bruit (cf. figures 5.19). Les mesures proches du sol montrent clairement ce bruit qui est présent même après le passage du vortex. Au niveau des autres points ces vibrations sont relativement moins visibles. Aucune comparaison ne peut être faite à ce stade avant d'analyser les courbes. Quant à l'origine du bruit, il est probable-

Chapitre 5. MESURE PAR ANÉMOMÉTRIE À FIL CHAUD

ment dû aux vibrations du sol générées suite à l'impact de la plaque sur ce dernier. En effet, le simulateur du pas humain a été fixé sur une plaque en bois afin de faciliter son transport et aussi pour effectuer les mesures PIV, LDV et HW sans démonter le mécanisme. Pour les premiers points de mesure, la distance entre le fil et le sol est de l'ordre du μm , ce qui fait que des petites vibrations vont changer les distances entre le sol et le fil de plusieurs ordres de grandeur influençant ainsi la réponse de la sonde. Une autre hypothèse concernant l'origine du bruit enregistré dans cette zone est le fait

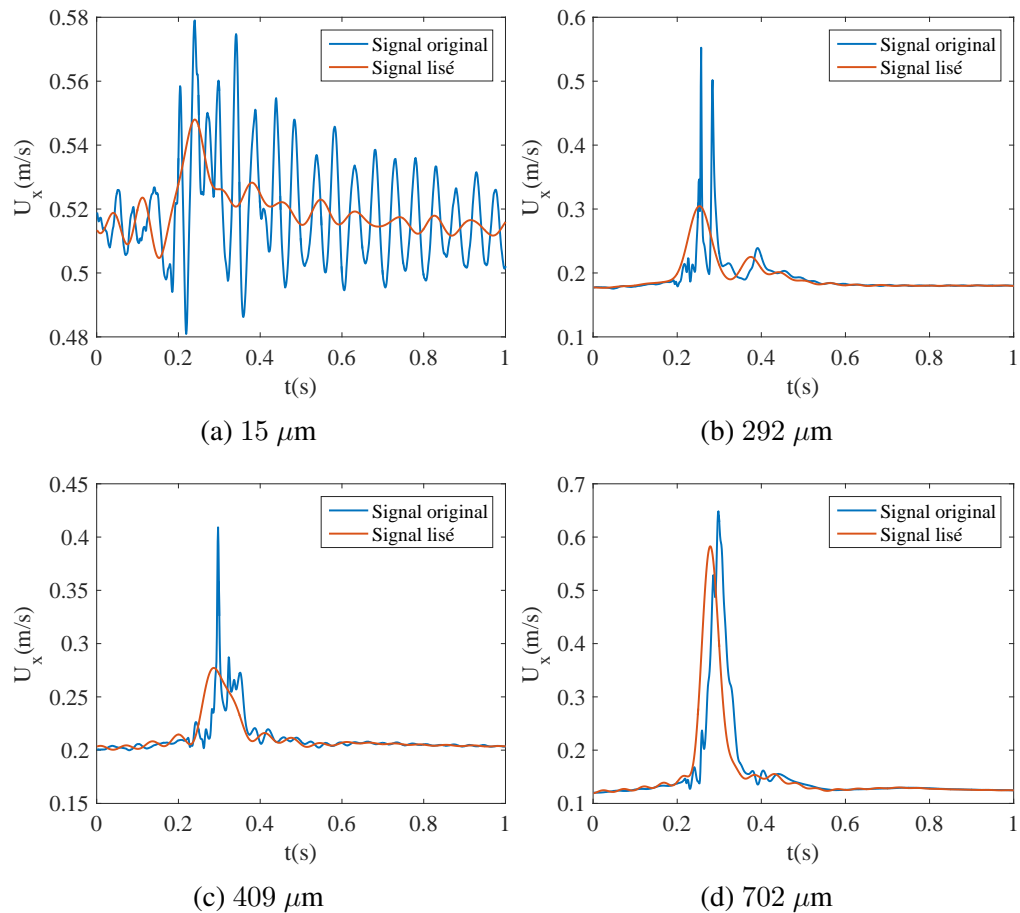


FIGURE 5.20 – Évolution du signal en fonction du temps à différentes distances de la surface du sol avec les signaux lissés par la FFT

que les vibrations du sol influencent directement l'écoulement généré par le simulateur. Nous n'avons pas vérifié la validité de cette dernière hypothèse au cours de nos travaux à cause du manque de temps consacré à l'étude. Nous avons donc effectué une

5.4. Étude du l'écoulement généré par le simulateur du pas humain

analyse spectrale des signaux enregistrés par l'application d'une FFT. Les figures 5.20 représentent la variation de la vitesse enregistrée et celle lissée en gardant que les 50 premiers modes.

5.4.3 Profils de la vitesse longitudinal

5.4.3.1 Profil vertical

Dans un premier temps nous avons vérifié la validité de notre démarche et l'ordre de grandeur des vitesses mesurées par la technique HWA en les confrontant à ceux obtenues auparavant par la technique LDV. Nous avons donc comparé les variations de la vitesse longitudinale maximale en fonction de la distance par rapport à la paroi à une distance égale à 4.5 cm du bout de la plaque obtenues par les deux techniques de mesures LDV et HWA. Les résultats sont représentés dans la figure 5.21 et elles montrent une bonne correspondance entre les deux techniques. Nous constatons aussi que les mesures effectués par la technique HWA s'approchent encore plus du sol comparant avec la technique LDV. Cependant, comme attendu, nous constatons que la réponse de la sonde très proche de la paroi est influencée par cette dernière. La figure 5.22 montre

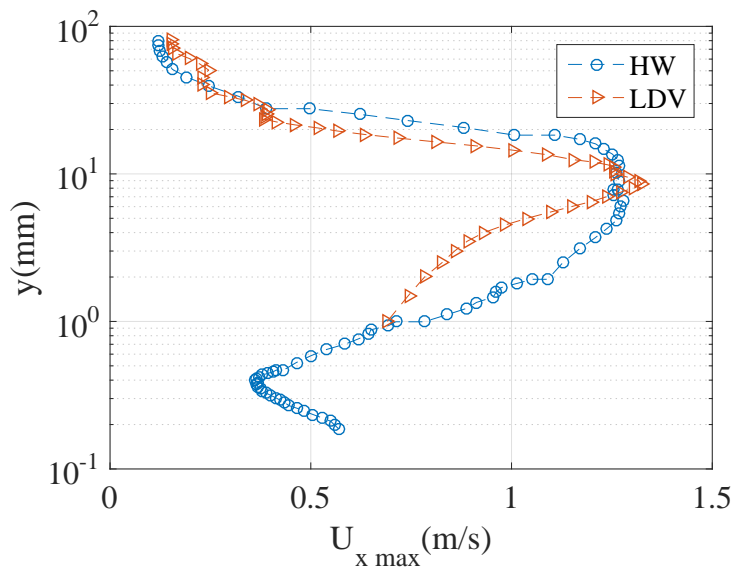


FIGURE 5.21 – Évolution de la vitesse maximale en fonction de la distance par rapport à la paroi pour les deux techniques LDV et HWA à $x = 4.5$ cm du

la variation de la vitesse de l'écoulement généré par le mouvement de la plaque. Ce

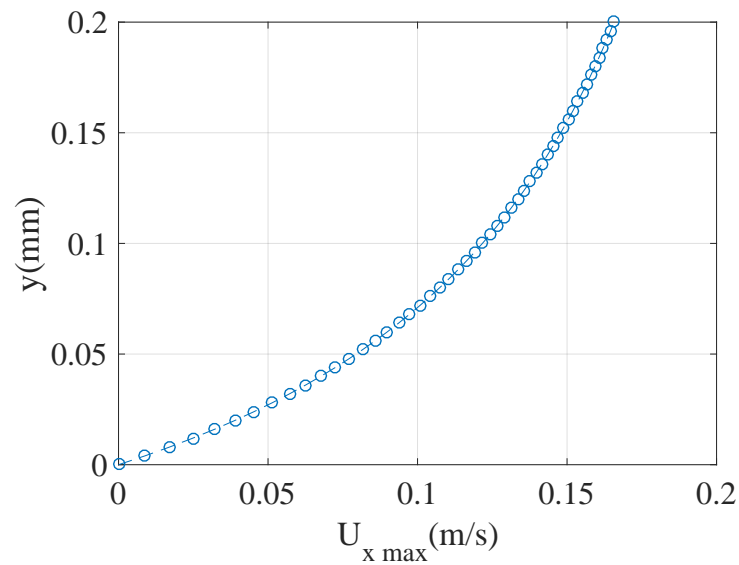


FIGURE 5.22 – Évolution de la vitesse de l'écoulement corrigée dans la zone proche du sol générée par le mouvement du simulateur à $x = 4.5$ cm

