



HAL
open science

Etude phénoménologique du dépôt sec d'aérosols en milieu urbain : Influence des propriétés des surfaces, de la turbulence et des conditions météorologiques

Pierre Roupsard

► **To cite this version:**

Pierre Roupsard. Etude phénoménologique du dépôt sec d'aérosols en milieu urbain : Influence des propriétés des surfaces, de la turbulence et des conditions météorologiques. Autre [cond-mat.other]. INSA de Rouen, 2013. Français. NNT : 2013ISAM0007 . tel-00845215

HAL Id: tel-00845215

<https://theses.hal.science/tel-00845215>

Submitted on 16 Jul 2013

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.



Etude phénoménologique du dépôt sec d'aérosols en milieu urbain

Influence des propriétés des surfaces, de la turbulence et
des conditions météorologiques

Pierre Roupsard

21 janvier 2013

ISRN/IRSN-2013/162

Laboratoire de Radioécologie de Cherbourg-Octeville

Service d'Expertise et de Recherche sur les Risques

IRSN / PRP-ENV / SERIS / LRC

Thèse

Présentée pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE ROUEN

Discipline : Physique

par

Pierre ROUPSARD

au Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie

ETUDE PHÉNOMÉNOLOGIQUE DU DÉPÔT SEC D'AÉROSOLS EN MILIEU URBAIN : INFLUENCE DES PROPRIÉTÉS DES SURFACES, DE LA TURBULENCE ET DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES

Soutenue le 21 janvier 2013 devant le jury composé de :

Président du jury :	Denis BOULAUD	Directeur Docteur d'Etat, IRSN, Le Vésinet
Rapporteurs :	Evelyne GEHIN	Professeur, Université Paris-Est, Créteil
	Dominique THOMAS	Professeur, Université de Lorraine, Nancy
Examineurs :	Muriel AMIELH	Chargée de recherche CNRS, IRPHE, Marseille
	Alexis COPPALLE	Professeur, INSA de Rouen
	Denis MARO	Ingénieur de recherche HDR, IRSN, Cherbourg-Octeville
	Martine TALBAUT	Maître de Conférences, INSA de Rouen

Ecole doctorale Sciences Physiques, Mathématiques et de l'Information pour l'Ingénieur (SPMII)

Thèse préparée à l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire
Laboratoire de Radioécologie de Cherbourg-Octeville
Rue Max Pol Fouchet
50130 Cherbourg-Octeville

« ... science sans conscience n'est que ruine de l'âme. »

François Rabelais

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord adresser mes remerciements les plus sincères à M. Denis Maro, tuteur IRSN de la thèse. Je tiens à lui exprimer ici toute ma gratitude pour m'avoir fait confiance et m'avoir encadré pendant ces années passées au LRC. Tes qualités scientifiques et humaines m'ont permis de m'épanouir et de mener à bien ces travaux.

Je remercie sincèrement M. Alexis Coppalle, directeur de la thèse, et M^{me} Martine Talbaut de m'avoir encadré durant ces trois années de thèse. Vos conseils et encouragements ont toujours été précieux et m'ont aidé à avancer dans ces travaux.

Je remercie M. Denis Boulaud de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de thèse. Je remercie également M^{me} Evelyne Géhin et M. Dominique Thomas d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Et je remercie M^{me} Muriel Amielh d'avoir accepté d'être examinatrice de ce mémoire. J'adresse mes remerciements à l'ensemble du jury pour leurs remarques et conseils qui ont amélioré ce document.

Je remercie M^{me} Véronique Ruban de l'IFSTTAR pour son accueil au sein du projet INOGEV. Je la remercie ainsi que M. Stéphane Percot pour leur aide et leur accueil sympathique à chacune de nos venues. Je souhaite également remercier MM. Yelva Roustan et Nicolas Cherin du CEREVA pour les échanges expérimentateurs/modélisateurs que nous avons eus sur le dépôt sec dans le cadre d'INOGEV.

J'adresse mes plus sincères remerciements à M. Hubert Branger, M^{me} Muriel Amielh et M. Alain Laurence de l'IRPHE pour leur aide précieuse lors des expérimentations en soufflerie. Je me souviendrai longtemps du très bon accueil qui nous était réservé à chacune de nos missions. Je remercie également MM. Fabien Anselmet, de l'IRPHE, Patrick Boyer et Névenick Colec, de l'IRSN, pour les échanges sur la physique du dépôt. J'ai une pensée pour M. Bertrand Zucchini qui a contribué à ces travaux et a toujours fait preuve de sympathie lors de nos venues à l'IRPHE.

Je souhaite remercier MM. Patrice Mestayer, Jean-Michel Rosant et Jean-François Sini pour les échanges sur la turbulence et le dépôt sec en milieu urbain et pour leurs conseils.

Je remercie sincèrement M. Dominique Boust de m'avoir accueilli au LRC et de m'avoir donné les moyens de travailler dans les meilleures conditions. J'adresse mes remerciements les plus sincères à toute l'équipe du LRC qui contribue à la formation et à la réussite des étudiants qu'elle accueille. Je remercie plus particulièrement Marianne Rozet, Olivier Connan, Didier Hébert, Philippe Laguionie et Luc Solier pour leurs contributions respectives à ce travail. Je garde en mémoire les savoirs et techniques que j'ai acquis à vos côtés, ainsi que les bons moments passés avec vous en mission.

Un grand merci à Marianne, Claire, Serge, Bruno, Alain, Michel, Pascal, Julien et Olivier pour leur aide technique ou administrative, mais surtout pour leur sympathie et pour les échanges toujours intéressants que nous avons pu avoir. Je remercie chaleureusement Pierre et Céline auprès de qui j'ai beaucoup appris. Et je n'oublie pas Alexandre, Guillaume, Pauline, Anne, Basile, Emilie, Mirvatte, David et Mathieu avec qui j'ai pu passer de très bons moments au gré de leurs passages dans les bureaux des doctorants et stagiaires.

Enfin je souhaite remercier mes proches, mes parents et mon frère pour m'avoir toujours poussé et accompagné dans mes projets, mais aussi et surtout ma compagne, qui m'a soutenu, aidé et supporté pendant ces trois années. Merci à toi Bérénice.

Sommaire

REMERCIEMENTS	7
NOTATIONS	13
INTRODUCTION	15
CHAPITRE I. LES AEROSOLS, LEUR DEPOT SEC ET LA DEMARCHE EXPERIMENTALE..	19
I.1 NOTIONS DE PHYSIQUE DES AEROSOLS.....	19
I.1.1 Caractérisation des aérosols.....	19
I.1.2 Forces physiques s’appliquant aux aérosols	27
I.2 LE DEPOT SEC DES AEROSOLS.....	33
I.2.1 Définition de la vitesse de dépôt sec	33
I.2.2 Processus physiques influençant le dépôt sec.....	34
I.2.3 Méthodes de mesure des vitesses de dépôt sec.....	40
I.2.4 Vitesses de dépôt issues de la littérature	44
I.2.5 Modélisation du dépôt sec	51
I.3 DEMARCHE EXPERIMENTALE.....	58
I.3.1 Problématique du milieu urbain	59
I.3.2 Approche expérimentale choisie	61
CHAPITRE II. ETUDE DU DEPOT SEC EN SOUFFLERIE	63
II.1 CARACTERISATION DE LA TURBULENCE ET DE LA COUCHE LIMITE SUR PLAQUE PLANE	63
II.1.1 Généralités sur la turbulence	63
II.1.2 Généralités sur les couches limites turbulentes et les paramètres associés.....	65
II.2 METHODE EXPERIMENTALE	70
II.2.1 Description de la soufflerie, des surfaces urbaines et des configurations étudiées	71
II.2.2 Mesures des vitesses de dépôt sec avec un aérosol de fluorescéine submicronique	76
II.2.3 Mesures des paramètres associés aux vitesses de dépôt	82
II.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS	85
II.3.1 Dépôt sur parois en équilibre thermique avec l’air	85
II.3.2 Dépôt sur parois horizontales chauffées	97
II.3.3 Paramétrisation de la vitesse de dépôt en fonction de la vitesse de l’écoulement et de l’écart de température surface-air.....	112

II.4	CONCLUSIONS	118
CHAPITRE III. ETUDE DU DEPOT SEC <i>IN SITU</i> SUR UNE COURTE DUREE.....		121
III.1	CARACTERISATION DE LA TURBULENCE ET DE LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE	121
III.1.1	la turbulence atmosphérique.....	121
III.1.2	La couche limite atmosphérique	123
III.2	METHODE EXPERIMENTALE	127
III.2.1	Site d'étude	128
III.2.2	Mesure des vitesses de dépôt sec in situ avec un aérosol traceur	129
III.2.3	Mesures des paramètres micrométéorologiques associés	134
III.3	RESULTATS ET DISCUSSIONS	134
III.3.1	Conditions météorologiques	135
III.3.2	Concentrations, flux de dépôt sec et vitesses de dépôt sec.....	137
III.3.3	Discussions.....	142
III.4	CONCLUSIONS	151
CHAPITRE IV. ETUDE DU DEPOT SEC <i>IN SITU</i> SUR DE LONGUES DUREES.....		155
IV.1	LE BERYLLIUM 7, TRACEUR DE L'AEROSOL ATMOSPHERIQUE	155
IV.1.1	Origine du béryllium 7 atmosphérique	156
IV.1.2	Association du béryllium 7 à l'aérosol atmosphérique	158
IV.2	METHODE EXPERIMENTALE	160
IV.2.1	Dispositif expérimental.....	160
IV.2.2	Traitement des échantillons.....	164
IV.2.3	Mesure du béryllium 7	164
IV.3	RESULTATS ET DISCUSSIONS	168
IV.3.1	Conditions météorologiques	168
IV.3.2	Vitesses de dépôt sec	172
IV.3.3	Discussions.....	174
IV.4	CONCLUSIONS	187
CONCLUSION GENERALE		191
CONCLUSIONS		191
PERSPECTIVES.....		194
REFERENCES.....		197

LISTE DES FIGURES	211
LISTE DES TABLEAUX	217
ANNEXES	219
ANNEXE A : ETUDE DE LA DISTRIBUTION DES TEMPERATURES DE SURFACE SUR LE VERRE ET L'ENDUIT DE FAÇADE CHAUFFES EN SOUFFLERIE.....	221
ANNEXE B : MISE AU POINT DE LA MESURE DE FLUX DE DEPOT SEC DE BERYLLIUM SUR LES EPROUVETTES URBAINES.	227

NOTATIONS

Les symboles principalement utilisés dans ce mémoire sont définis ci-dessous. Lorsque d'autres notations sont utilisées ponctuellement, elles sont définies précisément dans le texte.

Lettres latines (# : signifie que l'objet n'a pas de dimension physique)

C	concentration en particules dans l'air	particules m^{-3}
C_d	coefficient de traînée de la particule	#
C_f	coefficient de frottement pariétal	#
C_u	facteur de correction de Cunningham	#
d	hauteur de déplacement	m
d_p	diamètre de la particule	μm
d_a	diamètre aérodynamique de la particule	μm
d_m	diamètre médian d'une distribution de particules	μm
d_{ama}	diamètre aérodynamique médian en activité des particules	μm
d_{amm}	diamètre aérodynamique médian massique des particules	μm
D_b	coefficient de diffusion brownienne	$m^2 s^{-1}$
F	flux de dépôt de particules	particules $m^{-2} s^{-1}$
g	accélération de pesanteur	$m s^{-2}$
H	coefficient d'accommodation de la particule	#
h_s	hauteur équivalente de rugosité	m
h_s^+	hauteur équivalente de rugosité	m
I	intensité de turbulence	%
k	énergie cinétique de turbulence	$m^2 s^{-2}$
k_a, k_p	conductivité thermique de l'air et de la particule	$W m^{-1} K^{-1}$
k_b	constante de Boltzmann	$N m K^{-1}$
Kn	nombre de Knudsen	#
Pe	nombre de Péclet	#
Pr	nombre de Prandtl	#
R_a	résistance aérodynamique de couche turbulente de surface	$s m^{-1}$
R_b	résistance de la sous-couche laminaire (ou moléculaire ou visqueuse)	$s m^{-1}$
Re	nombre de Reynolds	#
RH	taux d'humidité relative	%
Sc	nombre de Schmidt	#
Sh	nombre de Sherwood	#
St	nombre de Stokes	#
T	température du gaz porteur	K
T_{air}	température de l'air ambiant	K
T_d	température du point de rosée	K

T_0	température de la paroi	K
T^*	température caractéristique	K
$\Delta T_{\text{surface-air}}$	écart de température entre la surface et l'air	K
t	temps	s
t_c	temps de convection	s
t_v	temps de diffusion	s
u	vitesse du vent selon l'axe x	m s^{-1}
u_{ref}	vitesse de référence, ou vitesse longitudinale du vent ou d'un écoulement	m s^{-1}
u_*	vitesse de frottement	m s^{-1}
u^+	vitesse de vent adimensionnée	#
Δu^+	écart de vitesse adimensionné	#
V_d	vitesse de dépôt sec	m s^{-1}
V_s	vitesse de sédimentation	m s^{-1}
V_{th}	vitesse de thermophorèse	m s^{-1}
w	vitesse verticale du vent selon l'axe z	m s^{-1}
z	position selon l'axe verticale	m
z_0	hauteur de rugosité	m
z_r	hauteur de référence	m
z_+	position selon l'axe vertical adimensionnée	#

Lettres grecques

δ	hauteur (ou épaisseur) de la couche limite	m
κ	constante de Von Karman	#
λ_g	libre parcours moyen du gaz porteur	m
μ_a	viscosité dynamique du gaz porteur	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
ν	viscosité cinématique du gaz porteur	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
ν_t	viscosité apparente ou turbulente	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
μ	viscosité dynamique du gaz porteur	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$; Pa s
ρ_a	masse volumique de l'air	kg m^{-3}
ρ_p	masse volumique de la particule	kg m^{-3}
σ_g	écart type géométrique	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$
τ_p	contrainte pariétale	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$; Pa
χ	facteur de forme dynamique	#
ψ_H	fonction de stabilité	#

INTRODUCTION

Un aérosol est défini comme une suspension, dans un milieu gazeux, de particules solides, liquides ou les deux, présentant une vitesse de chute négligeable (Schmauß, 1920 ; cité par Renoux et Boulaud, 1998). Dans l'atmosphère, cette définition concerne les particules de diamètres inférieurs à 100 µm. Leur origine peut être naturelle ou anthropique. Les aérosols jouent un rôle essentiel dans le bilan radiatif de la Terre et dans la physico-chimie de l'atmosphère, par leurs interactions avec les gaz qui la composent et le rayonnement solaire. Ils sont ainsi impliqués dans des changements de climat à des échelles locales, des effets sanitaires de la pollution sur la population ou encore le transport de polluants (Delmas *et al.*, 2005).

Dans un contexte de protection de l'environnement et de l'Homme face aux pollutions, comprendre et évaluer l'impact des rejets chroniques et accidentels d'aérosols représente aujourd'hui un enjeu de premier ordre. Notamment, ces connaissances doivent permettre de suivre, de gérer et de prédire les flux d'aérosols submicroniques, porteurs des polluants atmosphériques (hydrocarbures aromatiques polycycliques, métaux,...) et des radionucléides artificiels, aux interfaces naturelles et urbaines.

Les milieux naturels doivent être considérés comme un point d'entrée des polluants vers la chaîne alimentaire de l'Homme. Quant aux milieux urbains, sources de pollutions atmosphériques, ils peuvent être soumis à leurs dépôts, qui peuvent être remobilisés par les pluies pour se retrouver aux exutoires, puis dans les milieux naturels. Dans le cas particulier du dépôt de radionucléides, les surfaces urbaines peuvent aussi représenter une voie d'exposition externe des habitants aux rayonnements radioactifs.

Les particules atmosphériques peuvent se déposer selon deux voies. Soit par dépôt humide, les particules sont déposées avec les gouttes lors des précipitations, par captation des particules au sein d'un nuage (ou « rainout ») et par rabattement par les gouttes de pluie sous le nuage (ou « washout », Seinfeld et Pandis, 1998). Soit par dépôt sec, les particules proches de la surface se déposent selon plusieurs mécanismes physiques en l'absence de précipitations. Afin de réduire les incertitudes sur les prédictions des transferts de ces aérosols par les modèles, les mécanismes de dépôt des particules doivent être connus pour différents environnements.

Le dépôt sec, souvent quantifié par la vitesse de dépôt sec V_d ($m s^{-1}$), est principalement dépendant des caractéristiques de l'aérosol, des propriétés de la surface de dépôt et des conditions de météorologie et de turbulence. Il est moins efficace que le rabattement par la pluie pour déposer les particules atmosphériques. Fogh *et al.* (1999) montrent que seulement 10 % du dépôt total de particules submicroniques correspond à du dépôt sec (les collecteurs utilisés dans leur étude peuvent cependant induire des erreurs de représentativité des surfaces pour le dépôt sec en milieux naturels et urbains, leur valeur doit donc être considérée comme un ordre de grandeur). Cependant en périodes sèches il reste le seul mécanisme de dépôt et devient non négligeable. Les résultats de Katata *et al.* (2012) sur la modélisation des transferts des radionucléides rejetés par la centrale Fukushima lors de son accident en sont un très bon exemple : la zone sud-ouest de la centrale est marquée uniquement par le dépôt sec de radionucléides lors du passage du panache radioactif le 15 mars 2011.

Le milieu urbain peut regrouper une grande partie des populations (jusqu'à 70 % dans certaines régions). Pourtant, il s'avère que le dépôt sec d'aérosols a jusqu'à présent été très peu étudié dans ce milieu et que les données existantes sont peu ou pas documentées par des données météorologiques (Fowler *et al.*, 2009 ; Maro, 2012). Cette absence de données implique une méconnaissance du dépôt sec en milieu urbain et des problèmes de précisions sur les prédictions par les modèles existants.

La présente étude s'intègre dans les objectifs de deux structures : les missions de l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) et le projet de recherche INOGEV (pour Innovations pour une gestion durable de l'eau en ville) de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR).

Une des missions de l'IRSN est d'étudier et de prévoir le devenir des radionucléides dans l'environnement pour mieux estimer l'exposition des populations aux rayonnements ionisants. Dans le cas d'un rejet atmosphérique impliquant des éléments radioactifs, la vitesse de dépôt sec est le coefficient utilisé dans les modèles de l'IRSN pour quantifier les transferts par dépôt sec de radionucléides sous forme gazeuse ou particulaire du panache atmosphérique vers la surface. Une meilleure estimation des vitesses de dépôt sec permet donc *in fine* des estimations plus précises des transferts de radionucléides jusqu'à l'Homme. Dans le cas d'un milieu urbain, les vitesses de dépôt doivent être estimées pour les différentes surfaces qui le composent afin de mieux estimer l'exposition externe des habitants.

Un des objectifs du projet INOGEV de l'ANR Villes durables, coordonné par l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports de l'Aménagement et des Réseaux de Nantes, est l'étude du transfert par l'eau de pluie des polluants atmosphériques sur un bassin versant urbanisé. Dans ce cas, le dépôt sec est l'un des points d'entrée des polluants atmosphériques particuliers vers les bassins versants urbanisés, via les surfaces urbaines (toits, murs et sols), avant leur mise en solution par lessivage de ces surfaces par la pluie. Le milieu urbain étant émetteur de polluants particuliers et souvent à proximité immédiate d'industries sources de pollutions, la connaissance des vitesses de dépôt sur les différentes surfaces des bassins versants urbanisés devient indispensable pour estimer les flux de polluants. Une particularité du milieu urbain par rapport aux autres milieux tient à l'hétérogénéité des surfaces qui le compose : horizontales, verticales, en pente, de nature très diverses (verre, bitume, herbe, ardoise...)... Autant de paramètres pouvant influencer la vitesse de dépôt des particules sur ces surfaces.

Les principaux objectifs de la thèse sont de mesurer des vitesses de dépôt sec pour des surfaces urbaines, de quantifier et hiérarchiser les principaux paramètres et phénomènes physiques à prendre en compte, et enfin d'étudier l'effet de la thermophorèse (mouvement des particules dans leur gaz porteur en présence d'un gradient de température) sur le dépôt, dans le cas de surfaces chauffées. Pour répondre à ces objectifs, certaines contraintes doivent être respectées, principalement, les vitesses de dépôt sec doivent être mesurées pour des particules de diamètres représentatifs des particules transportant les polluants et les radionucléides dans l'atmosphère, pour des surfaces urbaines représentatives de la diversité des surfaces rencontrées en milieu urbain et pour différentes conditions de météorologie et de turbulence.

La quantification et la hiérarchisation des paramètres les plus importants à prendre en compte passent par l'identification et la mesure des paramètres météorologiques et turbulents, pour, à partir des

vitesse de dépôt mesurées, mettre en évidence les processus physiques mis en jeu. Une comparaison des résultats aux données de la littérature et aux modèles de dépôt permettra aussi de mieux hiérarchiser l'importance des différents processus physiques de dépôt. D'autre part, la quantification des paramètres de météorologie et de turbulence est indispensable pour que les vitesses de dépôt acquises puissent à terme servir à la validation de modèles de dépôt sec adaptés aux milieux urbains.

Une attention particulière doit être apportée au phénomène de thermophorèse dans cette étude. L'influence de ce mécanisme de déplacement des particules, des zones de températures chaudes vers les zones de températures froides, dans un gaz soumis à un gradient de température, n'a été clairement mise en évidence que très récemment en milieu urbain (Connan *et al.*, 2006 ; Maro *et al.*, 2010). De plus, la thermophorèse n'a encore jamais été prise en compte dans la prédiction du dépôt sec sur des surfaces urbaines alors qu'elle pourrait jouer un rôle majeur et diminuer les dépôts dans le cas de surfaces chauffées par le rayonnement solaire.

L'étude expérimentale du dépôt sec en milieu urbain et des différents phénomènes physiques qui le régissent peut s'avérer complexe, surtout si l'on veut discerner les flux de dépôt sec de particules sur les différentes surfaces (et non sur une zone urbaine de façon globale) et pour différentes échelles de temps. Les différentes configurations des environnements urbains peuvent générer des écoulements d'air (donc de la turbulence) très différents, selon leurs formes ou selon la vitesse et la direction du vent. Les variations des conditions météorologiques et des types de surfaces s'ajoutent à ces difficultés. Il s'avère nécessaire d'appréhender cette étude par étapes pour mettre en évidence progressivement les différents phénomènes physiques qui peuvent intervenir dans le processus de dépôt sec.

Ce mémoire de thèse s'organise en cinq chapitres.

Le premier chapitre établit le contexte de cette étude. Il dresse de façon synthétique l'état des connaissances sur le dépôt sec en milieu urbain et présente les principales notions de physique des aérosols et du dépôt sec. Dans un premier temps, les outils de caractérisation physique de l'aérosol tels que le diamètre des particules et leurs distributions sont donnés. L'aérosol atmosphérique, objet de cette étude, est plus particulièrement décrit. Les forces physiques contrôlant le mouvement de ces particules et leurs voies de transferts sont ensuite détaillées. Dans un second temps, le dépôt sec des particules est décrit. La vitesse de dépôt sec est définie. Les principaux phénomènes physiques de dépôt sec sont présentés. Une revue des données expérimentales pour le milieu urbain, issues de la littérature, est faite et certaines modélisations du dépôt sec sont présentées. Enfin, la complexité du problème du dépôt sec en milieu urbain est synthétisée et la démarche expérimentale originale adoptée pour cette étude, qui découle de cette complexité, est décrite.

Le deuxième chapitre est dédié à la première étape expérimentale de cette étude : les expérimentations en soufflerie. Il synthétise l'ensemble des travaux qui ont été réalisés et dont les données seront utilisées dans la partie suivante du mémoire. Une première partie est consacrée à des rappels sur les couches limites et la turbulence en soufflerie. Il présente aussi les paramètres turbulents qui ont été mesurés et sont associés aux vitesses de dépôt. La seconde partie est dédiée au matériel et à la méthode expérimentale utilisée. Elle présente la soufflerie, les surfaces urbaines étudiées, la méthode de mesure des vitesses de dépôt sec avec un aérosol de fluorescéine, sur des

surfaces en équilibre thermique avec l'air ou chauffées, et la méthode de mesure des paramètres turbulents et des températures liés à ces vitesses de dépôt. La troisième partie rassemble les résultats expérimentaux (vitesses de dépôt, paramètres turbulents et données de températures) et l'interprétation de ces résultats. Enfin, les principaux enseignements tirés de ces expérimentations sont rassemblés sous la forme d'une conclusion de ce chapitre.

Le troisième chapitre est consacré aux expérimentations *in situ* de courte durée. Il introduit les expérimentations *in situ*, décrit la méthode et regroupe les résultats des expérimentations de courte durée. Il débute par un rappel sur la structure de la couche limite atmosphérique, sur les paramètres turbulents qui la caractérisent, et replace l'échelle de notre type d'expérimentations vis-à-vis de celle-ci. La méthode expérimentale utilisée pour les expérimentations de courte durée, basée sur l'aérosol de fluorescéine, est ensuite décrite. Les résultats qui en sont tirés sont rassemblés et comparés aux données acquises en soufflerie et à deux modèles de dépôt sec afin d'être interprétés. Une conclusion sur cette étape dresse un bilan sur les phénomènes rencontrés et importants pour le dépôt dans cette configuration expérimentale.

Le quatrième chapitre est destiné au troisième et dernier type d'expérimentations, les expérimentations *in situ* de longue durée. Il résume la dernière étape expérimentale de ce travail. Il présente d'abord la méthode expérimentale utilisée, dont le béryllium 7 utilisé comme traceur. Son origine et sa validité de traceur de la fraction submicronique de l'aérosol atmosphérique sont discutées. Les résultats issus de ces expérimentations sont ensuite présentés et comparés aux résultats précédemment acquis. Suite à cette interprétation, les processus mis en jeu dans cette étape sont exposés. Leurs importances respectives sont enfin discutées.

Pour finir, le cinquième chapitre est divisé en deux parties. La première est une conclusion générale qui rappelle la problématique du dépôt sec en milieu urbain. Elle présente la méthode utilisée et les conclusions qui doivent en être tirées. La seconde partie regroupe les perspectives issues des résultats acquis dans cette étude. En effet, ce travail de thèse étudie le dépôt sec selon trois types d'expérimentations dont les résultats mettent en lumière des sujets qui devront être développés afin d'améliorer la connaissance du dépôt sec en général et plus particulièrement en milieu urbain.

CHAPITRE I. LES AEROSOLS, LEUR DEPOT SEC ET LA DEMARCHE EXPERIMENTALE

Par définition, un aérosol est une suspension de particules solides ou liquides, dans un gaz, pour lesquelles la vitesse de chute est négligeable (Renoux et Boulaud, 1998). Les aérosols atmosphériques sont d'origine naturelle (volcanisme, embrun marins, pollens...) ou issus des activités humaines. Les sources anthropiques d'aérosols peuvent être variées (industrie, trafic routier, maritime et aérien, chauffage domestique...) et les caractéristiques physiques et chimiques de ces aérosols sont directement liées à leurs sources. Ils peuvent donc être vecteurs des polluants résultant de ces activités humaines. Avec une répartition de tailles allant de quelques de nanomètres à une dizaine de micromètres, ils peuvent aussi bien transporter des composés polluants organiques, métalliques ou encore radioactifs sur de courtes comme de longues distances. Au cours de leur transfert, ils se déposeront selon les conditions météorologiques par dépôt sec (en cas de temps sec) ou dépôt humide (en cas de précipitations).

I.1 NOTIONS DE PHYSIQUE DES AEROSOLS

Le comportement des aérosols dans l'atmosphère dépend à la fois de processus physiques (transport, dépôt...) et de processus chimiques (formation, réactions avec les gaz...). Les notions sur la caractérisation physique des aérosols et sur les forces s'appliquant à ceux-ci, nécessaires à la compréhension de leur dépôt sec, sont rappelées dans cette partie. Les paramètres turbulents et météorologiques, prépondérant pour étudier le dépôt et dépendant de différentes échelles d'espace et de temps, seront décrits dans les chapitres suivants afin de les associer aux différents types d'expérimentations qui sont menés dans la suite de l'étude.

I.1.1 CARACTERISATION DES AEROSOLS

I.1.1.1 *Diamètres des particules*

Les lois physiques s'appliquant aux aérosols sont généralement définies pour des particules sphériques (Bricard, 1977a). Or, dans la réalité, les particules en suspension ne sont pas systématiquement sphériques et leurs formes peuvent varier selon leurs origines (combustion, érosion, bioaérosols...). Afin de leur appliquer ces lois physiques, plusieurs diamètres équivalents ont été définis selon les caractéristiques géométriques et aérodynamiques des particules, plus particulièrement selon leur vitesse terminale de chute V_s (ou vitesse de sédimentation). Les principaux diamètres utilisés dans la littérature sont le diamètre équivalent en volume d_{ev} , le diamètre de Stokes d_{St} et le diamètre aérodynamique d_a (en μm , Figure I-1).

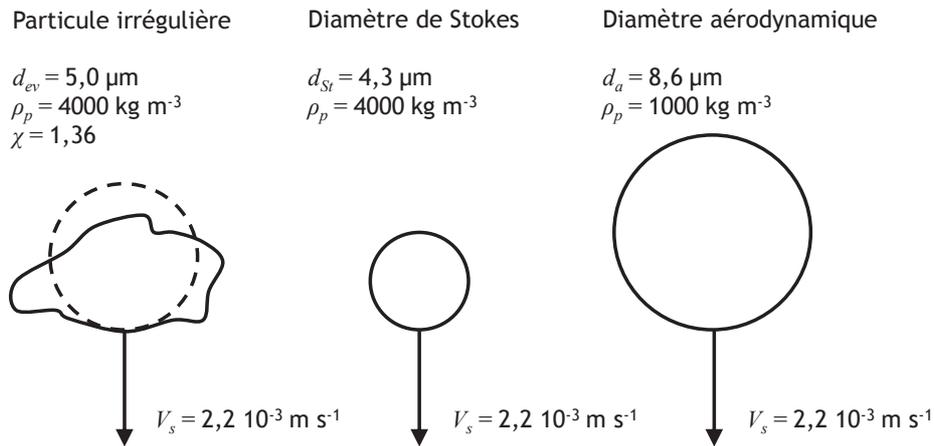


Figure I-1 : diamètres équivalents pour une particule quelconque (Hinds, 1999).

Pour une particule irrégulière quelconque, le diamètre équivalent en volume d_{ev} correspond au diamètre d'une sphère ayant la même masse que la particule et la même masse volumique ρ_m (kg m^{-3}) que le matériau. Le diamètre de Stokes d_{St} correspond au diamètre d'une sphère ayant la même vitesse terminale de chute et la même masse volumique ρ_p que la particule. Le diamètre aérodynamique d_a correspond quant à lui au diamètre d'une sphère ayant la même vitesse terminale de chute et une masse volumique ρ_0 de 1000 kg m^{-3} . Le facteur de forme dynamique χ permet, à partir des diamètres décrits, de se ramener à la vitesse de sédimentation de la particule irrégulière (par exemple, une sphère de diamètre équivalent aurait une vitesse limite de chute plus élevée que celle de la particule irrégulière). En régime continu (cf. paragraphe I.1.2.1), il est défini comme le rapport de la force de traînée sur la particule irrégulière et celle sur une particule sphérique de mêmes volume et vitesse limite de chute (Équation I-1 ; Renoux et Boulaud, 1998).

$$\chi = \frac{\rho_p}{\rho_m} \left(\frac{d_{ev}}{d_{St}} \right)^2 \quad \text{Équation I-1}$$

ρ_p est la masse volumique de la particule, ρ_m la masse volumique du matériau.

Quand $\rho_p = \rho_m$, les diamètres de Stokes et aérodynamique peuvent être reliés par l'Équation I-2.

$$d_a = d_{St} \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_0}} \quad \text{Équation I-2}$$

I.1.1.2 Distributions granulométriques des aérosols

Les aérosols généralement rencontrés dans l'environnement sont composés de particules de diamètres d_p différents. Ils sont définis par leur distribution granulométrique, c'est-à-dire une distribution du nombre N de particules (ou de leur surface S , de leur volume V , de leur masse $M = \rho_p \times V$) en fonction de leur diamètre d_p . Cette fonction peut prendre la forme de l'Équation I-3 pour une distribution en nombre de particules.

$$dN = N(d_p)dd_p \quad \text{Équation I-3}$$

Dans cette équation, $N(d_p)$ est le nombre de particules de diamètres compris entre d_p et $d_p + dd_p$.

Ces distributions peuvent être discrètes et représentées par des histogrammes (à la suite de prélèvements ou de mesures par des appareils par exemple). C'est-à-dire que dans la gamme de diamètres considérés, les particules (leur nombre, leur surface ou leur volume) sont classées dans différents intervalles i selon leurs diamètres. Ces intervalles sont définis par des largeurs Δd_{pi} comprises entre deux diamètres. Dans ce cas, le diamètre moyen arithmétique ou géométrique de l'aérosol est alors défini respectivement selon l'Équation I-4 ou l'Équation I-5.

$$\bar{d}_p = \frac{\sum_{i=1}^n a_i d_i}{A} \quad \text{Équation I-4}$$

$$\ln \bar{d}_g = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \ln d_i}{A} \quad \text{Équation I-5}$$

a_i est la quantité considérée (nombre, surface, volume ou masse par exemple) de particules dans la classe de diamètre moyen d_i et A est la somme des a_i (nombre, surface, volume ou masse total de particules). Ces diamètres moyens arithmétique et géométrique sont différents selon la distribution considérée (nombre, surface ou volume).

En plus du diamètre moyen, le diamètre médian (souvent en masse d_{mm}) est très utilisé. Il correspond au diamètre tel que 50 % des particules sont de diamètres inférieurs ou égaux pour la distribution en nombre, ou tel que 50 % du volume total est donné par des diamètres $d_p < d_{mm}$ pour la distribution en volume.

En diminuant la largeur Δd_{pi} de chaque classe de diamètre, la distribution granulométrique tend vers une fonction continue $f(d_p)$ (alors représentée par une courbe, par exemple la forme lognormale de l'Équation I-6) qui permet un traitement statistique de ces distributions (Renoux et Boulaud, 1998).

Afin de définir la distribution (en nombre ou en volume) d'un aérosol d'un point de vue mathématique, différentes fonctions peuvent être utilisées. Il existe par exemple la loi normale ou gaussienne. Cependant, la loi lognormale est la plus fréquemment rencontrée dans la littérature (Équation I-6 pour une distribution en nombre ; Renoux et Boulaud, 1998 ; Hinds, 1999 ; Baron et Willeke, 2001).

$$f(d_p) = \frac{1}{\ln \sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln d_p - \ln \bar{d}_g)^2}{2(\ln \sigma_g)^2} \right] \quad \text{Équation I-6}$$

L'écart type géométrique σ_g permet de quantifier la dispersion des diamètres des particules d'une distribution d'un aérosol autour d'un diamètre moyen géométrique. Ainsi, σ_g est égal à 1 pour un aérosol idéalement monodispersé, c'est-à-dire composé de particules d'un même diamètre. En pratique, les aérosols sont souvent polydispersés ($\sigma_g > 1,2$).

Pour les diamètres moyens en nombre \bar{d}_p , en surface \bar{d}_s et en masse \bar{d}_m , on a pour une même distribution : $\bar{d}_p < \bar{d}_s < \bar{d}_m$. La Figure I-2 qui présente les distributions en nombre, en surface et en volume (en masse) d'un même aérosol, illustre bien ce classement.

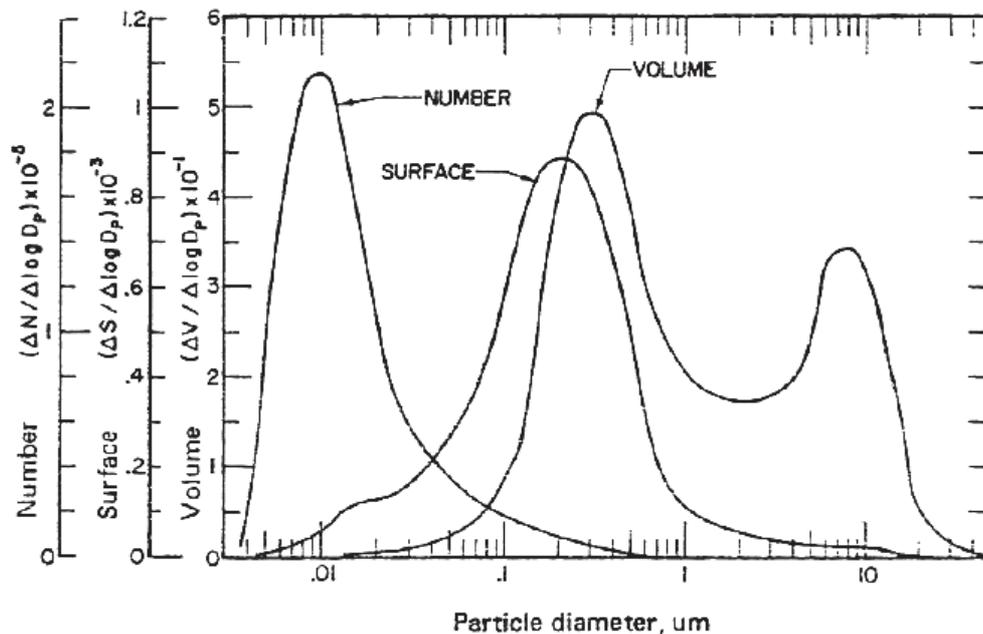


Figure I-2 : distributions en nombre, surface et volume d'un même aérosol atmosphérique en épisode de « smog » mesurées à Los Angeles en 1969 (Whitby, 1975 ; cité par Papastefanou, 2008).

De plus, cette figure montre qu'en fonction de la quantité étudiée un aérosol peut avoir une distribution monomodale (distribution en nombre) ou bien bimodale (distribution en volume).

1.1.1.3 Cas particulier de l'aérosol atmosphérique

1.1.1.3.1 Formation et distribution de l'aérosol atmosphérique

Lorsque l'on considère sa distribution massique, l'aérosol atmosphérique est généralement classé en deux gammes de tailles de particules ou deux modes : le mode « grossier » pour des diamètres supérieurs à 1 à 2 µm et le mode « fin » pour des diamètres inférieurs (Renoux et Boulaud, 1998 ; Papastefanou, 2008). La Figure I-2 met en évidence cette distribution volumique bimodale. Les grosses particules sont essentiellement produites par des moyens mécaniques (érosion des sols, embruns marins par exemple).

La distribution en nombre de la fraction fine de l'aérosol atmosphérique révèle que celle-ci est souvent composée de deux modes (Figure I-3) : le mode « nucléation » ($d_p < 0,1 \mu\text{m}$) et le mode « accumulation » ($0,1 < d_p < 1-2 \mu\text{m}$). Le mode « nucléation » est principalement composé de particules primaires de condensation, condensation de vapeurs sur des particules primaires, et de noyaux provenant de la nucléation, conversion gaz-particule (Delmas *et al.*, 2005). Dans la littérature, ce mode est parfois divisé en deux catégories de particules issues de deux processus distincts (Kulmala *et al.*, 2004) : les particules issues de la nucléation homogène, parfois appelé mode de particules ultrafines ($d_p < 0,015 \mu\text{m}$), dont le temps de vie est très court (quelques minutes à quelques heures), et les particules de « Aitken » ($0,015 < d_p < 0,1 \mu\text{m}$) produite par condensation et coagulation des particules ultrafines. Le mode « accumulation » est constitué de particules issues du grossissement de

noyaux par condensation ou de la coagulation de particules du mode nucléation (Renoux et Boulaud, 1998).

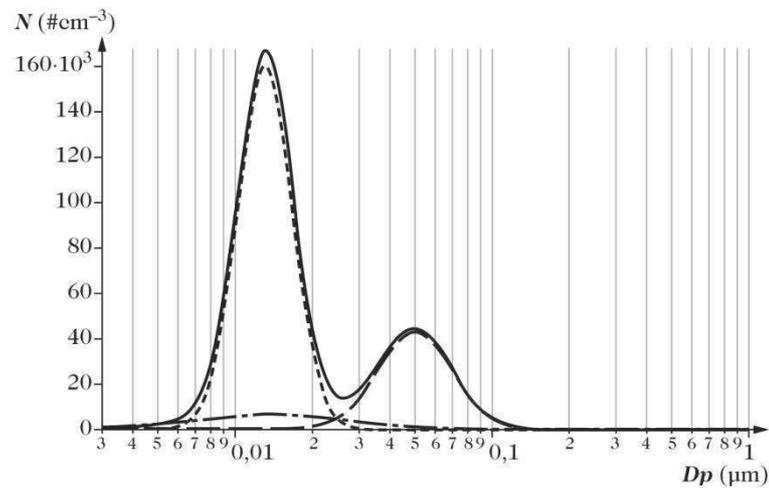


Figure I-3 : distribution granulométrique en nombre d'un aérosol typique d'un milieu urbain, contribution des modes ultrafin (· · · ·), Aitken (- - -) et accumulation (— — —) (Delmas *et al.*, 2005).