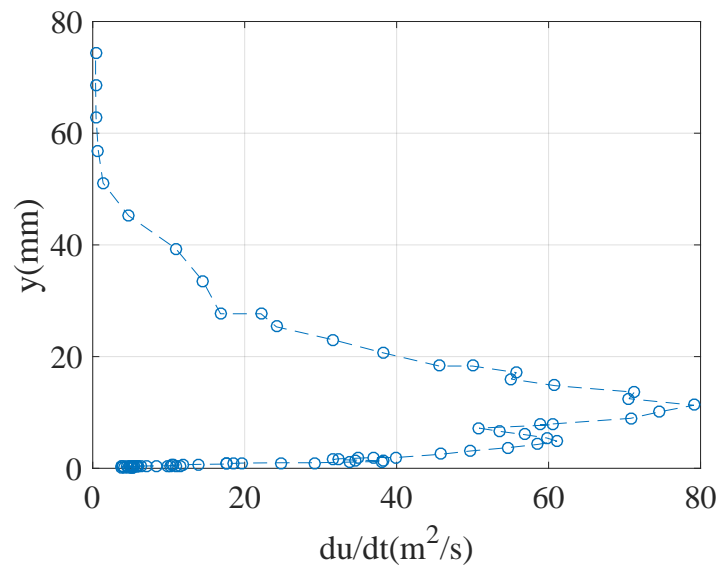


FIGURE 5.23 – Évolution de l'accélération maximale de l'écoulement suivant la verticale à $x = 4.5$ cm après le mouvement de la plaque

profil de vitesse a été trouvé en suivant deux étapes : la correction des premiers points de mesure en utilisant la fonction de correction C trouvée dans la section 5.2.2.2 ensuite

5.4. Étude de l'écoulement généré par le simulateur du pas humain

l'interpolation des valeurs corrigées avec une fonction de type *Padé* afin de trouver le profil complet de la vitesse. Nous avons pris en compte la condition d'adhérence à la paroi ($U_x = 0$ m/s).

Dans la figure 5.23 nous représentons la variation de l'accélération de l'écoulement après le mouvement du simulateur mécanique. Le profil d'accélération montre un comportement semblable à celui de la vitesse longitudinale avec un maximum d'accélération égale 80 m/s².

5.4.3.2 Profil longitudinal

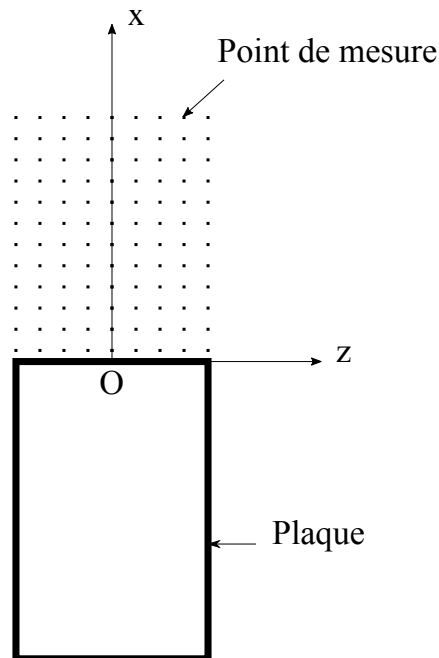


FIGURE 5.24 – Vue du haut de la plaque rectangulaire avec les points où les mesures ont été effectuées

Dans cette partie du travail, nous avons effectué des mesures à dans la direction longitudinale Ox et suivant plusieurs lignes. Des mesures dans 20 points espacés de 0.5 cm ont été effectuées pour chaque ligne, ce qui donne au final un maillage de 180 points. Les résultats ont été traités en utilisant le même algorithme utilisé dans la section précédente. Nous récupérons les données, ensuite nous recombinaisons les résultats de tous

Chapitre 5. MESURE PAR ANÉMOMÉTRIE À FIL CHAUD

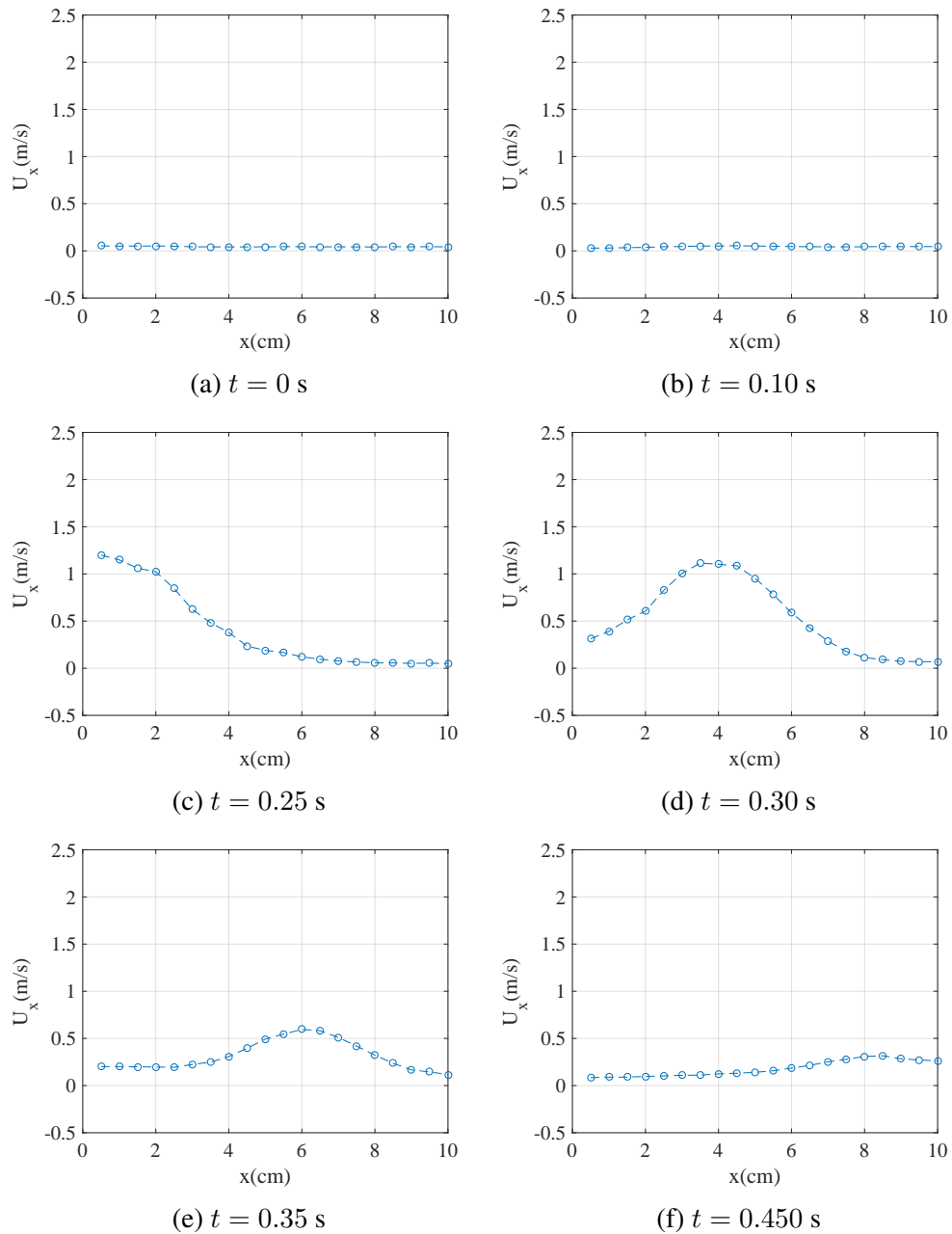


FIGURE 5.25 – Évolution de la vitesse longitudinale moyenne suivant la direction longitudinale à différents instants t du début du mouvement de la plaque

les points afin de trouver la variation temporelle suivant une ou deux directions x, z de la composante longitudinale de la vitesse. Les figures 5.25 montrent la variation de la

5.4. Étude de l'écoulement généré par le simulateur du pas humain

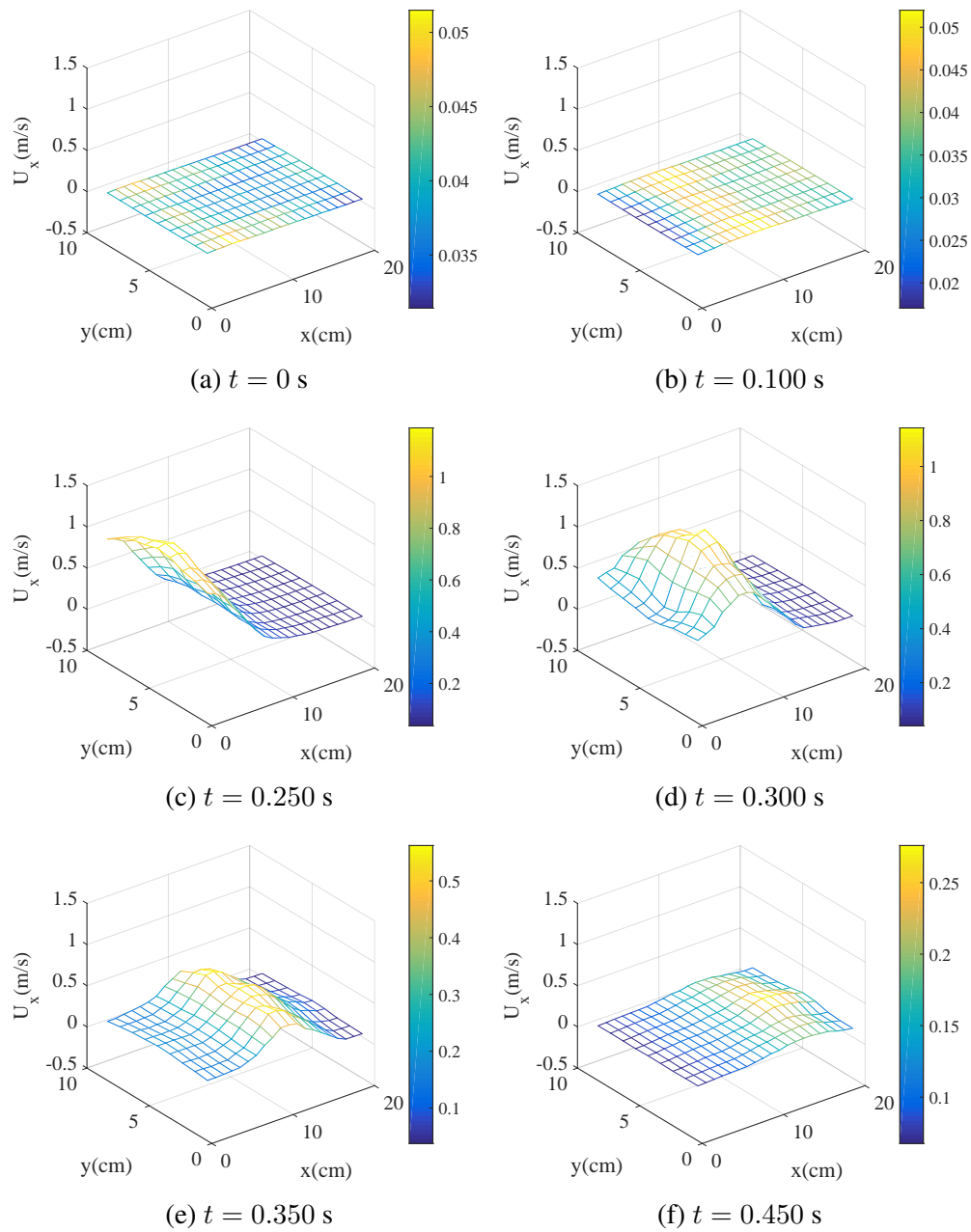


FIGURE 5.26 – Évolution de la vitesse longitudinale moyenne suivant les deux directions longitudinale et transversale à différents instants t du début du mouvement de la plaque

Chapitre 5. MESURE PAR ANÉMOMÉTRIE À FIL CHAUD

composante de vitesse longitudinale suivant Ox à différents instants. Les temps indiqués sous les figures représentent les temps après le début du mouvement de la plaque. Le premier instant montre uniquement le bruit de fond. Ensuite, la vitesse augmente indiquant le début du mouvement de la plaque. Le profil de la vitesse présente un maximum au moment où la plaque touche le sol. Ce maximum indique le passage du vortex au point de mesure. Nous constatons que plus le vortex avance, plus il perd de son énergie, cela est montré par la diminution de la vitesse de l'écoulement au niveau de la surface causée par son passage. Cette vitesse atteint 0.03 m/s à une distance $x = 10$ cm loin de la plaque. Les figures 5.26 montrent la formation d'une perturbation devant la plaque pendant le mouvement de cette dernière. La vitesse de l'écoulement atteint son maximum après la chute de la plaque. Cette perturbation peut être représentée comme une gaussienne dans les deux directions Ox et Oz qui avance à une certaine vitesse dans la direction longitudinale Ox .

5.4.4 Incertitude sur les mesures par HWA

La figure 5.27 représente la variation de l'Écart Type de la Moyenne pour différents points de mesure. Nous constatons que l'erreur augmente fortement en s'éloignant du sol est cela jusqu'à atteindre le point situé à une distance égale à environ $y = 10$ mm du sol. Après une comparaison avec le profil de vitesse (cf. figure 5.21), nous constatons que ce maximum représente le point où la vitesse de l'écoulement atteint son maximum après le passage du vortex. Ensuite, loin de la paroi l'erreur diminue fortement jusqu'à atteindre un minimum à une distance égale à environ $y = 40$ mm. L'erreur reste constante à partir de ce point.

5.4. Étude de l'écoulement généré par le simulateur du pas humain

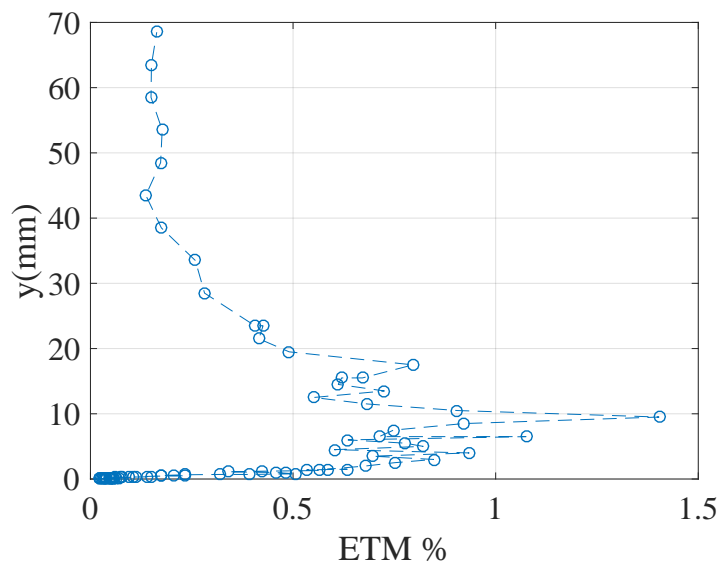


FIGURE 5.27 – Écart Type de la Moyenne du signal dans les mesures verticales à $x = 4.5$ cm

5.5 Modèle de détachement des particules

Dans cette partie du travail nous avons étudié analytiquement le détachement des particules dû au mouvement du simulateur du pas humain. Le profil vertical de la vitesse longitudinale obtenue dans la section précédente (cf. figure 5.22) a été injecté dans le modèle de détachement basé sur un bilan de moments de forces [85]. Le modèle en question suppose qu'en présence d'un écoulement avec une vitesse donnée, une particule de taille d_p déposée sur la surface (cf. figure 5.28) est susceptible de se détacher de cette dernière une fois les moments de forces extérieures de réentraînement qui sont d'origines aérodynamiques dépassent les moments des forces d'adhérence (voir §1.7.2.3). Ce modèle a été choisi car il intègre à la fois les effets aérodynamiques et d'adhérences appliquées sur une particule déposée sur une surface. Il est donc le mieux adapté au cas de la remise en suspension des particules par la marche humaine. Le bilan des moments de forces peuvent donc être représenté par l'équation :

$$\underbrace{M_T + F_T \left(\frac{d_p}{2} - \alpha \right) + F_P a}_{M_{Det}} \geq \underbrace{F_{Adh} a}_{M_{Adh}} \quad (5.10)$$

Dans la suite nous allons exposer les différents termes de l'équation 5.10 ainsi que les différents modèles pour les calculer :

- M_T : le moment hydrodynamique :

$$M_T = 2\pi\nu g_w U_x d_p^2 \quad (5.11)$$

g_w est un coefficient adimensionnel caractérisant l'effet de la surface, U_x est la vitesse longitudinale de l'écoulement au point correspondant au centre de la masse de la particule.