Les processus de formation des particules atmosphériques favorisent les diamètres de particules liés aux modes nucléation, accumulation et grossier qui sont les plus souvent rencontrés (Delmas *et al.*, 2005). La condensation et la coagulation des particules fines et les processus de dépôt (lessivage par la pluie, sédimentation...) réduisent les concentrations en particules grossières et ultrafines mais peu le mode « accumulation ». Il en résulte des temps de résidence dans l'atmosphère différents pour chaque gamme de taille de particules, comme le présente la Figure I-4.

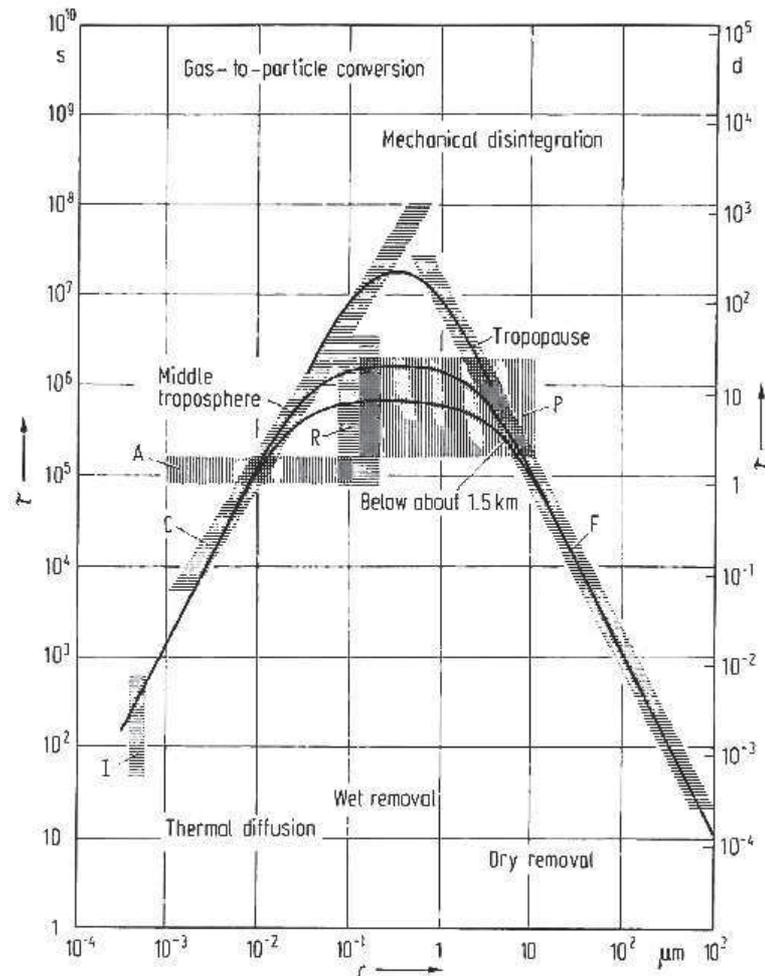


Figure I-4 : temps de résidence τ des particules en secondes (s, échelle de droite) et en jours (d, échelle de gauche) en fonction de leur rayon r (en μm) (Jaenicke, 1988).

La durée de vie des aérosols dans l'atmosphère est très variable. Les particules ultrafines et les particules très grossières ($> 10 \mu\text{m}$) ont un temps de séjour de l'ordre de quelques minutes à quelques heures. Le mode « accumulation » a le temps de résidence le plus long dans la troposphère, soit de l'ordre de la dizaine de jours (Jaenicke, 1988 ; Papastefanou, 2006). D'une façon plus générale, la durée de vie moyenne d'une particule est d'environ 1 semaine (Renoux et Boulaud, 1998). Les différents processus de formation et de disparition des particules atmosphériques sont résumés sur la Figure I-5.

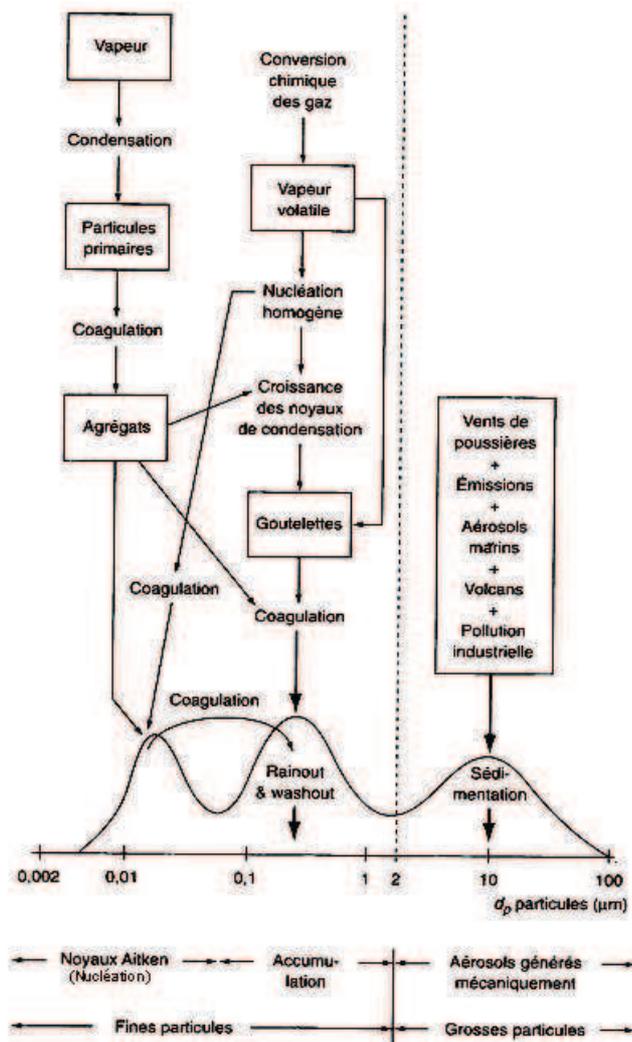


Figure I-5 : processus de formation et de disparition des particules atmosphériques (Madelaine, 1982 ; cité par Renoux et Boulaud, 1998).

I.1.1.3.2 Distribution des polluants et des radionucléides sur l'aérosol atmosphérique

Même si l'on distingue en général la fraction inorganique des aérosols de la fraction organique, la composition de l'aérosol atmosphérique est un mélange complexe d'espèces chimiques, inorganiques, organiques, de suies et éventuellement d'eau (Sportisse, 2008). La concentration en particules et leur composition sont à la fois dépendantes de la nature et de la proximité des sources. Des compositions chimiques moyennes des aérosols en fonction de leur provenance peuvent être proposées (Figure I-6).

La distribution de ces composés, dont certains sont polluants, sur le spectre granulométrique de l'aérosol atmosphérique dépend de la source d'émission et de l'âge de la masse d'air. Une distribution dans le mode « Aitken » est le signe d'une source « fraîche d'aérosols ». Par vieillissement de la masse d'air, la distribution passe ensuite sur le mode accumulation. (Van Dingenen *et al.*, 2004). Le mode « grossier », issu de processus mécaniques, est lui de composition indépendante à celles des deux autres modes (Clarke *et al.*, 1999 ; Tanner *et al.*, 2001).

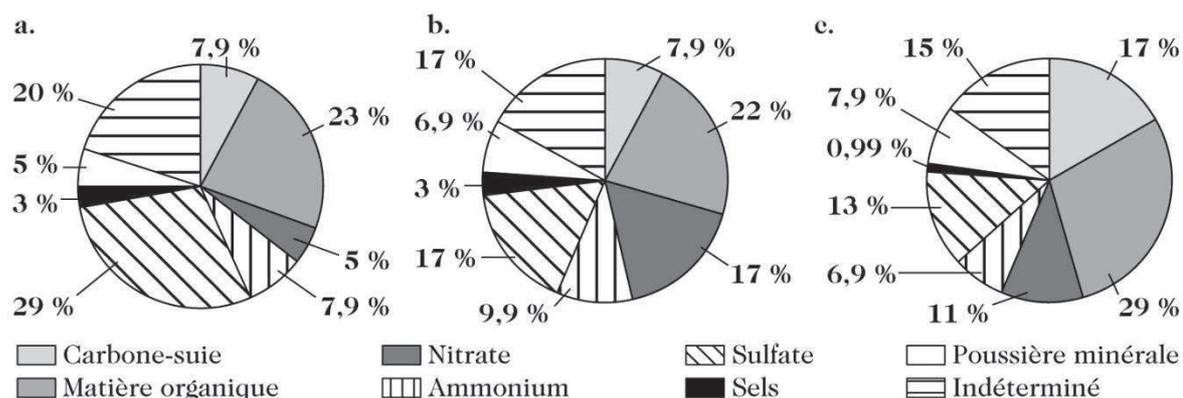


Figure I-6 : compositions moyennes d'aérosols représentatifs de milieux naturels (a, « bruit de fond »), péri-urbains (b) et urbains (c, au niveau d'une rue) (Delmas *et al.*, 2005).

Afin de mieux comprendre le transport et le transfert de polluants par les aérosols, la distribution des polluants sur les aérosols fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Les polluants organiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques, pesticides...) et inorganiques (métaux lourds), émis par le trafic et les activités industrielles en milieux urbains, sont souvent étudiés soit en échantillonnant la fraction fine d'une part et la fraction grossière d'autre part (Putaud *et al.*, 2004), soit en échantillonnant les particules sur des impacteurs (Horvath *et al.*, 1996a ; Allen *et al.*, 2001 ; Salma *et al.*, 2002 ; Percot *et al.*, 2011). Des distributions de polluants obtenues avec un impacteur et représentatives des résultats obtenus dans ce type d'études sont présentés sur la Figure I-7. Cet exemple pour des métaux montre que le mode « accumulation » est celui qui contient la part la plus importante de polluants. Ce type d'observations a aussi été réalisé pour d'autres métaux et pour des polluants organiques.

De même que pour les polluants chimiques stables, ce type d'étude a été conduit pour des radionucléides naturels et artificiels. Gründel et Porstendörfer (2004) et Connan *et al.* (2008) montrent que les descendants du radon 222 (plomb 210 et 214, polonium 210 et 214.) ont un diamètre aérodynamique médian en activité (Bq) compris entre 0,1 et 0,6 μm (diamètre médian calculé à partir de la distribution en activité des éléments radioactifs fixés aux particules). Le béryllium 7, radionucléide naturel souvent étudié qui montre le même type de distribution, sera plus particulièrement abordé dans le chapitre IV. Suite à l'accident de Tchernobyl, des études ont montré que les radionucléides émis (iode 131, césium 137...) étaient attachés au mode « accumulation » de l'aérosol atmosphérique et transportés à l'échelle continentale (Devell *et al.*, 1986 ; Jost *et al.*, 1986 ; Baltensperger *et al.*, 1987 ; Ogorodnikov *et al.*, 1994).

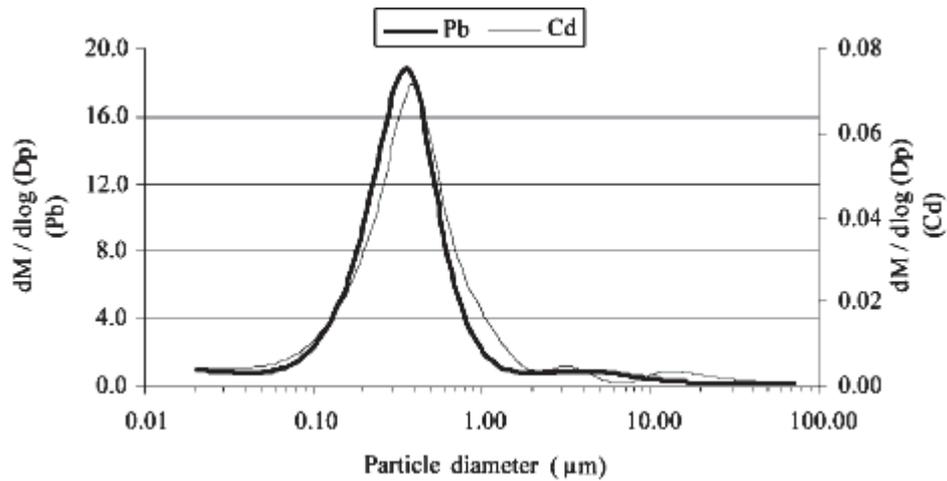


Figure I-7 : distribution massique de métaux sur le spectre granulométrique (en diamètre aérodynamique) de l'aérosol atmosphérique : exemple du plomb Pb et du cadmium Cd (Allen *et al.*, 2001).

Il apparaît donc que les éléments chimiques polluants et les radionucléides relâchés dans l'atmosphère, et mesurés, sont généralement fixés aux particules du mode « accumulation » de l'aérosol atmosphérique. Ce mode « accumulation » est représentatif de la distribution en surface de cet aérosol (Papastefanou, 2008).

1.1.2 FORCES PHYSIQUES S'APPLIQUANT AUX AEROSOLS

Selon la nature des aérosols, les particules ont des tailles pouvant varier de quelques dizaines de nanomètres à quelques dizaines de micromètres, voire une centaine de micromètres. Les forces physiques s'appliquant à ces particules dans l'écoulement de leur gaz porteur peuvent être nombreuses. Les principales forces intervenant sur le déplacement des particules dans l'environnement sont décrites dans cette partie.

Etant donné cette large gamme de tailles, les particules ne sont pas forcément toutes soumises à ces forces avec la même intensité. Pour distinguer les régimes de comportement des aérosols, il est parfois nécessaire d'introduire un nombre adimensionnel : le nombre de Knudsen Kn (Équation I-7).

$$Kn = \frac{2\lambda_g}{d_p} \quad \text{Équation I-7}$$

Le nombre de Knudsen caractérise la continuité du milieu porteur vis-à-vis de la particule avec λ_g le libre parcours moyen du gaz porteur ($\approx 6,6 \cdot 10^{-8}$ m pour l'air pour des conditions standards de température et de pression) et d_p le diamètre de la particule. Trois régimes sont alors distingués :

- $Kn \ll 1$: le régime continu. Les particules sont grosses en comparaison du libre parcours moyen et le gaz porteur peut être traité comme un milieu continu ;
- $Kn \approx 1$: le régime intermédiaire. Des discontinuités apparaissent et sont à l'origine du phénomène de glissement (ou diminution des forces de frottement sur la particule) ;
- $Kn \gg 1$: le régime moléculaire. Les échanges entre les particules et les molécules de gaz sont discontinus dans le temps. A un instant donné, les transferts de quantité de mouvement, de matière et de chaleur sont dus à un nombre très restreint de chocs moléculaires. Le mouvement des particules est affecté par les molécules de gaz.

Pour exemple, le mode accumulation de l'aérosol atmosphérique compris entre 0,1 et 1 μm est soumis aux régimes intermédiaires à continus.

1.1.2.1 Diffusion brownienne

La diffusion brownienne traduit l'effet des chocs des molécules du gaz porteur à la surface des particules du fait de l'agitation thermique, rendant leurs trajectoires aléatoires. Elle a une influence croissante pour des diamètres de particules décroissants. Typiquement elle s'applique aux particules fines et principalement aux ultrafines. A grande échelle la diffusion brownienne se traduit par une loi de diffusion. Pour des particules, le coefficient de diffusion brownienne D_b ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) s'écrit selon l'Équation I-8.

$$D_b = \frac{C_u k_b T}{3\pi\mu d_p} \quad \text{Équation I-8}$$

Avec k_b la constante de Boltzmann ($= 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ N m K}^{-1}$). Ce coefficient de diffusion est dépendant du diamètre d_p de la particule, de la température du gaz T (K), de la viscosité dynamique du gaz μ ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) et d'un facteur correctif C_u , ou coefficient de Cunningham (sans unité).

Pour des diamètres de particules de l'ordre du libre parcours moyen des molécules du gaz porteur, la loi de Stokes n'est plus applicable. Le milieu ne peut plus être considéré continu. Le coefficient correctif de Cunningham C_u est alors introduit pour accroître le domaine de validité de la loi de Stokes. L'expression de ce facteur correctif en fonction du nombre de Knudsen est donnée par l'Équation I-9.

$$C_u = 1 + Kn \left[\alpha + \beta \exp\left(\frac{-\gamma}{Kn}\right) \right] \quad \text{Équation I-9}$$

Les paramètres α , β et γ ont des valeurs différentes selon les auteurs (Renoux et Boulaud, 1998 ; Nerisson, 2009). Les valeurs respectives de 1,257, 0,400 et 1,10 sont souvent utilisées dans la littérature pour l'air, dans des conditions normales de température et de pression (Petroff, 2005 ; Nerisson, 2009). Le coefficient de Cunningham est égal à 1 dans le régime continu ($Kn \ll 1$), il croît pour des diamètres de particules décroissants dans le régime intermédiaire (Baron et Willeke, 2001).

1.1.2.2 Poids et force d'Archimède

Les particules sont soumises à leur poids (ou force de gravité F_p) et à la poussée d'Archimède F_a due au poids du volume de fluide déplacé par la particule. Pour une particule sphérique, la résultante de ces forces, aussi appelée force de flottabilité F_f est donnée par l'Équation I-10.

$$F_f = F_p + F_a = \frac{\pi}{6} d_p^3 g (\rho_p - \rho_a) \approx \frac{\pi}{6} d_p^3 g \rho_p \quad \text{Équation I-10}$$

Avec g l'accélération de pesanteur, ρ_p et ρ_a respectivement les masses volumiques de la particule et de l'air. Dans le cas d'une particule dans l'air, la force de flottabilité est prise égale au poids du fait de la masse volumique de l'air négligeable devant celle des particules (Baron et Willeke, 2001).

1.1.2.3 Force de traînée

La force de traînée F_d peut être une des forces majeures s'exerçant sur une particule au sein d'un fluide. Elle exprime la résistance de l'air à la vitesse de la particule et du gaz qui l'entoure (Baron et Willeke, 2001). En régime continu ($Kn \ll 1$) pour une particule sphérique, son intensité peut être exprimée selon l'Équation I-11 (dérivée de la loi de Stokes).

$$F_d = \frac{\pi}{8} C_d \rho_a u_p^2 d_p^2 \quad \text{Équation I-11}$$

Avec u_p la vitesse de la particule et C_d le coefficient de traînée de la particule donné par l'Équation I-12.

$$C_d = \frac{24}{Re_p} = \frac{24\nu_a}{d_p u_p} \quad \text{Équation I-12}$$

Re_p est le nombre de Reynolds particulaire et ν_a est la viscosité cinématique de l'air ($1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). Cette formulation est utilisée pour des nombres de Reynolds particuliers inférieurs à 0,1 (en régime de Stokes, laminaire). Pour Re_p supérieur à 0,1, cette formulation doit être corrigée selon le régime laminaire ou turbulent rencontré (voir par exemple, Hinds, 1999 ; ou Baron et Willeke, 2001).

1.1.2.4 Thermophorèse

La thermophorèse est le phénomène suivant lequel les particules en suspension dans un gaz où règne un gradient thermique se déplacent des zones chaudes vers les zones froides du gaz. Les molécules de gaz venant de la zone chaude délivrent une quantité de mouvement plus forte aux particules que les molécules venant de la zone froide (Figure I-8). Le transfert inégal de quantité de mouvement de chaque côté des particules induit une force de thermophorèse \vec{F}_{th} qui les met en mouvement (Montassier, 1990).

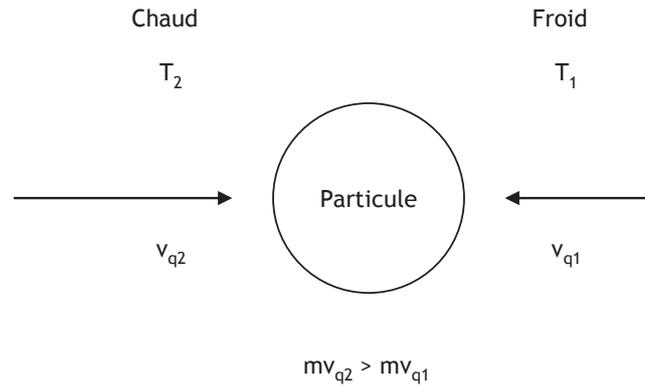


Figure I-8 : schéma de principe de la thermophorèse (d'après Montassier, 1990). T_1 et T_2 sont les températures du gaz ($T_1 < T_2$), v_{q1} et v_{q2} représentent les vitesses quadratiques du gaz, m est la masse de la particule.

La force de thermophorèse dépend du gradient thermique dans le gaz porteur, des caractéristiques de ce gaz et des caractéristiques des particules. Pour $d_p < \lambda_g$, l'expression de la force de thermophorèse donnée par Waldmann et Schmitt (1966, Équation I-13) est régulièrement retrouvée dans la littérature (Sagot *et al.*, 2009).

$$\vec{F}_{th} = \frac{-p\lambda_g d_p^2 \nabla T_\infty}{T} \quad \text{Équation I-13}$$

Avec p la pression du gaz (Pa), T la température absolue de la particule et ∇T_∞ le gradient thermique loin de la particule ($K m^{-1}$).

Pour $d_p > \lambda_g$ (régime continu ou de transition), plusieurs études donnent des expressions différentes de la force de thermophorèse (Zheng, 2002 ; Sagot *et al.*, 2009). L'expression de la force de thermophorèse donnée par Brock (1962) prend la forme de l'Équation I-14.

$$\vec{F}_{th} = \frac{-9\pi d_p \mu^2 H \nabla T_\infty}{2\rho_g T} \quad \text{Équation I-14}$$

H est un coefficient, sans dimension, d'accommodation thermique de la particule donné par l'Équation I-15.

$$H = \left(\frac{1}{1 + 6 \frac{\lambda_g}{d_p}} \right) \left(\frac{\frac{k_a}{k_p} + 4,4 \frac{\lambda_g}{d_p}}{1 + 2 \frac{k_a}{k_p} + 8,8 \frac{\lambda_g}{d_p}} \right) \quad \text{Équation I-15}$$

Avec k_a et k_p respectivement les conductivités thermiques de l'air et de la particule ($W m^{-1} K^{-1}$).

Il existe plusieurs formulations de la force de thermophorèse. Les formulations de Waldmann et Schmidt (1966) et de Brock (1962) définies précédemment, souvent retrouvées dans la littérature (Hinds, 1999 ; Baron et Willeke, 2001 ; Sagot *et al.*, 2009), seront utilisées dans notre étude.

La thermophorèse peut être rencontrée dans le cas d'écoulements dans des conduites industrielles. Les différentes études expérimentales menées sont généralement focalisées sur le cas d'un aérosol dans un

gradient de température dans un écoulement laminaire dans une enceinte. Le gradient thermique est alors imposé par chauffage d'une paroi plane et refroidissement de la paroi plane opposée (voir les études rapportée par Zheng, 2002) ou par passage d'un gaz porteur dans une conduite dont la température de paroi est contrôlée (Montassier, 1990). La thermophorèse dans des couches limites turbulentes a été modélisée mais plus rarement expérimentée (Sagot *et al.*, 2009 ; Wang *et al.*, 2011). Elle a aussi été prise en compte pour étudier le comportement des aérosols à l'intérieur de l'enceinte de confinement dans certains cas d'accidents de réacteurs nucléaires (Montassier, 1990). Jusqu'à présent négligée en milieu urbain, la thermophorèse pourrait pourtant y être rencontrée dans le cas de surfaces chauffées par les rayons du soleil et ainsi diminuer les dépôts sur ces surfaces (Maro *et al.*, 2010).

1.1.2.5 *Autres phénomènes phorétiques et électrostatiques*

D'autres processus phorétiques existent et peuvent être pris en compte sous certaines conditions. Ce sont la diffusiophorèse, la photophorèse et le flux de Stefan (Hinds, 1999). Cependant, les contributions respectives des phénomènes électrostatiques et phorétiques ne sont généralement pas prises en compte dans les études et la modélisation du dépôt.

La photophorèse est le déplacement de particules sous l'effet d'un rayon lumineux (attraction ou répulsion des particules par la source de lumière). La particule absorbe les rayons lumineux qui chauffent la face exposée de la particule et l'apparition d'un gradient de température à la surface de la particule provoque le mouvement de celle-ci de la même façon que la thermophorèse (Baron et Willeke, 2001).

L'existence d'un gradient de concentration d'une espèce chimique dans un volume d'air à température et pression uniformes est connue pour induire un mouvement des particules d'aérosols, c'est la diffusiophorèse. Par exemple, une accumulation d'aérosols peut être observée autour d'une goutte qui condense (Facy, 1955 ; d'après Waldmann et Schmitt, 1966). Dans la littérature, ce processus est envisagé pour le cas de gradients de vapeur d'eau dans une enceinte de réacteur nucléaire en cas d'accident (Renoux et Boulaud, 1998). La diffusiophorèse semble toutefois limitée aux très petites particules ($< 0,1 \mu\text{m}$; Baron et Willeke, 2001).

Le flux de Stefan est un cas particulier de la diffusiophorèse à proximité d'une surface liquide se condensant ou s'évaporant. Un écoulement aérodynamique de l'air se crée dans la direction de la surface dans le cas d'une condensation et entraîne les particules vers la surface par traînée de Stokes (Hinds, 1999). L'effet inverse s'observe pour une surface s'évaporant. Les forces issues de la diffusiophorèse et du flux de Stefan peuvent agir dans le même sens ou dans le sens opposé selon les conditions. Ce phénomène pourrait contrebalancer la diffusiophorèse dans le mouvement des particules à proximité d'une surface (Camuffo, 2001 ; cité par Lombardo, 2002).

Les aérosols atmosphériques peuvent acquérir des charges électriques du fait de dépôt d'ions par diffusion brownienne. Ces ions ont diverses origines (naturelles ou anthropiques) et sont la majeure partie du temps produits par le rayonnement solaire (Bricard, 1977b). Dans un champ électrique E , les particules sont soumises à une force électrostatique proportionnelle à E et au nombre de charges q

portées par la particule. Non prise en compte en environnement, l'existence de matières plastiques électrostatiques sur les bâtiments pourrait amener à reconsidérer l'importance de ce phénomène.

1.1.2.6 Variation de taille des particules par condensation et évaporation

La condensation de vapeur est le processus principal de création des particules dans l'environnement. On parle alors de nucléation homogène (dans le cas de nucléation sur des noyaux issus d'une vapeur unique) ou hétérogène (si les noyaux sont de nature différente de la vapeur). L'évaporation (par exemple de l'eau) est le processus opposé (Renoux et Boulaud, 1998). Ces deux processus sont gouvernés par les mêmes lois (Baron et Willeke, 2001).

La condensation et l'évaporation de la vapeur d'eau de l'air sur les particules atmosphériques joue aussi un rôle important. La quantité d'eau condensée en surface d'un aérosol est directement proportionnelle à l'humidité relative ambiante. Le diamètre des particules varie en fonction de ce taux d'humidité. Il croît à partir d'un certain taux, appelé point de déliquescence, et diminue avec le taux d'humidité jusqu'à ce que la particule redevienne solide, au point de cristallisation (Seinfeld et Pandis, 1998). Ces processus de déliquescence et de cristallisation suivent une hystérésis (Figure I-9).

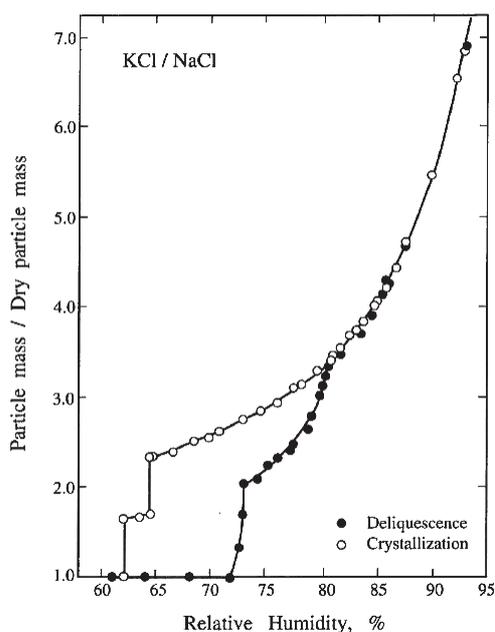


Figure I-9 : taux relatif de croissance et de décroissance en masse d'un aérosol (composé de 66 % de KCl et de 33 % de NaCl, en masse) en fonction de l'humidité relative (%) (Tang et Munkelwitz, 1993 ; cité par Seinfeld et Pandis, 1998).

Selon cette figure, les effets de déliquescence peuvent avoir lieu pour des taux d'humidité régulièrement rencontrés dans l'environnement. Le processus de condensation d'eau sur des particules, alors appelés noyaux de condensation, est à l'origine de la formation des nuages et des brouillards dans l'atmosphère. Il est dépendant de paramètres météorologiques (taux d'humidité, pression, température de la masse d'air) et de paramètres liés à la particule (nature chimique, diamètre).

I.2 LE DEPOT SEC DES AEROSOLS

Dans l'atmosphère, le transfert de particules aux interfaces peut intervenir par dépôt sec (par temps sec) ou par dépôt humide (en présence de précipitations). Bien que beaucoup moins efficace que le dépôt humide, le dépôt sec devient la seule voie de transfert des particules en l'absence de précipitations. Afin d'estimer l'ensemble des dépôts, le dépôt sec est généralement pris en compte dans les modèles de transport de polluants en utilisant la notion de vitesse de dépôt sec. Dans la littérature, le dépôt sec, dépendant de plusieurs phénomènes physiques, est à la fois étudié en laboratoire et dans l'environnement. Les milieux confinés (conduites aérauliques, environnements intérieurs) et les environnements naturels sont les milieux les plus étudiés, même s'il persiste beaucoup d'incertitudes, surtout dans la gamme de taille 0,05 - 2 μm (Hewitt et Jackson, 2003). Le milieu urbain a jusqu'à présent été peu étudié (Fowler *et al.*, 2009). Les principaux mécanismes de dépôt sec en milieu urbain, les différentes méthodes de mesure, les principales données expérimentales de la littérature et les principaux modèles développés sont présentés.

I.2.1 DEFINITION DE LA VITESSE DE DEPOT SEC

Pour quantifier le dépôt sec aux interfaces (sol, murs, végétation...) des particules contenues dans un panache ou dans l'atmosphère, le transfert des particules est traité avec une vitesse de dépôt. Cette vitesse de dépôt sec, notée V_d (m s^{-1}), est définie par Chamberlain et Chadwick (1953 ; cité par Sehmel, 1980) comme l'opposé du rapport du flux surfacique de dépôt de particules F (en particule $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) et de la concentration moyenne en particules dans l'air C (en particule m^{-3}) à une hauteur de référence donnée (Équation I-16).

$$V_d = \frac{-F}{\bar{C}} \quad \text{Équation I-16}$$

Pour un aérosol polydispersé comportant i gammes de tailles de particules, la vitesse de dépôt sec doit être calculée selon l'Équation I-17.

$$V_d = \frac{\sum_i V_{di} C_i}{\sum_i C_i} \quad \text{Équation I-17}$$

V_{di} est la vitesse de dépôt des particules de la gamme de taille i de concentration C_i .

Dans l'environnement, les conditions de dépôt sec peuvent être très différentes. La vitesse de dépôt est dépendante des caractéristiques de l'aérosol, de la surface de dépôt et des conditions micrométéorologiques (principalement de la turbulence atmosphérique). A partir de ces trois catégories, le Tableau I-1, inspiré de Sehmel (1980), synthétise de façon non exhaustive les principaux paramètres pouvant influencer sur le dépôt sec en milieu urbain.

Tableau I-1 : paramètres influençant le dépôt sec des particules en milieu urbain.

Propriétés de l'aérosol	Propriétés de la surface	Variables micrométéorologiques
Diamètre	Densité des rugosités	Vitesse du vent
Forme	Taille des rugosités	Vitesse de frottement
Densité	Température	Intensité de turbulence
Hygroscopicité	Propriétés électrostatiques	Flux de chaleur sensible
Solubilité	Nature chimique	Stabilité atmosphérique
Charge électrostatique		Humidité relative
Propriétés physiques		Température ambiante
		Rayonnement solaire

1.2.2 PROCESSUS PHYSIQUES INFLUENÇANT LE DEPOT SEC

Le dépôt sec des particules est dépendant des variables présentées dans le Tableau I-1 car il met en jeu différents mécanismes physiques. Certains peuvent être rencontrés en milieu urbain, ils seront prioritairement étudiés lors de nos expérimentations. Il s'agit de la sédimentation, de la diffusion brownienne et des processus turbulents d'impaction et d'interception. La thermophorèse sera aussi prise en compte dans notre étude.

1.2.2.1 Sédimentation

La sédimentation d'une particule est la résultante de la force de gravité, de la poussée d'Archimède et de la traînée, c'est donc le mécanisme de dépôt des particules sur des surfaces horizontales. Lorsque l'équilibre de ces forces existe, la particule atteint une vitesse terminale de chute ou vitesse de sédimentation V_s . En régime de Stokes, la vitesse de sédimentation dans l'air est exprimée sous la forme de l'Équation I-18.

$$V_s = \frac{d_p^2 g \rho_p}{18 \mu_a} \quad \text{Équation I-18}$$

Dans cette expression μ_a est la viscosité dynamique de l'air ($= 1,8 \cdot 10^{-5}$ Pa s, égale au produit $\nu_a \rho_a$).

Cependant, pour des particules de petits diamètres (typiquement de l'ordre du libre parcours moyen de l'air λ_g), la loi de Stokes n'est plus applicable. Une expression générale de la vitesse de sédimentation intégrant le coefficient correctif de Cunningham C_u doit être utilisée (Équation I-19 ; Hinds, 1999).

$$V_s = \frac{d_p^2 g \rho_p C_u}{18 \mu_a} = g \tau_p \quad \text{Équation I-19}$$

Cette formulation permet d'introduire τ_p (s), temps caractéristique de réponse de la particule à une sollicitation extérieure appelé temps de relaxation. Son expression dans l'air est donnée par l'Équation I-20.

$$\tau_p = \frac{d_p^2 \rho_p C_u}{18\mu_a} \quad \text{Équation I-20}$$

Le temps de relaxation d'une particule est dépendant de sa taille, de sa densité et des propriétés du gaz porteur.

1.2.2.2 Diffusion brownienne

Dans un écoulement, à l'approche d'un obstacle dont la surface est considérée comme un puits parfait, les particules peuvent migrer par diffusion brownienne vers la paroi et se déposer (Figure I-10). La concentration à la paroi est alors nulle et il s'établit un flux de particules par diffusion vers la paroi. L'efficacité de collection est généralement une fonction du nombre de Peclet Pe défini par l'Équation I-21 (Renoux et Boulaud, 1998).

$$Pe = \frac{uL}{D_b} = ReSc \quad \text{Équation I-21}$$

u est la vitesse moyenne du gaz porteur (m s^{-1}), L est une longueur caractéristique de l'obstacle (m) et D_b est le coefficient de diffusion brownienne.

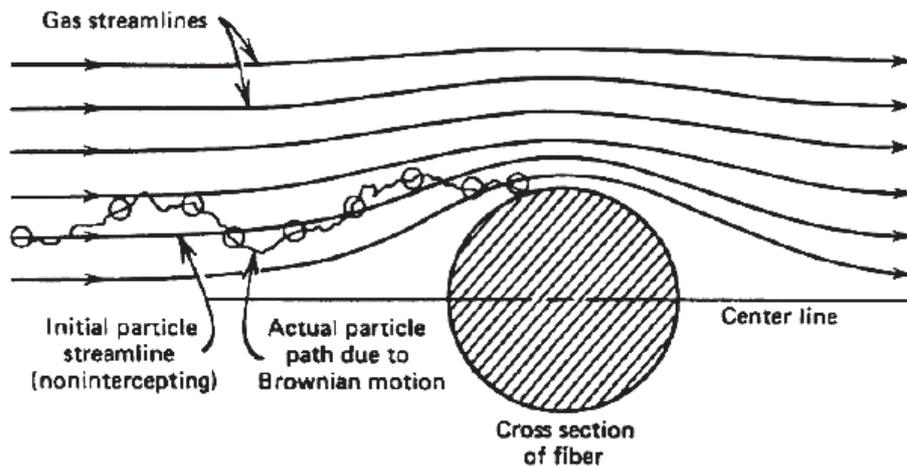


Figure I-10 : illustration du dépôt d'une particule sur un obstacle par diffusion brownienne (Hinds, 1999).

Le nombre de Peclet décrit le rapport entre le transport par convection (suivant le mouvement du fluide) et le transport par diffusion. Plus il est faible, plus l'efficacité de collection par diffusion brownienne est grande. Il est aussi égal au produit du nombre de Reynolds Re (Équation I-22) et du nombre de Schmidt Sc (Équation I-23).

$$Re = \frac{uL}{\nu_a} \quad \text{Équation I-22}$$

$$Sc = \frac{\nu_a}{D_b} \quad \text{Équation I-23}$$

Le nombre de Reynolds caractérise le rapport du transport par inertie et de la viscosité du gaz. Le nombre de Schmidt caractérise le rapport de la viscosité cinématique et le coefficient de diffusion brownienne. Lorsque ce dernier croît, le transport par diffusion brownienne diminue relativement au transport convectif (Baron et Willeke, 2001). Il exprime l'aptitude des particules à diffuser à travers un milieu visqueux. Une vitesse de dépôt par diffusion brownienne V_b (m s^{-1}) sur l'obstacle est donnée par l'Équation I-24 (Renoux et Boulaud, 1998).

$$V_b = \frac{ShD_b}{L} = \frac{Sh C_u k_b T}{L 3\pi\mu d_p} \quad \text{Équation I-24}$$

Sh est le nombre de Sherwood, dépendant des nombre de Schmidt et de Reynolds, dont une formulation pour un écoulement turbulent est donnée par Friedlander (1977 ; Équation I-25 ; cité par Renoux et Boulaud, 1998).

$$Sh = 0,0118Sc^{\frac{1}{3}}Re^{\frac{7}{8}} \quad \text{Équation I-25}$$

Le dépôt par diffusion brownienne devient important surtout pour les particules très fines, typiquement de diamètres inférieurs à $0,1 \mu\text{m}$.

1.2.2.3 Impaction

Une particule transportée par un écoulement vers un obstacle peut ne pas suivre les changements de directions de l'écoulement autour de l'obstacle et va l'impacter si son inertie est trop grande (Figure I-11).

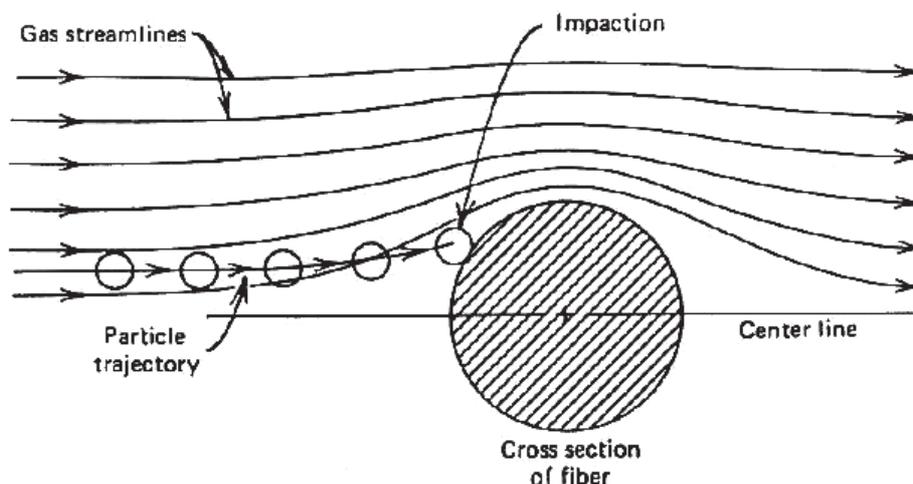


Figure I-11 : illustration du dépôt d'une particule sur un obstacle par impaction inertielle (Hinds, 1999).

L'influence de cette inertie croît pour des diamètres de particules, des masses volumiques de particules et des vitesses d'écoulements croissants. Elle se fait généralement sentir pour des particules dont le diamètre est de l'ordre ou supérieur au micromètre. L'impaction inertielle est décrite en fonction d'une efficacité d'impaction E_{imp} prise en compte dans le calcul de la vitesse de dépôt par impaction V_{imp} , celle-ci est alors donnée par l'Équation I-26.

$$V_{imp} = uE_{imp}(St) \quad \text{Équation I-26}$$

La formulation de l'efficacité d'impaction peut varier selon les couverts étudiés par différents auteurs dans la littérature (Petroff, 2005). Elle est définie comme le ratio du nombre de particules impactées au nombre de particules qui passeraient au travers de l'obstacle si l'écoulement n'était pas perturbé par sa présence. Elle est reliée au nombre de Stokes St , défini par l'Équation I-27, et à la forme de l'obstacle (Fuchs, 1964 ; Hinds, 1999).

$$St = \frac{\tau_p u}{L} = \frac{d_p^2 \rho_p C_u u}{18 \mu_a L} ; St = \frac{\tau_p u_*^2}{\nu} \quad \text{Équation I-27}$$

Dans la première équation, le nombre de Stokes quantifie le rapport de la taille caractéristique de l'obstacle L et de la distance d'arrêt de la particule égale à $\tau_p u$ (m). Il peut aussi être vu comme le rapport du temps de relaxation et du temps de transit autour de l'obstacle (Hinds, 1999). Dans le cas d'une surface plane, le nombre de Stokes prend la forme de la seconde équation, la vitesse caractéristique étant alors la vitesse de frottement u_* .

1.2.2.4 Interception

Quand une particule suit une ligne de courant d'un écoulement qui passe à une distance inférieure ou égale à son rayon $r_p = d_p/2$, elle se dépose par interception sur l'obstacle (Figure I-12).

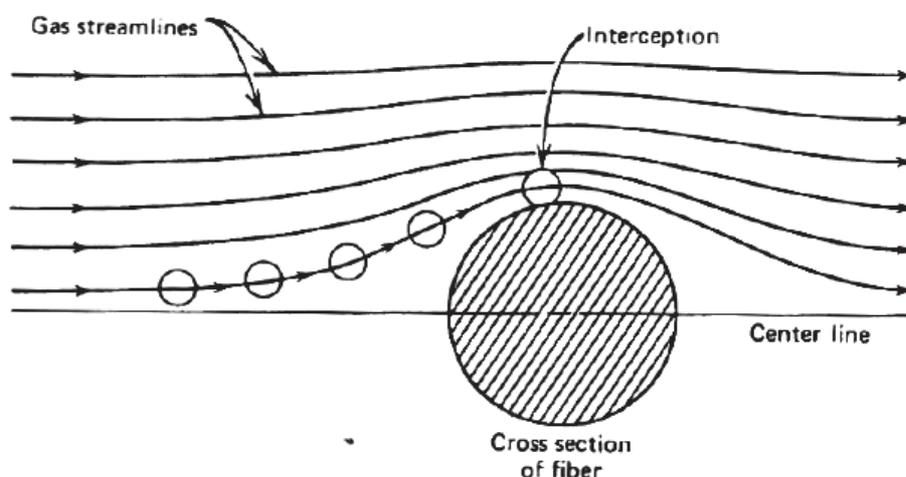


Figure I-12 : illustration du dépôt d'une particule sur un obstacle par interception (Hinds, 1999).

L'importance de l'interception est liée au rapport des dimensions de la particule et de l'obstacle (Équation I-28).

$$K = \frac{d_p}{d_o} \quad \text{Équation I-28}$$

K est le nombre d'interception et d_o (m) est le diamètre de l'obstacle. Plus le nombre d'interception est grand, plus l'efficacité de captation est grande. Ce processus de dépôt adapté à l'étude de la filtration est plus rarement pris en compte dans les modèles de dépôt dans l'environnement (Petroff, 2005). Concernant les particules de faible inertie, l'interception pure considère que la particule suit parfaitement la ligne de courant sans influence de l'inertie, de la gravité et de la diffusion brownienne sur le mouvement de la particule (Hinds, 1999).

1.2.2.5 Thermophorèse

La thermophorèse est prise en compte dans la modélisation du dépôt dans les conduites et dans les bâtiments. Elle est aussi considérée dans le cas d'études de combustion et d'accidents de réacteurs nucléaires (Zheng, 2002). Par contre, jusqu'à récemment, elle n'avait pas été prise en compte dans les études de dépôt dans des environnements extérieurs. Lors d'une étude sur le dépôt sec de suies sur des monuments antiques, Camuffo et Bernardi (1993, 1996) ont émis l'hypothèse d'une influence possible d'un effet de la thermophorèse sur les monuments qui pourrait, selon les températures des surfaces et de l'air ambiant, diminuer ou augmenter les dépôts, surtout pour les particules fines. Plus récemment, Maro *et al.* (2010) mettent clairement en évidence une diminution du dépôt par effet de thermophorèse sur des surfaces de verre chauffées par le soleil (Figure I-13). En effet, la Figure I-13 montre clairement que pour l'essai n°4 qui possède l'écart de température le plus grand entre le verre et l'air ambiant, la vitesse de dépôt est nettement diminuée. La thermophorèse doit donc être prise en compte en milieu urbain dans le cas de surfaces chauffées par le soleil.

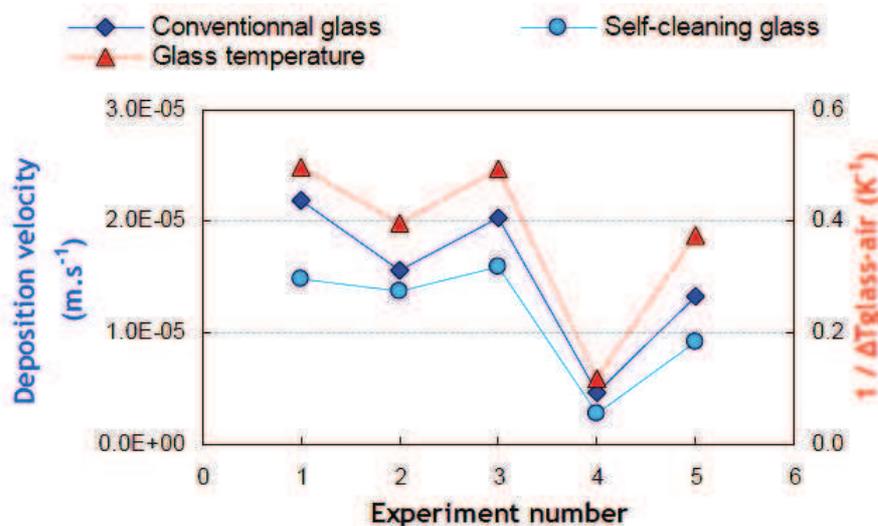


Figure I-13 : vitesses de dépôt sec et inverses des écarts de températures verre - air pour cinq expérimentations (Maro *et al.*, 2010).

Des expressions de vitesses de thermophorèse V_{th} dans l'air peuvent être déduites des expressions des forces de thermophorèse données par l'Équation I-13 et l'Équation I-14. Pour $d_p < \lambda_g$, la vitesse de thermophorèse est donnée par l'Équation I-29 (Waldmann et Schmitt, 1966).

$$\vec{V}_{th} = \frac{-0,55\mu_a\vec{\nabla}T_\infty}{\rho_a T} \quad \text{Équation I-29}$$

Pour $d_p > \lambda_g$, la vitesse de thermophorèse donnée par Brock (1962) prend la forme de l'Équation I-30.

$$\vec{V}_{th} = \frac{-3\mu_a C_u H \vec{\nabla}T_\infty}{2\rho_a T} \quad \text{Équation I-30}$$

La comparaison des vitesses de sédimentation et de thermophorèse, dans un gradient de température de 100 K m^{-1} , montre que cette dernière peut être supérieure à la vitesse de sédimentation pour des particules de diamètres inférieurs à $1 \mu\text{m}$ (Hinds, 1999).

En résumé de ce paragraphe I.2.2, la vitesse de dépôt est une résultante de l'ensemble de ces phénomènes physiques de dépôt. Cependant, la diffusion brownienne, l'interception, l'impaction, la sédimentation et la thermophorèse dépendent du diamètre des particules. Elles s'appliquent avec des intensités variables selon le diamètre des particules : la diffusion brownienne est prépondérante pour les particules ultrafines alors que la sédimentation est prépondérante pour les particules grossières. Lorsque les équations qui modélisent les phénomènes de dépôt, sont intégrées aux modèles de dépôt, il en résulte une courbe en « V » caractéristique de la vitesse de dépôt V_d en fonction du diamètre d_p . Cette courbe est classiquement représentée pour les environnements naturels par la Figure I-14 (ici une paramétrisation du modèle de Slinn, 1982), avec trois régions de prédominance pour les différents phénomènes de dépôt.

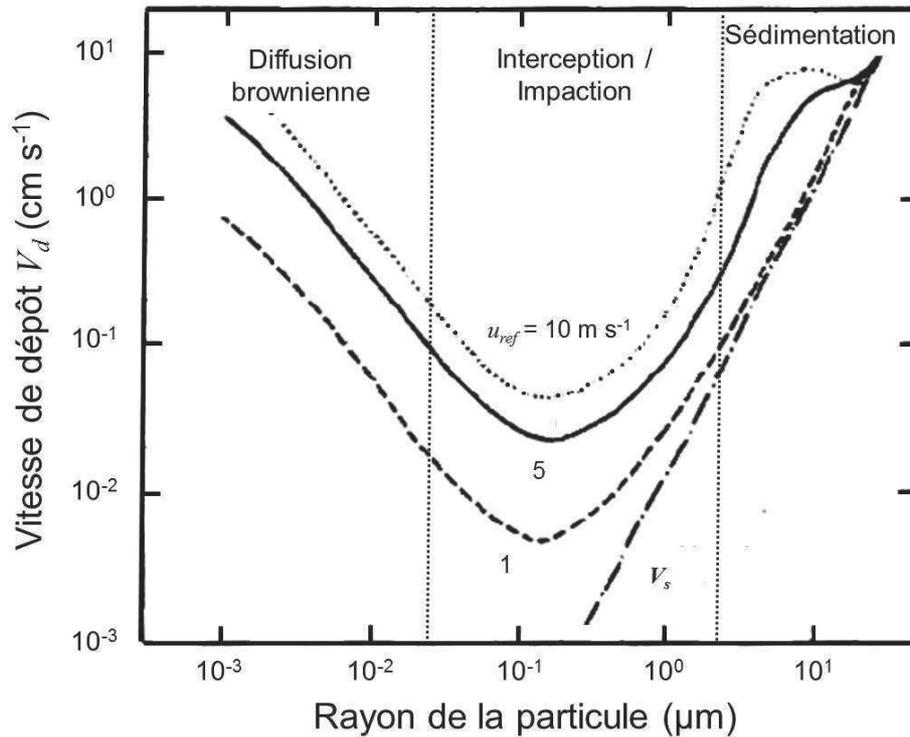


Figure I-14 : courbe en « V » de la vitesse de dépôt sec en fonction du diamètre des particules pour trois vitesses de vent (Slinn, 1982 ; d'après Maro, 2012).

Sur cette figure, u_{ref} ($m s^{-1}$) est la vitesse du vent, V_s ($m s^{-1}$) est la vitesse de sédimentation et la vitesse de dépôt est donnée en $cm s^{-1}$. De plus, la thermophorèse n'apparaît pas car c'est un phénomène physique qui n'est généralement pas pris en compte dans l'environnement.

1.2.3 METHODES DE MESURE DES VITESSES DE DEPOT SEC

Il existe dans la littérature plusieurs méthodes pour mesurer des vitesses de dépôt sec. Selon la méthode utilisée, les données peuvent être acquises *in situ* ou en laboratoire (souffleries et chambres de dépôt). Les vitesses de dépôt sec acquises *in situ* sont principalement issues d'études sur la qualité de l'air, réalisées pour caractériser les transferts de polluants atmosphériques, et de mesures des retombées radioactives des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl. Dans ces études, les caractéristiques de l'aérosol déposé et les conditions météorologiques et turbulentes de dépôt ne sont souvent pas quantifiées. A l'inverse, lors d'études en laboratoire, les paramètres liés au dépôt (diamètre des particules, turbulence...) sont généralement connus. Par contre, les conditions y étant simplifiées, les paramètres et les surfaces étudiées sont rarement représentatifs des conditions urbaines. Il existe deux types de méthodes de quantification des dépôts : les mesures directes et les mesures indirectes. Les principales méthodes rencontrées dans la littérature sont présentées.

1.2.3.1 Méthodes de mesures directes

Les mesures directes de flux de dépôt sec se font soit par accumulation, soit par traçage. Ces deux méthodes nécessitent l'utilisation de surfaces dédiées au prélèvement de particules par dépôt. Les substrats artificiels couramment utilisés sont des disques de Pétri (Tanner *et al.*, 2001), des plaques de téflon (Davidson *et al.*, 1985), du papier filtre (Vandenberg et Knoerr, 1985), des bacs en polyéthylène (Vandenberg et Knoerr, 1985) ou encore des plaquettes de dépôt (ou dépositimètres, souvent des plaques collantes ; Odabasi *et al.*, 2002 ; Tasdemir *et al.*, 2004). Notons que la méthode de prélèvement d'aérosols avec ce dernier type de collecteur est encadrée par une norme définissant les prélèvements liés aux études de qualité de l'air (NF X 43-007). L'utilisation des substrats artificiels facilite l'extraction des composés chimiques pour leur analyse. Par contre, elle met en question la représentativité du flux de dépôt vis-à-vis de surfaces urbaines réelles. En effet, les caractéristiques de ces surfaces sont différentes des surfaces réellement exposées aux aérosols, que ce soit la nature du matériau les composant ou leurs rugosités (Davidson *et al.*, 1985). La contribution de différents processus de dépôt, notamment par charges électrostatiques ou thermophorèse, rend difficile l'analyse du prélèvement. Le prélèvement sur des surfaces réelles est probablement plus représentatif de la réalité. Dans ce cas, les surfaces sont prélevées puis lavées après leur exposition à l'aérosol. Un désavantage de cette méthode est de réaliser un prélèvement en un point donné d'un milieu urbain qui ne peut être représentatif de l'ensemble du milieu (Underwood, 1987). Un prélèvement sur filtre réalisé en parallèle de l'exposition des surfaces, pour mesurer la concentration en aérosols dans l'air, permet de calculer *a posteriori* des vitesses de dépôt sec.

Dans le cas de la mesure par accumulation, l'aérosol est déjà présent dans l'environnement et se dépose sur un substrat artificiel ou naturel. Les espèces chimiques ou radioactives liées aux particules sont déposées, puis mesurées suite à leur extraction du substrat. Les périodes de prélèvement sont souvent assez longues et limitent les possibilités d'étude de la dynamique du dépôt. Les composés chimiques les plus étudiés sont les métaux (Little et Wiffen, 1977 ; cité par Sehmel, 1980 ; Odabasi *et al.*, 2002), les espèces ioniques (Davidson *et al.*, 1985 ; Tanner *et al.*, 2001) et les composés aromatiques, tels que les polychlorobiphényles (PCB ; Tasdemir *et al.*, 2004). Ce type de méthode a été utilisé avec des surfaces réelles ou des substrats pour des couverts végétaux (Vandenberg et Knoerr, 1985, Davidson *et al.*, 1985), de l'eau de lacs (Zufall *et al.*, 1998) et de l'eau de mer (Young et Silker, 1980). Cette méthode a été ponctuellement utilisée pour des surfaces urbaines réelles, notamment par Roed (1983, 1985, 1987), par mesure de radionucléides suite aux retombées radioactives des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl. Des vitesses de dépôt peuvent être quantifiées pour les composés mesurés et extrapolées aux tailles de particules atmosphériques associées. Cependant, une source d'incertitude réside dans le fait que l'aérosol atmosphérique échantillonné est soumis à des variations de diamètres non maîtrisées, car influencées par les conditions météorologiques (Underwood, 1987).

La mesure du dépôt par traçage se base sur l'utilisation d'espèces chimiques ou radioactives normalement absentes du milieu étudié. Le traçage peut être mis en œuvre de différentes façons : avec un aérosol généré à partir de la nébulisation d'une solution contenant le traceur : fluorescéine (Liu et Agarwal, 1974 ; Connan *et al.*, 2006), sodium (Shimada *et al.*, 1987), $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (Hussein *et al.*,

2009b) ; avec un aérosol solide en solution ou en poudre comme des billes de latex fluorescentes (Horvath *et al.*, 1996b) ; avec un aérosol généré à partir d'une suspension de particules de suies (Pesava *et al.*, 1999) ; ou encore par fixation d'un traceur sur un aérosol déjà existant, par exemple de l'iode 131 sur des spores de Lycopodium par Chamberlain (1967). La granulométrie de l'aérosol est en général monomodale, monodispersée ou polydispersée autour de ce mode, son diamètre médian et son écart-type sont connus. Les expérimentations par traçage peuvent être réalisées *in situ* et présentent l'avantage d'être utilisables en soufflerie ou encore en chambre de dépôt. Cette méthode permet de mesurer des dépôts sur une grande variété de surfaces, naturelles ou représentatives de milieux intérieurs, pour des aérosols allant d'environ 10 nm à 100 µm selon le type de traceur utilisé.

Souvent utilisée à titre de comparaison et/ou pour contraindre des modèles de dépôt sec, les méthodes de mesure directes de vitesses de dépôt sec nécessitent de quantifier les paramètres environnementaux (turbulence, paramètres météorologiques...) et de surface (température, paramètres de rugosité...) en parallèle des expérimentations de dépôt.

1.2.3.2 Méthodes de mesures indirectes

Les méthodes de mesures indirectes se basent sur des mesures de concentrations d'aérosols pour estimer des flux de dépôts et/ou des vitesses de dépôt. Deux méthodes principalement utilisées, une en laboratoire et l'autre *in situ*, sont présentées.

En laboratoire, l'utilisation de chambres de dépôt, une enceinte confinée dans laquelle un aérosol peut être injecté, permet de mesurer le dépôt sec par suivi de la concentration en particules dans l'air. Cette méthode, permettant des études avec des aérosols générés et des surfaces lisses à peu rugueuses, est souvent utilisée dans la littérature pour étudier le dépôt sec sur des surfaces représentatives des environnements intérieurs (Holub *et al.*, 1988 ; Byrne *et al.*, 1995 ; Abadie *et al.*, 2001 ; Hussein *et al.*, 2009a, 2009b). Le principe est de préparer la chambre avec la surface étudiée, d'injecter un aérosol dans la chambre, dont l'air est initialement propre (absence de particules), et de mesurer la concentration en particules en continu sur une certaine période de temps. Une décroissance de la concentration due au dépôt est alors observée. Un taux de décroissance β (s^{-1}) est déterminé par ajustement de l'Équation I-31 aux mesures de concentrations réalisées sur le temps d'observation.

$$C(t) = C_0 \exp(-\beta t) \quad \text{Équation I-31}$$

$C(t)$ est la concentration en particules (particule m^{-3}) mesurée à l'instant t (s) et C_0 est la concentration initiale en particules (particule m^{-3}) dans l'enceinte à $t = 0$ s. Une vitesse de dépôt peut être calculée à partir de ce taux de décroissance, du volume de l'enceinte et de la surface qu'elle présente à l'aérosol selon l'Équation I-32.

$$V_d = \frac{\beta V}{A} \quad \text{Équation I-32}$$

V est le volume de l'enceinte (m^3) et A est la surface développée par les parois à l'intérieur de l'enceinte (m^2). Ces chambres de dépôt sont équipées d'un ventilateur pour générer de la turbulence et augmenter le dépôt par processus turbulents. Elles présentent plusieurs avantages : choix du diamètre des particules utilisées, choix du type de surface étudié. Par contre, cette méthode présente

des contraintes importantes quant à l'exploitation des résultats. Les vitesses de dépôt calculées sont représentatives de l'ensemble de la chambre (sol, murs et plafond). Les taux de décroissance acquis avec une chambre peuvent donc être comparés avec des modèles mais plus difficilement avec des données issues d'une autre méthode ou d'une chambre de géométrie différente. D'autre part, la turbulence, souvent quantifiée par le régime du ventilateur (rotation par minute ou *rpm*), semble difficilement mesurable dans la chambre. Certains auteurs réalisent des mesures anémométriques pour estimer des vitesses de frottement (Lai et Nazaroff, 2005). A défaut, les vitesses de frottement sont extrapolées par comparaison des vitesses de dépôt expérimentales avec celles prédites par des modèles et dépendantes de ces vitesses de dépôt (Hussein *et al.*, 2009a).

In situ, une des principales méthodes utilisées ces dernières années est la mesure de flux par corrélation turbulente (ou méthode des covariances). Récemment détaillée et mise en œuvre par Damay (2009, 2010), les mesures de vitesses de dépôt sont réalisées dans la couche de surface de la couche limite atmosphérique. La vitesse verticale du vent w et la concentration C en aérosol doivent y être mesurées à haute fréquence (1 à 10 Hz) avec un anémomètre ultrasonique et un compteur de particules : un compteur à noyau de condensation (CNC) ou un Electrical Low Pressure Impactor (ELPI) par exemple. En respectant notamment les conditions de stationnarité de la vitesse verticale du vent et de la concentration en aérosol sur la période d'échantillonnage (pas de dérive lente des signaux), donc en supposant l'existence d'une couche à flux constant, les flux verticaux de particules F (particule $m^{-2} s^{-1}$) peuvent être calculés par covariance de la vitesse verticale instantanée du vent w' ($m s^{-1}$) et de la concentration instantanée C' (particule m^{-3}) selon l'Équation I-33.

$$F = \overline{w'C'} - V_s \bar{C} \quad \text{Équation I-33}$$

Un flux négatif correspond alors à un dépôt sec, d'où la soustraction du dépôt par sédimentation (V_s) à F . La vitesse de dépôt sec est calculée en divisant l'opposé de ce flux de dépôt par la concentration moyenne en aérosols au voisinage de la mesure du flux. Cette méthode est très utilisée en environnements naturels et un grand nombre de ces données sont synthétisées par Petroff (2005) et Damay (2010). Des vitesses de dépôt ont pu être mesurées sur divers couverts naturels (forêts, prairies...) et paramétrées selon les variables micrométéorologiques (vitesses de frottement et flux de chaleur sensible). Par contre, cette méthode nécessite de grandes surfaces planes et homogènes pour chaque couvert, pour avoir une turbulence bien établie dans la couche de surface. Elle peut être utilisée en milieu urbain pour mesurer des flux de gaz (Velasco *et al.*, 2005) et de particules (Dorsey *et al.*, 2002 ; Longley *et al.*, 2004 ; Schmidt et Klemm, 2008). Les mesures sont réalisées dans la couche limite atmosphérique, au-dessus de la canopée urbaine. Elles mettent plus souvent en évidence des flux d'émission de particules même si certains auteurs mesurent des flux de dépôt (Schmidt et Klemm, 2008). Les flux de particules tirés de ces mesures sont représentatifs du site d'observation dans la zone urbaine (Dorsey *et al.*, 2002) et ne permettent pas de mesurer les vitesses de dépôt caractéristiques des différentes surfaces.

1.2.4 VITESSES DE DEPOT ISSUES DE LA LITTERATURE

Les données de vitesses de dépôt sec sont nombreuses dans la littérature. Cependant, les études sont souvent réalisées dans des environnements naturels (prairies, forêts, déserts, lacs, océans...) et des environnements confinés (conduites aérauliques, pièces de travail), mais beaucoup plus rarement pour les milieux urbains. L'ensemble de ces données peut s'avérer intéressant pour des calculs de dépôt en milieux urbains dont les surfaces sont souvent très hétérogènes (surfaces lisses, rugueuses et végétalisées). Dans cette partie, seuls les résultats d'études réalisées en milieux urbains, en souffleries (et chambres de dépôt) et les données acquises sur l'herbe (considérée comme une surface urbaine dans notre étude) sont répertoriés. Les données mesurées en milieu urbain par la méthode de corrélation turbulente, dépendantes de chaque site expérimental, ne sont pas présentées car elles ne permettent pas de distinguer des vitesses de dépôt pour chaque type de surface. Une première partie rassemble des vitesses de dépôt acquises *in situ*, une seconde celles acquises en laboratoire et la troisième présente des vitesses de dépôt mesurées en environnements naturels sur de l'herbe.

1.2.4.1 Vitesses de dépôt sec en milieu urbain

Les vitesses de dépôt rencontrées dans la littérature sont mesurées selon différentes méthodes dépendantes des objectifs des études. Elles sont principalement mesurées par accumulation sur des substrats dans le cas d'études de transferts de polluants particulaires, par accumulation sur des surfaces urbaines réelles, notamment grâce à la mesure du dépôt de radionucléides, ou par traçage dans le cas d'acquisition de données comparées à des modèles de dépôt sec. Les valeurs de V_d sont synthétisées dans le Tableau I-1 et présentées sur la Figure I-15. Cette liste de données présente les différents ordres de grandeurs de V_d observés en milieu urbain.

Tableau I-2 : vitesses de dépôt sec mesurées en milieux urbain.

Type de mesure	Référence	Type de substrat	Eléments mesurés	d_p (μm)	V_d (10^{-2} m s^{-1})
Accumulation sur substrat	Langner <i>et al.</i> , 2011	Bac	Sb	PM ₁₀ (2,5 - 10 μm)	4 - 13
	Odabasi <i>et al.</i> , 2002	Plaquette de dépôt	Pb, Cr, Zn, Cd, Cu, Ni, Mn, Mg, Ca, Fe, Al	0,1 - 10 μm	0,6 - 6,2
	Tanner <i>et al.</i> , 2001	Boite de Pétri en polystyrène	Espèces ioniques	0,74 - 4,26 μm	0,04 - 0,84
	Tasdemir <i>et al.</i> , 2004	Plaquette de dépôt	PCB (polychlorobiphenyl)	~ 25 μm	5,2
Accumulation sur surfaces urbaines	Roed, 1983	Murs de briques et d'enduit	¹³⁷ Cs	~ 0,6 μm	0,003 - 0,085
	Roed, 1985	Murs de briques, d'enduits et murs peints	¹³⁷ Cs, ⁷ Be	~ 0,6 μm	0,001 - 0,044
	Roed, 1987	Surfaces urbaines diverses	¹³⁷ Cs, ¹³⁴ Cs, ¹³¹ I, ¹⁴¹ Ce, ¹⁴⁴ Ce, ¹⁴⁰ La, ¹⁰³ Ru, ¹⁰⁶ Ru, ⁹⁵ Zr, ⁹⁵ Nb	0,4 - 0,6 μm	0,001 - 0,84
	Nicholson, 1987	Surfaces urbaines diverses	¹³⁷ Cs, ¹³⁴ Cs	~ 0,6 μm	0,002 - 0,018
	Connan <i>et al.</i> , 2006	Verre, enduit de façade	⁷ Be	~ 0,6 μm	0,003 - 0,024
Traçage en milieu urbain	Horvath <i>et al.</i> , 1996	Substrat en verre	Particules latex	0,088, 0,2, 0,6 μm	0,002 - 0,003
	Kim <i>et al.</i> , 2000	Plaquette de dépôt	Perlite, Diatomite, Verre	12,6 - 100 μm	23 - 151
	Connan <i>et al.</i> , 2006	Verre, enduit de façade	Fluorescéine	~ 0,6 μm	0,002 - 0,018

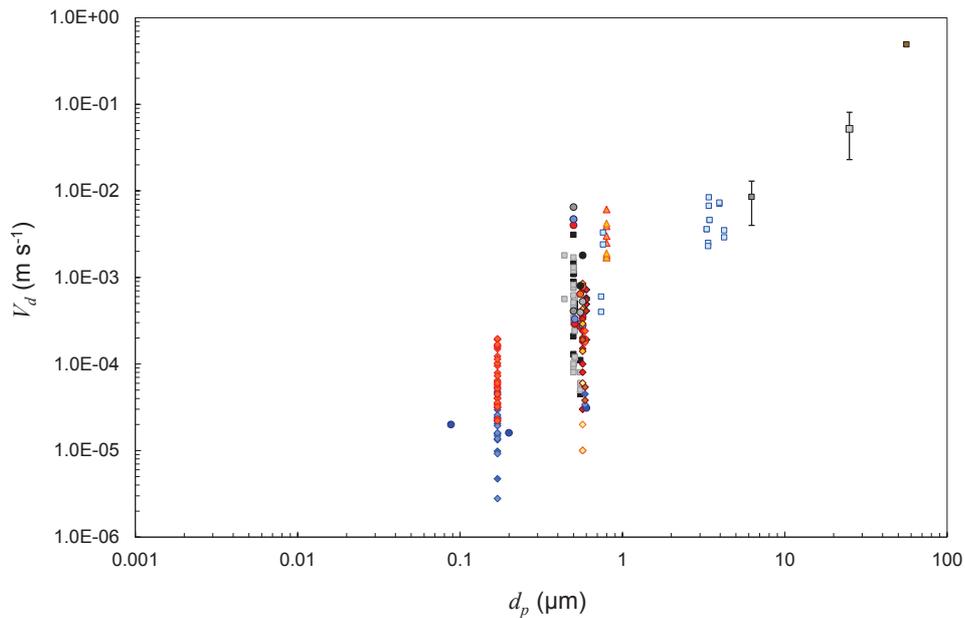


Figure I-15 : vitesses de dépôt sec mesurées en milieu urbain par accumulation ou traçage.

- Surfaces horizontales : ■ bitume, Roed (1987) ; □ dalle béton, Roed (1987) ;
 ▲ plaque téflon, Davidson *et al.* (1985) ; ▲ boîte pétri, Davidson *et al.* (1985) ;
 ● verre, Horvath *et al.* (1996) ; ■ déposimètre, Kim *et al.* (2000) ; □ boîte pétri, Tanner *et al.* (2001) ;
 □ déposimètre, Tasdemir *et al.* (2004) ; ■ déposimètre, Langner *et al.* (2011).
- Surfaces verticales : ◆ enduit, Roed (1983) ; ◆ brique, Roed (1983) ; ◆ mur, Roed (1985) ;
 ◆ enduit, Roed (1987) ; ◆ brique, Nicholson (1987) ; ◆ enduit, Aksu *et al.* (1996) ;
 ◆ verre, Connan *et al.* (2006) ; ◆ enduit, Connan *et al.* (2006).
- Toits : ● ciment, ● tuile, ● éternite, Roed (1987) ; ● tuile, ○ ciment, ● bitume, Nicholson (1987).

L'échantillonnage du dépôt sec de particules en milieux urbains sur des substrats, couplé à des mesures sur filtres permettent le calcul de vitesses de dépôt sec. Cela est réalisé par plusieurs auteurs. Certaines études (Tanner *et al.*, 2001 ; Langner *et al.*, 2011) donnent la répartition des éléments chimiques mesurés sur le spectre granulométrique des particules et peuvent être exploitées pour les comparer aux vitesses de dépôt théoriques qui sont très dépendantes de la taille des particules. Cependant, ces données ne sont pas toujours accompagnées de données météorologiques caractérisant les conditions de dépôt, ce qui pourrait justifier en partie les différences de plusieurs ordres de grandeur des valeurs de V_d mesurées pour un même substrat.

Les substrats utilisés présentent généralement leur face de prélèvement de façon horizontale orientée vers le haut. Les données acquises ne sont donc pas valides pour des surfaces verticales (murs) et peu représentatives des différents types de surfaces urbaines. La mesure de dépôt sec par accumulation sur des surfaces urbaines est plus rare. Elle a surtout été réalisée suite aux retombées radioactives des essais nucléaires (Roed 1983, 1985) et de Tchernobyl (Nicholson, 1987 ; Roed, 1987). Plus récemment, Connan *et al.* (2006) ont mesuré des vitesses de dépôt sec par dépôt de béryllium 7. Les surfaces étudiées sont de natures diverses, surtout représentatives des murs et des toits des bâtiments. Le temps nécessaire à l'accumulation étant long, V_d n'est pas relié à des conditions micrométéorologiques.

De plus, les vitesses de dépôt tirées de certaines de ces études peuvent éventuellement être entachées d'erreurs dues à un apport de radionucléides par des précipitations (Nicholson, 1987). La répartition des radionucléides sur le spectre granulométrique de l'aérosol atmosphérique n'est pas mesurée en parallèle des expérimentations. Les diamètres associés à ces radionucléides, généralement des diamètres aérodynamiques médians en activité d_{ama} , sont donc tirés d'autres études (par exemple : Papastefanou, 2008 ; Percot *et al.*, 2011).

Les vitesses de dépôt sec mesurées par traçage d'aérosols en milieu urbain sont plus rares dans la littérature. Aksu *et al.* (1996) et Horvath *et al.* (1996) ont mesuré des vitesses de dépôt de particules submicroniques générées et dispersées vers des substrats en verre placés en milieu urbain. Les surfaces horizontales et verticales ne sont pas dissociées dans leurs calculs de V_d . Kim *et al.* (2000) ont étudié le dépôt de grosses particules dispersées vers des plaquettes de dépôt. Les vitesses de vent et vitesses de frottement associées sont mesurées. Enfin, Connan *et al.* (2006) ont mesuré des vitesses de dépôt de particules submicroniques générées et dispersées vers des surfaces verticales de verre et d'enduit de façade. Les vitesses de vent et les paramètres météorologiques associés sont aussi mesurés.

La Figure I-15 donne un aperçu de ces données tirées de la littérature et relatives à des mesures en milieu urbain. Pour un diamètre donné, les vitesses de dépôt mesurées dans les différentes études varient de un à quatre ordres de grandeurs. L'absence de connaissance des paramètres météorologiques associés (vitesse de vent par exemple), pour la majorité de ces données, ne permet pas de mettre en valeur leur influence dans ces variations de V_d . Les vitesses de dépôt mesurées pour des particules submicroniques, peu nombreuses pour $d_p < 0,6 \mu\text{m}$, sont plus variables que celles mesurées pour des particules microniques. Les différences de rugosités et d'orientations (horizontale ou verticale) de ces surfaces peuvent expliquer, en partie, ces variations très fortes. En effet, les mesures réalisées pour des particules de diamètres supérieurs au micromètre sont réalisées exclusivement sur des surfaces lisses et horizontales alors que celles réalisées pour des particules submicroniques sont réalisées pour divers types de surfaces orientées horizontalement et verticalement. L'ensemble de ces données montre une augmentation de V_d pour des diamètres croissants. Enfin, cette figure met en évidence une absence de données pour des aérosols de diamètres inférieurs à $0,1 \mu\text{m}$.

1.2.4.2 Vitesses de dépôt sec en conduites, souffleries et chambres de dépôt

Le dépôt sec a régulièrement été étudié en laboratoire, il en résulte un nombre plus important de données que pour le milieu urbain. Dans leur majorité, ces études ont été menées pour étudier le dépôt sec de particules soit dans des écoulements de conduites industrielles, soit dans des pièces confinées pour prendre en compte ce dépôt dans l'exposition des travailleurs par exemple. Ces expérimentations réalisées en laboratoire présentent des conditions simplifiées d'écoulement d'air. Un grand nombre de paramètres (vitesses de l'écoulement, diamètre des particules...) sont contrôlés. De plus, les conditions de turbulence dans les couches limites de parois peuvent être mesurées. Les vitesses de dépôt de ce type d'expérimentations sont généralement présentées en fonction du temps de relaxation τ_p des particules et utilisées par les modélisateurs pour contraindre leurs modèles. Nerisson (2009) synthétise une partie des travaux réalisés en milieux confinés. Ils sont en majorité

dédiés à l'étude des contributions respectives de la diffusion brownienne, de l'impaction turbulente et de la sédimentation dans le dépôt sec. Les autres processus sont peu étudiés.

Les premières études ont généralement été réalisées dans des conduites lisses pour des conditions d'écoulements turbulents (Fiedlander et Johnstone, 1957 ; Wells et Chamberlain, 1967 ; Liu et Agarwal, 1974, Sippola et Nazaroff, 2004). Suite à ces premiers travaux, certains auteurs (Lai *et al.*, 2001, Sippola et Nazaroff, 2004) étudient l'impact des rugosités sur le dépôt dans ces conduites. Cependant, les types de surfaces étudiés et les conditions de turbulence rencontrées sont assez éloignés de ceux rencontrés en milieu urbain.

En soufflerie, Chamberlain (1967) a mené une des premières études de dépôt sec de particule sur une large gamme de diamètres et sur des surfaces rugueuses (herbes naturelles et artificielles, verre rugueux) mettant en évidence l'importance de ces rugosités dans le processus de dépôt. Sehmel (1973) mesure des vitesses de dépôt de particules microniques sur des surfaces lisses pour quantifier le dépôt par diffusion turbulente, montrant aussi l'importance de la sédimentation dans le dépôt de cette gamme de taille de particules. D'autres auteurs (Dai *et al.*, 2001) ont continué à étudier le dépôt sur des surfaces lisses pour différentes conditions de turbulences. Récemment, Toprak *et al.* (1996) et Pesava *et al.* (1999) ont mesuré en soufflerie des vitesses de dépôt sec sur une surface d'enduit.

Les expérimentations avec des chambres de dépôt sont généralement réalisées pour des surfaces lisses à peu rugueuses, surtout représentatives d'environnements intérieurs. Même si beaucoup de ces études caractérisent des taux de décroissance β , certains auteurs présentent des vitesses de dépôt sec (Byrne *et al.*, 1995 ;Lai et Nazaroff, 2005). Les conditions de turbulence sont rarement mesurées mais plutôt estimées à partir de modèles, et elles sont généralement d'intensités inférieures à celles attendues en milieu urbain et en soufflerie.

La Figure I-16 présente les données tirées des études précédemment citées. Elle montre une nouvelle fois des ordres de grandeurs différents selon les conditions de turbulence rencontrées et selon l'orientation des surfaces. Surtout, elle montre de nouveau un manque de données pour des particules submicroniques (surtout pour $d_p < 0,6 \mu\text{m}$).

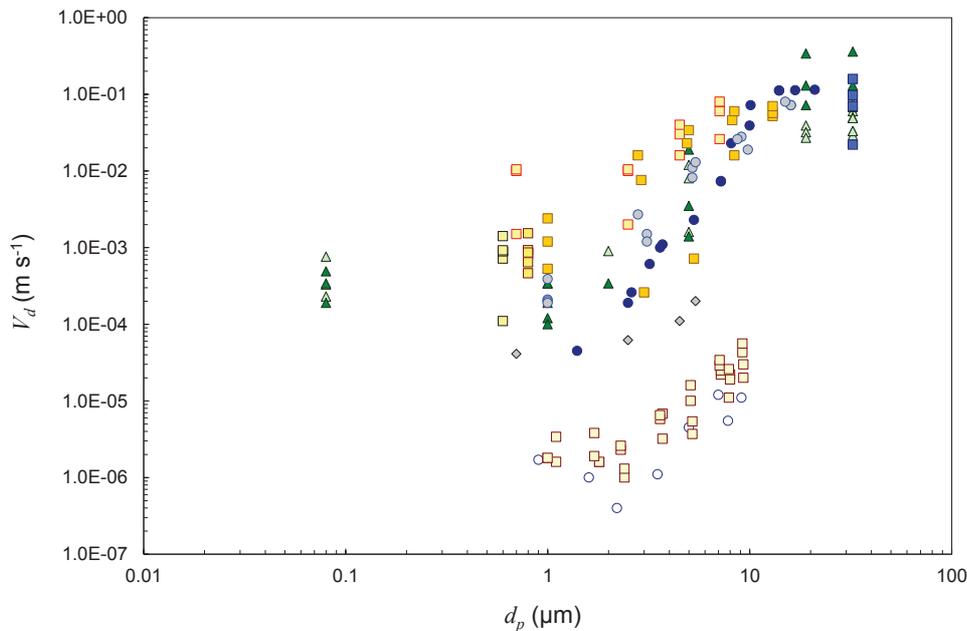


Figure I-16 : vitesses de dépôt sec mesurées en conduites, en souffleries et en chambres de dépôt.

Surfaces lisses : ● verre, Liu et Agarwal (1974) ; ◆ aluminium, Byrne *et al.* (1995) ;
 ○ acier galvanisé, Sippola et Nazaroff (2004) ; ○ verre, Lai et Nazaroff (2005).

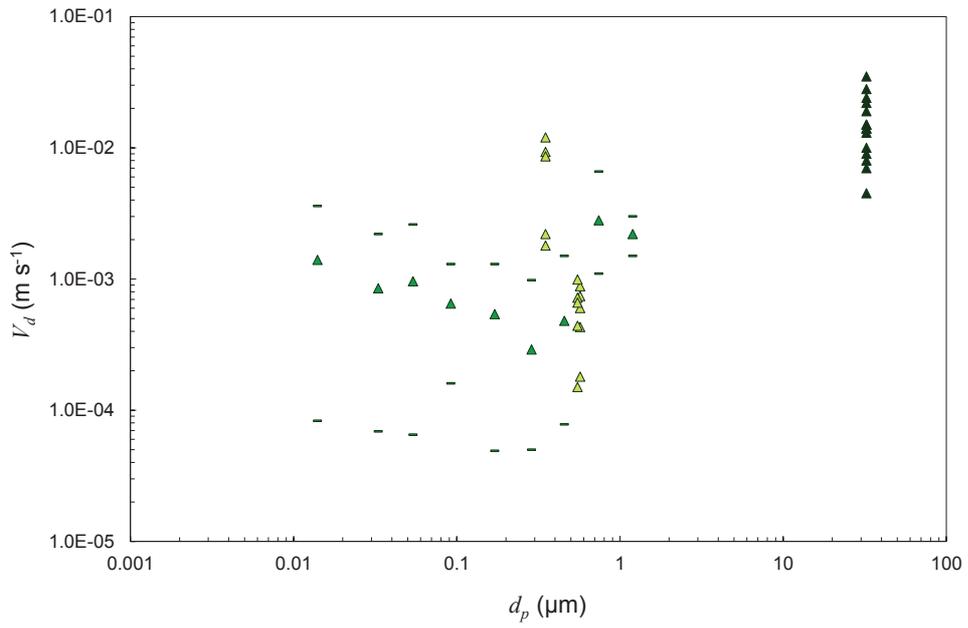
Surfaces rugueuses : ■ verre, Chamberlain (1967) ; ■ enduit, Toprak *et al.* (1997) ;
 □ enduit, Pesava *et al.* (1999) ; □ géométrie rugueuse, Lai *et al.* (2001) ;
 ■ fibre de verre, Sippola et Nazaroff (2004), □ papier de verre, Lai et Nazaroff (2005).