- F_T : la force de trainé :

$$F_T = \frac{3\pi f \mu d_p}{C_c} U_x + \frac{1 + C_m}{C_c} \left(\frac{\rho \pi d_p^3}{6} \right) \frac{\partial U_x}{\partial t} \quad (5.12)$$

avec f le facteur de correction qui varie de 1.7 quand la particule est posée sur la surface [74], [36] à l'unité quand la particule est libre et $C_m = 0.61$ est l'effet de masse ajoutée pour une particule en contact avec une surface [21], C_c est

5.5. Modèle de détachement des particules

le facteur de Cunningham (cf. equation 1.2), $\frac{\partial U_x}{\partial t}$ est l'accélération de l'écoulement au niveau du centre de masse de la particule, ce terme, comme la vitesse de l'écoulement a été estimé à partir des mesures effectuées par la technique HW.

- F_P : la force de portance :

$$F_P = F_{PSaff} \left((1 - 0.3314\alpha_0^{1/2}) \exp \left[-\frac{Re_s}{10} \right] + 0.3314\alpha_0^{1/2} \right), \quad (5.13)$$

Le terme F_{PSaff} représente la force de Saffman donnée par :

$$F_{PSaff} = 1.6d^2U_x \sqrt{\rho\mu \frac{dU_x}{dy}} \quad (5.14)$$

Avec Re_s , le nombre de Reynolds de la particule :

$$Re_s = \frac{U_x d_p}{\nu} \quad (5.15)$$

Avec $\alpha_0 = 1/2Re_s\epsilon^2$, $\epsilon = \frac{Re_G^{1/2}}{Re_s}$ et $Re_G = \frac{dU_x}{dy} \frac{d_p^2}{\nu}$ sont des nombres adimensionnels,

- F_{Adh} : la force d'adhérence, Soltani et Ahmadi [94] ont développé un modèle de

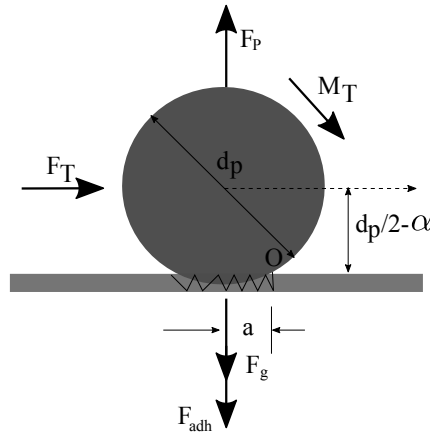


FIGURE 5.28 – Géométrie d'une particule sphérique déposée sur une paroi rugueuse [110]

la force d'adhérence est qui prend en compte la rugosité de la paroi. Ce paramètre

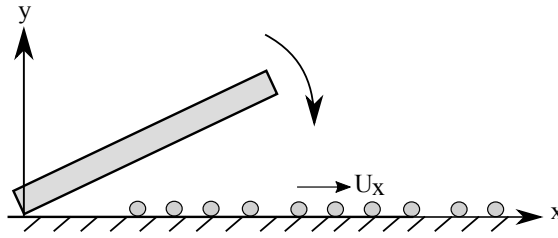


FIGURE 5.29 – Particules déposées sur une surface et soumises à l'écoulement généré par le mouvement du simulateur mécanique

et comme nous l'avons mentionné dans l'introduction influence significativement la force d'adhérence entre la surface et la particule [32].

$$F_{Adh} = \left(\frac{0.15\pi^2 W_A \exp[-0.6/(\Delta_c)^2]}{\sigma} \right) \left(\frac{d_p}{2K} \right)^2, \quad (5.16)$$

σ et Δ_c sont des paramètres liés à la surface ; σ est l'Écart Type des rugosités de la surface et $\Delta_c = \delta_c/\sigma$ où δ_c est la hauteur maximale des aspérités de la surface. Dans le présent travail, les deux paramètres σ et δ_c sont le résultat de l'analyse de la rugosité des surfaces (voir § 2.1.2).

- a : le diamètre de contact entre la particule et la surface (cf. figure 5.28) qui est donné par la relation suivante [110] :

$$a = \frac{0.15\pi^2 d_p W_A \exp[-0.6/(\Delta_c)^2]}{2K\sigma} \quad (5.17)$$

W_A représente l'énergie surfacique d'adhérence pour le couple particule surface considérés.

- α : la profondeur d'enfoncement de la particule dans la surface, ce paramètre est négligé dans la plupart des cas [110].

Une fois la variation de la vitesse connue à différentes distances de la paroi, et les différents moments de forces agissantes sur la particule sont estimés, nous avons vérifié la condition de détachement 5.10 pour des particules de taille $d_p \in [0 \ 10] \mu\text{m}$. Dans

5.5. Modèle de détachement des particules

le tableau 5.2, nous résumons les différents paramètres utilisés pour la vérification du modèle 5.10.

Nous représentons dans la figure 5.30 la variation des moments des forces aérody-

	<i>Couple 1</i>	<i>Couple 2</i>
ρ (kg/m ³)	1.117	/
ν (m ² /s)	15.7×10^{-6}	/
δ_c (μm)	23	/
σ (μm)	1	/
λ (μm)	0.07	/
C_m	0.6	/
g_w	0.94	/
f	1.7	/
W_A (J.m ⁻²)	0.0153	0.0107
E_1 (GPa)	390	72
E_2 (GPa)	4200	4200
ν_1	0.27	0.16
ν_2	0.41	0.41

TABLE 5.2 – Les différents coefficients et facteurs utilisés pour l'estimation des moments de forces pour deux couples surface-particule

namiques et d'adhérence en fonction des tailles des particules dans cas différents : nous considérant le *Couple 1* constitué de particules en Alumine et une surface en vinyle et le *Couple 2* constitué de particules en Silice et une surface également en vinyle. Nous constatons d'après les deux courbes que la condition du détachement des particules 5.10 est vérifiée pour des particules de tailles supérieures à $5.7 \mu\text{m}$ et $8 \mu\text{m}$ pour le couple 1 et 2 respectivement, c'est-à-dire, pour le couple 1 et 2, à une distance de 4.5 cm du bout de la plaque, uniquement les particules de tailles supérieures à $5.7 \mu\text{m}$ et $8 \mu\text{m}$ respectivement vont être remise en suspension par le mouvement du simulateur.