Herbe horizontale, Chamberlain (1967) : ▲ réelle (ray-grass d'Italie), ▲ artificielle collante.

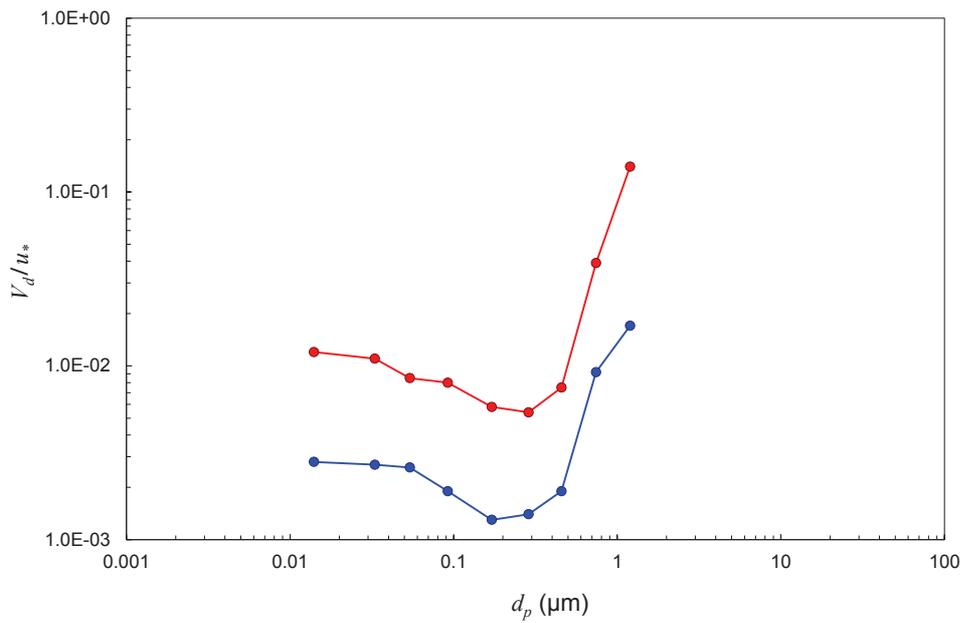
1.2.4.3 Vitesses de dépôt sec sur l'herbe

Les vitesses de dépôt sec mesurées sur couverts naturels ont d'abord été mesurées par traçage puis ensuite plus largement grâce aux méthodes indirectes. Le dépôt a été mesuré sur des prairies, des forêts, de la neige, du désert et des étendues d'eau. Les variables micrométéorologiques associées à ces vitesses de dépôt sont généralement bien quantifiées. Le dépôt sur les surfaces naturelles a déjà fait l'objet de plusieurs articles de synthèse (Sehmel, 1980 ; Nicholson, 1988 ; Pryor *et al.*, 2007 ; Petroff *et al.*, 2008). Ces couverts peuvent faire partie des milieux urbains. Mais, dans notre étude, nous nous limiterons à l'étude du dépôt sur l'herbe. Les récents travaux de Damay (2010) présentent des données très complètes, tant du point de vue de la gamme de diamètres de particules (Figure I-17 a) que de la paramétrisation de V_d avec les variables micrométéorologiques (Figure I-17 b). Ces données sont complétées par celles acquises par Chamberlain (1967) et Roed (1987) respectivement par méthodes de traçage et d'accumulation.

Damay (2010) relève que ses vitesses de dépôt sont très dépendantes des conditions de stabilité atmosphérique et que le rapport entre la vitesse de dépôt et la vitesse de frottement est quasiment constant en conditions neutres et stables pour des particules submicroniques, pour des couverts de prairies (sol nu, herbe, maïs) et proche de $2 \cdot 10^{-3}$. Cette remarque est corroborée par Donateo *et al.* (2010) pour un plus grand nombre de surfaces naturelles.



a)



b)

Figure I-17 : V_d mesurées sur l'herbe *in situ* (a) et rapports V_d/u_* moyens pour différents couverts ruraux en conditions de stabilités atmosphériques neutres et stables (b).

V_d : ▲ Chamberlain (1967) ; △ Roed (1987) ; ▲ moyenne, ■ maximum et minimum, Damay (2010) ;
 V_d/u_* : Damay (2010) : ● stabilité atmosphérique neutre, ● stabilité atmosphérique instable.

1.2.5 MODELISATION DU DEPOT SEC

A l'image des données présentées précédemment, le dépôt sec a principalement été modélisé pour des environnements naturels et des milieux confinés. Les échelles mises en jeu ne sont pas les mêmes (couche limite atmosphérique par rapport à la couche limite de conduite), mais les processus de dépôt sec à prendre en compte dans ces deux types de modélisations sont ceux répertoriés précédemment. La même forme en « V » d'évolution des points expérimentaux de V_d en fonction de d_p est retrouvée pour ces deux environnements. Cette tendance est due à l'augmentation de l'efficacité de collection par diffusion brownienne pour des diamètres décroissants inférieurs à 0,1 μm et à l'augmentation conjuguée des efficacités de collection par impaction et par sédimentation pour des diamètres supérieurs au micromètre. Cependant, les modèles développés pour les environnements naturels n'ont pas les mêmes formulations que ceux développés pour les milieux confinés. Ces approches de modélisation du dépôt sec sont exposées ci-dessous. Enfin, deux modèles dits opérationnels (résolus analytiquement) sont plus particulièrement présentés car ils seront utilisés à titre de comparaison plus tard dans l'étude. Il s'agit du modèle de dépôt pour surfaces lisses de Lai et Nazaroff (2000) et du modèle de dépôt pour couverts ruraux de Zhang *et al.* (2001).

1.2.5.1 Modélisation en environnements extérieurs

Dans le cas d'un couvert rural, le transfert de gaz ou de particules à travers la couche limite atmosphérique, la couche quasi-laminaire à proximité immédiate du couvert et enfin à la surface de dépôt est souvent abordé par analogie avec un courant électrique passant à travers une série de résistances (Figure I-18, Seinfeld et Pandis, 1998). La vitesse de dépôt est alors égale à l'inverse de la somme de ces « résistances en série » (Équation I-34).

$$V_d^{-1} = R_a + R_b + R_c \quad \text{Équation I-34}$$

Chaque couche est représentée par une résistance au dépôt, de dimension inverse à celle du coefficient de transfert qu'est la vitesse de dépôt. Une première résistance dite « aérodynamique » R_a (s m^{-1}) quantifie le transfert turbulent des aérosols, de concentration C_3 , du haut de la couche de surface jusqu'au sommet de la sous-couche laminaire, de concentration C_2 . La résistance de couche quasi-laminaire R_b permet de calculer le transfert du sommet de la sous-couche laminaire jusqu'à la surface du substrat de concentration C_1 . Enfin, la résistance du couvert (ou de surface) R_c permet de prendre en compte la capacité d'absorption d'un gaz par le substrat pour finalement avoir $C_0 = 0$.

Pour des particules, la résistance R_c est égale à zéro car il n'y a pas de phénomène d'absorption comme pour un gaz. De plus, la sédimentation doit être prise en compte. L'expression de la vitesse de dépôt sec prend alors la forme de l'Équation I-35 (Seinfeld et Pandis, 1998).

$$V_d = \frac{1}{R_a + R_b + R_a R_b V_s} + V_s \quad \text{Équation I-35}$$

Dans cette équation, la vitesse de sédimentation est prise en compte comme une résistance en parallèle et la résistance $R_a R_b V_s$ est un artefact de calcul mathématique et non une vraie résistance physique. Les modèles de Slinn (1982) et de Zhang *et al.* (2001) utilisent cette approche et sont

développés pour modéliser le dépôt sur plusieurs types de couverts naturels. Il faut noter que dans cette formulation, une des deux résistances, si elle devient trop forte, peut être un facteur limitant pour le dépôt. Par exemple, une résistance de surface trop forte limitera le dépôt, même si la résistance aérodynamique est faible.

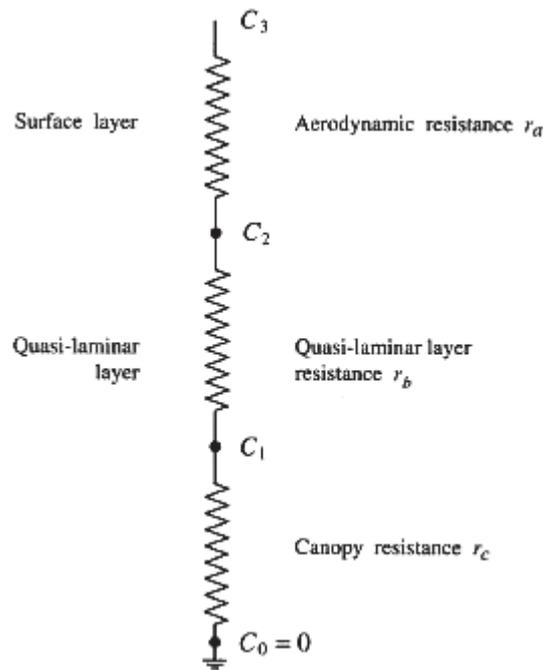


Figure I-18 : illustration du modèle de résistances pour le dépôt sec (Seinfeld et Pandis, 1998).

1.2.5.2 Modélisation en milieux confinés

La modélisation en milieux confinés se résume souvent à la modélisation du dépôt sec sur une surface plane et lisse. La concentration en aérosols est considérée homogène hors de la couche limite au-dessus de la surface. Les particules se déplacent à travers la couche limite vers la surface par processus de diffusions brownienne et turbulente, et par sédimentation. Au-dessus d'une surface horizontale, le flux de particule F à une position verticale z est donné par une loi de Fick modifiée sous la forme de l'Équation I-36 (Crump et Seinfeld, 1981 ; Guha, 1997 ; Lai et Nazaroff, 2000).

$$F = -(D_b + \varepsilon_p) \frac{dC}{dz} + V_s C \quad \text{Équation I-36}$$

C est la concentration en particules dans l'air à la position verticale z , D_b le coefficient de diffusion brownienne et ε_p le coefficient de diffusion turbulente. La condition à la limite de la surface est que la concentration en particule est nulle, donc que la surface est un puits de dépôt parfait pour toute particule la touchant. La vitesse de dépôt peut alors être calculée selon l'Équation I-16. Le coefficient de diffusion turbulente est une fonction de la position verticale z dont l'expression peut changer selon les auteurs (Crump et Seinfeld, 1981 ; Lai and Nazaroff, 2000). La diffusion turbulente, la diffusion brownienne et la sédimentation sont souvent les seuls processus pris en compte, mais quelques auteurs

intègrent les processus phorétiques dans leurs modèles (Nerisson, 2009). Ce type de modèle est généralement résolu numériquement mais certains auteurs (par exemple Lai et Nazaroff, 2000) proposent des solutions analytiques moins coûteuses en temps de calcul.

Le modèle de Wood (1981) a longtemps été le seul modèle à prendre en compte l'influence de rugosités dans des conduites mais récemment plusieurs auteurs se sont attachés à modéliser le dépôt sur des surfaces faiblement rugueuses. Par la prise en compte de la dimension verticale des rugosités et du régime d'écoulement (lisse ou rugueux), ils définissent des hauteurs à partir desquelles les particules se déposent (Zhao and Wu, 2006 ; Piskunov, 2009). Hussein *et al.* (2012) propose une formulation originale, dépendante de la hauteur des rugosités et de la distance entre deux rugosités. Ils modélisent de cette manière le dépôt sur des surfaces lisses et rugueuses de milieux confinés, voir même sur de fortes rugosités de type rurales. Ce type de modèle ne peut être résolu que numériquement.

1.2.5.3 Modélisation opérationnelle du dépôt sec

Le terme de modélisation opérationnelle s'entend par un calcul rapide des vitesses de dépôt pour répondre à une demande immédiate, comme cela peut être le cas pour l'IRSN dans le cadre d'une crise. Actuellement, cela passe par des modèles résolus analytiquement. Il n'existe pour le moment pas de modèle dédié au milieu urbain. Nous présentons deux modèles, chacun tiré d'un des deux types de modélisation présentés précédemment : le modèle de Zhang *et al.* (2001) pour des couverts ruraux et le modèle de Lai et Nazaroff (2000) pour les surfaces lisses.

1.2.5.3.1 Le modèle de Zhang *et al.* (2001) pour couverts naturels

Zhang *et al.* (2001) se basent sur l'approche de Slinn (1982) en simplifiant la paramétrisation. Le diamètre des particules, leur densité et les paramètres micrométéorologiques de la couche limite atmosphérique sont nécessaires. Dans ces modèles, la vitesse de dépôt V_d est calculée selon une loi de « résistances » (Équation I-37).

$$V_d = V_s + \frac{1}{R_a + R_b} \quad \text{Équation I-37}$$

V_s est la vitesse de sédimentation (Équation I-19), R_a la résistance aérodynamique, modélisant le transfert des particules dans la couche limite, et R_b la résistance de la sous-couche visqueuse aussi appelée résistance de surface, liée à la rugosité de la surface et modélisant les processus turbulents de dépôt.

La résistance aérodynamique prend la forme de l'Équation I-38.

$$R_a = \frac{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right) - \psi_H}{\kappa u_*} \quad \text{Équation I-38}$$

Avec z_r (m) la hauteur à laquelle la vitesse de dépôt est évaluée, z_0 (m) la hauteur de rugosité, ψ_H (#) une fonction de stabilité atmosphérique, κ (0,41) la constante de Von Karman et u_* (m s^{-1}) la vitesse de frottement dans la couche limite atmosphérique.

La résistance de surface R_b (Équation I-39) dépend de l'efficacité de captation de la surface. Elle est déterminée par les processus turbulents de dépôt, la taille des particules, les conditions de turbulence à la surface du couvert et les propriétés de la surface.

$$R_b = \frac{1}{\varepsilon_0 u_* R (E_b + E_{imp} + E_{int})} \quad \text{Équation I-39}$$

Dans cette expression, ε_0 est une constante empirique prise égale à 3, les efficacités de collection E sont sans dimension physique et R (Équation I-40) est un coefficient de rebond sans dimension, s'appliquant à l'ensemble des efficacités de collection et dépendant du nombre de Stokes St .

$$R = e^{-St^{1/2}} \quad \text{Équation I-40}$$

La dimension caractéristique de l'obstacle L nécessaire au calcul du nombre de Stokes est donnée pour chaque type de couvert. Pour une surface humide, le rebond est considéré inexistant et l'efficacité de collection maximale ($R = 1$).

L'efficacité de collection par diffusion brownienne E_b est reliée au nombre de Schmidt Sc , exprimant l'aptitude des particules à diffuser à travers un fluide visqueux, par un coefficient γ dépendant du couvert (Équation I-41).

$$E_b = Sc^{-\gamma} \quad \text{Équation I-41}$$

L'efficacité de collection par impaction E_{imp} est gouvernée par le nombre de Stokes, nombre caractérisant la capacité d'une particule à suivre ou sortir de sa ligne de courant dans un écoulement (Équation I-42).

$$E_{imp} = \left(\frac{St}{\alpha + St} \right)^2 \quad \text{Équation I-42}$$

α est une variable dépendante du couvert.

L'efficacité de collection par interception E_{int} proposée par Zhang *et al.* (2001) est liée à la taille caractéristique L des obstacles présentés par le couvert grâce à l'Équation I-43 en négligeant l'efficacité de collection d'éventuelles microrugosités sur ces obstacles.

$$E_{int} = \frac{1}{2} \left(\frac{d_p}{L} \right)^2 \quad \text{Équation I-43}$$

Enfin, le modèle permet de tenir compte du grossissement des particules en condition de forte humidité relative en recalculant leurs diamètres selon le taux d'humidité.

A travers R_b , Zhang *et al.* (2001) prennent en compte l'influence de différents couverts sur le dépôt. Les coefficients L , α et γ qu'ils utilisent sont variables en fonction du type de couvert (LUC pour Land Use Category) et de la saison (SC pour Seasonal Category). La hauteur de rugosité z_0 est aussi dépendante de ces LUC et SC. Les valeurs des LUC et SC sont présentées dans le Tableau I-3. Dans ce tableau, Zhang *et al.* (2001) proposent des variables pour le milieu urbain. Dans ce cas le milieu urbain doit être considéré comme un couvert, une parcelle, à l'échelle d'une ville ou au moins d'un quartier.

Tableau I-3 : LUC (Land Use Categories) et SC (Seasonal Categories) donnés par Zhang *et al.* (2001).

Catégorie	Description
LUC	
1	Arbres à feuillage persistant - conifère
2	Arbres à feuillage persistant - feuillu
3	Arbres à feuillage caduc - conifère
4	Arbres à feuillage caduc - feuillu
5	Mélange d'arbres à feuillage persistant et caduque
6	Herbe
7	Cultures, mélange de cultures
8	Désert
9	Toundra
10	Arbustes et forêts interrompues
11	Région humide avec végétation
12	Banquise et glacier
13	Hydrosphère continentale (lac, étang, rivières...)
14	Océan
15	Milieu urbain
SC	
1	Milieu d'été, végétation luxuriante
2	Automne, cultures non récoltées
3	Automne tardif après gelée, sans neige
4	Hiver, neige au sol
5	Printemps avec partiellement des plantes annuelles

La Figure I-19 présente un exemple de vitesses de dépôt sec calculées avec la paramétrisation pour l'herbe pour des vitesses de frottement égales à 0,1 et 1,0 m s⁻¹. Il est visible sur cette figure que, dans ce modèle, la sédimentation ($d_p > 1 \mu\text{m}$) et la diffusion brownienne ($d_p < 1 \mu\text{m}$) sont les processus les plus importants de dépôt sur l'herbe pour des u_* faibles. L'impaction agit pour des vitesses de frottement plus fortes et pour des diamètres de particules supérieurs au micromètre. L'interception est par contre un processus dont la contribution est considérée mineure pour le dépôt sur l'herbe. Enfin, le dépôt est majoritairement brownien pour des particules submicroniques.

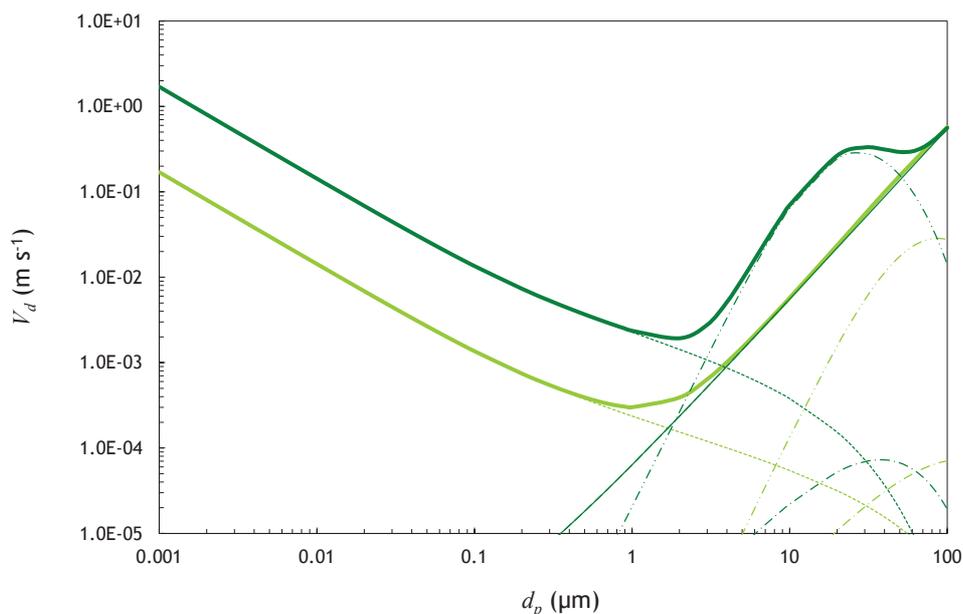


Figure I-19 : V_d calculée pour l'herbe avec le modèle de Zhang *et al.* (2001).

$u_* = 0,1 \text{ m s}^{-1}$: — V_{ds} , - - - V_d brownien, - · - V_d interception, - · - V_d impaction, — V_s
 $u_* = 1,0 \text{ m s}^{-1}$: — V_{ds} , - - - V_d brownien, - · - V_d interception, - · - V_d impaction, — V_s

I.2.5.3.2 Le modèle de Lai et Nazaroff (2000) pour surfaces lisses

Le modèle de Lai et Nazaroff (2000) a été mis au point pour prédire le dépôt sec de particules fines sur des surfaces lisses verticales et horizontales, orientées vers le haut et vers le bas, pour des conditions de vents faibles. Basé sur une expression modifiée de la loi de Fick, il ne prend en compte que les mécanismes de diffusion brownienne, de diffusion turbulente et de sédimentation.

Les vitesses de dépôt sec sur parois verticales V_{dv} , horizontales orientées vers le haut V_{du} (sol) et orientées vers le bas V_{dd} (plafond) sont calculées respectivement selon l'Équation I-44, l'Équation I-45 et l'Équation I-46.

$$V_{dv} = \frac{u_*}{I} \quad \text{Équation I-44}$$

$$V_{du} = \frac{V_s}{1 - e^{-V_s I / u_*}} \quad \text{Équation I-45}$$

$$V_{dd} = \frac{V_s}{e^{V_s I / u_*} - 1} \quad \text{Équation I-46}$$

Dans ces expressions, I est une solution du calcul intégral du déplacement des particules dans la couche limite (Équation I-47), entre le haut de la couche limite où la concentration est uniforme et la surface où la concentration est égale à zéro, et V_s est la vitesse de sédimentation. I est égale à l'inverse de la vitesse de dépôt adimensionnée à la vitesse de frottement pour une paroi verticale et son expression est déterminée par l'ajustement d'une loi sur les valeurs de la solution numérique de l'intégrale.

$$I = \int \left(\frac{v}{\varepsilon_p + D_b} \right) dy^+ = \frac{1}{V_d^+} = 3,64 Sc^{2/3} (a - b) + 39 \quad \text{Équation I-47}$$

Les variables a et b sont tirées de cet ajustement et sont calculées à partir de l'Équation I-48 et de l'Équation I-49.

$$a = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{(10,92 Sc^{-1/3} + 4,3)^3}{Sc^{-1} + 0,0609} \right] + \sqrt{3} \tan^{-1} \left[\frac{8,6 - 10,92 Sc^{-1/3}}{\sqrt{3} 10,92 Sc^{-1/3}} \right] \quad \text{Équation I-48}$$

$$b = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{(10,92 Sc^{-1/3} + r^+)^3}{Sc^{-1} + 7,669 \times 10^{-4} (r^+)^3} \right] + \sqrt{3} \tan^{-1} \left[\frac{2r^+ - 10,92 Sc^{-1/3}}{\sqrt{3} 10,92 Sc^{-1/3}} \right] \quad \text{Équation I-49}$$

Dans ces expressions, Sc est le nombre de Schmidt et r^+ est le rayon de la particule adimensionné à la vitesse de frottement. La Figure I-20 présente un résultat de ce modèle pour une large gamme de diamètres de particules et une vitesse de frottement de $0,1 \text{ m s}^{-1}$.

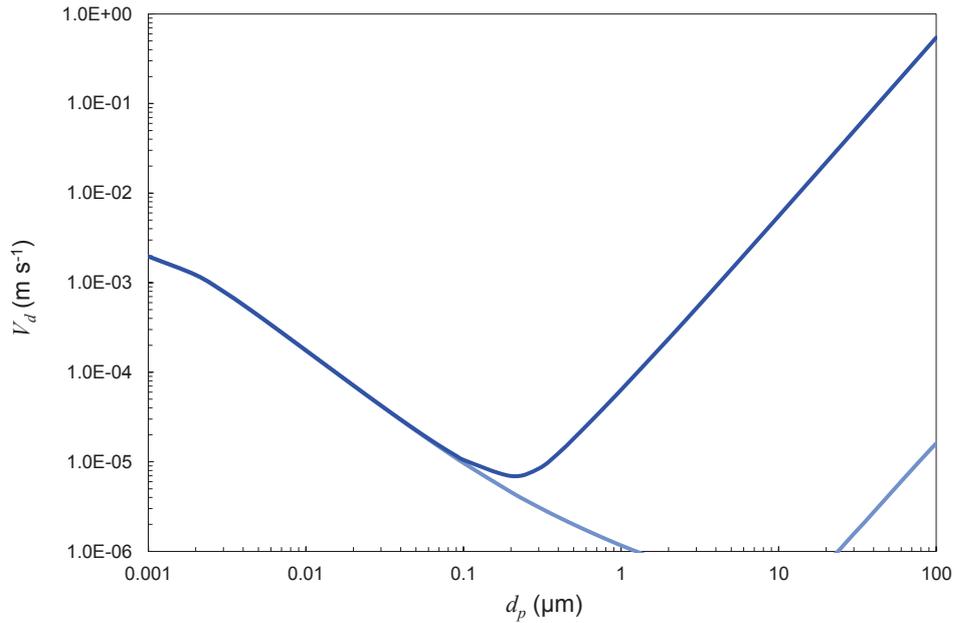


Figure I-20 : V_d calculées pour une surface lisse avec le modèle de Lai et Nazaroff (2000).

— paroi horizontale orientée vers le haut, — paroi verticale.

I.3 DEMARCHE EXPERIMENTALE

L'espace urbain regroupe plus de la moitié de la population mondiale, et en Europe plus de 80 % de la population y réside, alors qu'il ne représente globalement que 1 à 3 % des surfaces de chaque région du monde (Oleson *et al.*, 2008). Une grande partie des polluants y sont émis du fait notamment des activités industrielles et du trafic routier. Alors que nos connaissances sur les transferts d'aérosols en milieu urbain sont très limitées, les émissions de polluants et l'exposition qui en résulte dans ces environnements demeurent des inquiétudes croissantes (Fowler *et al.*, 2009). Les polluants déposés avec les particules sur des surfaces urbaines peuvent être remobilisés par ruissellement de la pluie sur les surfaces, transiter par les réseaux d'assainissement et se retrouver dans les écosystèmes (Gromaire-Mertz, 1998). Dans le cas du dépôt sec de particules produites par un incident ou un accident impliquant des radionucléides, les dépôts secs localisés sur les surfaces urbaines peuvent participer à l'exposition externe des habitants (Kelly, 1987 ; Meckbach *et al.*, 1988a). Il est donc primordial d'étudier les flux de polluants en milieu urbain, et notamment leur dépôt sec, pour mieux estimer leur impact sur les populations et les écosystèmes.

1.3.1 PROBLEMATIQUE DU MILIEU URBAIN

1.3.1.1 Approche actuelle du dépôt sec en milieu urbain

Les données de la littérature rappelées précédemment montrent leur disparité et leurs limites de représentativité des environnements urbains. De plus, les études les plus récentes ont une tendance à se limiter à deux types d'expérimentations : les mesures de vitesses de dépôt sur des substrats dédiés (déposimètres, bacs, boîtes de Pétri...) et les mesures micrométéorologiques et de flux de particules au-dessus de la surface urbaine. Très adaptée à la caractérisation des polluants et de leur flux, ces méthodes présentent certains désavantages, notamment celui de ne pas donner accès à une répartition des dépôts sur les différentes surfaces composant les milieux urbains.

Du point de vue de la modélisation, l'approche la plus simple est du type de celle proposée par Zhang *et al.* (2001). Dans ce cas, le milieu urbain est considéré comme une surface uniforme à laquelle une vitesse de dépôt sec, dépendante des conditions de turbulence dans la couche limite, est associée.

Dans le cadre de travaux sur le dépôt de radionucléides, l'approche a été sensiblement améliorée en considérant différentes répartitions des dépôts selon les types de surfaces (Meckbach et Jacob, 1988b ; VAMP, 1994, Brown *et al.*, 2006). Ces dépôts peuvent être calculés à partir des vitesses de dépôt mesurées par Roed (1987). L'avantage de ce type d'approche est d'être rapide à mettre en œuvre.

Plus récemment, Jonsson *et al.* (2008) ont réalisé une étude du dépôt sec en environnement urbain avec une approche par CFD (Computational Fluid Dynamics). A partir d'un modèle de dépôt sec (habituellement utilisé pour les conduites de ventilation) et de la prédiction de l'écoulement et de sa turbulence, ils calculent des vitesses de dépôt pour deux configurations simples de milieux urbains. Grâce à cette approche, ils montrent une forte hétérogénéité des vitesses de dépôt sur les surfaces des bâtiments à cause des différences de turbulence mais aussi en prenant en compte un possible effet de thermophorèse. Probablement plus précise dans son estimation des dépôts, cette approche nécessite par contre une connaissance fine du milieu urbain étudié (configuration des bâtiments et des voies par exemple). Elle devra aussi être améliorée par l'utilisation d'un modèle de prédiction du dépôt pour des surfaces rugueuses typiquement urbaines. Enfin, elle s'avère beaucoup moins opérationnelle que l'approche citée précédemment.

Une approche mixte a été récemment développée par Chérin *et al.* (2012). La méthode employée se base sur une modélisation résistive du dépôt sec (Figure I-21). La résistance aérodynamique qui permet le calcul du transfert des particules de l'air vers la surface urbaine est complétée par l'ajout de résistances modélisant les transferts des particules dans l'air vers les toits et dans la rue (ici en configuration « rue canyon »). Le dépôt des particules de l'air vers la surface est ensuite calculé grâce à des résistances de surfaces typiques des différentes surfaces composant les toits, les murs et les sols.

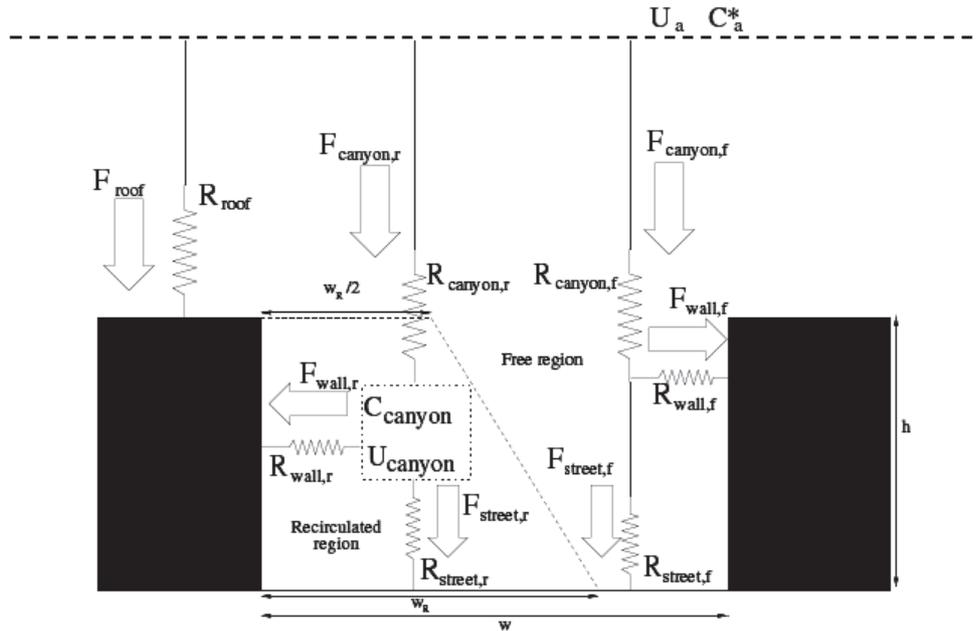


Figure I-21 : modèle de dépôt sec pour un canyon urbain (Chérin *et al.*, 2012)

1.3.1.2 Constat des besoins de connaissances sur le dépôt sec en milieu urbain

La majorité des mesures de transferts atmosphère-surface a été réalisée dans des environnements ruraux (Fowler *et al.*, 2009). Il en résulte que, pour le milieu urbain, le manque de données et d'expérimentations *in situ* sur le dépôt sec est systématiquement mis en avant par les auteurs s'étant attachés à le modéliser (Underwood, 1987 ; Brown *et al.*, 2006 ; Jonsson *et al.*, 2008).

La variabilité des vitesses de dépôt sur les différentes surfaces dans un milieu urbain est établie. Par contre, leur dépendance aux paramètres micrométéorologiques (vitesse de vent, turbulence), météorologiques locaux (humidité relative, température de l'air, rayonnement solaire) et aux conditions de surfaces (orientation, rugosité, température) est peu connue. Pourtant ces informations peuvent être importantes, comme, par exemple, dans le cas de dépôt de radionucléides et du calcul de dose reçues par les habitants ou pour l'estimation d'une remobilisation des polluants par le lessivage des surfaces par la pluie et leur transport vers les écosystèmes. Il existe donc un besoin réel de données de vitesses de dépôt sec sur divers types de surfaces urbaines associées à la mesure des conditions environnementales.

D'autre part, le manque de données sur la thermophorèse et son absence de prise en compte sont pénalisants pour la modélisation du dépôt sec. De la même manière, les autres processus phorétiques, les effets électrostatiques ou encore les variations de taille des particules ne sont pas prises en compte pour le milieu urbain. L'étude du processus de dépôt doit donc passer par l'étude des différents phénomènes physiques pour améliorer l'estimation de leurs contributions respectives et finalement améliorer la prédiction du dépôt sec par les modèles.

1.3.2 APPROCHE EXPERIMENTALE CHOISIE

Les données sur des vitesses de dépôt sec en milieu urbain doivent être obtenues en tenant compte de l'hétérogénéité des surfaces. Une méthode de mesure directe de V_d est donc plus adaptée qu'une méthode indirecte site-dépendante car elle permet d'étudier le dépôt sur chaque surface urbaine. Les données acquises de cette manière peuvent ensuite être utilisées pour plusieurs types de villes à condition de connaître la proportion de chaque surface.

Dans l'optique de répondre au besoin de caractérisation et de quantification des phénomènes physiques mis en jeu, une démarche expérimentale en plusieurs étapes a été adoptée avec différents objectifs :

- étudier la contribution des différents phénomènes physiques en étudiant le dépôt d'abord dans un cas simple (en ne faisant varier que certains paramètres actuellement reconnus comme les plus importants) ;
- étudier progressivement l'impact des variations des différents paramètres rencontrés en milieu urbain ;
- être le plus représentatif possible des conditions réellement rencontrées lors du dépôt de particules contenues dans un panache ou dans l'atmosphère ;
- quantifier les variations des paramètres importants à prendre en compte : diamètre de l'aérosol, vitesse du vent...

Le couplage d'expérimentations en soufflerie et *in situ* permet de répondre à ces objectifs en procédant au moins en trois étapes :

- 1^{ère} étape : en soufflerie. Les conditions rencontrées sont simplifiées vis-à-vis d'un environnement réel. Un certain nombre de paramètres (vitesse d'écoulement, type de surface de dépôt et température de la surface) sont contrôlés et peuvent être choisis sur une gamme voulue ;
- 2^{ème} étape : *in situ* sur une courte durée (de l'ordre de l'heure). Le dépôt est étudié dans des conditions réelles. Il peut être observé sous des conditions atmosphériques relativement stables pendant une heure (vent fort, vent faible, temps couvert ou ensoleillé...). Les variations des paramètres rencontrés étant alors relativement faibles, les incertitudes sur les contributions des différents processus de dépôt sont moins fortes que pour de grandes variations des paramètres météorologiques. Une analogie avec les conditions rencontrées lors du passage d'un panache accidentel ponctuel sur un milieu urbain peut être faite ;
- 3^{ème} étape : *in situ* sur une longue durée. L'ensemble des paramètres sont rencontrés et varient avec l'alternance de jours et de nuits, de conditions de vents forts et faibles... Ce type d'expérimentation est comparable aux conditions rencontrées lors de l'exposition d'un milieu urbain à des pollutions chroniques (rejets d'usine, trafic routier...).

La réalisation d'expérimentations en soufflerie et *in situ* permet de répondre aux objectifs en procédant en trois étapes expérimentales. Toutefois, une attention particulière doit être apportée à la quantification des paramètres météorologiques et turbulents pour que les données acquises pour le dépôt soient les plus complètes possibles afin de pouvoir les comparer avec des résultats de modèles.

La représentativité des mesures directes de vitesses de dépôt et leur extension à différents milieux urbains passent par une mesure des différents paramètres à proximité immédiate des échantillons.

Enfin, étant donné les caractéristiques de l'aérosol atmosphérique et des aérosols rejetés par les sources de pollutions, les particules dont les diamètres sont compris dans la gamme 0,1 - 1,0 μm doivent être prioritairement étudiées. En effet, cette gamme de taille correspond au mode accumulation qui est susceptible de fixer des polluants gazeux, car représentatif de la distribution en surface de l'aérosol atmosphérique, et susceptible de transporter les polluants sur les plus longues distances grâce à son temps de résidence moyen le plus long dans la troposphère (cf. paragraphe I.1.1.3.1).

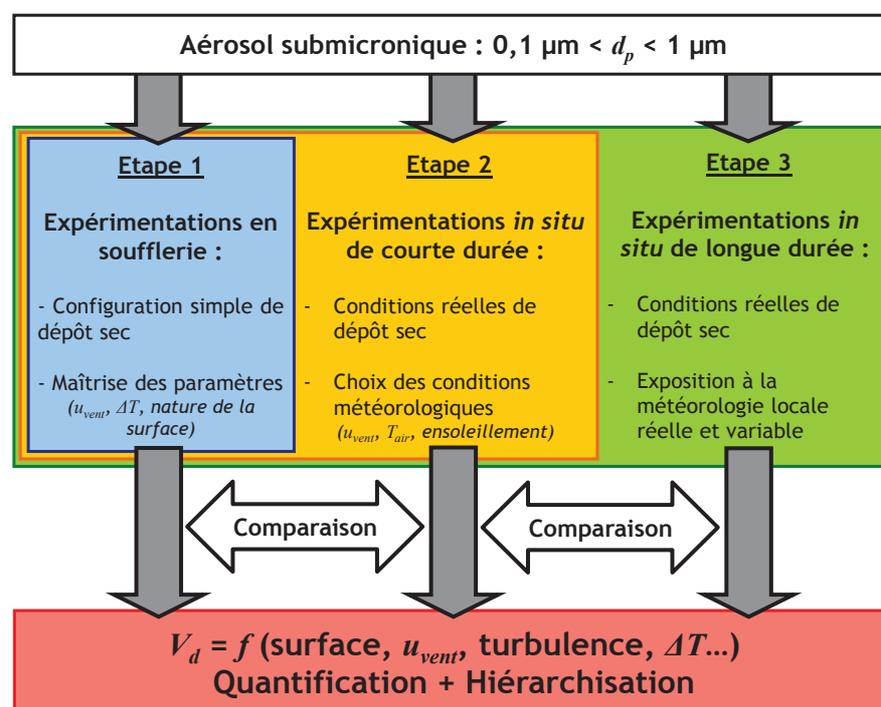


Figure I-22 : schématisation de la démarche expérimentale employée.

La Figure I-22 résume la démarche expérimentale employée. Elle présente les paramètres et les conditions expérimentales étudiés à chaque étape. Elle montre ainsi l'imbrication des étapes expérimentales et leur interdépendance pour améliorer la compréhension du processus de dépôt en milieu urbain.

CHAPITRE II. ETUDE DU DEPOT SEC EN SOUFFLERIE

Les expérimentations en soufflerie constituent la première étape de cette étude du dépôt sec en milieu urbain. Les conditions environnementales qui y sont rencontrées sont simplifiées en comparaison de celles rencontrées dans un milieu urbain réel et plusieurs paramètres peuvent y être contrôlés. Cette double caractéristique présente les avantages d'étudier le dépôt en ne faisant intervenir qu'un nombre limité de paramètres variables en fonction du phénomène de dépôt recherché et de contrôler ces paramètres sur une gamme de valeurs déterminée. De plus, les expérimentations y sont facilement répétables, ce qui permet d'une part de confirmer les observations réalisées, d'autre part d'associer des incertitudes aux résultats obtenus.

Les expérimentations conduites ont pour objectifs d'étudier le dépôt sec sur trois types de surfaces rencontrées en milieu urbain : du verre, de l'enduit de façade et de l'herbe. Les surfaces sont orientées horizontalement (verre, enduit et herbe) et verticalement (verre et enduit). Des vitesses de vent couvrant une large gamme sont générées dans la soufflerie. Les surfaces horizontales de verre et d'enduit de façade ont été chauffées pour observer l'effet d'un écart de température avec l'air sur la diminution du dépôt. Les résultats acquis permettront d'évaluer l'impact relatif de différents phénomènes physiques sur le dépôt sec : les phénomènes turbulents, la sédimentation, la thermophorèse. L'importance de ces phénomènes physiques peut ainsi être étudiée et quantifiée pour ces surfaces urbaines.

II.1 CARACTERISATION DE LA TURBULENCE ET DE LA COUCHE LIMITE SUR PLAQUE PLANE

Les données et les modèles de dépôt sec correspondant aux souffleries, aux conduites et aux chambres de dépôt, présentés au Chapitre I, montrent la dépendance du dépôt sec d'aérosols microniques et submicroniques à la turbulence de paroi. Cette turbulence est généralement quantifiée par la vitesse de frottement u_* . En soufflerie, la quantification des conditions de turbulence dans les couches limites de parois est donc indispensable afin de les associer aux V_d mesurées. Certaines notions de turbulence sont rappelées et la structure des couches limites de plaques planes est décrite dans cette partie pour mieux appréhender les résultats de turbulence qui seront liés aux vitesses de dépôt sec.

II.1.1 GENERALITES SUR LA TURBULENCE

Dans le cas simple, d'un écoulement d'air dans une conduite, deux régimes d'écoulement peuvent être distingués : le régime « laminaire » et le régime « turbulent ».

Le régime laminaire est caractérisé par une structure régulière de l'écoulement à l'échelle macroscopique. Les échanges dans le fluide résultent de l'agitation moléculaire. Le régime d'écoulement turbulent est lui désordonné à l'échelle macroscopique. Les échanges (de quantité de mouvement, de chaleur...) y sont principalement réalisés par l'agitation turbulente dans les trois dimensions, plus efficace que l'agitation moléculaire. Ces régimes sont caractérisés par le nombre de

Reynolds Re , rapport des forces d'inertie et des forces visqueuses (moléculaires) dans l'écoulement (Équation II-1).

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad \text{Équation II-1}$$

U est une vitesse caractéristique de l'écoulement (m s^{-1}), d une longueur caractéristique (m) et ν la viscosité cinématique du fluide ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$). Un nombre de Reynolds critique est défini : les écoulements ont des régimes laminaires pour Re inférieur à 2300 dans des conduites, ils deviennent turbulents pour des valeurs supérieures (Schlichting, 1968). Pour une couche limite de plaque plane, la valeur critique est comprise entre $3,5 \cdot 10^5$ et 10^6 (Schlichting, 1968). Dans l'environnement, le cas d'écoulements turbulents est plus fréquemment rencontré. Ces écoulements sont irréguliers et aléatoires donc plus difficilement modélisables.

En écoulement turbulent, les variables étudiées, comme par exemple la composante u de la vitesse du vent, sont décomposées en une valeur moyenne \bar{u} et une fluctuation turbulente u' (Équation II-2).

$$u = \bar{u} + u' \quad \text{Équation II-2}$$

Les vitesses u , v et w sont respectivement les vitesses longitudinale (horizontale dans le sens de l'écoulement), transversale (horizontale perpendiculaire au sens de l'écoulement) et verticale (normale à la paroi) de l'écoulement dans un axe orthonormé (x, y, z). Cette décomposition peut être appliquée à toutes les composantes du vent ainsi qu'à des grandeurs scalaires telles que la température T ou une concentration C . La variance d'une variable sert à évaluer l'intensité de la turbulence, la covariance de deux variables à quantifier un flux turbulent. Par exemple, la variance sur u quantifie l'intensité de turbulence selon l'axe x et la covariance sur u et w quantifie le flux vertical de quantité de mouvement (Équation II-3 et Équation II-4).

$$var(u) = \overline{u'^2} \quad \text{Équation II-3}$$

$$cov(uw) = \overline{u'w'} \quad \text{Équation II-4}$$

Ces variances et covariances sont aussi appelées « tenseurs de Reynolds ».

Une mesure directe de flux de particules par covariance a été présentée au Chapitre II. Elle repose sur le calcul de la covariance entre la vitesse verticale du vent w et la concentration en particules dans l'air C . Cette covariance est égale au flux vertical de particules.

L'intensité de turbulence I (%) peut être utilisée comme indicateur du niveau d'agitation turbulente par rapport à l'écoulement moyen sur chaque composante de la vitesse (Équation II-5-a, b et c).

$$\text{a) } I_u = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{u_{ref}}; \quad \text{b) } I_v = \frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{u_{ref}}; \quad \text{c) } I_w = \frac{\sqrt{\overline{w'^2}}}{u_{ref}}; \quad \text{Équation II-5}$$

u_{ref} (m s^{-1}) est la vitesse de l'écoulement moyen ou vitesse de référence. Ce ratio permet de classer les champs turbulents par catégories : faibles (~1 %), moyens (~10 %) et forts (~20 %) (Chassaing, 2000).

L'énergie cinétique de la turbulence par unité de masse k de l'écoulement en un point (généralement appelée énergie cinétique de turbulence) est calculée avec l'Équation II-6.

$$k = \frac{\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}}{2} \quad \text{Équation II-6}$$

La notion de turbulence appelle aussi l'introduction de notion d'échelle (échelle de temps et de longueur). Les différentes échelles font référence à différents modes de transport : diffusion moléculaire, diffusion turbulente et advection. Les échelles caractéristiques utilisées seront introduites au fur et à mesure de l'étude.

II.1.2 GENERALITES SUR LES COUCHES LIMITES TURBULENTES ET LES PARAMETRES ASSOCIES

II.1.2.1 Couche limite de plaque plane

Dans le cas d'un écoulement au-dessus d'une paroi plane parallèle, la condition d'adhérence du fluide à la paroi introduit la notion de « couche limite ». Loin de la paroi, l'écoulement a une certaine vitesse de référence u_{ref} qui s'annule à la paroi. Cette transition est assurée par la couche limite. Cette couche limite peut aussi être définie comme la couche fluide adjacente à la paroi au sein de laquelle les effets de viscosité se font sentir (Cousteix, 1988 ; cité par Piot, 2008). La hauteur (ou épaisseur) de la couche limite δ est définie comme la distance à la paroi où la vitesse longitudinale vaut 99 % de la vitesse extérieure de référence u_{ref} . Elle est l'échelle de longueur des phénomènes visqueux dans une couche limite laminaire et permet de définir une échelle de temps relative à la diffusion moléculaire en la reliant à la viscosité cinématique ν ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) (Cousteix, 1989). Une échelle peut aussi être définie pour le phénomène de convection dans de la couche limite à partir de la vitesse de l'écoulement u_{ref} et de la longueur de développement de la couche limite L (m). Cette longueur de développement de couche limite L , distance entre l'origine de la couche limite et le point à la distance L de l'origine, est aussi appelée « fetch ».

Après une phase de transition, la couche limite laminaire devient turbulente si Re est suffisamment élevé. Dans la couche limite turbulente, une échelle de longueur importante est la hauteur de couche limite. Elle permet de définir une échelle de temps en introduisant une viscosité apparente ou turbulente ν_t ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) liée aux propriétés de l'écoulement. Il existe cependant en proche paroi une région où la viscosité moléculaire reste prépondérante du fait de la condition d'adhérence du fluide visqueux. La couche limite turbulente est ainsi structurée en trois zones (Klebanoff, 1955) : une zone où la diffusion moléculaire est prépondérante appelée sous-couche visqueuse, une zone intermédiaire où la diffusion turbulente et les propriétés dynamiques sont prépondérantes (mais influencée par la paroi) appelée sous-couche inertielle (ou région de recouvrement), et une région externe dite de sillage (Figure I-1).

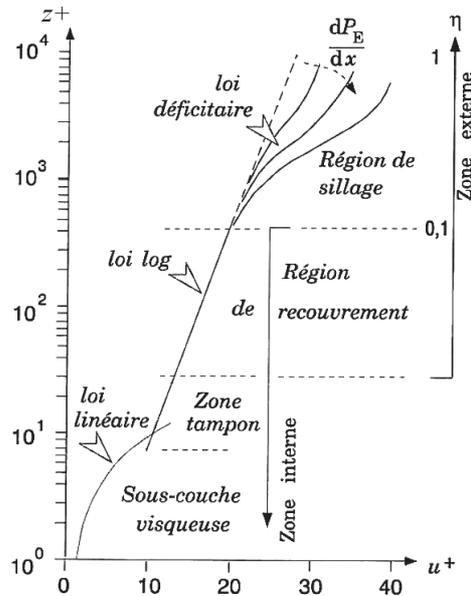


Figure II-1 : illustration des différentes zones constituant une couche limite turbulente (tirée de Chassaing, 2000).

Sur la Figure II-1, les variables u^+ ($=u/u_*$) et z^+ ($=zu^*/\nu$) sont respectivement la vitesse selon le sens de l'écoulement (x) et la position verticale z , adimensionnées avec la vitesse de frottement u_* et la viscosité cinématique ν . La vitesse de frottement est l'échelle de vitesse dans la couche limite près de la paroi. Elle quantifie la tension de frottement (ou de cisaillement) à la paroi selon l'Équation II-7.

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_p}{\rho}} = u_{ref} \sqrt{\frac{C_f}{2}} = \sqrt{-\overline{u'w'}} \quad \text{Équation II-7}$$

τ_p ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$) est ici la contrainte pariétale, ρ est la masse volumique (kg m^{-3}) du fluide, C_f (sans unité) est le coefficient de frottement pariétal et u' et w' sont les fluctuations turbulentes des vitesses horizontales et verticales du vent.

Une façon d'estimer la vitesse de frottement est de réaliser la mesure du profil vertical de la vitesse u dans la couche limite, à proximité de la paroi. Pour une couche limite de plaque plane lisse, lorsque la turbulence y est développée, la zone de recouvrement établie présente un profil de vitesses logarithmique (Équation II-8 ; Schlichting, 1968).

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(z^+) + C \quad \text{Équation II-8}$$

κ est la constante de Von Karman égale à 0,41 et C une constante égale à 5,0 (Schlichting, 1968). Cette loi est valable dans la région interne, dite en « loi log », correspondant à la région de recouvrement de la couche limite (Figure II-1). L'ajustement de cette loi sur un profil expérimental des vitesses permet d'estimer la vitesse de frottement u_* . Une seconde méthode consiste à mesurer la covariance de u et de w pour estimer la vitesse de frottement à partir de l'Équation II-7. Dans la région logarithmique, le

rapport $\overline{u'w'}/u'w'$ de la covariance $\overline{u'w'}$ par les variances de u et w est constant (Cousteix, 1989 ; Figure II-2-b). Dans une couche limite de plaque plane, le transport des aérosols est régi par des phénomènes différents selon la région dans laquelle il se trouve. A l'approche de la paroi, en l'absence d'effets thermiques, son transport est d'abord de nature turbulente dans la zone de recouvrement puis de nature moléculaire dans la sous-couche visqueuse. De ce fait, u_* est le paramètre utilisé pour quantifier la turbulence dans les modèles de dépôt sec d'aérosols, qu'ils soient développés pour des surfaces lisses ou rugueuses, et donc c'est le paramètre qui doit être estimé en priorité pour analyser les V_d mesurées.

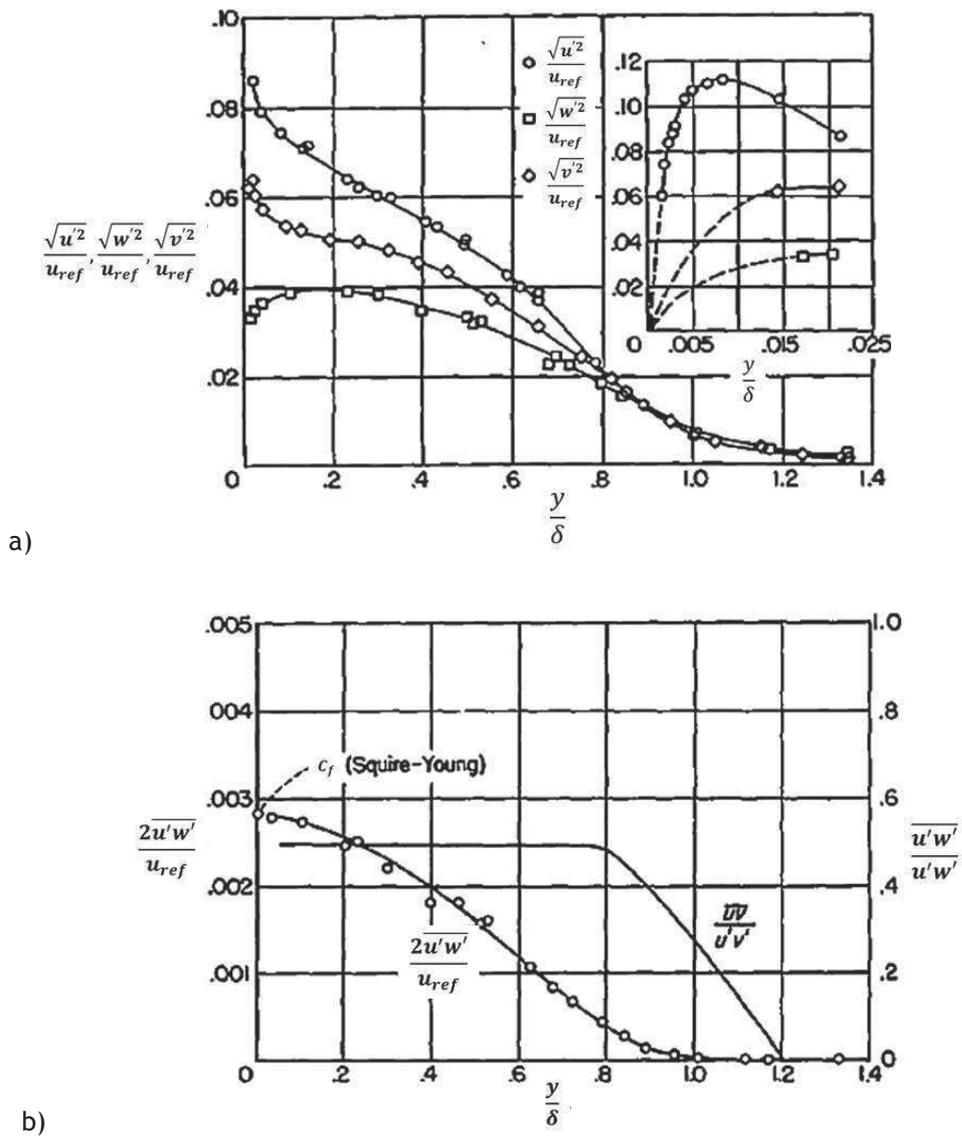


Figure II-2 : profils verticaux des tensions de Reynolds d'après Klebanoff (1955) : a) intensités de turbulence sur u , v et w , b) corrélation de u et v .

La couche limite turbulente peut aussi être qualifiée par les profils verticaux des tenseurs de Reynolds (des fluctuations des vitesses). La Figure II-2 représente la distribution des tensions de Reynolds dans une couche limite turbulente de plaque plane. A la paroi, la condition de non glissement impose que les tensions soient nulles. En s'écartant de la paroi, ces tensions augmentent, atteignent un maximum et diminuent ensuite pour tendre vers le taux de turbulence de l'écoulement libre qui n'est jamais nul.

II.1.2.2 Effets des rugosités

Les rugosités d'une paroi ont pour premier effet de déclencher la turbulence et de déplacer le point de transition laminaire-turbulent de la couche limite. Ce procédé est d'ailleurs utilisé pour initier le développement de couches limites turbulentes en soufflerie. Schlichting (1968) rapporte que cette transition est réalisée au niveau des rugosités pour un rapport $u_{ref}k/\nu$ supérieur ou égal à 900 (k , en mètre, correspond à la hauteur des rugosités). Pour une vitesse d'écoulement de 1 m s^{-1} , ceci correspond à des rugosités supérieures à environ 10 mm pour déclencher la turbulence.

D'autre part, les rugosités d'une paroi modifient la structure de la couche limite et plus particulièrement la région interne, par rapport à une couche limite de plaque plane lisse. Nikuradse (1933) montre que, pour une rugosité de type grain de sable, il existe plusieurs régimes d'écoulement selon la valeur du rapport défini par l'Équation II-9, où u_* est de la vitesse de frottement, h_s la hauteur équivalente des rugosités et ν la viscosité cinématique.

$$h_s^+ = \frac{h_s u_*}{\nu} \quad \text{Équation II-9}$$

Les régimes d'écoulement sont le régime hydrauliquement lisse ($h_s^+ < 5$) pour lequel la couche limite n'est pas affectée par les rugosités, le régime intermédiaire ($5 < h_s^+ < 70$) pour lequel l'épaisseur de la sous-couche visqueuse diminue et le régime rugueux ($h_s^+ > 70$) pour lequel il n'y a plus de sous-couche visqueuse.

Les résultats expérimentaux de Nikuradse (1933) montrent que les vitesses diminuent dans la région externe de la couche limite (Figure II-3).

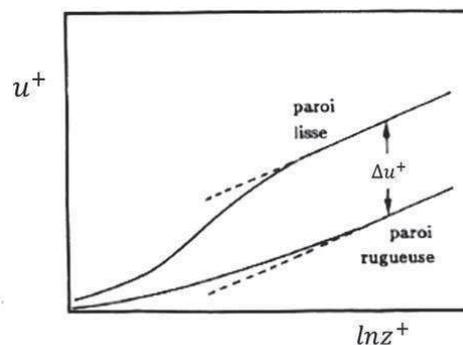


Figure II-3 : illustration de profils verticaux de vitesses au-dessus d'une surface lisse et d'une surface rugueuse (tirée de Cousteix, 1989).

En introduisant Δu^+ le décalage de vitesse à la loi de paroi lisse, la loi logarithmique dans la région de recouvrement s'écrit selon l'Équation II-10.

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(z^+) + C - \Delta u^+ \quad \text{Équation II-10}$$

Pour des surfaces très rugueuses et des écoulements pleinement rugueux (dont l'atmosphère), le profil logarithmique peut être écrit sous la forme de l'Équation II-11.

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{(z-d)}{z_0} \quad \text{Équation II-11}$$

u^* , d et z_0 sont alors les variables à définir ou ajuster. La hauteur de déplacement d est définie comme le niveau à partir duquel le frottement moyen apparaît pour agir effectivement sur l'écoulement au-dessus des éléments de rugosité, c'est-à-dire la hauteur moyenne de déplacement de la contrainte de frottement (Jackson, 1981). d est toujours inférieure à la hauteur des rugosités k . La longueur de rugosité z_0 est la hauteur (à partir de la hauteur de déplacement d) à laquelle la vitesse de vent s'annule, de l'ordre de 10 % de la hauteur des rugosités. Elle est dépendante des hauteurs géométriques des rugosités k et constante dans le cas d'écoulements pleinement rugueux, mais dépendante des conditions d'écoulement et variable pour des écoulements hydrauliquement lisses (Raupach *et al.*, 1991). L'Équation II-12 présente une seconde formulation de la loi de paroi pour un écoulement pleinement rugueux qui sera utilisée dans l'étude, avec $B = 8,5$ une constante (Schlichting, 1968).

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{(z-d)}{k} + B \quad \text{Équation II-12}$$

Enfin, dans le cas de surfaces rugueuses, le niveau de turbulence près de la paroi augmente. Les tensions de Reynolds, donc les fluctuations de vitesses, sont plus fortes à la fois dans la région interne et dans la région externe de la couche limite (Krogstad et Antonia, 1999).

II.1.2.3 Profils de températures liés au chauffage des surfaces

Dans le cas d'une paroi chauffée, les modèles existants pour les champs de températures sont principalement définis pour la zone turbulente externe de la couche limite (Schlichting, 1968). Johnk et Hanratty (1962a et b) ont étudié ces profils pour des écoulements en conduites lisses, dans les zones de début de chauffage et de transfert de chaleur pleinement turbulent, et pour différents nombres de Reynolds. Ils considèrent deux zones de transfert de chaleur distinctes : une première zone, dite d'entrée, où le profil vertical de température se développe dans le sens de l'écoulement et une zone pleinement développée où le profil est établi. Dans la zone pleinement développée, les échanges turbulents loin de la paroi sont considérés prépondérants par rapport aux échanges moléculaires.

Pour une zone d'échange de chaleur pleinement développée, un profil logarithmique de température est proposé selon l'Équation II-13 dans la région $30 < z^+ < 200-300$ correspondant à la région de recouvrement (Johnk et Hanratty, 1962a).

$$\frac{T_0 - T}{T_*} = 5,1 \log_{10}(z^+) + 3,3 \quad \text{Équation II-13}$$

Dans cette équation, T est la température à la position verticale z , T_0 est la température à la paroi et T_* est la température caractéristique, dépendante de la vitesse de frottement. Pour une zone d'entrée d'échange de chaleur, Johnk et Hanratty (1962b) montrent que cette équation est valable pour des mesures suffisamment proches de la paroi. L'expression de T_* est généralement donnée sous la forme de l'Équation II-14.

$$T_* = \frac{q_w}{\rho C_p u_*} \quad \text{Équation II-14}$$

Avec q_w le flux de chaleur à la paroi (W m^{-2}), ρ la masse volumique de l'air, C_p la capacité calorifique de l'air ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$). Enfin, Kader (1981) propose une autre loi logarithmique (Équation II-15) pour représenter les profils de température dans les couches limites pleinement turbulentes. Dans cette expression intervient le nombre de Prandtl $Pr (= \nu/a, a$ la diffusivité thermique).

$$\frac{T_0 - T}{T_*} = \alpha \ln(z^+) + \beta(Pr) \quad \text{Équation II-15}$$

Avec α une constante égale à 2,12 et $\beta(Pr) = (3,85Pr^{1/3} - 1,3)^2 + 2,12 \ln(Pr)$.

Ces profils logarithmiques sont établis par similitudes avec les profils logarithmiques de vitesses pour les couches limites turbulentes. Yaglom et Kader (1974) proposent d'ailleurs, pour les surfaces rugueuses, un autre profil de température logarithmique et une formule permettant de calculer l'augmentation des transferts de chaleur, à l'image du cas des vitesses pour les surfaces rugueuses.

II.2 METHODE EXPERIMENTALE

Les expérimentations ont été réalisées lors de deux campagnes à la soufflerie de l'Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibres (IRPHE) sur le site de Luminy (Marseille, 13). La première campagne en avril 2010 portait sur l'étude du dépôt sur trois surfaces horizontales en équilibre thermique avec l'air (non chauffées) et sur la mesure des paramètres turbulents associés. La seconde campagne en avril 2011 était dédiée à la mesure de vitesses de dépôt sur des surfaces verticales non chauffées et à l'étude de l'effet de la thermophorèse sur le dépôt en présence de surfaces horizontales chauffées.

La méthode choisie pour mesurer les vitesses de dépôt sec est une méthode par traçage avec des particules de fluorescéine. Cette méthode permet de quantifier les flux pariétaux de dépôt sec de fluorescéine et les concentrations à proximité des surfaces pour déterminer les vitesses de dépôt sec. Les différentes configurations étudiées ont, dans leur majorité, fait l'objet d'au moins deux essais pour s'assurer de la reproductibilité des résultats obtenus.

II.2.1 DESCRIPTION DE LA SOUFFLERIE, DES SURFACES URBAINES ET DES CONFIGURATIONS ETUDIÉES

II.2.1.1 Soufflerie utilisée

Les expérimentations sont réalisées dans une soufflerie à retour à veine fermée (aussi appelée soufflerie à recirculation), une maquette à l'échelle 1/5 de la grande soufflerie « Interface Océan-Atmosphère » (Figure II-4). La veine d'essai est longue de 8,65 m et large de 0,64 m. Initialement cette veine était dédiée à l'étude de phénomènes à l'interface eau-air, elle est donc composée de deux parties : un canal inférieur de 0,31 m de haut pour recevoir de l'eau et un canal d'air supérieur de 0,28 m de haut. Pour cette étude, le canal d'eau est laissé vide et un plateau en inox de 0,64 m de large et 8,65 m de long est installé au même niveau que l'interface eau-air. Il sépare les deux canaux et permet de poser dessus les surfaces urbaines étudiées, créant ainsi une simple veine d'air d'une section de 0,28 m de haut par 0,64 cm de large.

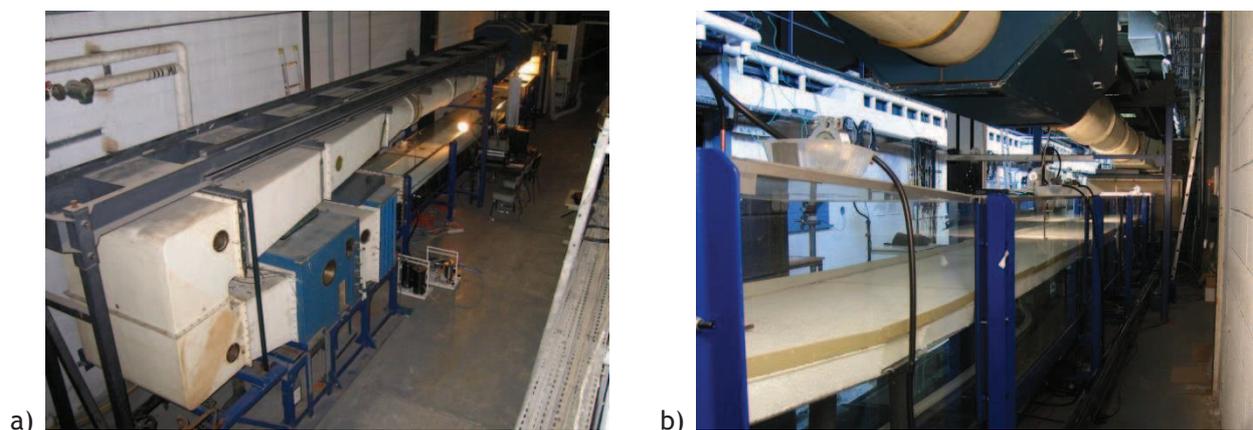


Figure II-4 : soufflerie à recirculation de l'IRPHE : a) vue d'ensemble de la soufflerie, b) vue de la veine d'essai recouverte d'enduit de façade.

Cette soufflerie présente deux atouts majeurs pour les expérimentations de dépôt d'aérosols : le circuit de recirculation se trouve au-dessus de la veine d'essai, ce qui libère les côtés pour manipuler les surfaces étudiées et les échantillons ; les parois sont en verre, ce qui facilite le nettoyage de la veine et permet de limiter les risques de pollution des échantillons entre différentes expérimentations. De plus, sa conception assure la stabilité de l'écoulement aux basses vitesses et des conditions de température et d'humidité constantes en entrée de veine (Pouchain, 1970). Des écoulements d'air allant théoriquement de 0,5 à environ 19 m s^{-1} peuvent y être générés. Pour cette étude, trois vitesses d'écoulements d'air u_{ref} , mesurées au centre de la veine, sont utilisées : 1,3 , 5,0 et $9,9 \text{ m s}^{-1}$. Ces trois vitesses sont choisies pour représenter une large gamme de vitesses de vent. Les nombres de Reynolds (Équation II-1) associés sont de $2,4 \cdot 10^4$, $9,3 \cdot 10^4$ et $1,9 \cdot 10^5$ pour une longueur caractéristique de 0,28 m (hauteur de la veine d'air), ce qui correspond à des écoulements turbulents dans la veine.

II.2.1.2 Surfaces urbaines étudiées

Le dépôt est étudié sur des surfaces horizontales en équilibre thermique avec l'air (non chauffées) de verre classique, d'enduit de façade et d'herbe synthétique lors de la première campagne expérimentale. Les mêmes surfaces de verre et d'enduit de façade sont réutilisées pour étudier le dépôt sur des parois verticales non chauffées et des parois horizontales chauffées lors de la seconde campagne. Les noms commerciaux des matériaux et les paramètres de rugosité de l'enduit de façade et de l'herbe synthétique sont regroupés dans le Tableau II-1 et présentés sur la Figure II-5.

Dans l'ensemble de l'étude, en soufflerie et *in situ*, de l'herbe synthétique a été utilisée pour simuler de l'herbe naturelle dont l'utilisation aurait été trop contraignante pour les expérimentations. L'herbe synthétique est systématiquement déchargée de son électricité statique par aspersion d'éthanol sur les brins avant chaque expérimentation. L'état de charge de ces éprouvettes est ensuite contrôlé avec un appareil de mesure de champ électrostatique (Eltex EMF 58) pour s'assurer qu'elles sont correctement déchargées. Un éventuel effet triboélectrique, engendré par le frottement des particules sur la surface de l'herbe pendant les expérimentations, ne peut pas être mis en évidence et étudié dans cette étude.

Tableau II-1 : caractéristiques des surfaces de verre, d'enduit de façade et d'herbe synthétique.

	Verre classique	Enduit de façade	Herbe synthétique
Nom commercial	Planilux®, Saint-Gobain	Fema®-Therm-Mineralputz 5 mm	« Romana »
Paramètres de rugosité	Lisse	$Ra = 0.57$ mm	$h_c = 34 \pm 2$ mm
	Epaisseur du verre = 4 mm	$Rq = 0.74$ mm	$l_b = 38.4 \pm 1.9$ mm
		$Rv = 2.36$ mm	$w_b = 1.2 \pm 0.1$ mm
		$Rp = 1.86$ mm	$n_t = 10364$ m ⁻²
			$n_b = 164675$ m ⁻²

Le verre utilisé pour cette étude est un verre lisse classique, sans rugosité ni traitement spécifique.

L'enduit de façade a été utilisé sous forme de plaques de différentes longueurs, adaptées aux différentes configurations expérimentales, et de 64 centimètres de large. Constitué d'une couche d'enduit-ciment et d'une couche de finition, il avait préalablement été appliqué sur des plaques de polystyrène selon les recommandations de l'avis technique 7/01-1342 du CSTB. Ses paramètres de rugosité mesurés par rugosimétrie laser par Flori *et al.* (2007) sont l'écart moyen arithmétique du profil Ra , l'écart moyen quadratique du profil Rq (moyenne quadratique correspondante à la moyenne arithmétique de Ra), la profondeur d'un creux du profil Rv et la hauteur de saillie du profil Rp (Figure II-5-a ; m est la ligne moyenne du profil servant de référence pour calculer les autres paramètres).

L'herbe synthétique se présente sous forme de rouleaux. Des bandes de différentes longueurs, adaptées aux configurations, et de 64 centimètres de large sont coupées dans ces rouleaux. L'herbe est principalement composée de brins droits regroupés en touffes. Des brins frisés moins larges et moins

longs sont aussi présents pour densifier le couvert (Figure II-5-b). Les paramètres caractérisant l'herbe synthétique ne sont pas donnés par le fabricant. Ceux mesurés au Laboratoire de Radioécologie de Cherbourg-Octeville (LRC) à partir de différents échantillons tirés des rouleaux utilisés sont la hauteur moyenne de canopée h_c , la longueur des brins droits l_b , la largeur de ces brins w_b , le nombre de touffes par mètre carré n_t et le nombre de brins droits par mètre carré n_b .

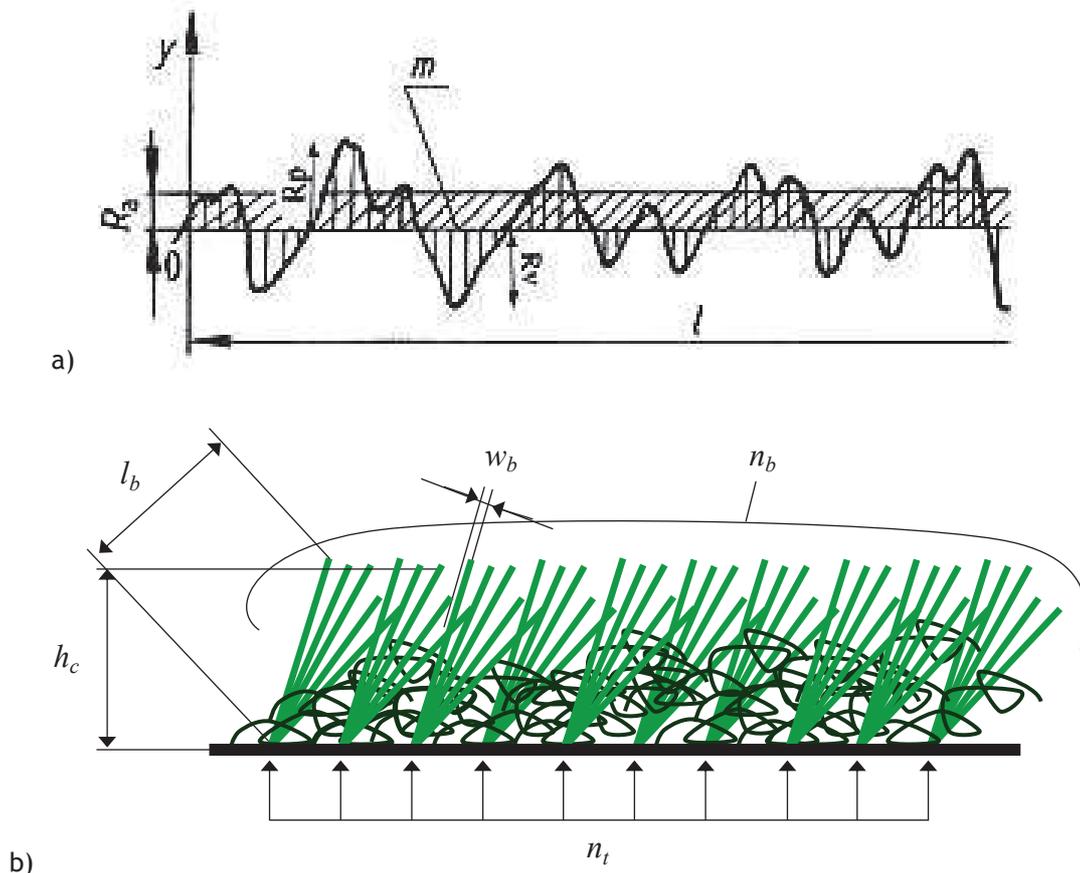


Figure II-5 : illustration des paramètres de rugosité quantifiés pour l'enduit de façade (a, Flori *et al.*, 2007) et l'herbe synthétique (b).

II.2.1.3 Configurations utilisées

Lors des expérimentations sur les surfaces horizontales, chauffées et non chauffées, le plateau en inox est entièrement recouvert de chaque surface pour développer les couches limites et les conditions de turbulence qui leurs sont propres (Figure II-6-a et c). Des rangées de 200 mm de long sont laissées libres pour y placer des plaquettes (ou éprouvettes) d'échantillonnage constituées des surfaces étudiées. Les bords d'attaque de ces rangées sont situés à 1,0, 5,0 et 6,8 m de l'entrée de la veine (fetch) lors des expérimentations sur les surfaces non chauffées (Figure II-6-a). Dans le cas des surfaces chauffées, une seule partie correspondant à la zone chauffée de la soufflerie est laissée libre pour placer des éprouvettes (entre les fetchs 4,2 à 5,2 m, Figure II-6-c).

Lors des expérimentations sur les surfaces verticales non chauffées, une paroi verticale de la veine a été successivement recouverte de verre classique puis d'enduit de façade de l'entrée jusqu'à 6,0 m

(Figure II-6-b). Un espace est laissé libre entre 4,8 et 5,4 m pour y placer des éprouvettes. Les mesures ne sont pas réalisées à d'autres fetchs du fait des conditions de turbulence bien développées rencontrées à $x = 5,0$ m (cf. paragraphe II.3.1.2).

Ces configurations se veulent représentatives des conditions les plus simples rencontrées en milieu urbain, c'est-à-dire des couches limites développées sur des surfaces (toits, murs, sols) par des vents parallèles aux surfaces. La Figure II-6 présente l'orientation du repère (x,y,z) utilisé dont l'origine $(0,0,0)$ correspond au coin inférieur de l'entrée de la veine.

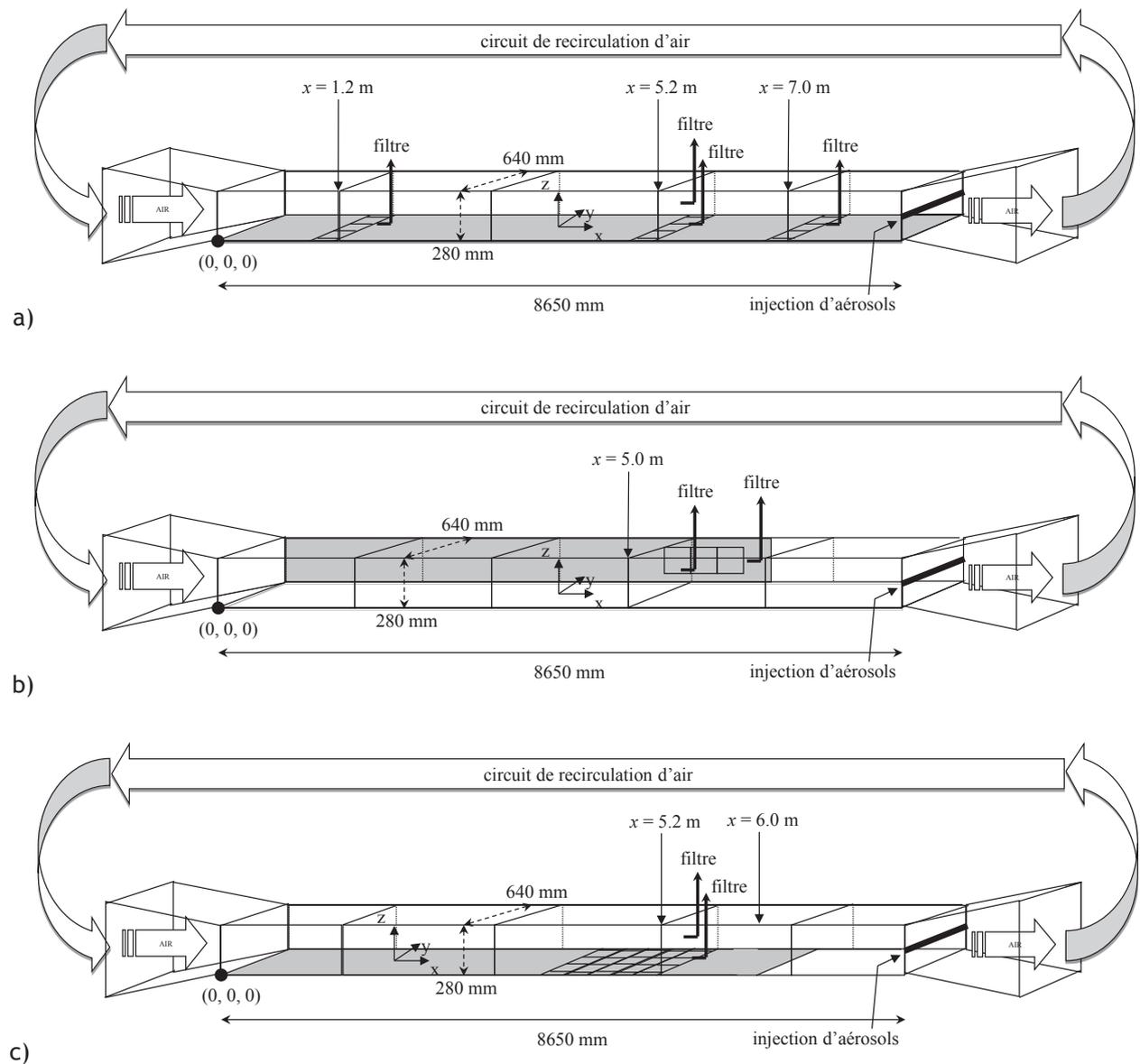


Figure II-6 : illustration des trois configurations de la veine d'essai : a) dépôt sur surfaces horizontales non chauffées, b) dépôt sur surfaces verticales non chauffées et c) dépôt sur surfaces horizontales chauffées. Les zones grisées correspondent aux zones recouvertes par les surfaces étudiées, les carrés dans ces zones représentent les éprouvettes.

Le verre recouvre les parois sous la forme d'un dallage de plaques carrées de 200 mm de côté. La disposition de ces plaques a été ajustée de façon à ne pas présenter de différences de niveaux, de « marches », entre deux plaques voisines. L'enduit de façade et l'herbe synthétique recouvrent la soufflerie de façon homogène et continue. Un joint est appliqué entre les plaques d'enduit pour couvrir les éventuels espaces existants qui seraient dus aux découpes. L'herbe synthétique a été découpée en tapis ajustés en longueurs et largeurs entre les rangées d'éprouvettes.

Une canne d'injection en cuivre de 700 mm de longueur et de 10 mm de diamètre intérieur, régulièrement percée sur 640 mm dans le sens de sa longueur, est placée horizontalement au centre de la section de la veine juste devant le convergent de sortie, avec les trous placés vers ce convergent. Une partie non percée de cette canne (60 mm) est accessible hors de la veine pour y brancher la sortie d'un générateur d'aérosols. De cette façon, la concentration en particules doit s'homogénéiser sur toute la section de la veine grâce à la recirculation d'air.

Des tubes de prélèvement en cuivre de 10 mm de diamètre intérieur, coudés à 90°, sont placés à différents emplacements, en les passant dans les trous prévus à cet effet dans le plafond de la veine. Ils sont utilisés pour échantillonner les particules sur filtres en les reliant chacun à un porte-filtre et une pompe avec du tuyau en fluoroélastomère. Les entrées de ces cannes de prélèvement ont été placées à 10 mm au-dessus de la surface horizontale, à mi-largeur de la veine, à des fetchs de 1,2, 5,2 et 7,0 m (juste derrière chaque rangée d'éprouvette) pour les mesures de V_d sur des surfaces horizontales non chauffées (Figure II-6-a). Une canne est placée à 5,2 m pour la mesure de V_d sur des surfaces chauffées (Figure II-6-c). Une canne est placée à 10 mm de la paroi verticale recouverte de verre ou d'enduit à mi-hauteur de la veine et à un fetch de 5,2 m (juste derrière une éprouvette) pour mesurer V_d sur les surfaces verticales (Figure II-6-b). Enfin, une dernière canne est placée au centre de la section à un fetch de 5,2 m pour chaque expérimentation. Placés juste en aval des éprouvettes, tous ces tubes de prélèvement ne perturbent pas l'écoulement au-dessus des rangées d'éprouvettes et n'ont donc pas d'influence sur le dépôt sec mesuré.