Nous n'avons pas effectué des mesures à des distances plus proches du simulateur à

Chapitre 5. MESURE PAR ANÉMOMÉTRIE À FIL CHAUD

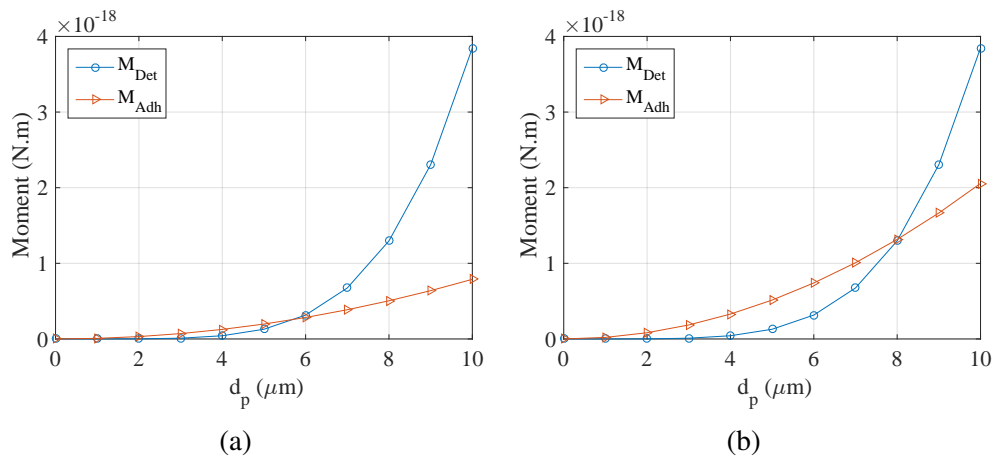


FIGURE 5.30 – Variation des moments de forces aérodynamiques et d’adhérence agissantes sur la particule en fonction du diamètre de cette dernière pour deux couples particules-surface, a) Alumine-Vinyle, b) Silice-Vinyle

cause du manque de temps consacré à l’étude. Cependant en se référant aux profils longitudinaux nous pouvons estimer la vitesse proche de la paroi à toutes distances du simulateur. Nous avons mis en évidence que la vitesse maximale à proximité de la plaque est deux fois plus grande que la vitesse maximale à 4.5 cm. Nous pouvons donc confirmer en utilisant le même modèle que dans la zone proche du simulateur, des particules de tailles inférieures sont susceptibles de se détacher.

5.6 Conclusion du chapitre

Au cours de ce chapitre, les effets aérodynamiques générés par le mouvement d'un simulateur mécanique du pas humain ont été étudié expérimentalement par la technique d'Anémométrie à Fil Chaud. Son excellente résolution spatiale et temporelle et aussi les dimensions minuscules des sondes de mesure positionnent cette technique en première place pour atteindre certains objectifs que nous nous sommes fixés au départ. Des mesures dans la grande soufflerie ont permis de développer une technique d'étalonnage de la sonde proche des surfaces. Les réponses de la sonde proche des surfaces ont été corrigée en utilisant une interpolation des valeurs expérimentales par une fonction de type *padé*. La fonction de correction ainsi obtenue, a été utilisée afin de corriger les vitesses générées par le simulateur mécanique au voisinage du sol. Grâce au système de synchronisation développé, des profils verticaux et longitudinaux de la vitesse ont été obtenus.

Un profil de vitesse complet a été obtenu à une certaine distance du simulateur et qui a permis d'étudier le détachement des particules de différentes tailles déposées sur la surface en utilisant un modèle de détachement analytique. Le modèle choisi est basé sur un bilan des moments des forces agissantes sur les particules. Les résultats de calcul analytique montrent que la nature de la particule joue un rôle important dans le processus de détachement des particules. Dans le cas d'une particule en Alumine, à une distance égale à 4.5 cm du simulateur, uniquement des particules de tailles supérieures $5.7 \mu\text{m}$ vont se détacher de la surface. Dans les mêmes conditions et pour une particule en Silice, les particules susceptibles de se détacher sont les particules de taille supérieure à $8 \mu\text{m}$.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

L'objectif principal de ce travail de thèse visait initialement la connaissance des phénomènes de la RmS des particules par le déplacement humain à l'intérieure des enceintes ventilées. Connaissance indispensable pour prétendre alimenter les codes de prédiction quant à l'évaluation des niveaux d'expositions des personnes occupants les enceintes d'habitations ou de travail. A cause de la complexité de la marche humaine, nous avons pris en compte uniquement une des deux phases du cycle de la marche, à savoir « la phase de la rotation » de l'avant du pied vers le sol quand le talon est posé par terre. En effet, c'est dans cette phase cruciale, que la compression de l'air entourant le pied s'effectue, occasionnant un largage particulière en proche paroi (plancher). Un simulateur mécanique du pas humain a été mis en place afin d'étudier le phénomène tout en assurant la précision et la répétabilité des mesures. Notre étude du phénomène a été effectuée en deux parties : une première partie où les sources de particules par un pas humain ont été estimées et une deuxième partie où des mesures de la vitesse de l'écoulement générées par le mouvement d'un simulateur du pas humain ont été effectuées.

La première partie du travail a permis grâce à un modèle réduit de mettre en place une classification de différents revêtements de sol en fonction de leurs émissions de particules après l'impact du simulateur avec le sol. Ici le simulateur, a pour vocation de traduire le mouvement mécanique « de base » qui a été scruté par le dispositif de mesure, mais en aucun cas traduire de façon optimale la réalité d'un pas « humain » occasionné par une vraie personne. Même si le simulateur utilisé ne traduit pas un « pas réel », son caractère très simplifié et « robotisé » nous a permis un grand nombre de simulations expérimentales sur un dispositif à échelle réduite et contrôlé, d'où la plus-value qu'apporte un tel simulateur, bien que simplifié. Le simulateur mécanique du pas

humain utilisé dans cette étude est la rotation d'une plaque rectangulaire rigide sous son propre poids. On a mis en évidence l'importance de la dureté des surfaces sur la remise en suspension des particules. Des surfaces dures comme le carrelage, le parquet sont les plus émissifs contrairement aux surfaces molles comme le lino. La rugosité de la surface à un impact relativement faible par rapport à la dureté.

La perturbation aérodynamique causée par le pas humain pendant la marche était considérée comme le premier responsable du détachement des particules et aussi de leurs transports dans l'environnement. Nous avons donc mis l'accent sur cette perturbation qui est représentée par un écoulement d'air généré lors de la marche. Après une étude expérimentale sur la marche humaine, un simulateur mécanique du pas humain a été développé puis proposé. Ce dernier, a été automatisé puis comparé avec celui utilisé dans la première partie (où il s'agissait d'une plaque rectangulaire et rigide de dimensions identiques en moyenne à ceux d'un pas humain de taille 40 FR). Le mouvement de la plaque est contrôlé par un moteur qui impose une rotation vers le bas et vers le haut avec une vitesse constante. Le mouvement du moteur est l'acquisition des données sont synchronisés grâce un code sous Labview.

S'agissant d'un écrasement du fluide localisé sous le pied (ou simulateur en mouvement), nous avons donc réalisé des mesures de la vitesse longitudinale à proximité du simulateur mécanique pendant son mouvement en utilisant les trois techniques : PIV (Particle Image Velocimetry), la LDV (Laser Doppler Velocimetry) et la CTA (Constant Temperature Anemometry). Les mesures ont été effectuées à différentes positions : devant, au bout et en dessous de la plaque pendant et après le mouvement de la plaque. Comme notre phénomène est relativement rapide, un effort particulier a été accordé au développement des techniques de synchronisation de l'acquisition des données et le mouvement de la plaque.

Nous avons dans un premier temps effectué des mesures par la technique PIV. Les résultats obtenus par cette technique ont mis en évidence que le mouvement de la plaque génère deux vortex contrarotatifs. Ces derniers se combinent pour former un seul vortex qui avance finalement en translation à proximité du sol devant la plaque.

Les résultats que nous avons atteint à ce jour, ne nous ont pas permis de bien comprendre le phénomène à cause des limitations liées aux matériels et au montage réalisé

à l'ERM, mais des améliorations sont actuellement en cours de réflexions. En effet, la caméra utilisée pour les mesures PIV est relativement lente par rapport à la vitesse du mouvement de la plaque et à la vitesse de l'écoulement qui a été généré. Les images ainsi obtenues ne donnent pas accès à toutes les informations, surtout le développement de l'écoulement pendant le mouvement de la plaque. L'un des objectifs fixé au début de la thèse était de mesurer les vitesses en dessous de la plaque. Pour des raisons de sécurité du matériel (caméra) nous avons abandonné cette étape. Soulignons qu'un autre inconvénient de la technique PIV se situe dans son principe, il s'agit des mesures en proche paroi. Comme les surfaces que nous avons utilisées sont des surfaces ayant des rugosités bien connues, nous n'avons pas pu les peindre (craignant de modifier irrémédiablement leurs rugosités intrinsèques) afin de réduire les réflexions des rayons laser. De ce fait, le seul moyen que nous avons trouvé pour éviter les réflexions a été de s'éloigner sensiblement de la surface. Ainsi, on perd malheureusement beaucoup d'informations concernant la vitesse en proche paroi.

Nous avons ensuite opté pour des mesures par les techniques LDV et CTA. Ces deux techniques et contrairement à la technique PIV n'ont pas été utilisées dans le domaine d'étude de la remise en suspension des particules par activité humaine. L'avantage de ces deux techniques est leurs excellentes résolutions temporelles. Ainsi, nous pouvons avoir accès à plus d'informations par rapport à ce que nous avons obtenu par la technique PIV. Cependant, la LDV et CTA sont des techniques ponctuelles et les vitesses mesurées ne donnent pas une information globale sur tout le champ autour de la plaque. L'alternative était de synchroniser le mouvement de la plaque et l'acquisition des données, mesurer dans différents points selon un maillage bien défini et enfin reproduire l'écoulement de l'air généré suivant la direction de l'espace souhaitée. La validation des techniques de synchronisation des deux techniques LDV et CTA a été effectuée en comparant les résultats obtenus avec les résultats PIV. Après le traitement des résultats, et grâce aux techniques de synchronisations développées, nous avons réussi à reproduire le développement de l'écoulement généré par le mouvement de la plaque avec une résolution temporelle de l'ordre de la milliseconde. Les résultats ainsi obtenus ont permis de mettre en évidence que la vitesse générée par le mouvement du simulateur suit deux comportements ; un premier comportement en dessous du simulateur où la vitesse augmente en s'éloignant de l'axe de rotation de la plaque, et un deuxième comportement dans la zone externe où la vitesse diminue en s'éloignant du bout de la plaque. Ce profil

de vitesse présente un maximum à une distance $x \approx 2\text{cm}$ devant la plaque du simulateur.

Le profil de vitesse verticale obtenue par la technique HWA a été corrigé dans la zone proche du sol en utilisant une fonction de type *padé*. Les résultats ainsi trouvés ont été injectés dans un modèle de détachement basé sur un bilan de moments des forces (prédominant dans cette région de perturbations dynamiques). Les résultats de calcul montrent que la condition de détachement des particules situées aux points de mesure de la vitesse dépend fortement de la taille de la particule mais aussi du type de revêtement de la surface.

Les résultats obtenus à travers ce travail ont permis l'accès aux champs de vitesses au voisinage du simulateur mécanique du pas humain. Le manque de temps consacré à cette partie n'a pas permis d'élargir la zone d'étude et uniquement une mesure à une distance x du simulateur et avec une seule vitesse de ce dernier a été effectuée. Un code de calcul CFD et en cours de validation où nous utilisons la technique de frontières immergées (IBM) pour simuler le mouvement d'un pas humain dans une enceinte. Un algorithme de suivi de mailles a été développé à cette fin. La mise en place de ce code a comme objectif la validation d'un modèle de remise en suspension des particules par un pas humain. Les perspectives de ce travail sont les suivantes :

- Des mesures dans tout le domaine voisin du simulateur afin d'avoir un champ de vitesse globale. Cette dernière permettra d'étudier le détachement, la remise en suspension et aussi le transport des particules par le mouvement du simulateur du pas humain,
- Utiliser un simulateur mécanique plus réaliste,
- Validation du code CFD.

En ce qui concerne l'étude de la remise en suspension des particules en modèle réduit, la conception ainsi que la mise en place d'un simulateur mécanique automatisé est en cours de réalisation au LaSIE. Dans le présent travail, nous avons commencé par envisager un simulateur simplifié (impaction libre tout simplement) ce qui nous a permis de contrôler d'autres paramètres comme par exemple le contrôle de la concentration surfacique. A ce stade, la perspective d'un simulateur plus réaliste (dimensions, surface, vitesse...etc)

sera aussi envisageable. Au niveau du LaSIE nous disposons d'un générateur de particules HIAC ROYCO 256 pour l'ensemencement de particules calibrées de latex, nous pouvons charger la surface du sol avec des particules ayant des diamètres contrôlés. Ainsi, une étude plus approfondie sur la remise en suspension de particules ciblées sur une taille bien précise selon un modèle de détachement approprié sera également à notre portée.



Bibliographie

- [1] M. Abadie, K. Limam, and F. Allard. Indoor particle pollution : effect of wall textures on particle deposition. *Building and Environment*, 36 :821–827, Aug. 2001.
- [2] L. Alloul-Marmor. Réentraînement par écoulement d’air d’une contamination particulaire déposée sur une surface application au cas d’un tas de poudre. *Créteil : Université Paris XII-Val de Marne*, 2002.
- [3] J. C. Bhatia, F. Durst, and J. Jovanovic. Corrections of hot-wire anemometer measurements near walls. *Journal of Fluid Mechanics*, 122 :411–431, 1982.
- [4] H. Bin. *An investigation of walking induced electrostatic field effects on indoor particle resuspension*. PhD thesis, Oct. 2007.
- [5] D. Bonnet. *Vélocimétrie par images de particules (PIV) pour le diagnostic d’écoulements dans la boucle d’air automobile*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2012.
- [6] M. Borys, H.-E. Albrecht, N. Damaschke, and C. Tropea. *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*. Springer Berlin Heidelberg, Verlag Berlin Heidelberg, 2003.
- [7] A. Boutier. *Vélocimétrie laser pour la mécanique des fluides*. Hermes Science Publications, Cachan, 2012.
- [8] R. A. Bowling. *A Theoretical Review of Particle Adhesion*, pages 129–142. Springer US, Boston, MA, 1988.
- [9] D. Braaten, K. P. U, and R. Shaw. Particle resuspension in a turbulent boundary layer-observed and modeled. *Journal of Aerosol Science*, 21(5) :613 – 628, 1990.

BIBLIOGRAPHIE

- [10] B. Brunekreef and S. T. Holgate. Air pollution and health. *The Lancet*, 360(9341) :1233–1242, Oct. 2002.
- [11] R. Cham and M. S. Redfern. Changes in gait when anticipating slippery floors. *Gait & posture*, 15(2) :159–171, 2002.
- [12] P. Cherukat and J. B. McLaughlin. The inertial lift on a rigid sphere in a linear shear. *Journal of Fluid Mechanics*, 263 :1 – 18, 1994.
- [13] J.-I. Choi, J. R. Edwards, J. A. Rosati, and A. D. Eisner. Large eddy simulation of particle resuspension during a footstep. *Aerosol Science and Technology*, 46(7) :767–780, 2011.
- [14] J. Cleaver and B. Yates. Mechanism of detachment of colloidal particles from a flat substrate in a turbulent flow. *Journal of Colloid and Interface Science*, 44(3) :464 – 474, 1973.
- [15] M. C. Coelho and N. Harnby. Moisture bonding in powders. *Powder Technology*, 20(2) :201–205, 1978.
- [16] D. C. Collis and M. J. Williams. Two-dimensional convection from heated wires at low reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 6 :357–384, 1959.
- [17] G. Comte-Bellot. Hot-wire anemometry. *Annual review of fluid mechanics*, 8 :209–231, 1976.
- [18] G. Comte-Bellot. Les methodes de mesure physique de la turbulence. *Le Journal de Physique Colloques*, 37 :C1–67, 1976.
- [19] G. Comte-Bellot and A. Craya. *Écoulement turbulent entre deux parois parallèles*. Publications scientifiques et techniques du Ministère de l’air. Service de documentation scientifique et technique de l’armement, 1965.
- [20] E. R. Corino and R. S. Brodkey. A visual investigation of the wall region in turbulent flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 37(01) :1–30, 1969.
- [21] S. J. Cox and M. J. Cooker. Potential flow past a sphere touching a tangent plane. *Journal of Engineering Mathematics*, 38(3) :355–370, 2000.