La température de l'air et son humidité relative sont mesurées en continu pendant les expérimentations à l'aide d'une sonde PTU (pour pression, température, humidité ; non représentée sur la Figure II-6). Placée au centre de la veine à environ 50 mm du plafond au fetch 5,5 m pendant la première campagne expérimentale, elle est descendue au centre de la section (en $z = 140$ mm) pendant les expérimentations avec surfaces chauffées.

II.2.1.4 *Chauffage des surfaces*

Lors de la seconde campagne expérimentale, un plateau chauffant réalisé sur mesure est substitué à une partie du plateau horizontal en inox pour étudier l'effet de la thermophorèse sur le dépôt des surfaces urbaines chauffées. Long de 1,8 m et large de 640 mm, il est composé d'un plateau en aluminium de 10 mm d'épaisseur pour poser les surfaces à chauffer, de deux résistances chauffantes plates en silicone de 800 mm de long et 400 mm de large collées sous le plateau aluminium, d'une isolation en laine de verre sous les résistances et de pieds réglables.

Les résistances permettent de chauffer le plateau en aluminium jusqu'à 100°C et sont contrôlées par un coffret de régulation (mesure et affichage de la température du plateau). Le plateau n'est chauffé

ni sur l'intégralité de sa surface ni de façon homogène à cause de sa conception avec deux résistances. L'hétérogénéité de la température à la surface des éprouvettes est étudiée et présentée en annexe A. Intégré dans la veine entre des fetchs de 4,2 et 6 m, le plateau permet de chauffer les surfaces entre 4,2 m et 5,8 m. L'isolation en laine de verre sous le plateau permet de ne pas dissiper la chaleur vers le bas pour éviter de chauffer l'air sous le plateau aluminium et donc de ne pas chauffer indirectement l'ensemble du plateau inox de la veine.

Le verre était directement posé sur le plateau en aluminium pour être chauffé. Par contre, l'enduit de façade a été séparé de son support en polystyrène pour ne poser que la partie « enduit-ciment » directement sur le plateau. Des écarts de températures $\Delta T_{\text{surface-air}}$ entre la surface de dépôt et l'air de 2, 5, 10 et 30 K ont été pris comme références et étudiés pour couvrir un spectre assez large d'écarts de températures, en cohérence avec des données de la littérature sur les températures de surfaces urbaines (Nakamura et Oke, 1988 ; Lagouarde *et al.*, 2004 ; Niachou *et al.*, 2008).

II.2.2 MESURES DES VITESSES DE DEPOT SEC AVEC UN AEROSOL DE FLUORESCÉINE SUBMICRONIQUE

II.2.2.1 Choix et génération de l'aérosol de fluorescéine

Le principe de mesure des vitesses de dépôt sec par traçage particulaire impose d'utiliser un élément traceur, dont certains sont énumérés dans le Chapitre I. Pour cette étude, l'aérosol traceur doit avoir un spectre granulométrique proche de celui du mode accumulation de l'aérosol atmosphérique. Plus spécifiquement, pour les expérimentations en soufflerie et afin de pouvoir étudier le plus grand nombre de cas, le principe de génération de l'aérosol doit être simple, robuste, facilement répétable et facile à installer à proximité immédiate de la soufflerie. La mesure du traceur doit être de mise en œuvre simple, rapide et non destructive pour les surfaces étudiées. L'appareil de mesure doit être transportable vers un laboratoire de campagne et rapide à étalonner. La génération pneumatique d'aérosols de fluorescéine (uranine, $\rho = 1500 \text{ kg m}^{-3}$), utilisée par Nerisson (2009), Maro *et al.* (2010) et Damay (2010), qui présente les caractéristiques requises et permet de générer un aérosol submicronique monomodal polydispersé (Laurent, 1997), a été retenue.

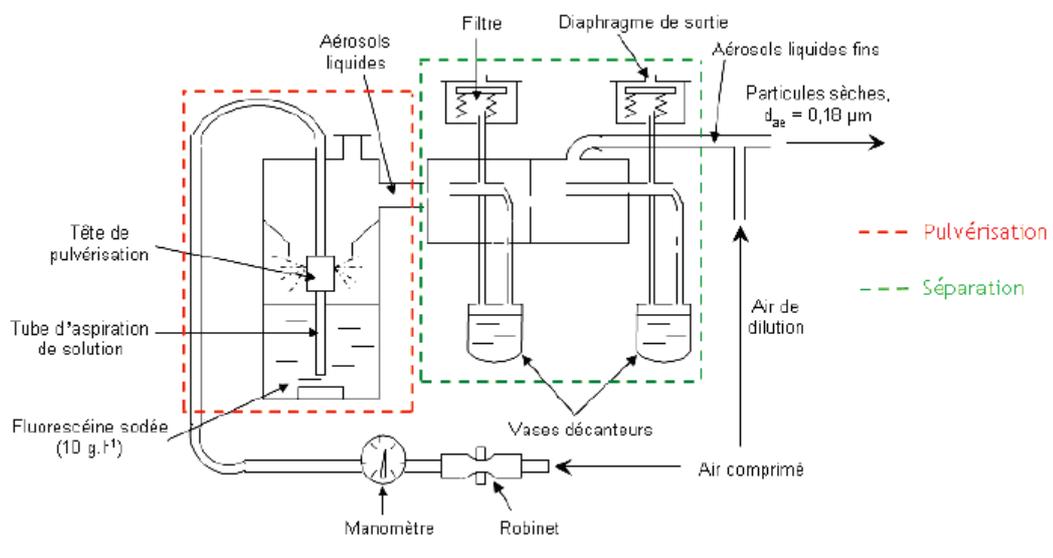
Le générateur pneumatique (Figure II-7-a) a été mis au point pour réaliser les tests de filtres industriels « très haute efficacité » (THE) selon la norme NF X 44-011. Il génère un aérosol de fluorescéine sec monomodal légèrement polydispersé de diamètre aérodynamique médian massique d_{amm} 0,15 μm , d'écart type géométrique σ_g de 1,6, à partir d'une solution aqueuse de fluorescéine sodée à 10 g L^{-1} . Il se compose de deux parties, la partie pulvérisation et la partie séparation (Figure II-7-b).

Le générateur doit être branché à une source d'air comprimé sec et déshuilé d'une pression minimum de 5 bars. Une partie de l'air comprimé ($1,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) sert à pulvériser la solution de fluorescéine contenue dans la cuve en fines gouttelettes dans la partie pulvérisation (cadre en pointillés rouges Figure II-7-b) et sert aussi à les entraîner vers la partie séparation (cadre en pointillés verts Figure II-7-b). Les gouttes produites par la pulvérisation sont triées par inertie sur les deux étages successifs du séparateur. Les plus grosses gouttes sont récupérées par des buses et orientées vers des vases décanteurs. Les plus fines composent l'aérosol liquide de fluorescéine, sortent du séparateur et sont

entraînées par un flux d'air sec de dilution ($9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) où elles sont séchées pour devenir un aérosol solide. Le débit d'air total en sortie du générateur, porteur de l'aérosol solide de fluorescéine, est de $10,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Le débit massique d'aérosols de fluorescéine est de 30 mg h^{-1} avec la solution de fluorescéine à 1 % (10 g L^{-1}). L'absence de pièces en mouvement assure la robustesse du générateur, la répétabilité de la génération et un entretien réduit lors des campagnes expérimentales.



a)



b)

Figure II-7 : générateur pneumatique d'aérosols (a) et illustration de son principe de fonctionnement (b) (d'après Nerisson, 2009).

La recirculation de l'air dans la soufflerie permet de ne générer les particules que deux minutes au début de l'expérimentation, puis de laisser la concentration diminuer au cours du temps jusqu'à l'arrêt de l'expérimentation et le retrait des éprouvettes au bout de quinze minutes. L'aérosol généré est

introduit par la canne d'injection en sortie de la veine d'essai puis mélangé dans le volume d'air dans la section de recirculation de la soufflerie. La concentration en particules est homogène sur toute la section en entrée de veine. Enfin, l'air de la veine est renouvelé entre chaque expérimentation à l'aide d'une extraction d'air vers l'extérieur.

II.2.2.2 Caractérisation de l'aérosol de fluorescéine

Pour notre étude, une solution de fluorescéine à 80 g L^{-1} a été utilisée en remplacement de la solution à 10 g L^{-1} . Ceci a permis d'augmenter le diamètre des particules de l'aérosol de fluorescéine produit pour générer un aérosol plus représentatif de l'aérosol atmosphérique. Cette nouvelle granulométrie de l'aérosol a été mesurée à l'aide d'un impacteur en cascade basse pression (Low Pressure Impactor, LPI, Dekati Inc.).

Le LPI est une rampe composée de 13 étages d'impacteurs inertiels conventionnels empilés, fonctionnant à basse pression (100 mbar) (Baron and Willeke, 2001). Montés en cascade, les premiers étages collectent les plus grosses particules qui, par inertie, sortent des lignes de courant de l'air, alors que les plus petites particules continuent pour aller s'impacter sur les étages inférieurs. Les particules sont séparés en douze classes granulométriques comprises entre 24 nm et $9,55 \mu\text{m}$ (le premier étage collecte toutes les particules de diamètres supérieurs à $9,55 \mu\text{m}$). Les plateaux d'impactions sont utilisés sans feuilles de collections et peuvent être directement plongés en solution aqueuse pour dissoudre la fluorescéine collectée. Les diamètres déterminés avec un LPI sont des diamètres aérodynamiques d_a .

Le Tableau II-2 présente les diamètres de coupure d_c (diamètres des plus petites particules collectées sur les plateaux) et diamètres aérodynamiques géométriques moyens d_a de chaque étage du LPI utilisé. Trois prélèvements de l'aérosol sont réalisés dans la soufflerie avec le LPI lors de la première campagne expérimentale pour caractériser sa distribution granulométrique massique.

Tableau II-2 : diamètres de coupure d_c et géométriques moyens d_{ai} du LPI.

Numéro de plateau i	1	2	3	4	5	6	7
d_{ci} (μm)	0,024	0,031	0,051	0,100	0,217	0,324	0,589
d_{ai} (μm)	0,027	0,040	0,071	0,147	0,265	0,437	0,732
Numéro de plateau i	8	9	10	11	12	13	
d_{ci} (μm)	0,910	1,534	2,294	3,833	6,320	9,546	
d_{ai} (μm)	1,181	2,965	4,922	4,922	7,767		

Les prélèvements sont réalisés au centre de la veine, en $x = 5,2$ m, grâce à une canne de prélèvement en cuivre, juste après l'arrêt de la génération d'aérosols, et pendant 60 secondes pour limiter les quantités de fluorescéine collectées sur les plateaux d'impaction et ainsi réduire le temps consacré au traitement des échantillons et à leur mesure.

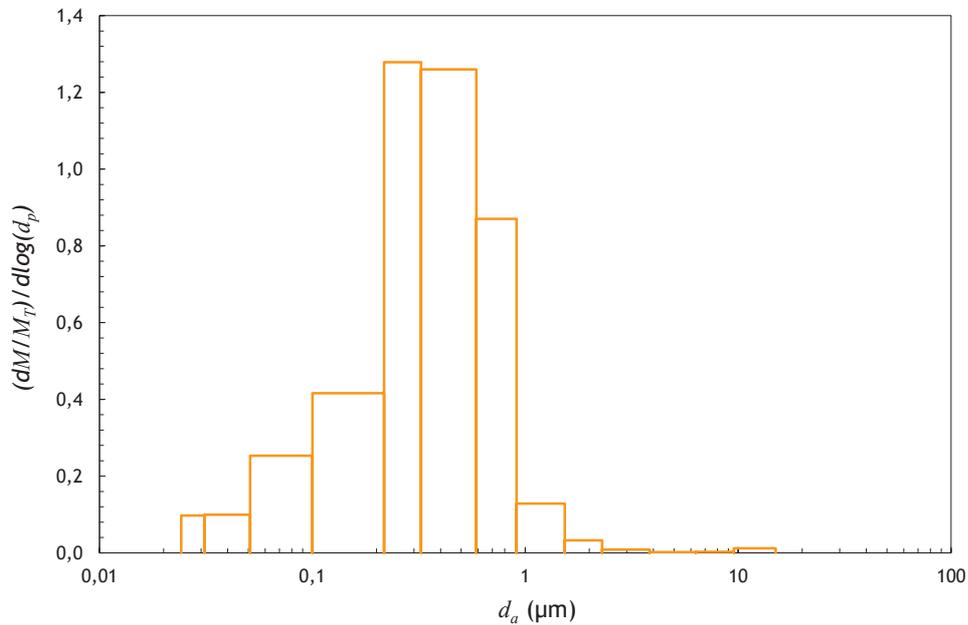


Figure II-8 : distribution granulométrique en masse normalisée de l'aérosol de fluorescéine.

La distribution granulométrique massique de l'aérosol, moyennée sur les trois prélèvements, est présentée sur la Figure II-8. Le diamètre aérodynamique médian massique d_{amm} et l'écart-type géométrique σ_g de cet aérosol ont été déterminés à l'aide d'une loi lognormale. Ils sont respectivement de $(0,27 \pm 0,07) \mu\text{m}$ et de $(2,06 \pm 0,23)$.

La vitesse de sédimentation moyenne de cet aérosol polydispersé qui sera utilisée pour l'interprétation des mesures, peut être calculée à partir de l'Équation I-19 qui prend alors la forme de l'Équation II-16.

$$V_s = \sum_{i=1}^{12} \frac{d_{ai}^2 g \rho_0 C_{ui}}{18 \mu_a} m_{ni} = 1,10 \pm 0,37 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1} \quad \text{Équation II-16}$$

L'indice i fait référence à un numéro de plateau du LPI. Le facteur correctif de Cunningham d'indice i C_{ui} prend la valeur correspondante au diamètre aérodynamique d_{ai} . La variable m_{ni} est un facteur correctif (ou fraction massique) égal à la masse de fluorescéine impactée sur un plateau i normalisée à la masse totale de fluorescéine prélevée par le LPI. Il sert de facteur de pondération des vitesses de sédimentation de chaque gamme de taille i . La masse volumique ρ_0 est prise égale à 1000 kg m^{-3} du fait que le LPI sélectionne les particules selon leurs diamètres aérodynamiques. La vitesse de sédimentation de l'aérosol de fluorescéine est calculée en prenant en compte les plateaux 1 à 12 de l'impacteur. Elle est égale à $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$.

Le plateau 13 reçoit toutes les particules de diamètres supérieurs à 9,5 μm et n'a pas de diamètre de coupure supérieur permettant le calcul d'un diamètre aérodynamique moyen pour le plateau. De plus, la masse de fluorescéine collectée sur ce plateau représente entre 0,06 et 0,6 % de la masse totale de fluorescéine collectée à chaque échantillonnage, il n'est donc pas pris en compte dans ce calcul.

II.2.2.3 Mesure des flux de dépôts secs et des concentrations dans l'air

L'utilisation d'aérosols traceurs pour le calcul de V_d passe par l'utilisation de substrats pour échantillonner les flux de dépôt sec et par la mesure de leurs concentrations dans l'air (cf. paragraphe I.2.3.1). Cette méthode permet donc d'utiliser des surfaces urbaines réelles comme éprouvettes pour notre étude. Dans le cas de la fluorescéine, les masses déposées $M_{substrat}$ (kg) sur la surface projetée de substrat $A_{substrat}$ (m^2) pendant un temps d'exposition donné t (s) servent au calcul des flux de dépôt F ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Équation II-17).

$$-F = \frac{M_{substrat}}{A_{substrat}t} \quad \text{Équation II-17}$$

Dans notre étude en soufflerie, des éprouvettes de verre, d'enduit de façade et d'herbe synthétique sous la forme de plaques carrées de 200 mm de côtés (Figure II-9) sont directement utilisées pour échantillonner les flux de dépôt en les exposant à l'aérosol de fluorescéine.



Figure II-9 : éprouvettes carrées de 200 mm de côté, de verre posé sur un support polystyrène-bois (a), d'enduit de façade (b) et d'herbe synthétique (c).

La fluorescéine est hydrophile donc les particules déposées sur les substrats sont remises en suspension et dissoutes par rinçage de la surface à la seringue (rinçages successifs avec la même solution pour le verre et l'enduit de façade) ou par trempage directe (herbe synthétique) avec une solution d'eau ammoniaquée à pH 9. Ces solutions sont mesurées avec un spectromètre de fluorescence (Jobin Yvon Horiba FluoroMax-3) pour déterminer les concentrations des solutions de fluorescéine obtenues par rinçages. Les mêmes éprouvettes ont été utilisées pour plusieurs expérimentations. Après avoir été rincées avec de l'eau distillée et séchées à température ambiante, les éprouvettes sont mises en place dans la soufflerie avec une grande attention pour ne pas les polluer avec la fluorescéine qui pourrait être déposée sur les parois de la veine. Des mesures de « blancs » des éprouvettes (éprouvettes non exposées à l'aérosol de fluorescéine) sont régulièrement réalisées pour s'assurer qu'il ne reste pas de

fluorescéine à leur surface après leur nettoyage à l'eau distillée. Des tests de seconds rinçages ont aussi été réalisés et montrent qu'il reste moins de 3 % de la fluorescéine déposée sur les éprouvettes suite au premier lavage à l'eau ammoniacquée.

Lors des expérimentations de dépôt sur des surfaces horizontales sans chauffage, trois éprouvettes sont intégrées dans chacun des trois rangs laissés libres dans la surface étudiée développée sur le plateau en inox (Figure II-6-a), avec leurs bords d'attaques placés aux fetchs 1,0, 5,0 et 6,8 m. De cette manière, les bords de ces éprouvettes affleurent les surfaces des substrats recouvrant le fond de la veine aéraulique et contribuent au développement des couches limites caractéristiques des surfaces. Dans le cas du plateau chauffant, ces éprouvettes sont toujours placées en affleurement, par rangs de trois entre 4,2 et 5,2 m. Par contre, étant donné l'hétérogénéité surfacique des températures lors des expérimentations avec chauffage, seules les éprouvettes centrales de chaque rang ont servi à l'échantillonnage des flux de dépôts, car leurs températures moyennes sont assez proches en comparaison des températures des éprouvettes latérales. Pour la mesure de vitesses de dépôt sec sur des surfaces verticales, la paroi verticale utilisée est recouverte du substrat étudié de l'entrée de la veine d'essai jusqu'à 6 m dans la veine d'essai. Trois éprouvettes sont intercalées sur cette paroi verticale dans le sens de la longueur, avec des bords d'attaque à 4,8 , 5,0 et 5,2 m, pour mesurer les flux de dépôt sec. Ces éprouvettes sont centrées sur la hauteur de la veine d'essais, c'est-à-dire à 40 mm du fond de la veine.

En parallèle, les concentrations moyennes des aérosols de fluorescéine dans l'air pendant les expérimentations sont mesurées grâce à des prélèvements sur filtres réalisés sur toute la durée de chaque expérimentation. Le dispositif utilisé est constitué de portes-filtres branchés à chaque tube de prélèvement en cuivre (disposés selon la configuration choisie), de pompes ayant des débits d'air constants compris entre 7,6 et 8,6 L min⁻¹, contrôlés avec un débitmètre massique TSI 4000 Series et de filtres de cellulose (Whatman 1440-047). Un prélèvement au centre de la veine est systématiquement réalisé pour s'assurer de l'homogénéisation de la concentration en particules par mélange dans le circuit de recirculation de la soufflerie. Suite au prélèvement, les filtres sont directement plongés dans de l'eau ammoniacquée pour dissoudre les particules de fluorescéine filtrées et mesurer les solutions avec le spectrofluorimètre. La concentration est calculée selon l'Équation II-18 avec M_{filtre} (kg) la masse de fluorescéine sur le filtre, Q_{filtre} (m³ s⁻¹) le débit d'air au niveau du filtre et t (s) le temps de prélèvement qui correspond au temps d'exposition des éprouvettes.

$$C = \frac{M_{\text{filtre}}}{Q_{\text{filtre}}t} \quad \text{Équation II-18}$$

A la fin de chaque expérimentation, les éprouvettes et les filtres sont retirés de la veine avec beaucoup d'attention, emballés dans du papier aluminium et ensuite traités pour la mesure. La protection des éprouvettes et des filtres avec du papier aluminium permet de limiter les risques de pollution (par ajout de fluorescéine potentiellement déposée et présente autour de la soufflerie lors de la manipulation). De plus, des tests ont montré que la fluorescéine déposée sur les éprouvettes ou prélevée par les filtres n'est pas transférée (par frottement par exemple) sur le papier aluminium enveloppant les éprouvettes et les filtres pendant leur transport jusqu'au laboratoire de mesure.

II.2.3 MESURES DES PARAMETRES ASSOCIES AUX VITESSES DE DEPOT

Les mesures de la turbulence des écoulements et des températures des surfaces et de l'air sont indispensables et doivent être réalisées pour quantifier précisément les conditions expérimentales rencontrées dans la soufflerie. Ces connaissances permettront par la suite de constituer des bases de données utilisables par les modélisateurs pour améliorer les prédictions sur le dépôt.

II.2.3.1 Mesures de turbulence

Des mesures anémométriques ont été réalisées lors de la première campagne expérimentale afin de quantifier la turbulence dans les couches limites développées. Les mesures ont été réalisées au-dessus des surfaces horizontales non chauffées de verre, d'enduit de façade et d'herbe synthétique. Elles n'ont pas été reproduites pour les surfaces verticales et les surfaces horizontales chauffées. Par contre les résultats de ces mesures sont utilisés pour les surfaces verticales. Elles ne le sont pas pour les surfaces chauffées.



Figure II-10 : sonde à fils chauds croisés sur son support au-dessus de l'enduit de façade.

Ces mesures sont réalisées avec une sonde à deux fils chauds croisés (type 55P61, Figure II-10) associée à un système anémométrique *Streamline* (Dantec Dynamics). Avec ce système, la mesure de u , composante instantanée horizontale de vitesse dans le sens de l'écoulement, et de w , composante instantanée verticale de la vitesse, a pu être faite à hautes fréquences (2,5 kHz pour $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$ et 10 kHz pour $u_{ref} = 5,0$ et 10 m s^{-1}). La durée d'acquisition est de 50 s à chaque point. Ce type d'instrumentation fragile nécessite de réaliser les mesures dans une atmosphère propre. Les mesures anémométriques sont donc réalisées séparément des expérimentations de dépôt sec, sans génération d'aérosols. Par contre, les éprouvettes d'échantillonnage des dépôts et les tubes de prélèvements en cuivre sont maintenus dans l'ensemble des expérimentations. De cette manière, les conditions d'écoulement sont identiques à celles rencontrées pendant les mesures de vitesses de dépôt.

La sonde à fils chauds est fixée à un support motorisé, automatisé et programmable, mobile sur la direction verticale. Cet ensemble est positionné pour placer la sonde au centre de la veine. Les acquisitions sont réalisées sur des profils verticaux de 40 points, de la surface étudiée vers le haut de veine (de $z = 2,5$ mm à $z = 200$ mm). Les trois premiers points sont séparés d'un pas de 0,5 mm, les trois suivants d'un pas de 1 mm, les vingt suivants d'un pas de 2 mm, les points restants sont séparés d'un pas de 10 mm. Une difficulté de ces mesures vient de la nature des surfaces rugueuses dont il est difficile d'approcher la sonde anémométrique. Une autre difficulté est de déterminer la position d'origine verticale $z = 0$ dans ces rugosités.

Ces profils sont réalisés au-dessus du centre de chaque rang d'éprouvettes, aux fetchs 1,1, 5,1 et 6,9 m, pour chaque vitesse d'écoulement u_{ref} .

II.2.3.2 Mesures de températures

La vitesse de thermophorèse définie au Chapitre I fait intervenir un gradient de température dans l'air. La connaissance des gradients de température liés aux vitesses de dépôt mesurées est donc nécessaire pour comparer les résultats obtenus à ceux prédits par les modèles. Mais leur mesure est délicate. Par contre, les températures des surfaces et de l'air loin de la paroi sont plus facilement mesurables. De plus, elles sont nécessaires pour comparer les vitesses de dépôt de soufflerie à celles qui pourront être acquises *in situ*. Les températures des surfaces sont donc mesurées lors de la seconde campagne portant sur l'étude de l'effet de la thermophorèse sur le dépôt sur les surfaces horizontales chauffées. La température de l'air est mesurée en continu sur l'ensemble des deux campagnes.

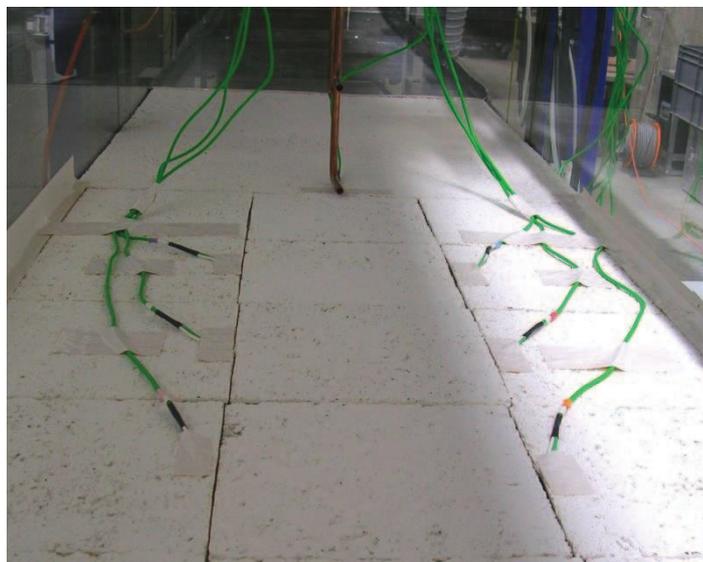


Figure II-11 : mesure des températures de la surface d'enduit de façade avec des thermocouples.

Les températures des surfaces sont mesurées avec sept thermocouples de type K, de précision 1,5 K, et acquises toutes les dix secondes avec une station ALMEMO® 5990-2. Par contre, les mesures ne peuvent pas être réalisées sur les éprouvettes d'échantillonnage des dépôts pour deux raisons évidentes : la

partie d'éprouvette recouverte par le thermocouple ne collecterait pas d'aérosol et le collage successif d'un thermocouple sur plusieurs éprouvettes risquerait d'engendrer des pollutions et de fausser les résultats. Les thermocouples sont donc placés au bord des éprouvettes centrales, sur des éprouvettes latérales de verre et d'enduit qui ne sont pas utilisées pour mesurer des flux de dépôt (Figure II-11). Ces thermocouples en positions latérales sont utilisés pour contrôler et ajuster manuellement la différence de température entre la surface et l'air.

La surface du plateau chauffant n'est pas totalement homogène en température lorsqu'il chauffe. Cette distribution de températures se retrouve logiquement à la surface des substrats de verre et d'enduit de façade. A partir des valeurs fournies par les thermocouples disposés sur les bords des éprouvettes, la distribution des températures sur les surfaces de verre et d'enduit de façade peut être ajustée en fonction de la vitesse de référence de l'écoulement u_{ref} et des températures de référence étudiées. Les températures moyennes $T_{éprouvette}$ sont calculées par intégration des lois ajustées sur l'ensemble de la surface de chaque éprouvette. La mise au point de cette distribution des températures est présentée plus précisément en annexe A.

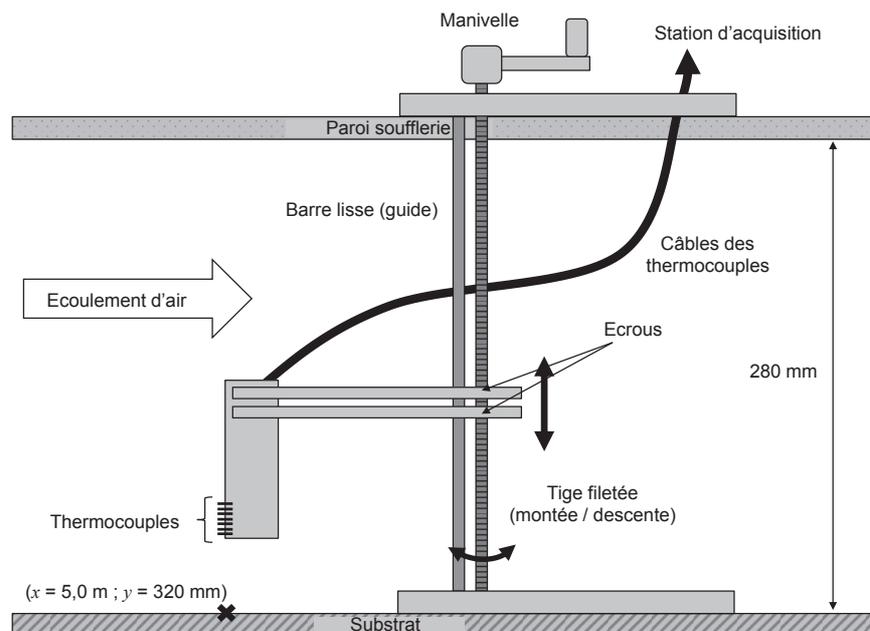


Figure II-12 : illustration du rack de thermocouples et de son support pour le déplacement vertical.

Sept thermocouples du même type et la même station d'acquisition sont utilisés pour mesurer toutes les dix secondes les gradients de température. Les thermocouples sont montés sur un rack vertical en PVC avec des écarts inter-thermocouples connus. Ce rack est monté sur un bras en PVC couplé à un support, un système de guide (une barre lisse) et de jeu de tige filetée et d'écrous permettant de le déplacer sur la verticale avec une précision de l'ordre de 0,01 mm (Figure II-12). Le rack est suspendu par son bras au-dessus de la position ($x = 5,0 \text{ m} ; y = 320 \text{ mm}$). Le support se trouve en aval du rack par

rapport à l'écoulement d'air pour ne pas perturber l'écoulement. Des profils verticaux de température sont réalisés entre $z = 0,5$ mm et $z = 25$ mm.

La température de surface utilisée comme référence et associée aux profils verticaux de température est prise sur un thermocouple positionné sur une éprouvette centrale en $x = 5,0$ m et $y = 320$ mm. La température de référence de l'air est donnée en $z = 140$ mm par la sonde PTU au centre de la veine.

II.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les données obtenues sont présentées en deux parties, d'abord les résultats ayant trait aux expérimentations sur les surfaces horizontales et verticales non chauffées, puis ceux obtenus sur les surfaces chauffées. Elles sont ensuite analysées en fonction des paramètres physique mis en jeu et comparées aux données de la littérature, au modèle de Lai et Nazaroff (2000) et au modèle de Zhang *et al.* (2001). Ensuite, un ajustement simple est testé sur ces points expérimentaux dans l'optique de l'utiliser à titre de comparaison avec les résultats des expérimentations *in situ* de courte durée (seconde étape de cette étude).

II.3.1 DEPOT SUR PAROIS EN EQUILIBRE THERMIQUE AVEC L'AIR

II.3.1.1 Concentrations, flux de dépôt sec et vitesses de dépôt

Lors des expérimentations sur les surfaces horizontales non chauffées, les prélèvements sur filtres sont réalisés en quatre points (trois au niveau des éprouvettes, un au centre de la veine). Les concentrations mesurées n'ont pas montré de différences significatives entre chaque point de prélèvement pour une même expérimentation. L'écart relatif médian de 6,6 % entre les différentes concentrations est un indice de mélange homogène de l'aérosol de fluorescéine dans le volume d'air grâce à sa recirculation dans la soufflerie. La même observation est faite pour les deux prélèvements des expérimentations sur parois verticales avec un écart relatif médian de 3,4 %.

Sur les surfaces horizontales, les flux de dépôt ont été mesurés sur neuf éprouvettes, réparties en trois rangs de trois éprouvettes à chaque expérimentation. Les flux de dépôt mesurés sur les éprouvettes latérales et centrales de chaque rangée ne montrent pas de différences fortes et significatives (28,5 % d'écart relatif en moyenne valeurs plus élevées pour les éprouvettes latérales). Ceci met en évidence qu'il n'y pas d'influence mesurable d'une turbulence, due à d'éventuels effets de bords dans les coins de la veine d'air, sur le dépôt sur les éprouvettes latérales, donc que les vitesses de dépôt tirées des éprouvettes d'une même rangée peuvent être moyennées.

Les vitesses de dépôt sont calculées pour chaque éprouvette à partir de son flux de dépôt et de la concentration en particules associée (mesurée sur le filtre issu du point de prélèvement juste en aval de leur rangée à $z = 10$ mm ; dans deux cas, la concentration mesurée au centre de la veine est utilisée en substitution de ces concentrations à cause de la défaillance du prélèvement aval). Une vitesse de dépôt sec moyenne est calculée pour chaque fetch, chaque type de surface et chaque u_{ref} à partir des vitesses de dépôt de chaque éprouvette (Figure II-13). Malgré les précautions prises lors des essais, certaines éprouvettes ont certainement été polluées, donnant des flux de dépôt trop importants

vis-à-vis des mesures réalisées sur d'autres éprouvettes pour les mêmes conditions. Ces éprouvettes ne sont pas prises en compte dans les moyennes présentées lorsque que leur flux est supérieur d'un facteur 2 aux flux des éprouvettes de la même expérimentation.

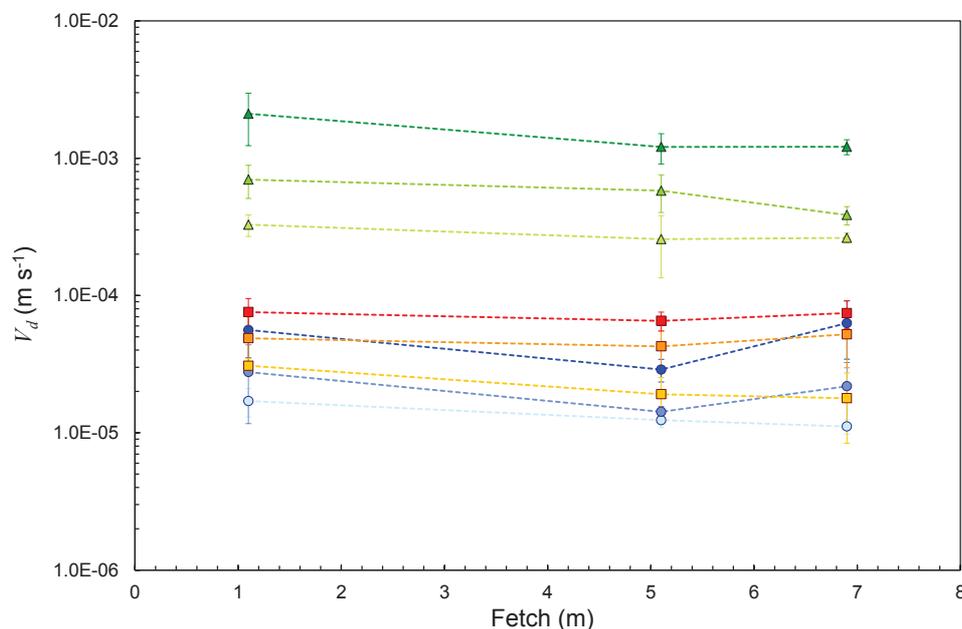


Figure II-13 : V_d pour chaque type de surface horizontale non-chauffée et chaque u_{ref} en fonction du fetch x .

Verre classique : \circ $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, \bullet $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, \bullet $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;
 enduit de façade : \square $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, \square $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, \square $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;
 herbe synthétique : \triangle $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, \triangle $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, \triangle $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$.

La Figure II-13 montre des vitesses de dépôt très dépendantes du type de surface et de la vitesse de l'écoulement, avec notamment une différence de plus de deux ordres de grandeurs entre le verre à $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$ (quelques 10^{-5} m s^{-1}) et l'herbe synthétique à $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$ (quelques 10^{-3} m s^{-1}). Les barres d'incertitudes représentent les écart-types associés aux moyennes des vitesses de dépôt mesurées sur des éprouvettes (moyennes sur 5 à 6 éprouvettes) à un fetch donné pour chaque u_{ref} et chaque surface. Selon ce graphique et compte tenu des incertitudes, V_d semble indépendante du fetch. C'est à partir de cette observation que le prélèvement des flux de dépôt sur parois verticales s'est limité à trois éprouvettes placées entre les fetch 4,8 m et 5,4 m, lors de la seconde campagne expérimentale en avril 2011.

Pour ces éprouvettes en positions verticales (verre ou d'enduit de façade), l'écart relatif médian observé entre les flux des trois éprouvettes pour la même surface et la même vitesse d'écoulement d'air est de 17,3 %. Les vitesses de dépôt mesurées ont le même ordre de grandeur, quelques 10^{-5} m s^{-1} . Celles sur le verre vertical à $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$ ne sont pas calculées car les flux de dépôt montrent des écarts trop importants, certainement dus à des pollutions.

V_d ne dépend pas du fetch, (Figure II-13), les vitesses de dépôt sec moyennes (sur les trois fetchs) sont calculées pour chaque vitesse de vent u_{ref} et chaque type de surface en position horizontale et verticale. Ces valeurs sont présentées sur la Figure II-14 et dans le Tableau II-3. Les incertitudes représentent les écart-types associés aux moyennes des vitesses de dépôt calculées pour chaque surface et chaque u_{ref} .

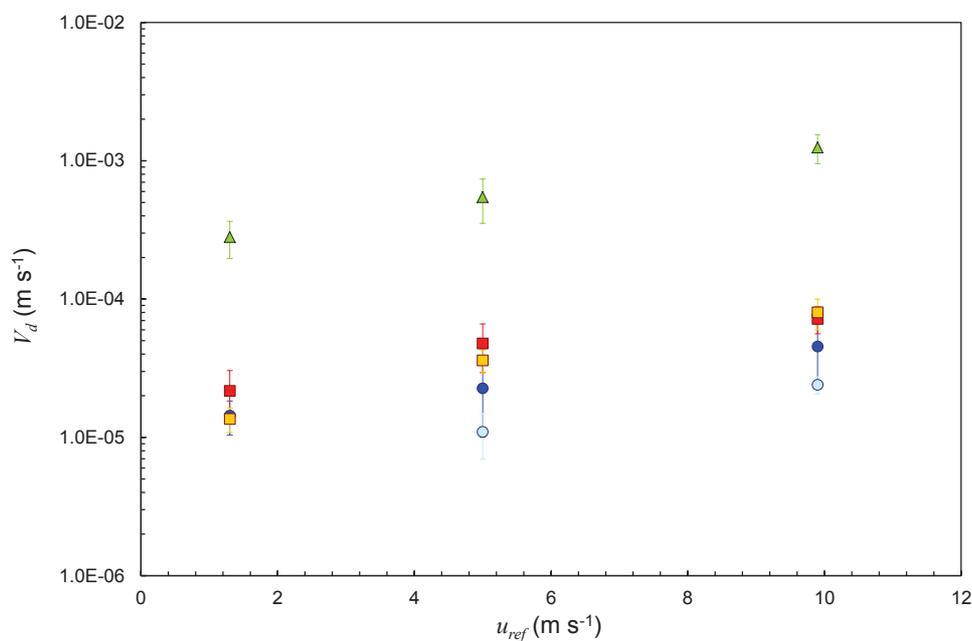


Figure II-14 : V_d moyennes pour chaque type de surface en fonction de u_{ref} .

Verre classique : ○ vertical, ● horizontal ;

enduit de façade : □ vertical, ■ horizontal ;

herbe synthétique horizontale : ▲.

Tableau II-3 : valeurs des V_d moyennes pour chaque type de surface en fonction de u_{ref} .

u_{ref} (m s ⁻¹)	V_d (x 10 ⁻⁵ m s ⁻¹)				Herbe synthétiques
	Verre classique		Enduit de façade		
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	
1,3	1,4 ± 0,4		2,2 ± 0,9	1,4 ± 0,3	28,1 ± 8,4
5,0	2,3 ± 1,3	1,1 ± 0,4	4,8 ± 1,8	3,6 ± 0,7	54,6 ± 19,3
9,9	4,5 ± 2,0	2,4 ± 0,3	7,2 ± 1,6	8,0 ± 2,0	124,7 ± 29,6

V_d varie avec la vitesse moyenne d'écoulement de l'air, le type de surface étudié et l'orientation de la surface. Les vitesses de dépôt sec mesurées sur les surfaces horizontales varient de $1,4 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ sur le verre classique pour $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$ à $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ sur l'herbe synthétique pour $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$. Celles mesurées sur des surfaces verticales varient de $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ sur le verre classique pour $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$ à $8,0 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ sur l'enduit de façade pour $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$. Selon les conditions de vent rencontrées, il existe donc un facteur 115 entre les plus faibles et plus fortes valeurs mesurées sur ces surfaces représentatives de surfaces urbaines.