-
- [22] B. V. Derjaguin, V. M. Muller, and Y. P. Toporov. Effect of contact deformations on the adhesion of particles. *Journal of Colloid and interface science*, 53(2) :314–326, 1975.
- [23] F. Durst and E. Zanoun. Experimental investigation of near-wall effects on hot-wire measurements. *Experiments in Fluids*, 33 :210–218, 2002.
- [24] F. Durst, E.-S. Zanoun, and M. Pashtrapanska. In situ calibration of hot wires close to highly heat-conducting walls. *Experiments in Fluids*, 31(1) :103–110, 2001.
- [25] A. D. Eisner, J. Rosati, and R. Wiener. Experimental and theoretical investigation of particle-laden airflow under a prosthetic mechanical foot in motion. *Building and Environment*, 45(4) :878–886, 2010.
- [26] J. El Hijri. *Contribution expérimentale et numérique à l'étude de la remise en suspension des particules par l'activité humaine*. PhD thesis, Université de La Rochelle, 2008.
- [27] A. R. Ferro, R. J. Kopperud, and L. M. Hildemann. Source strengths for indoor human activities that resuspend particulate matter. *Environmental Science & Technology*, 38(6) :1759–1764, Mar. 2004.
- [28] A. Fischer, D. Haufe, L. Büttner, and J. Czarske. Scattering effects at near-wall flow measurements using Doppler global velocimetry. *Applied optics*, 50 :4068–4082, 2011.
- [29] M. Fischer, J. Jovanović, and F. Durst. Near-wall behaviour of statistical properties in turbulent flows. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(5) :471–479, 2000.
- [30] R. A. Fisher. On the capillary forces in an ideal soil ; correction of formulae given by WB Haines. *The Journal of Agricultural Science*, 16(03) :492–505, 1926.
- [31] A. Fitouri, M. K. Khan, and H. H. Bruun. A multiposition hot-wire technique for the study of swirling flows in vortex chambers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 10(1) :142–151, 1995.

BIBLIOGRAPHIE

- [32] K. Fuller and D. Tabor. The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids. *Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 345(1642) :327–342, 1975.
- [33] E. Géhin, O. Ramalho, and S. Kirchner. Size distribution and emission rate measurement of fine and ultrafine particle from indoor human activities. *Atmospheric Environment*, 42(35) :8341–8352, Nov. 2008.
- [34] L. A. Gilchrist and D. A. Winter. A two-part, viscoelastic foot model for use in gait simulations. *Journal of Biomechanics*, 29(6) :795–798, 1996.
- [35] I. Goldasteh, Y. Tian, G. Ahmadi, and A. R. Ferro. Human induced flow field and resultant particle resuspension and transport during gait cycle. *Building and Environment*, 77 :101–109, July 2014.
- [36] A. Goldman, R. Cox, and H. Brenner. Slow viscous motion of a sphere parallel to a plane wall—i motion through a quiescent fluid. *Chemical Engineering Science*, 22(4) :637 – 651, 1967.
- [37] C. Gomes, J. Freihaut, and W. Bahnfleth. Resuspension of allergen-containing particles under mechanical and aerodynamic disturbances from human walking. *Atmospheric Environment*, 41(25) :5257–5270, Aug. 2007.
- [38] M. Guingo and J.-P. Minier. A new model for the simulation of particle resuspension by turbulent flows based on a stochastic description of wall roughness and adhesion forces. *Journal of Aerosol Science*, 39(11) :957 – 973, 2008.
- [39] D. Hall. The time dependence of particle resuspension. *Journal of Aerosol Science*, 20(8) :907 – 910, 1989. Proceedings of the 1989 European Aerosol Research.
- [40] J. R. Henty, D. E. Wood, D. J. Ewins, and U. K. Salisbury. Detection of gait events using a vibratory gyroscope. In *Proceeding of the 4th Annual conference of the IFESS*, 1999.
- [41] W. Hinds. *Aerosol technology : properties, behavior, and measurement of airborne particles*. Wiley-Interscience. Wiley, 1999.
- [42] J. O. Hinze. *Turbulence*. McGraw-Hill Book Company, 1959.

- [43] E. Hontañón, A. de los Reyes, and J. Capitão. The cÆsar code for aerosol resuspension in turbulent pipe flows. assessment against the storm experiments. *Journal of Aerosol Science*, 31(9) :1061 – 1076, 2000.
- [44] E. I and D. S.B. Dust resuspension by the flow around an impacting sphere. *Journal of Fluid Mechanics*, 403 :305–328, 2000.
- [45] A. H. Ibrahim, P. F. Dunn, and R. M. Brach. Microparticle detachment from surfaces exposed to turbulent air flow : controlled experiments and modeling. *Journal of aerosol science*, 34(6) :765–782, 2003.
- [46] J. N. Israelachvili. *Intermolecular and surface forces*. Academic Press, Burlington, MA, 3rd ed edition, 2011.
- [47] M. Jacquelin. *Etude de la mise en suspension de particules par chute de poudre*. PhD thesis, FACULTE DES SCIENCES DE CRETEIL UFR DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE UNIVERSITE PARIS XII – VAL DE MARNE, 2007.
- [48] T. Ji et al. Frequency and velocity of people walking. *Structural Engineer*, 84(3) :36–40, 2005.
- [49] D. A. Johnson and J. D. Brown. A laser Doppler velocimeter approach for near-wall three-dimensional turbulence measurements. 1990.
- [50] K. L. Johnson, K. Kendall, and A. D. Roberts. Surface energy and the contact of elastic solids. In *Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, volume 324, pages 301–313. The Royal Society, 1971.
- [51] N. Jonassen. Charging by Walking | In Compliance Magazine, 2013.
- [52] F. Jørgensen and D. Dynamics. *How to Measure Turbulence with Hot-wire Anemometers : A Practical Guide*. Dantec Dynamics, 2005.
- [53] E. Karlsson, T. Berglund, M. Strömqvist, M. Nordstrand, and I. Fängmark. The effect of resuspension caused by human activities on the indoor concentration of biological aerosols. *Journal of Aerosol Science*, 30 :S737–S738, 1999.

BIBLIOGRAPHIE

- [54] L. Kessler and W. K. Fisher. A study of the electrostatic behavior of carpets containing conductive yarns. *Journal of electrostatics*, 39(4) :253–275, 1997.
- [55] H. E. Khalifa and B. Elhadidi. Particle levitation due to a uniformly descending flat object. *Aerosol Science and Technology*, 41 :33–42, Feb. 2007.
- [56] B. C. Khoo, Y. T. Chew, C. P. Lim, and C. J. Teo. Dynamic response of a hot-wire anemometer. Part I : A marginally elevated hot-wire probe for near-wall velocity measurements. *Measurement Science and Technology*, 9(5) :751, 1998.
- [57] L. V. King. On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid : determination of the convection constants of small platinum wires, with applications to hot-wire anemometry. *Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 90 :563–570, Sept. 1914.
- [58] N. E. Klepeis, W. C. Nelson, W. R. Ott, J. P. Robinson, A. M. Tsang, P. Switzer, J. V. Behar, S. C. Hern, W. H. Engelmann, and others. The national human activity pattern survey nhaps : a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of exposure analysis and environmental epidemiology*, 11(3) :231–252, 2001.
- [59] D. K. Kreid. Laser-doppler velocimeter measurements in nonuniform flow : error estimates. *Applied Optics*, 13(8) :1872–1881, 1974.
- [60] Y. Kubota, J. W. Hall, and H. Higuchi. An experimental investigation of the flow-field and dust resuspension due to idealized human walking. *Journal of Fluids Engineering*, page 081104, 2009.
- [61] Y. Kubota and H. Higuchi. Aerodynamic particle resuspension due to human foot and model foot motions. *Aerosol Science and Technology*, 47(2) :208–217, Feb. 2013.
- [62] J. Le Louvetel-Poilly. *Etude expérimentale du rôle de la turbulence de paroi dans le transport de particules*. PhD thesis, INSA de Lyon, 2008.
- [63] N. M. Lefcoe and I. I. Inculet. Particulates in domestic premises. II. Ambient levels and indoor-outdoor relationships. *Archives of Environmental Health*, 30(12) :565–570, Dec. 1975.