L'écart obtenu entre les vitesses de dépôt sur surfaces horizontales et verticales est très proche de la vitesse de sédimentation V_s calculée pour l'aérosol de fluorescéine ($1,1 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, Équation II-16), mis à part pour l'enduit de façade à $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$ où les deux V_d sont proches dans les deux cas. Cette comparaison entre surfaces verticales et surfaces horizontales montre que la sédimentation participe pour une part importante au dépôt sec sur des surfaces lisses horizontales, à l'image du verre à $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$ pour lequel V_s compte pour quasiment la moitié de V_d totale. De plus, V_d sur du verre horizontal à $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$ indique que la sédimentation est le principal phénomène de dépôt dans ces conditions. La sédimentation participe aussi fortement au dépôt sur surfaces horizontales peu rugueuses comme le montre le résultat de l'enduit de façade à $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$ où V_s est égale à la moitié de V_d .

Sur parois horizontales, V_d varie en moyenne d'un facteur 1,7 et 23,7 respectivement entre le verre classique et l'enduit de façade et entre le verre classique et l'herbe synthétique, et d'un facteur 1,9 et 3,6 respectivement entre $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$ et $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$ et entre $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$ et $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$. Bien que V_d augmente avec u_{ref} , ces rapports moyens de V_d montrent le rôle prépondérant de la rugosité du substrat sur les vitesses de dépôt qui lui seront associées, et suggèrent une importante contribution des processus turbulents d'interception et d'impaction au dépôt, pour cette gamme de taille de particules. Cette observation est appuyée par le fait que, selon la littérature, ces phénomènes de dépôt sont dépendants de la taille de l'aérosol, de la taille de l'obstacle et du nombre de Stokes, lui-même dépendant du temps de relaxation de l'aérosol, de la vitesse de l'écoulement et de la taille de l'obstacle.

Sur les parois verticales de verre et d'enduit de façade, les variations de vitesses de dépôt entre les différentes vitesses d'écoulement et les différentes surfaces sont légèrement supérieures du fait de l'absence de sédimentation, avec un facteur moyen de 3,3 entre les V_d du verre et de l'enduit de façade et un facteur moyen de 2,2 entre $u_{ref} = 5,0$ et $9,9 \text{ m s}^{-1}$. Pour l'enduit de façade, l'écart entre $u_{ref} = 1,3$ et $5,0 \text{ m s}^{-1}$ est d'un facteur 2,7. Ces différences légèrement plus élevées que celles calculées pour les surfaces horizontales respectent les mêmes ordres de grandeur et mettent de nouveau en évidence l'importance des phénomènes turbulents de dépôt.

II.3.1.2 Profils de vitesses et paramètres turbulents

Les mesures anémométriques ont été réalisées au-dessus des surfaces horizontales de verre classique, d'enduit de façade et d'herbe synthétique, aux trois fetchs et aux trois vitesses d'écoulement d'air, ce qui représente 27 profils verticaux de mesure de turbulence. Cependant, les profils mesurés au-dessus du verre classique et de l'enduit de façade au fetch $x = 1,1 \text{ m}$ et pour $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$ ne sont pas

exploitables à cause de problèmes techniques. Les données tirées des mesures sont de deux types : des profils verticaux de vitesses horizontales moyennes u et des profils verticaux des fluctuations de vitesses instantanées.

La Figure II-15 présente les profils de vitesses moyennes obtenus au fetch $x = 5,1$ m. Ces profils sont représentatifs de ceux obtenus aux deux autres fetchs. Le décalage en hauteur, sur l'axe des z , des profils au-dessus de l'enduit et de l'herbe correspond au décalage de la sonde par rapport au $z = 0$ mm imposé par la hauteur des rugosités de ces deux surfaces.

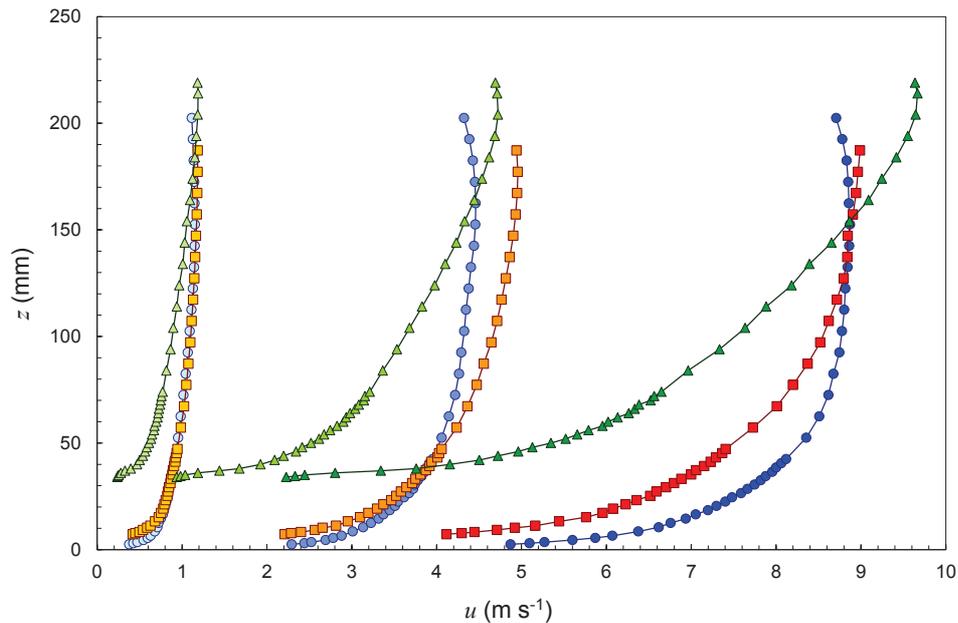


Figure II-15 : profils verticaux de vitesses moyennes u , au fetch $x = 5,1$ m pour les trois surfaces et trois vitesses d'écoulement.

Verre classique : \circ $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, \bullet $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, \bullet $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;
 enduit de façade : \square $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, \square $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, \square $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;
 herbe synthétique : \triangle $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, \triangle $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, \triangle $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$.

La loi de recouvrement logarithmique de l'Équation II-11 est ajustée à ces profils pour estimer les vitesses de frottement u^* . La hauteur de déplacement d est égale à zéro dans le cas du verre et ajustée dans le cas de l'enduit de façade et de l'herbe synthétique. Les longueurs de rugosités z_0 sont dépendantes des hauteurs géométriques des rugosités k dans le cas de l'enduit de façade et de l'herbe synthétique, mais dépendantes des conditions d'écoulement donc ajustées pour le verre qui est dynamiquement lisse. Pour l'enduit de façade, z_0 est déterminé à partir de l'Équation II-11 et de l'Équation II-12 et égal à $k \exp(-B\kappa)$ avec $k = Rv + Rp$. Dans le cas de l'herbe synthétique, z_0 est égal à $0,13h_c$ (Tanner et Pelton, 1960 ; Stanhill, 1969 ; cité par Raupach, 1991). La loi logarithmique est ajustée aux profils de vitesse en termes de variables adimensionnées u^+ et z^+ . La Figure II-16-a, la Figure II-16-b et la Figure II-16-c présentent les profils des vitesses adimensionnées $(u + \Delta u)^+$ en fonction de la position verticale adimensionnée $(z + d)^+$, avec $\Delta u^+ = 1/\kappa \ln z_0^+ + C$ (Schlichting, 1968).

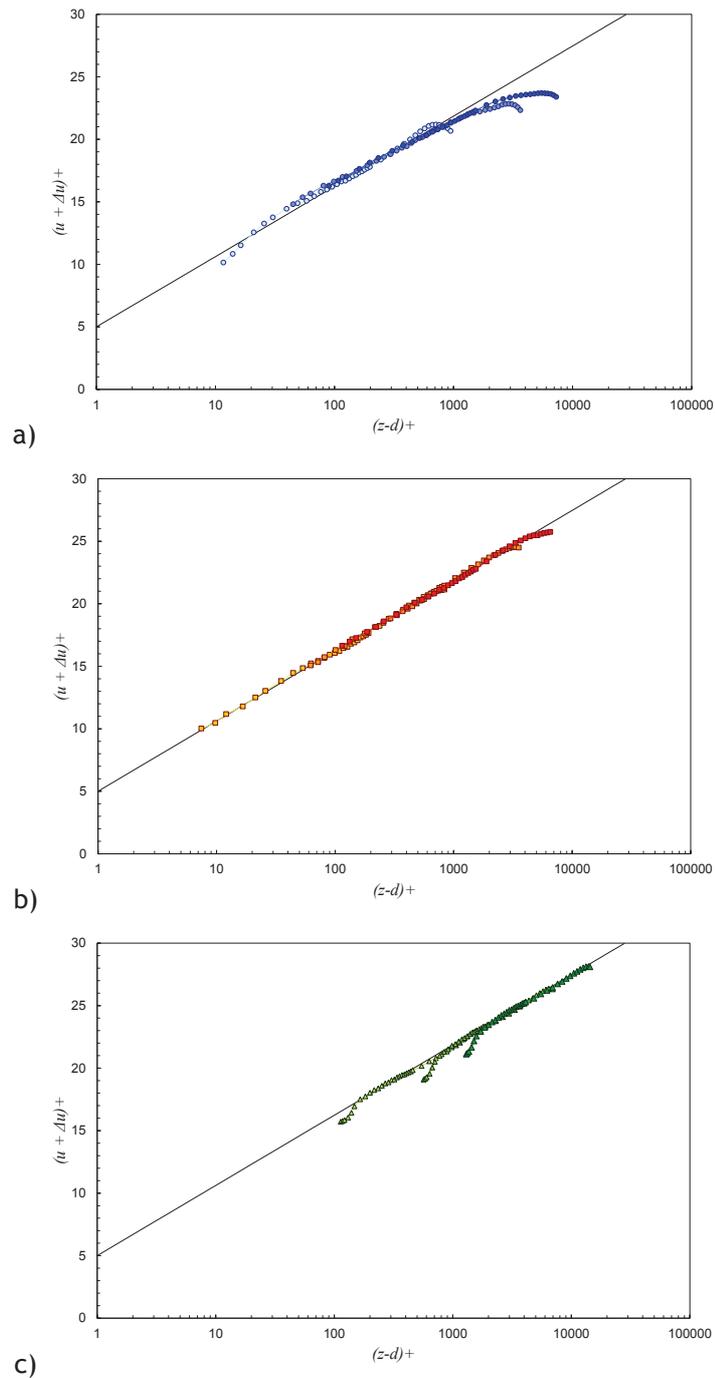


Figure II-16 : représentation des profils verticaux de vitesses $(u + \Delta u)^+ = f((z + d)^+)$ au fetch $x = 5,1$ m pour les trois surfaces et trois vitesses d'écoulement.

- a) verre classique : \circ $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, \bullet $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, \bullet $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;
b) enduit de façade : \square $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, \square $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, \square $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;
c) herbe synthétique : \triangle $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, \triangle $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, \triangle $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;
— loi logarithmique de paroi lisse (Équation II-8)

La Figure II-16 est représentative des fetchs $x = 1,1$ et $6,9$ m. Les couches limites développées présentent des régions de recouvrement en loi logarithmique ($z^+ > 70$) aux trois fetchs indiquant que les conditions de turbulence y sont systématiquement pleinement développées. Associés à ces profils, les valeurs des décalages de vitesse Δu^+ montrent les différents régimes d'écoulement générés par chaque surface et chaque u_{ref} (Krogstad et Antonia, 1999).

Toutes les valeurs de u_* , z_0 , d et hauteur de couche limite δ extraites des profils expérimentaux sont présentées dans le Tableau II-4. Les vitesses de dépôt sec moyennes pour chaque fetch correspondant aux données de turbulence sont aussi données dans ce tableau. Les vitesses de frottement estimées sont légèrement décroissantes pour des fetchs croissants. Cette variation est représentative d'une contrainte pariétale τ_p décroissante, ce qui est cohérent avec un développement de couche limite turbulente (Antonia et Luxton, 1971).

Les intensités de turbulence sont calculées sur u et w avec l'Équation II-5-a et l'Équation II-5-c. La Figure II-17 présente les profils verticaux des intensités de turbulence I sur w au fetch $x = 5,1$ m.

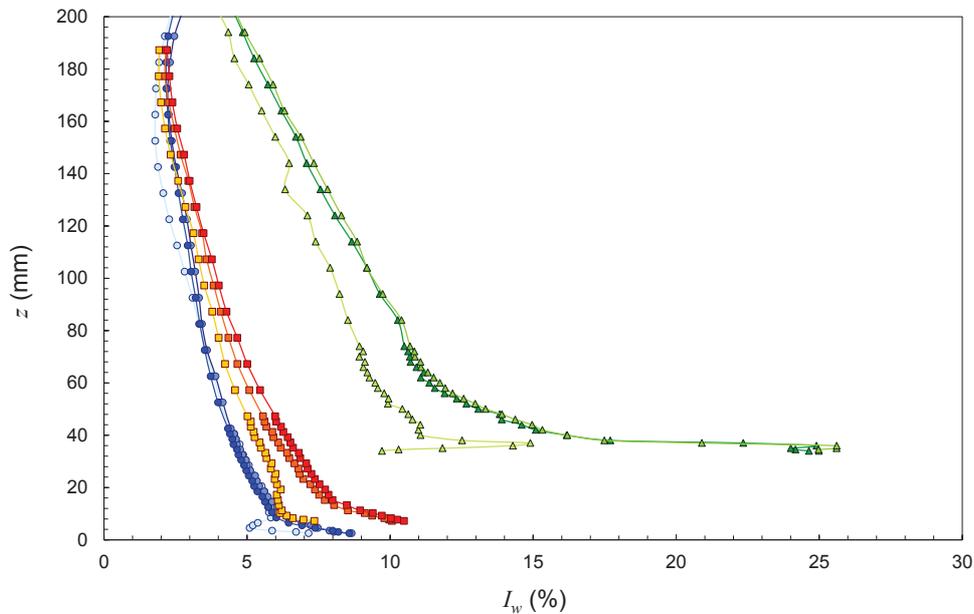


Figure II-17 : profils verticaux des intensités de turbulences sur w au fetch $x = 5,1$ m pour les trois surfaces et trois vitesses d'écoulement.

Verre classique : $\circ u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, $\bullet u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, $\bullet u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;
 enduit de façade : $\square u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, $\square u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, $\square u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;
 herbe synthétique : $\triangle u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, $\triangle u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, $\triangle u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$.

Tableau II-4 : données de turbulences et vitesses de dépôt pour chaque surface, chaque vitesse d'écoulement et chaque fetch.

u_{ref} (m s ⁻¹)	Fetch x (m)	Verre conventionnel					Enduit de façade					Herbe synthétique						
		V_d (x 10 ⁻⁵ m s ⁻¹)	u^* (m s ⁻¹)	z_0 (x 10 ⁻² mm)	I_{umax} (%)	I_{wmax} (%)	V_d (x 10 ⁻⁵ m s ⁻¹)	u^* (m s ⁻¹)	z_0 (mm)	d (mm)	I_{umax} (%)	I_{wmax} (%)	V_d (x 10 ⁻⁴ m s ⁻¹)	u^* (m s ⁻¹)	z_0 (mm)	d (mm)	I_{umax} (%)	I_{wmax} (%)
	1,1	1,7	—	—	—	—	3,1	—	—	—	—	—	3,3	0,17	4,4	23,9	38,3	18,7
1,3	5,1	1,2	0,06	8,5	25,4	7,2	1,9	0,07	0,14	5,6	25,8	7,4	2,6	0,13	4,4	20,9	33,5	14,9
	6,9	1,1	0,06	8,7	24,7	7,5	1,8	0,07	0,14	4,5	26,8	7,0	2,6	0,13	4,4	16,1	35,3	16,6
	1,1	2,8	0,26	9,9	23,6	10,1	4,9	0,33	0,14	6,4	21,2	11,0	7,0	0,67	4,4	24,0	44,7	23,7
5,0	5,1	1,4	0,23	4,2	21,2	8,7	4,3	0,29	0,14	4,0	24,3	10,1	5,8	0,52	4,4	17,6	47,6	24,9
	6,9	2,2	0,20	1,9	21,2	8,1	5,2	0,27	0,14	2,5	24,0	10,2	3,9	0,56	4,4	13,1	42,5	23,4
	1,1	5,6	0,50	5,9	19,1	9,3	7,6	0,66	0,14	5,1	22,8	11,7	13,1	1,37	4,4	24,0	46,6	26,0
9,9	5,1	2,9	0,46	3,1	18,7	8,6	6,5	0,54	0,14	4,0	23,5	10,5	12,1	1,06	4,4	15,6	44,7	25,6
	6,9	6,3	0,38	1,5	16,9	8,9	7,4	0,54	0,14	2,8	25,4	11,2	12,1	1,05	4,4	9,0	44,6	24,8

Le décalage en z est dû à la prise en compte de la hauteur des rugosités des surfaces d'enduit de façade et d'herbe synthétique. Cette figure est représentative de l'ensemble des profils d'intensité de turbulence sur u et w . Un maximum d'intensité de turbulence est systématiquement observé à proximité immédiate de la surface. Appelés $I_{u_{max}}$ et $I_{w_{max}}$, ces maximum sont reportés dans le Tableau II-4. Pour les mêmes vitesses d'écoulement u_{ref} , les intensités de turbulence sont plus fortes sur l'herbe synthétique en comparaison de l'enduit de façade et plus forte sur l'enduit de façade que sur le verre classique. $I_{u_{max}}$ est toujours supérieur à $I_{w_{max}}$. Ces observations sont cohérentes avec celles d'Antonia et Luxton (1971) pour des couches limites au-dessus de surfaces rugueuses et lisses. Il peut être remarqué que, contrairement aux vitesses de frottement, les intensités de turbulence maximum ne semblent pas varier avec le fetch pour une vitesse d'écoulement et une surface donnée.

II.3.1.3 Discussions

Les vitesses de dépôt sec moyennes calculées pour chaque type de surface et chaque vitesse de référence u_{ref} , prenant en compte l'ensemble des fetchs (Tableau II-3), sont comparées sur la Figure II-18 aux données de la littérature issues d'expérimentations en soufflerie. Les diamètres représentés en abscisse peuvent être de natures différentes selon les auteurs (diamètre aérodynamiques, de Stokes...) et sont donc donnés à titre d'information. Cette figure met en évidence le manque de données pour des diamètres inférieurs à $0,6 \mu\text{m}$. Pour un diamètre fixé, la dispersion des résultats est grande, mais l'évolution des vitesses de dépôt sec mesurées sur le verre et l'herbe synthétique est cohérente avec celles de la littérature pour les mêmes types de surface.

V_d sur le verre vertical est inférieure à celle obtenue par Liu et Agarwal (1974) pour des particules microniques dans un écoulement turbulent. Cependant, cela semble cohérent avec le minimum atteint par la courbe en « V » de la vitesse de dépôt dans cette gamme de diamètre du fait de la faible efficacité des phénomènes turbulents de dépôt (cf. paragraphe 0). Les données acquises sur l'herbe synthétique sont plus fortes mais du même ordre de grandeur que celles acquises par Chamberlain (1967). L'évolution des vitesses de dépôt sur l'herbe en fonction du diamètre montre que les phénomènes turbulents d'impaction et d'interception ont une réelle influence sur les dépôts de particules de diamètres inférieurs à $1 \mu\text{m}$ sur des surfaces rugueuses. Par contre, cette observation pour les particules submicroniques va à l'encontre de la modélisation de Zhang *et al.* (2001) qui modélise le dépôt sec sur l'herbe surtout par dépôt brownien et sédimentation (Figure I-19). Les vitesses de dépôt sur l'enduit de façade sont plus faibles que celles rencontrées dans la littérature, probablement du fait de la géométrie des rugosités qui sont différentes d'une étude à une autre. Toprak *et al.* (1997) et Pesava *et al.* (1999) ne donnent pas d'informations sur la géométrie de leur rugosité, par contre Lai *et al.* (2001) utilisent des plaques recouvertes de géométries carrées qui peuvent favoriser le dépôt par turbulence en comparaison avec l'enduit de façade utilisé dans cette étude qui présente peut-être moins d'aspérités. L'importance de V_s par rapport à V_d pour l'enduit de façade, observée précédemment, confirmerait cette hypothèse.

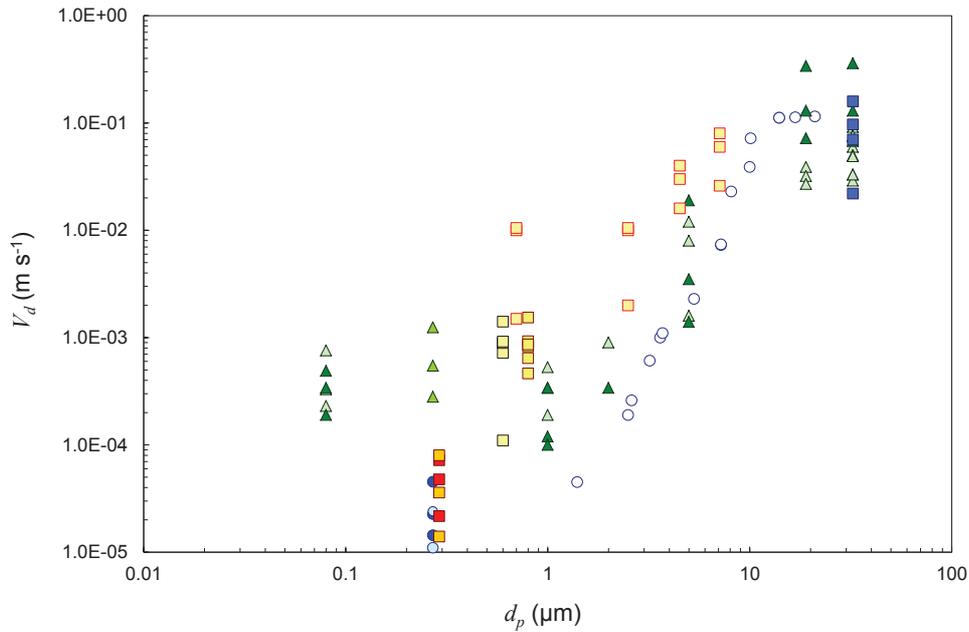


Figure II-18 : comparaison des valeurs de V_d de cette étude et des données la littérature issues d'expérimentations en soufflerie.

Cette étude : verre classique : ○ vertical, ● horizontal ; enduit de façade : □ vertical, ■ horizontal ; herbe synthétique horizontale : ▲ .

(valeurs obtenues sur surfaces non chauffées et moyennées pour chaque u_{ref})

Surfaces lisses : ○ verre, Liu et Agarwal (1974).

Surfaces rugueuses : ■ verre, Chamberlain (1967) ; □ enduit, Toprak *et al.* (1997) ; □ enduit, Pesava *et al.* (1999) ; □ géométrie rugueuse, Lai *et al.* (2001).

Herbe horizontale, Chamberlain (1967) : ▲ réelle (ray-grass d'Italie), ▲ artificielle collante.

Les vitesses de dépôt peuvent être comparées aux modèles de Lai et Nazaroff (2000) et de Zhang *et al.* (2001), en fonction de la vitesse de frottement. La Figure II-19 présente cette comparaison. Les barres d'incertitudes sont les écart-types des mesures effectuées à un fetch donné. Pour les modèles, V_d est une vitesse de dépôt calculée pour l'aérosol polydispersé de fluorescéine utilisé. Elle est égale à la somme des V_d calculées pour chaque classe granulométrique i pondérée par le pourcentage de masse de la classe i m_{ni} , selon la même méthode que celle utilisée pour le calcul de la vitesse de sédimentation dans le paragraphe II.2.2.2. Dans le modèle de Zhang *et al.* (2001), la résistance aérodynamique R_a est prise égale à zéro car la concentration en particules est mesurée au niveau du sommet des brins d'herbe et paraît homogène sur toute la section de la veine d'air selon les mesures faites aux différents points de prélèvements. Les vitesses de frottement associées aux V_d des surfaces verticales sont prises égales à celles associées aux V_d des surfaces horizontales au fetch 5,1 m.

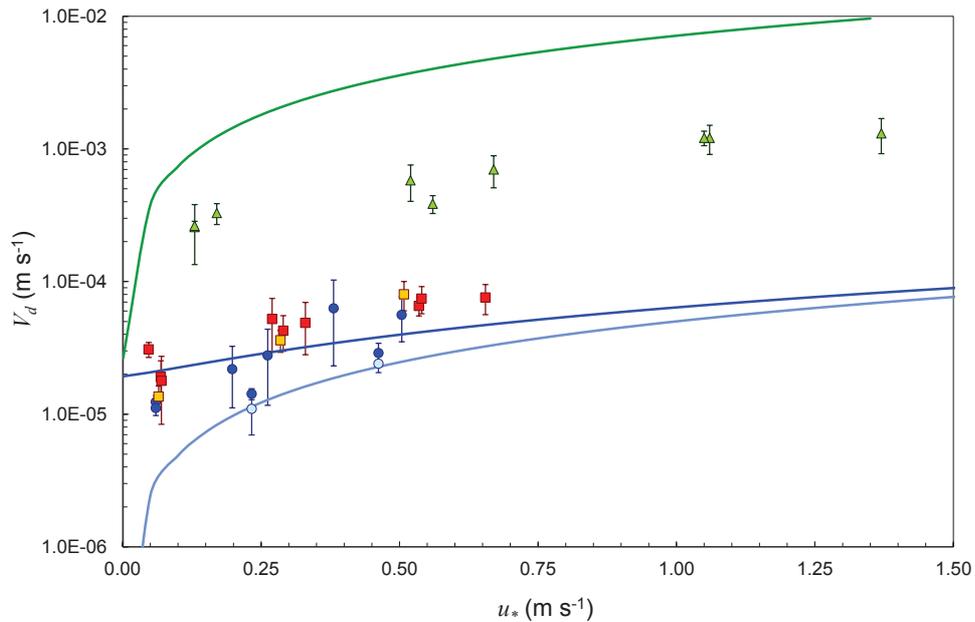


Figure II-19 : comparaison des modèles de Lai et Nazaroff (2000) et de Zhang *et al.* (2001) aux données de l'étude en fonction de u_* .

Cette étude : verre classique : ○ vertical, ● horizontal ; enduit de façade : □ vertical, ■ horizontal ; herbe synthétique horizontale : ▲ .

Lai et Nazaroff (2000) : — paroi horizontale, — paroi verticale ; Zhang *et al.* (2001) : — herbe.

Compte tenu des incertitudes de mesure, le modèle de Lai et Nazaroff (2000) semble estimer correctement les vitesses de dépôt sur les surfaces de verre horizontales et verticales. Avec une erreur relative moyenne de 58 % entre les V_d mesurées et calculées, il prédit mieux les vitesses de dépôt pour des u_* supérieures à $0,2 \text{ m s}^{-1}$. Pour les valeurs inférieures, il surestime le dépôt (erreur relative moyenne de 72 %) dans le cas de surfaces horizontales. Par contre, le modèle de Zhang *et al.* (2001) surestime systématiquement les vitesses de dépôt sur l'herbe, en moyenne d'un facteur 6. Alors qu'il néglige les phénomènes turbulents de dépôt (*cf.* paragraphe I.2.5.3.1), il surestime vraisemblablement le dépôt par diffusion brownienne. Une reconsidération de l'importance des différents processus permettrait probablement d'améliorer les prédictions de ce modèle sur l'herbe.

Dans cette gamme de taille de particules, et étant donné que les phénomènes de dépôt turbulent (interception et impaction) sont dépendants de la dynamique de l'écoulement, V_d est fortement corrélée à u_* . La Figure II-20 présente les valeurs moyennes du rapport $(V_d - V_s)/u_*$ pour chaque surface horizontale et du rapport V_d/u_* pour chaque surface verticale (la vitesse de sédimentation V_s , issue d'un phénomène non turbulent et indépendante de u_* , doit être soustraite de V_d pour les surfaces horizontales).

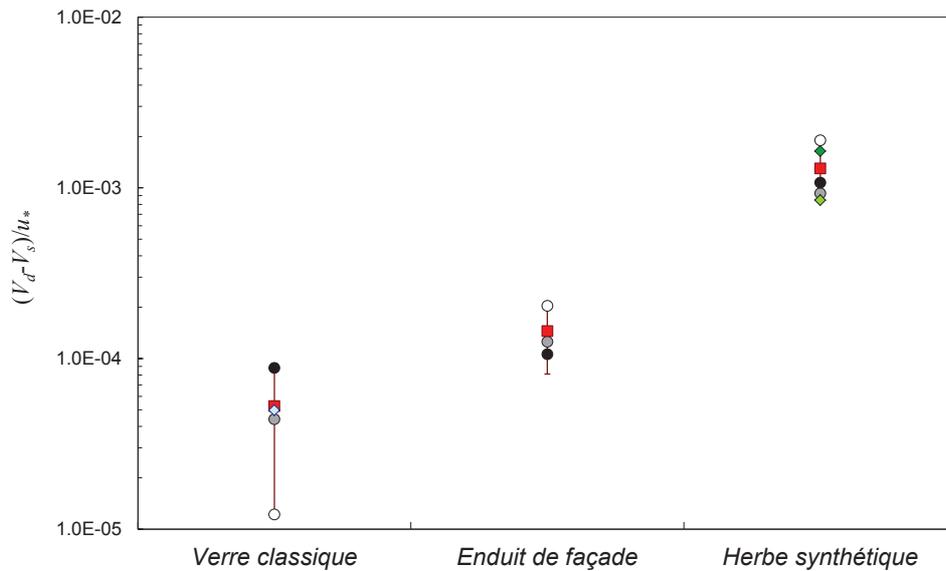


Figure II-20 : rapports $(V_d - V_s)/u_*$ de cette étude comparés à des données de la littérature.

Cette étude : ○ $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, ● $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, ● $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$, ■ Moyenne ;
 ◆ Lai and Nazaroff (2000) ; Damay (2010) : ◆ $d_p = 0,202 \text{ }\mu\text{m}$, ◆ $d_p = 0,316 \text{ }\mu\text{m}$.

Les barres d'incertitudes représentent les écart-types des rapports de V_d/u_* calculés pour chaque surface donnée. Dans de récentes études en environnements naturels, et pour des conditions de stabilité atmosphérique neutre, il a été montré que ce rapport est constant et égal à $2 \cdot 10^{-3}$ pour des aérosols submicroniques (Damay, 2010 ; Donateo, 2010). Dans notre cas, ce rapport est en moyenne égal à $(1,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$ pour l'herbe synthétique, ce qui semble concordant avec les valeurs de Damay (2010 ; $0,8 \cdot 10^{-3}$ et $1,6 \cdot 10^{-3}$ pour respectivement $d_p = 0,20$ et $0,32 \text{ }\mu\text{m}$). Par contre, les rapports moyens calculés sont dépendants de la surface considérée, $(5,3 \pm 4,1) \cdot 10^{-5}$ pour le verre classique et $(1,5 \pm 0,6) \cdot 10^{-4}$ pour l'enduit de façade, donc probablement dépendants des régimes d'écoulement (régime lisse ou rugueux) et de l'épaisseur de la sous-couche visqueuse de la couche limite. En effet, l'épaisseur de la sous-couche visqueuse, dans laquelle les transferts sont principalement dus à la diffusion, est dépendante de ce régime d'écoulement. Pour le dépôt d'un aérosol submicronique, le rapport $(V_d - V_s)/u_*$ pourrait être influencé par les contributions respectives des phénomènes de diffusion brownienne et d'interception/impaction. Dans ce cas, il diminue lorsque la diffusion brownienne devient prépondérante (sous-couche visqueuse épaisse) ou augmente jusqu'à une valeur limite ($2 \text{ à } 3 \cdot 10^{-3}$) lorsque les phénomènes turbulents deviennent prépondérants.

Enfin, Dai *et al.* (2001) relèvent une augmentation des flux de dépôt sec avec l'intensité de turbulence pour des particules microniques et une surface lisse en soufflerie. La Figure II-21 présente les vitesses de dépôt de notre étude en fonction des intensités de turbulence maximum sur w .

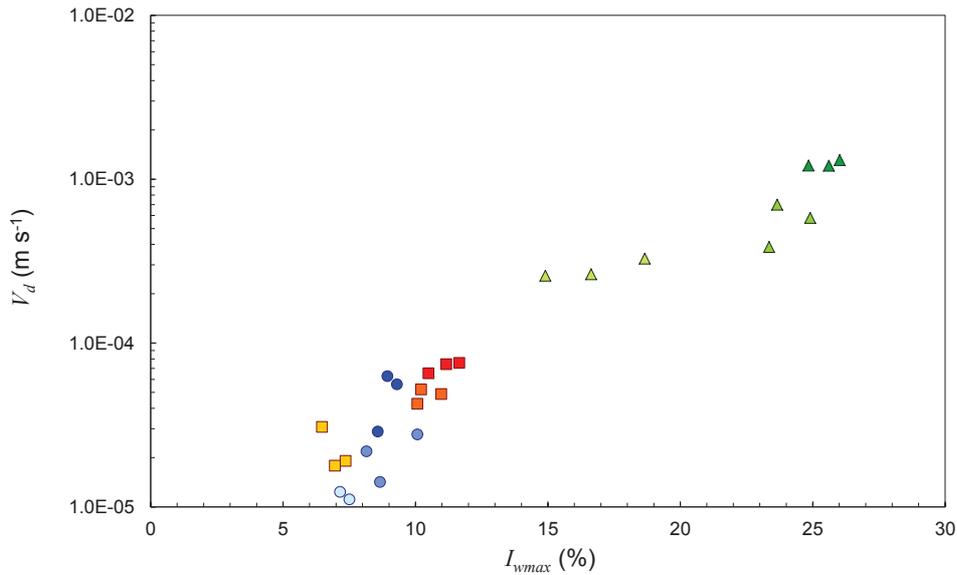


Figure II-21 : V_d en fonction du maximum de l'intensité de turbulence sur w .

Verre classique : \circ $u_{ref} = 1,3 m s^{-1}$, \circ $u_{ref} = 5,0 m s^{-1}$, \bullet $u_{ref} = 9,9 m s^{-1}$;
 enduit de façade : \square $u_{ref} = 1,3 m s^{-1}$, \square $u_{ref} = 5,0 m s^{-1}$, \square $u_{ref} = 9,9 m s^{-1}$;
 herbe synthétique : \triangle $u_{ref} = 1,3 m s^{-1}$, \triangle $u_{ref} = 5,0 m s^{-1}$, \triangle $u_{ref} = 9,9 m s^{-1}$.

Le choix de représentation de V_d en fonction de l'intensité de turbulence de la vitesse verticale est fait car w est la composante prise en considération dans le flux vertical de dépôt turbulent. Cette représentation originale qui n'est pas encore rencontrée dans la littérature, montre une nette dépendance de la vitesse de dépôt sec avec l'intensité de la turbulence à proximité immédiate de la paroi. Ceci est en accord avec l'observation de Dai *et al.* (2001) sur l'augmentation des flux de dépôt avec l'intensité de la turbulence. Cette figure suggère même que cette relation soit indépendante du type de surface considérée.

Même si la corrélation de V_d à I_w mise en évidence par la Figure II-21 peut sembler intéressante, elle devra être étendue à d'autres surfaces rugueuses et d'autres vitesses d'écoulement pour être validée ou invalidée. Actuellement la vitesse de frottement u_* est le paramètre prioritairement associé à la vitesse de dépôt, quantifié dans les études expérimentales et utilisé dans les modèles, car il est le paramètre représentatif des conditions de turbulence en proche paroi.

II.3.2 DEPOT SUR PAROIS HORIZONTALES CHAUFFEES

II.3.2.1 Concentrations, flux de dépôt sec et vitesses de dépôt

Lors des expérimentations sur surfaces horizontales chauffées, les prélèvements sur filtres sont réalisés en deux points justes derrière les éprouvettes et le plateau chauffant, un au centre de la section de la veine et l'autre à 10 mm au-dessus de la surface. De nouveau, les concentrations ne montrent pas de différences significatives entre les deux points de prélèvement pour une même expérimentation, avec un écart relatif médian de 5,7 % entre les deux concentrations sur l'ensemble des essais, ce qui tend à

montrer que le mélange de l'aérosol de fluorescéine est homogène sur la section de la veine grâce à la recirculation d'air.

Les flux de dépôt sont mesurés sur quatre éprouvettes dans la rangée centrale du plateau chauffant (dans le sens de la longueur) aux fetchs $x = 4,4, 4,6, 4,8$ et $5,0$ m. Etant donné l'hétérogénéité de la température de surface, les flux de dépôt peuvent varier sensiblement d'une éprouvette à une autre. Les écarts de températures associés à ces flux de dépôt sont aussi variables selon la position de l'éprouvette sur le plateau et hétérogènes sur la surface de chaque éprouvette. Des $\Delta T_{surface-air}$ moyens sont calculés pour chaque éprouvette selon la méthode présentée en annexe A.

Les vitesses de dépôt de chaque éprouvette sont calculées à partir de leur flux de dépôt sec et de la moyenne des deux concentrations en particules dans l'air de la veine (mesurées simultanément). Les vitesses de dépôt sec sont calculées pour les mêmes vitesses d'écoulement que précédemment ($u_{ref} = 1,3, 5,0$ et $9,9 \text{ m s}^{-1}$) et pour quatre écarts de températures entre la surface et l'air de la veine ($\Delta T_{surface-air} = 2, 5, 10$ et 30 K).

Les vitesses de dépôt mesurées sur chaque éprouvette de verre et d'enduit de façade sont présentées sur la Figure II-22 en fonction des écarts de températures associés. Les vitesses de dépôt pour $\Delta T_{surface-air} = 0 \text{ K}$ sont issues des résultats des expérimentations sur les surfaces horizontales non-chauffées.

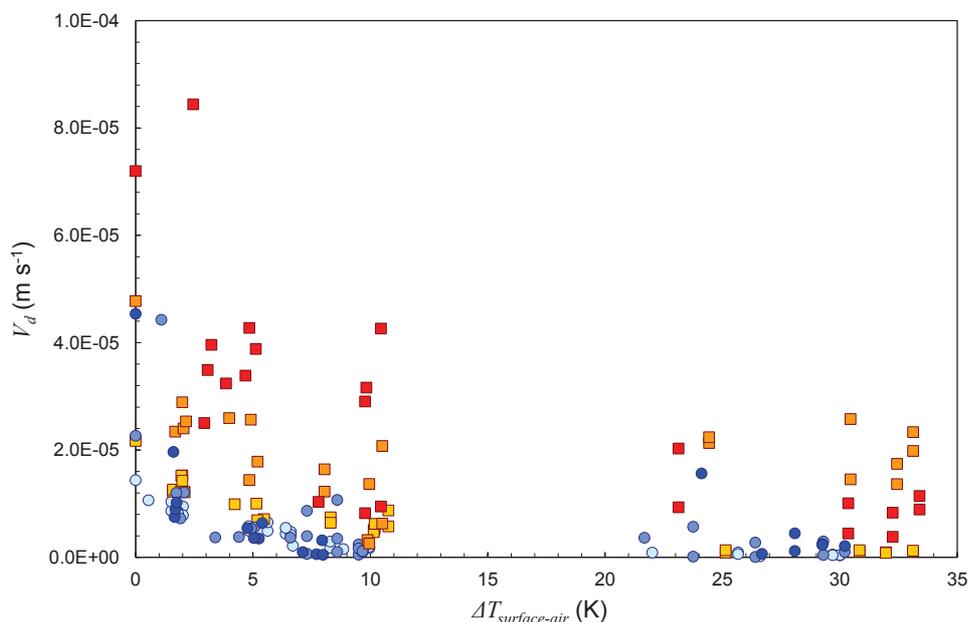


Figure II-22 : V_d en fonction de $\Delta T_{surface-air}$ pour chaque éprouvette de verre et d'enduit, et chaque u_{ref} .

Verre : $\circ u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, $\circ u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, $\bullet u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;
enduit de façade : $\square u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, $\square u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, $\square u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$.

Sur cette figure, les points expérimentaux sont assez dispersés, à la fois pour un même $\Delta T_{surface-air}$, et surtout pour l'enduit de façade. Cette dispersion peut être attribuée aux incertitudes de mesure sur V_d , aux incertitudes de mesure sur les températures des surfaces et de l'air, et aux incertitudes de calcul de $\Delta T_{surface-air}$.

De plus, les valeurs réelles des $\Delta T_{surface-air}$ des points expérimentaux sont dispersées par rapport aux écarts de températures de référence (2, 5, 10 et 30 K). Cette dispersion est expliquée par la distribution hétérogène des températures de paroi sur l'ensemble de la surface du plateau chauffant, donc par la distribution hétérogène de la température sur la surface de chaque éprouvette (cf. paragraphe II.2.3.2). En effet, les distributions de température de surface sont calculées pour chaque éprouvette sur le plateau avec la méthode présentée en annexe A. Ensuite, la température moyenne de chaque éprouvette est calculée à partir de ces distributions et un $\Delta T_{surface-air}$, souvent différent de l'écart de température théoriquement voulu, peut être associé à une vitesse de dépôt pour chaque éprouvette. Pour une expérimentation donnée, les $\Delta T_{surface-air}$ réels diffèrent donc légèrement entre chaque éprouvette, ce qui explique la dispersion des points de la Figure II-22.