- [64] D. Leighton and A. Acrivos. The lift on a small sphere touching a plane in the presence of a simple shear flow. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP*, 36(1) :174–178, 1985.
- [65] Z. Mana. *Étude sur la remise en suspension de particules suite à la marche d'un opérateur*. PhD thesis, Paris 11, 2014.
- [66] N. Martin. *Étude et caractérisation d'un vélocimètre laser : application à la mesure de vitesse dans un fluide*. PhD thesis, Université du Québec à Trois-Rivières, 1997.
- [67] S. Matsusaka and H. Masuda. Particle reentrainment from a fine powder layer in a turbulent air flow. *Aerosol science and technology*, 24(2) :69–84, 1996.
- [68] L. Mädler and W. Koch. Particle resuspension from surfaces by impacting objects. *Journal of Aerosol Science*, 1001(28) :S85–S86, 1997.
- [69] L. Mädler and W. Koch. Particle resuspension burst from dust layers induced by impacting objects. *Journal of Aerosol Science*, 30 :S731–S732, 1999.
- [70] J. E. Mehal. *Analysis of the influence of organized roughnesses on the unsteady flow cavitants*. PhD thesis, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2014.
- [71] M. J. Mendell. Indoor residential chemical emissions as risk factors for respiratory and allergic effects in children : a review. *Indoor air*, 17 :259–277, 2007.
- [72] H. K. Moffatt and B. R. Duffy. Local similarity solutions and their limitations. *Journal of Fluid Mechanics*, 96(02) :299–313, 1980.
- [73] S. Moreau. *Design of an experimental device and study of oscillating flow in a high acoustic level resonator for the characterization of non-linear phenomena : transition to turbulence and acoustic streaming*. PhD thesis, Université de Poitiers, 2007.
- [74] M. O. Neill. A sphere in contact with a plane wall in a slow linear shear flow. *Chemical Engineering Science*, 23(11) :1293–1298, 1968.

BIBLIOGRAPHIE

- [75] R. C. Oberoi, J. I. Choi, J. R. Edwards, J. A. Rosati, J. Thornburg, and C. E. Rodes. Human induced particle resuspension in a room. *Aerosol Science and Technology*, 44(3) :216–229, 2010.
- [76] H. Pang. *Dépoussiérage Electrostatique pour Les Particules Submicroniques en Atmosphère Usuelle (Terre)et Raréfiée (Planète Mars)*. PhD thesis, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2006.
- [77] A. Perry. *Hot-wire anemometry*. Oxford science publications. Clarendon Press.
- [78] M. Phillips. A force balance model for particle entrainment into a fluid stream. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 13(2) :221, 1980.
- [79] Z. Popiolek, F. Jørgensen, A. K. Melikov, M. Silva, and W. Kierat. Assessment of uncertainty in measurements with low velocity thermal anemometers. *International Journal of Ventilation*, 6(2) :113–128, 2007.
- [80] J. Qian and A. R. Ferro. Resuspension of dust particles in a chamber and associated environmental factors. *Aerosol Science and Technology*, 42(7) :566–578, May 2008.
- [81] J. Qian, A. R. Ferro, and K. R. Fowler. Estimating the resuspension rate and residence time of indoor particles. *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)*, 58(4) :502–516, Apr. 2008.
- [82] J. Qian, J. Peccia, and A. R. Ferro. Walking-induced particle resuspension in indoor environments. *Atmospheric Environment*, 89 :464–481, June 2014.
- [83] M. Raffel, C. E. Willert, S. T. Wereley, and J. Kompenhans, editors. *Particle image velocimetry : a practical guide ; with 42 tables*. Springer, 2007.
- [84] J. Reed. *Introduction to the Principles of Ceramic Processing*. Wiley, 1988.
- [85] M. W. Reeks and D. Hall. Kinetic models for particle resuspension in turbulent flows : theory and measurement. *Journal of Aerosol Science*, 32(1) :1–31, Jan. 2001.
- [86] M. W. Reeks, J. Reed, and D. Hall. On the resuspension of small particles by a turbulent flow. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 21(4) :574, 1988.

- [87] T. C. Roesler, W. H. Stevenson, and H. D. Thompson. Investigation of bias errors in laser doppler velocimeter measurements. Technical report, Purdue Univ Lafayette Ind School of Mechanical Engineering, 1980.
- [88] J. A. Rosati, J. Thornburg, and C. Rodes. Resuspension of particulate matter from carpet due to human activity. *Aerosol Science and Technology*, 42 :472–482, Apr. 2008.
- [89] M. J. Rudd. A new theoretical model for the laser dopplermeter. *Journal of Physics E : Scientific Instruments*, 2(1) :55, 1969.
- [90] P. G. Saffman. The lift on a small sphere in a slow shear flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 22(2) :385–400, 1965.
- [91] I. Saidi, N. Haritos, E. F. Gad, and J. L. Wilson. Floor vibrations due to human excitation-damping perspective. *Earthquake Engineering in Australia*, pages 257–264, 2006.
- [92] G. Sehmel. Particle resuspension : A review. *Environment International*, 4(2) :107 – 127, 1980.
- [93] M. Soltani and G. Ahmadi. On particle adhesion and removal mechanisms in turbulent flows. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 8(7) :763–785, Jan. 1994.
- [94] M. Soltani and G. Ahmadi. Direct numerical simulation of particle entrainment in turbulent channel flow. *Physics of Fluids*, 7(3) :647–657, 1995.
- [95] J. Spurk and C. Mayes. *Fluid Mechanics*. Springer-Verlag GmbH, 1997.
- [96] J. Taylor. *Incertitudes et analyse des erreurs dans les mesures physiques : avec exercices corrigés*. Masson Sciences. Physique. Dunod, 2000.
- [97] S. T. Tedeschi. *Improving aerosol dispersion through a fundamental understanding of interparticle forces*. PhD thesis, University of Florida, 2007.
- [98] T. Thatcher and D. Layton. Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence. *Atmospheric Environment*, 29(13) :1487–1497, 1995.

BIBLIOGRAPHIE

- [99] C.-J. Tsai, D. Y. H. Pui, and B. Y. H. Liu. Elastic flattening and particle adhesion. *Aerosol Science and Technology*, 15 :239–255, Jan. 1991.
- [100] P. Vainshtein, G. Ziskind, M. Fichman, and C. Gutfinger. Kinetic model of particle resuspension by drag force. *Physical Review Letters*, 78(3) :551, 1997.
- [101] M. Van Dyke. *Perturbation Methods in Fluid Mechanics*. Parabolic Press, 1975.
- [102] G. Viegi, M. Simoni, A. Scognamiglio, S. Baldacci, F. Pistelli, L. Carrozzi, and I. Annesi-Maesano. Indoor air pollution and airway disease, state of the art. *The International Journal of Tuberculosis and Lung Disease*, 8 :1401–1415, 2004.
- [103] J. Visser. On hamaker constants : A comparison between hamaker constants and lifshitz-van der waals constants. *Advances in Colloid and Interface Science*, 3(4) :331 – 363, 1972.
- [104] H. Wen and G. Kasper. On the kinetics of particle reentrainment from surfaces. *Journal of Aerosol Science*, 20(4) :483 – 498, 1989.
- [105] J. A. B. Wills. The correction of hot-wire readings for proximity to a solid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, 12(03) :388–396, 1962.
- [106] Y. Wu, G. Castle, I. Inculet, S. Petigny, and G. Swei. The effect of electric field strength on the induction charge of freely levitating particles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40 :1498–1503, Nov. 2004.
- [107] E.-S. Zanon, F. Durst, and J.-M. Shi. The physics of heat transfer from hot wires in the proximity of walls of different materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(15-16) :3693–3705, July 2009.
- [108] Z. Zarić. Wall turbulence studies. *Advances in Heat Transfer*, 8 :285–350, 1972.
- [109] F. Zhang. The modelling of particle resuspension in a turbulent boundary layer. 2011.
- [110] X. Zhang, G. Ahmadi, J. Qian, and A. Ferro. Particle detachment, resuspension and transport due to human walking in indoor environments. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 22(5-6) :591–621, 2008.

BIBLIOGRAPHIE

- [111] G. Ziskind, M. Fichman, and C. Gutfinger. Resuspension of particulates from surfaces to turbulent flows—review and analysis. *Journal of Aerosol Science*, 26(4) :613–644, 1995.
- [112] G. Ziskind, M. Fichman, and C. Gutfinger. Adhesion moment model for estimating particle detachment from a surface. *Journal of Aerosol Science*, 28(4) :623 – 634, 1997.