Pour l'enduit de façade, les rugosités peuvent être légèrement différentes d'une éprouvette à une autre et apporter une incertitude supplémentaire. Les éprouvettes d'enduit sont faites « à la main » avec un produit commercial qui est un mélange de ciment blanc, de chaux et de sable grossier leur donnant leur aspect rugueux. Les rugosités des éprouvettes d'enduit sont donc irrégulières sur chaque éprouvette et légèrement différentes d'une éprouvette à une autre, d'une part en densité à cause de leur fabrication manuelle, d'autre part par leurs formes dues aux grains de sables.

Pour faciliter l'interprétation des résultats, des valeurs moyennes de V_d sont calculées pour le verre et l'enduit de façade, pour chaque $\Delta T_{surface-air}$ de référence (2, 5, 10 et 30 K) et chaque u_{ref} . Des $\Delta T_{surface-air}$ réels moyens sont calculés à partir des températures surfaciques moyennes des éprouvettes pour être associés aux V_d . Ces données sont présentées dans le Tableau II-6 (p. 107) et sur la Figure II-23.

Les incertitudes reportées pour V_d et $\Delta T_{surface-air}$ sont les écart-types des mesures. La Figure II-23 montre que les vitesses de dépôt diminuent pour un écart croissant de température et qu'elles diminuent déjà fortement pour $\Delta T_{surface-air} = 2$ K, quelles que soient la surface et la vitesse d'écoulement. Pour une vitesse d'écoulement donnée, la diminution des vitesses de dépôt sur des surfaces chauffées (par rapport à celles des surfaces non chauffées) est le fait unique de la thermophorèse car l'écart de température surface-air est le seul paramètre qui varie. Cependant, la Figure II-23 montre que l'influence du chauffage des surfaces est différente pour le verre et l'enduit de façade : pour un même écart de température, les vitesses de dépôt ont tendance à être indépendantes de la vitesse du vent pour le verre et dépendantes de la vitesse du vent pour l'enduit de façade.

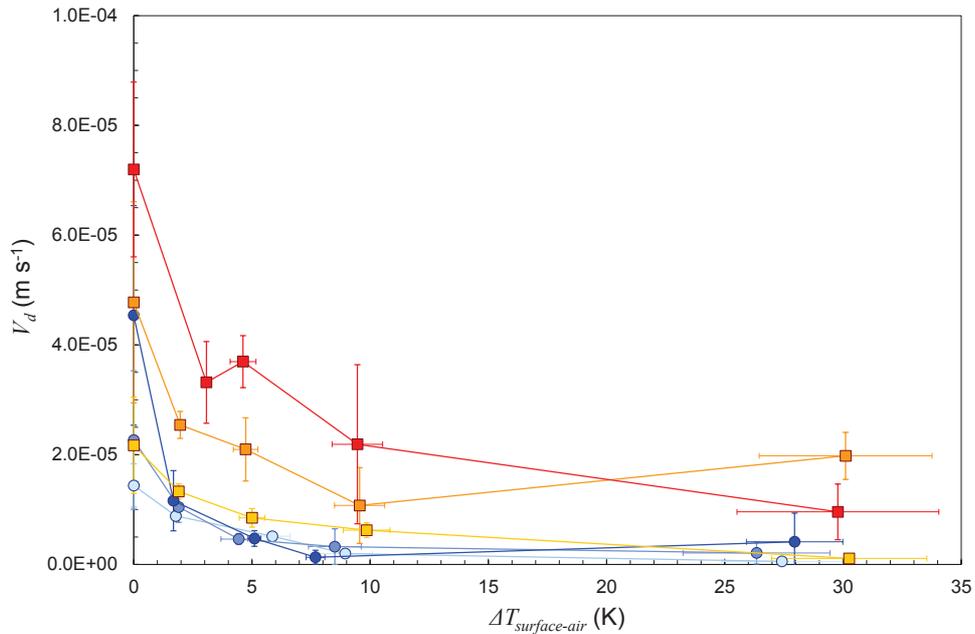


Figure II-23 : V_d et $\Delta T_{surface-air}$ moyens pour le verre classique et l'enduit de façade, et pour chaque u_{ref} .

Verre : \circ $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, \circ $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, \bullet $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;

enduit de façade : \square $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, \square $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, \square $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$.

Pour le verre et l'enduit de façade, les écarts de V_d observés peuvent aller d'un facteur 2 (pour $\Delta T_{surface-air} = 2 \text{ K}$ et $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$) à un facteur 35 (pour $\Delta T_{surface-air} = 8 \text{ K}$ et $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$). Déjà, pour $\Delta T_{surface-air} = 2 \text{ K}$, et comparativement aux vitesses de dépôt sur des surfaces non chauffées, V_d diminue sur le verre d'un facteur 1,6, 2,2 et 3,9 pour respectivement $u_{ref} = 1,3$, 5,0 et 9,9 m s^{-1} , et sur l'enduit d'un facteur 1,6, 1,9 et 2,17 pour respectivement $u_{ref} = 1,3$, 5,0 et 9,9 m s^{-1} .

L'observation d'une diminution de V_d indépendante de u_{ref} dans le cas du verre chauffé est en accord avec les résultats de Woo *et al.* (2012) qui concluent que le dépôt des particules de diamètres compris entre 0,1 et 1 μm est fortement diminué dès 5 K d'écart entre une surface lisse chauffée et l'air, mais dans le cas d'un écoulement laminaire. Les ordres de grandeurs des vitesses de dépôt sur le verre pour de faibles écarts de température (2 - 5 K) et vitesses d'écoulement sont aussi en accord avec celles mesurées par Opiolka *et al.* (1994) et Bae *et al.* (1995) sur des surfaces lisses pour des particules submicroniques et le même type de conditions. Par contre pour l'enduit, V_d est dépendante à la fois de u_{ref} et $\Delta T_{surface-air}$. La Figure II-24 présente le rapport des vitesses de dépôt (V_d) pour chaque écart de température surface-air à la vitesse de dépôt sans chauffage (V_{d0}).

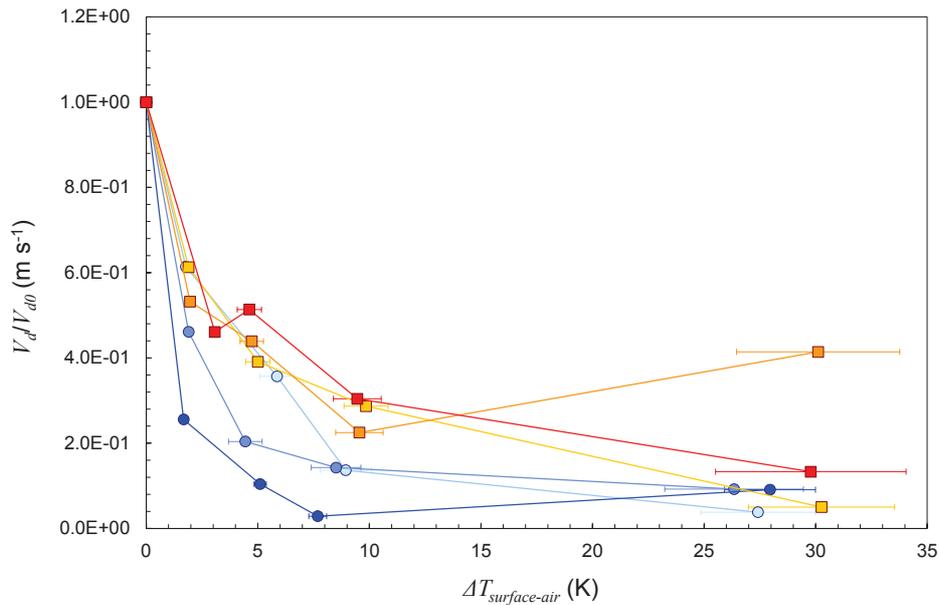


Figure II-24 : V_d/V_{d0} en fonction de $\Delta T_{surface-air}$ pour le verre et l'enduit de façade, et pour chaque u_{ref} . V_{d0} est la vitesse de dépôt pour $\Delta T_{surface-air} = 0$ K.

Verre : $\circ u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, $\square u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, $\bullet u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;
 enduit de façade : $\square u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, $\square u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, $\blacksquare u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$.

Selon cette figure, les rapports des vitesses de dépôt de l'enduit se regroupent assez bien pour chaque valeur de $\Delta T_{surface-air}$ fixée, sauf pour $\Delta T_{surface-air} = 30$ K. Ils sont décroissants pour des écarts de températures croissants. Les dépôts par interception et impaction sont donc diminués par la thermophorèse, tout en restant proportionnels à V_{d0} donc à u_{ref} . En d'autres termes, le rôle des rugosités de l'enduit est important et favorise le dépôt par interception et impaction, même lorsque la surface est chauffée, ce qui rend le dépôt toujours dépendant de la vitesse d'écoulement.

Par contre, pour le verre, la Figure II-24 est moins pertinente que la Figure II-23. Elle confirme que V_d n'est plus proportionnelle à u_{ref} , donc que l'interception et l'impaction contribuent très peu au dépôt sur une surface lisse chauffée (même faiblement chauffée). Par exemple, pour $\Delta T_{surface-air} = 2$ K, les vitesses de dépôt sont à la fois peu dépendantes de u_{ref} et très proches de la vitesse de sédimentation de l'aérosol de fluorescéine. Les dépôts dus à la diffusion brownienne et à la sédimentation sont ensuite décroissants pour des $\Delta T_{surface-air}$ croissants. Le dépôt sec pourrait donc être rapidement nul sur une surface lisse verticale en milieu urbain pour laquelle la sédimentation n'apporterait aucun dépôt.

II.3.2.2 Profils de températures

Des profils verticaux (selon z) de température de l'air T_{air} ($^{\circ}\text{C}$) sont mesurés au-dessus du verre et de l'enduit de façade pour chaque écart de température et vitesse d'écoulement (cf. paragraphe II.2.3.2). Ces profils sont présentés sur la Figure II-25-a et la Figure II-25-b.

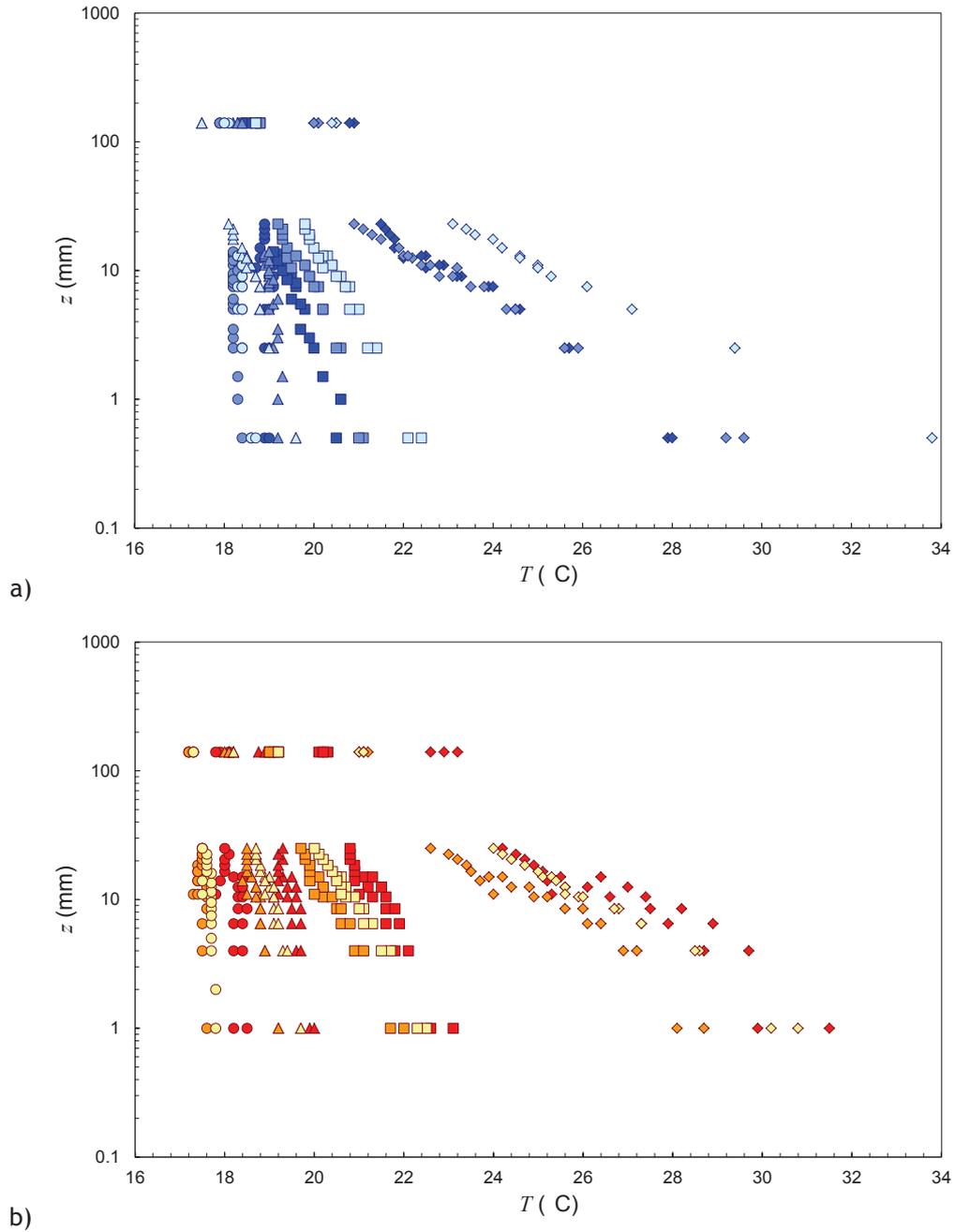


Figure II-25 : profils verticaux de températures mesurés au-dessus du verre classique (a) et de l'enduit de façade (b) pour les différents $\Delta T_{\text{surface-air}}$ et u_{ref} étudiés.

a) verre : $u_{\text{ref}} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$: \circ $\Delta T = 2 \text{ K}$, \triangle $\Delta T = 5 \text{ K}$, \square $\Delta T = 10 \text{ K}$, \diamond $\Delta T = 30 \text{ K}$;
 $u_{\text{ref}} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$: \bullet $\Delta T = 2 \text{ K}$, \blacktriangle $\Delta T = 5 \text{ K}$, \blacksquare $\Delta T = 10 \text{ K}$, \blacklozenge $\Delta T = 30 \text{ K}$;
 $u_{\text{ref}} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$: \bullet $\Delta T = 2 \text{ K}$, \blacktriangle $\Delta T = 5 \text{ K}$, \blacksquare $\Delta T = 10 \text{ K}$, \blacklozenge $\Delta T = 30 \text{ K}$.

b) enduit de façade : $u_{\text{ref}} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$: \circ $\Delta T = 2 \text{ K}$, \triangle $\Delta T = 5 \text{ K}$, \square $\Delta T = 10 \text{ K}$, \diamond $\Delta T = 30 \text{ K}$;
 $u_{\text{ref}} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$: \bullet $\Delta T = 2 \text{ K}$, \blacktriangle $\Delta T = 5 \text{ K}$, \blacksquare $\Delta T = 10 \text{ K}$, \blacklozenge $\Delta T = 30 \text{ K}$;
 $u_{\text{ref}} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$: \bullet $\Delta T = 2 \text{ K}$, \blacktriangle $\Delta T = 5 \text{ K}$, \blacksquare $\Delta T = 10 \text{ K}$, \blacklozenge $\Delta T = 30 \text{ K}$.

Les températures mesurées pour z inférieur à 30 mm l'ont été avec des thermocouples, celles en $z = 140$ mm avec une sonde PTU située au centre la veine. Ces profils de températures sont logarithmiques (l'axe des ordonnées est en échelle logarithmique). L'Équation II-15 (Kader, 1981) est utilisée pour déterminer l'échelle caractéristique des températures T_* . Cette équation est réécrite sous la forme de l'Équation II-19 pour être ajustée aux profils de températures mesurés.

$$\Delta T_{surface-air} = \alpha T_* \ln(z) + \left[\alpha T_* \ln\left(\frac{u_*}{\nu}\right) + \beta(Pr) \right] \quad \text{Équation II-19}$$

Dans cette équation, α est une constante égale à 2,12 et $\beta(Pr)$ est une fonction du nombre de Prandtl égale à 3,8 pour nos conditions expérimentales. Par exemple, la Figure II-26 présente un ajustement de l'équation logarithmique sur les profils de températures acquis sur le verre pour $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$.

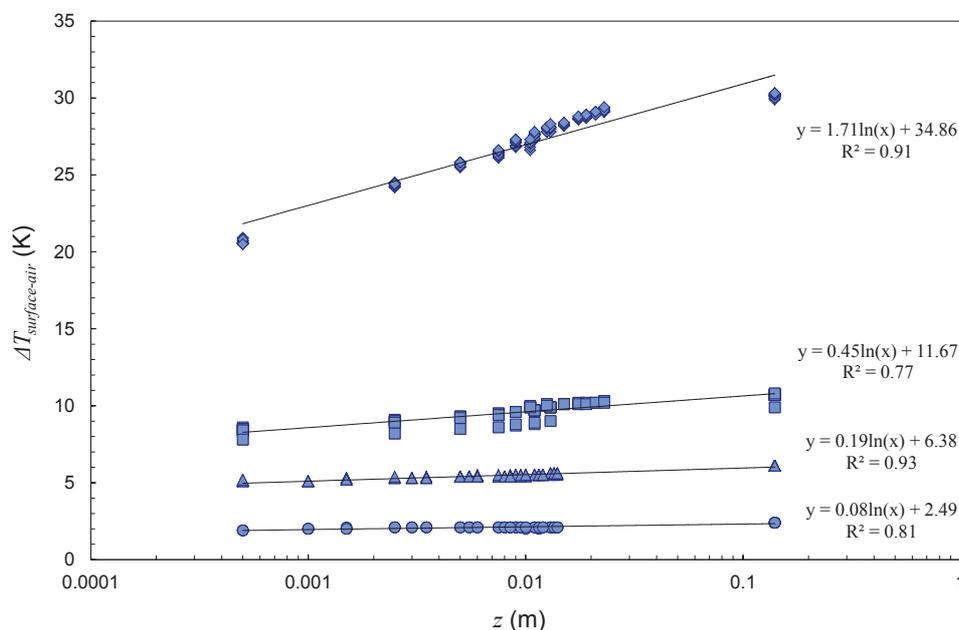


Figure II-26 : ajustement de la loi logarithmique de Kader (1981) sur les profils verticaux mesurés au-dessus du verre pour $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$.

● $\Delta T = 2 \text{ K}$, ▲ $\Delta T = 5 \text{ K}$, ■ $\Delta T = 10 \text{ K}$, ◆ $\Delta T = 30 \text{ K}$

Les ajustements logarithmiques montrent de bonnes corrélations avec les points expérimentaux. Par contre, la présence de u_* (paramètre déjà ajusté sur les points expérimentaux de vitesse donc accompagné d'incertitudes) dans le second membre contribue à une plus grande incertitude sur la valeur du T_* associé. Il est préférable d'utiliser le premier coefficient d'ajustement, associé au logarithme, pour déterminer les températures caractéristiques T_* .

L'Équation II-15 donnée par Kader (1981) qui est appropriée aux surfaces lisses est utilisée par défaut dans le cas de l'enduit de façade. Les valeurs estimées de T_* pour le verre et l'enduit de façade sont présentées dans le Tableau II-5.

Tableau II-5 : températures caractéristiques T_* estimées sur le verre et l'enduit de façade en fonction des vitesses d'écoulement d'air u_{ref} et des écarts de températures $\Delta T_{surface-air}$ moyens.

Surface	u_{ref} (m s ⁻¹)	$\Delta T_{surface-air}$ (K)	T_* (K)
Verre	1,3	2,2 ± 0,1	0,05
		6,8 ± 0,1	0,17
		10,8 ± 0,1	0,30
		30,5 ± 0,4	1,11
	5,0	2,4 ± 0,1	0,04
		6,1 ± 0,1	0,09
		10,6 ± 0,3	0,21
		30,1 ± 0,1	0,81
	9,9	1,8 ± 0,1	0,02
		5,6 ± 0,3	0,09
		10,3 ± 0,1	0,18
		28,0 ± 0,5	0,61
Enduit de façade	1,3	2,2 ± 0,1	0,05
		5,6 ± 0,1	0,16
		9,8 ± 0,1	0,32
		27,3 ± 0,5	0,89
	5,0	1,6 ± 0,1	0,05
		4,3 ± 0,2	0,12
		9,1 ± 0,3	0,31
		26,1 ± 0,7	0,85
	9,9	1,7 ± 0,3	0,02
		3,8 ± 0,1	0,11
		7,9 ± 0,2	0,28
		24,2 ± 0,9	0,93

Les températures caractéristiques sont présentées sur la Figure II-27 en fonction de l'écart de température surface-air. Elles semblent varier linéairement selon $\Delta T_{surface-air}$. La vitesse d'écoulement dans la veine ne semble pas avoir beaucoup d'influence sur les valeurs de T_* pour l'enduit de façade. Il semble par contre que, pour le verre, les températures caractéristiques soient plus élevées pour des vitesses d'écoulement faibles.

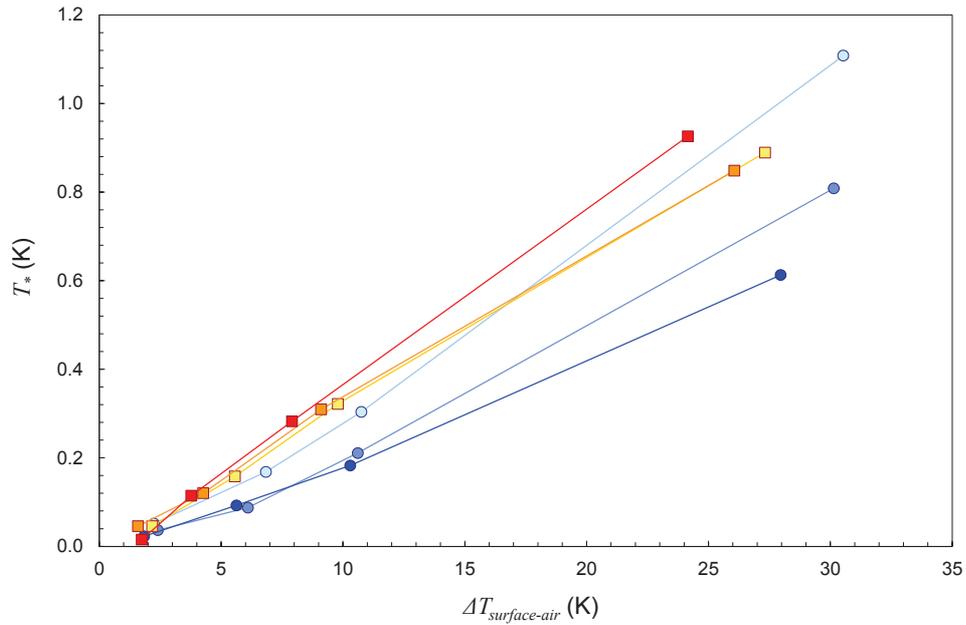


Figure II-27 : T_* en fonction de $\Delta T_{surface-air}$. Pour chaque u_{ref} au-dessus du verre et de l'enduit de façade.

Verre : $\circ u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, $\circ u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, $\bullet u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;
 enduit de façade : $\square u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, $\square u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, $\blacksquare u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$.

II.3.2.3 Discussions

Etant donné qu'en chauffant les surfaces horizontales de verre et d'enduit de façade, la thermophorèse est le seul phénomène s'ajoutant aux dépôts par sédimentation, interception, impaction et diffusion brownienne. Chaque phénomène s'additionne aux autres pour contribuer aux flux de particules aux parois. Comme chaque flux est égal à une vitesse multipliée par la concentration en particules, il est considéré que les vitesses de chaque phénomène s'additionnent pour contribuer à la vitesse de dépôt. Les vitesses de thermophorèse peuvent être calculées avec l'Équation II-20 pour chaque écart de température et chaque vitesse d'écoulement dans la veine.

$$V_{th,cal}(u_{ref}, \Delta T_{surface-air}) = V_{d,mes}(u_{ref}) - V_{d,mes}(u_{ref}, \Delta T_{surface-air}) \quad \text{Équation II-20}$$

$V_{th,cal}(u_{ref}, \Delta T_{surface-air})$ est la vitesse de thermophorèse théorique calculée à partir de $V_{d,mes}(u_{ref})$, la vitesse de dépôt sec de l'aérosol mesurée sur une surface non chauffée, et de $V_{d,mes}(u_{ref}, \Delta T_{surface-air})$, la vitesse de dépôt sec pour la même vitesse d'écoulement et un écart de température donné. La vitesse de thermophorèse est ici positive car les gradients de température rencontrés sont négatifs.

Ces vitesses de thermophorèse sont présentées dans le Tableau II-6 et sur la Figure II-28. Les vitesses de dépôt sur surfaces non-chauffées sont représentées sur la figure, en pointillés, à titre de comparaison. Ces vitesses de thermophorèse sont comprises entre $5,6 \cdot 10^{-6}$ et $6,2 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ pour cet aérosol de fluorescéine. Donc pour des particules submicroniques, la vitesse de thermophorèse peut facilement être de l'ordre de grandeur de la vitesse de sédimentation, voire de l'ordre de grandeur de la vitesse de dépôt mesurée pour une même vitesse d'écoulement mais sans chauffage de la surface.

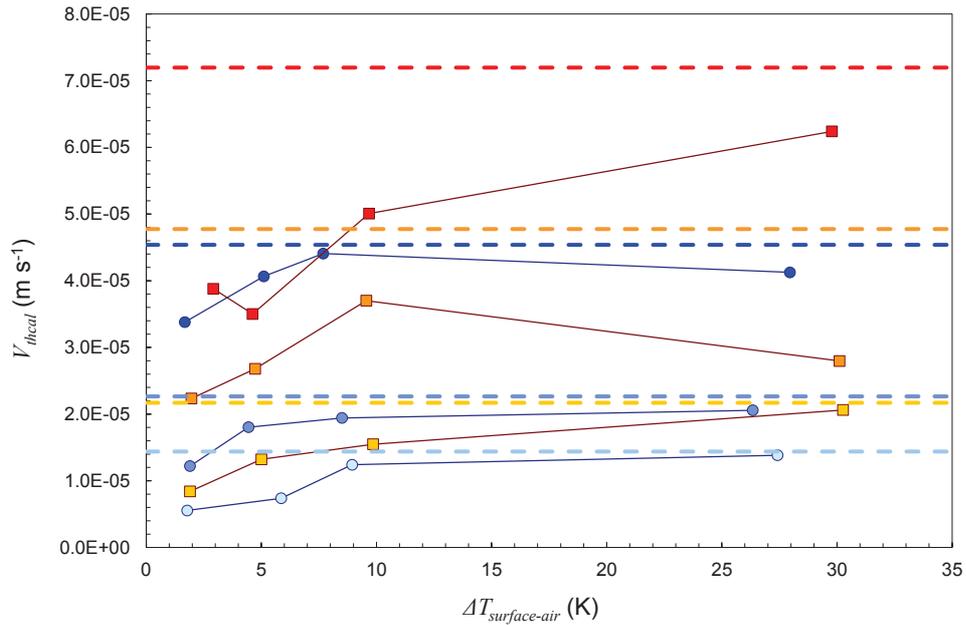


Figure II-28 : V_{thcal} en fonction de $\Delta T_{surface-air}$ pour chaque u_{ref} sur le verre et l'enduit de façade.

Verre : \circ $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, \circ $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, \bullet $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;
 $\Delta T_{surface-air} = 0 \text{ K}$: $---$ $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, $---$ $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, $---$ $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;
enduit de façade : \square $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, \square $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, \square $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;
 $\Delta T_{surface-air} = 0 \text{ K}$: $---$ $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, $---$ $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, $---$ $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$.

Cette figure montre que sur le verre, les vitesses de thermophorèse calculées sont très proches des vitesses de dépôt sur surfaces non-chauffées dès $\Delta T_{surface-air} = 10 \text{ K}$, quelle que soit la vitesse d'écoulement. Pour l'enduit à $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, la vitesse de thermophorèse est très proche de la vitesse de dépôt sec sur surface non-chauffée lorsque $\Delta T_{surface-air} = 30 \text{ K}$. Par contre pour l'enduit de façade et pour $u_{ref} = 5,0$ et $9,9 \text{ m s}^{-1}$, la vitesse de thermophorèse est nettement inférieure à la vitesse de dépôt sur surface non-chauffée.

Les vitesses de thermophorèse calculées avec cette méthode sont représentatives d'une force de thermophorèse appliquée aux particules qui varie pendant leur déplacement vertical près de la paroi. En effet, les profils de températures sont logarithmiques (entre la surface ($z = 0$) et la position z où la température devient égale à la température moyenne de l'écoulement), donc le gradient de température n'est pas constant sur la verticale.

Tableau II-6 : V_d moyennes, V_{thexp} moyennes et $\overline{\nabla T}$ calculés pour chaque u_{ref} et chaque $\Delta T_{surface-air}$ moyen pour le verre et l'enduit de façade.

Surface	u_{ref} (m s ⁻¹)	$\Delta T_{surface-air}$ (K)	V_d (m s ⁻¹)	V_{thexp} (m s ⁻¹)	$\overline{\nabla T}$ (K m ⁻¹)
Verre	1,3	0	$1,4 \pm 0,4 \cdot 10^{-5}$	—	—
		$1,8 \pm 0,2$	$8,8 \pm 0,9 \cdot 10^{-6}$	$5,6 \cdot 10^{-6}$	-326,2
		$5,9 \pm 0,8$	$5,1 \pm 0,7 \cdot 10^{-6}$	$7,4 \cdot 10^{-6}$	-432,3
		$8,9 \pm 1,2$	$2,0 \pm 0,4 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	-731,0
		$27,4 \pm 2,6$	$0,5 \pm 0,3 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	-819,3
	5,0	0	$2,3 \pm 1,3 \cdot 10^{-5}$	—	—
		$1,9 \pm 0,2$	$1,0 \pm 0,3 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	-717,1
		$4,4 \pm 0,8$	$4,6 \pm 1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	-1058,9
		$8,5 \pm 1,1$	$3,2 \pm 3,3 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	-1144,1
		$26,3 \pm 3,1$	$2,1 \pm 2,0 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	-1216,9
	9,9	0	$4,5 \pm 2,0 \cdot 10^{-5}$	—	—
		$1,7 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,5 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$	-1989,0
		$5,1 \pm 0,3$	$4,7 \pm 1,4 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	-2391,1
		$7,7 \pm 0,4$	$1,3 \pm 1,3 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$	-2593,6
		$28,0 \pm 2,0$	$4,1 \pm 5,2 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	-2446,3
	Enduit de façade	1,3	0	$2,2 \pm 0,9 \cdot 10^{-5}$	—
$1,9 \pm 0,2$			$1,3 \pm 0,1 \cdot 10^{-5}$	$8,4 \cdot 10^{-6}$	-492,3
$5,0 \pm 0,5$			$8,5 \pm 1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	-777,1
$9,9 \pm 1,0$			$6,2 \pm 1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	-913,0
$30,3 \pm 3,3$			$1,1 \pm 0,2 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	-1223,8
5,0		0	$4,8 \pm 1,8 \cdot 10^{-5}$	—	—
		$2,0 \pm 0,2$	$2,5 \pm 0,2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	-1308,9
		$4,7 \pm 0,5$	$2,1 \pm 0,5 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	-1574,2
		$9,6 \pm 1,1$	$1,1 \pm 0,7 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	-2182,0
		$30,1 \pm 3,7$	$2,0 \pm 0,5 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	-1660,8
9,9		0	$7,2 \pm 1,6 \cdot 10^{-5}$	—	—
		$3,1 \pm 0,1$	$3,3 \pm 0,7 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	-2278,7
		$4,6 \pm 0,5$	$3,7 \pm 0,5 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	-2063,3
		$9,5 \pm 1,1$	$2,2 \pm 1,5 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	-2964,4
		$29,8 \pm 4,3$	$9,6 \pm 5,1 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^{-5}$	-3727,1

Des gradients de températures peuvent être calculés à partir des vitesses de thermophorèse expérimentales avec l'Équation II-22, issue de l'équation de Brock (1962, Équation I-30). La contribution de chaque classe de particule est prise en compte comme pour le cas de la vitesse de sédimentation (Équation II-21).

$$\vec{V}_{th} = \sum_{i=1}^{12} \frac{-3\nu C_{ci} H_i \vec{\nabla} T}{2\rho_g T} \times m_{ni} \quad \text{Équation II-21}$$

$$\vec{\nabla} T = \vec{V}_{thexp} \times \frac{2\rho_g T}{-3\nu} \sum_{i=1}^{12} \frac{1}{m_{ni} C_{ci} H_i} \quad \text{Équation II-22}$$

Dans ces équations, l'indice i est relatif à un plateau d'impaction donné du LPI et indique le diamètre d'une classe granulométrique de l'aérosol de fluorescéine ($k_p = 0,43 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ pour la fluorescéine). D'autre part, la variation de la viscosité de l'air est inférieure à 10 % entre 20 et 50 °C (Hinds, 1999), ce qui valide notre calcul sur l'ensemble du gradient observé.

Les gradients calculés avec l'Équation II-22 sont présentés dans le Tableau II-6. Les gradients déterminés vont de quelques centaines à quelques milliers de K m^{-1} . De la même façon que pour les vitesses de thermophorèse dont ils sont issus, ces gradients de température sont des valeurs « efficaces ou moyennes » représentant l'influence des profils de gradients au-dessus des surfaces chauffées. Ils ne doivent pas être considérés comme de simples rapports d'écart de températures et de longueurs, prises entre la surface et une position verticale donnée. Selon les résultats du Tableau II-6, la thermophorèse diminue fortement (au moins de 50 %) le dépôt pour des gradients supérieurs ou égaux à 1000 K m^{-1} .

En considérant les gradients du Tableau II-6 égaux aux moyennes des gradients de températures en proche paroi (c'est-à-dire le long du profil vertical de températures), une position verticale z_{th} à partir de laquelle le gradient de température est à prendre en compte dans le calcul de la vitesse de thermophorèse peut être déterminée. z_{th} peut alors être défini comme « une hauteur de couche limite thermique pour la thermophorèse » ou « hauteur de thermophorèse », hauteur jusqu'à laquelle le gradient de température a un effet non négligeable, via la thermophorèse, sur le dépôt sec des particules.

Les profils expérimentaux présentent des températures mesurées avec des pas d'environ 2 mm entre chaque point de mesure. Afin de calculer avec une bonne précision les gradients de température, des profils de températures de l'air sont calculés avec l'expression logarithmique de Kader (1981) selon l'Équation II-23 en utilisant les températures caractéristiques T_* déterminées précédemment.

$$T_{air} = T_{surface} - \alpha T_* \ln(z) - \left[\alpha T_* \ln\left(\frac{u_*}{\nu}\right) + \beta(Pr) \right] \quad \text{Équation II-23}$$

Les profils de températures sont calculés entre $z = 1 \text{ mm}$ et $z = 50 \text{ mm}$ avec un pas de 0,5 mm. Les gradients de températures « locaux » sont calculés selon l'Équation II-24.

$$\overline{\nabla T} = \frac{T_{i+1} - T_i}{z_{i+1} - z_i} \vec{n} \quad \text{Équation II-24}$$

Dans cette équation, \vec{n} est un vecteur unitaire normal à la paroi orienté vers les z croissants, i est relatif à une position donnée sur le profil de température et $i+1$ est la position suivante, avec un pas de 0,5 mm. Pour calculer le gradient à la paroi (entre la surface et le premier point calculé), la différence de la température mesurée à la paroi et de la première température calculée en $z = 1$ mm avec la loi logarithmique est divisée par la hauteur de 1 mm.

Des profils de gradients de température moyens sont calculés à partir des profils de température déterminés selon l'Équation II-25.

$$\overline{\overline{\nabla T}}(z) = \frac{\sum_{i=1}^n \overline{\nabla T}_i(z)}{n} \quad \text{Équation II-25}$$

n correspond au nombre de positions prises en compte dans le calcul de la moyenne. En faisant varier n , on obtient ainsi les variations du gradient moyen en fonction de la plage de hauteur prise en compte. La Figure II-29 présente les profils de ces gradients moyens au-dessus du verre pour une vitesse d'écoulement de $5,0 \text{ m s}^{-1}$ et pour chaque écart de température.

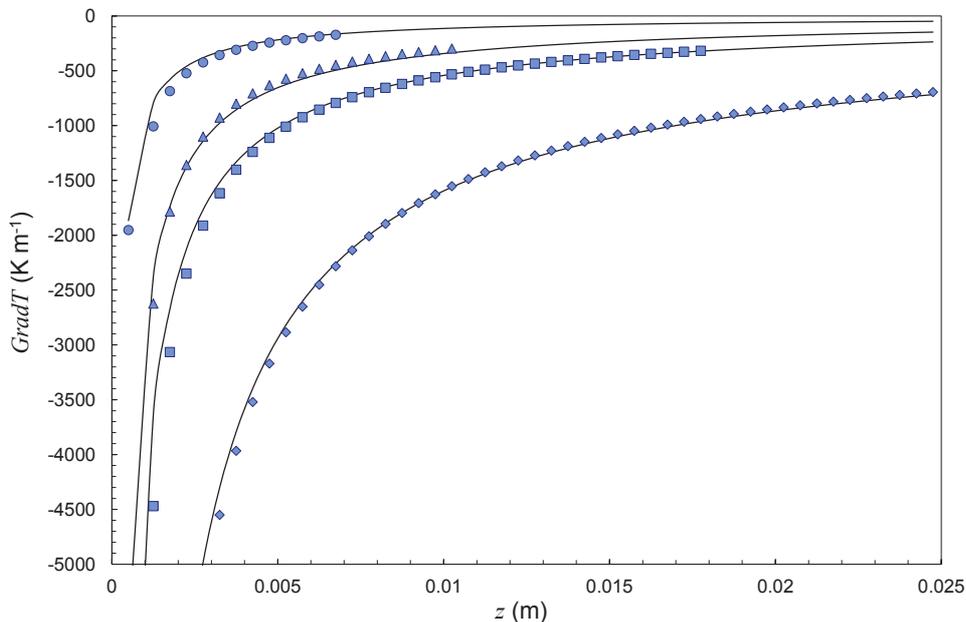


Figure II-29 : profils verticaux de gradients moyens et ajustements empiriques pour le verre pour $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$

- $\Delta T = 2 \text{ K}$, ▲ $\Delta T = 5 \text{ K}$, ■ $\Delta T = 10 \text{ K}$, ◆ $\Delta T = 30 \text{ K}$;
- ajustement empirique avec une loi de puissance.

Les courbes associées aux points calculés représentent une loi de puissance ajustée et qui est donnée par l'Équation II-26.

$$\overline{\nabla T}(z) = az^b \quad \text{Équation II-26}$$

Dans cette équation, a (en $\text{m}^{-(1-b)}$) et b (sans unité) sont des coefficients variables et ajustés pour chaque cas d'écart de température et de vitesse d'écoulement de l'air. Leurs valeurs sont données dans le Tableau II-7.

Pour chaque valeur de $\Delta T_{\text{surface-air}}$ et de u_{ref} , les « hauteurs de thermophorèse » z_{th} peuvent être déterminées en inversant l'Équation II-26 et en prenant les valeurs de gradients calculés (avec l'Équation II-22) et fournies dans le Tableau II-6. Cela permet de déterminer la position verticale z correspondante à cette valeur de gradient moyen. Les valeurs calculées de z_{th} sont reportées dans le Tableau II-7.

Ces valeurs sont dans l'ensemble de l'ordre de 1 à 10 mm. Selon ces résultats, l'influence de la thermophorèse ne se limite pas à la région de très proche paroi, c'est-à-dire à une distance de l'ordre du z_0 dynamique. Au contraire, l'effet de la thermophorèse doit être considéré sur une épaisseur plus grande, plutôt de l'ordre de 10 fois z_0 . Par contre, étant donné la méthode de détermination de z_{th} et les incertitudes associées, ces valeurs doivent être considérées comme des ordres de grandeurs.

Les valeurs de z_{th} dépendent à la fois de la vitesse d'écoulement et de l'écart de température entre la surface et l'air. z_{th} diminue pour des u_{ref} croissant et augmente pour des $\Delta T_{\text{surface-air}}$ croissants. Il est intéressant de noter que Talbot *et al.* (1980) relèvent le même comportement au-dessus d'une surface chauffée dans un écoulement laminaire pour des conditions de gradients beaucoup plus forts et des particules de 2 μm de diamètre. Les valeurs de z_{th} sont aussi systématiquement plus faibles au-dessus de l'enduit qu'au-dessus du verre (quelles que soient les écarts de températures et de vitesses de vent). Ceci pourrait être expliqué par un transfert de chaleur plus important dans la couche limite du fait de la présence des rugosités et de la décélération de l'écoulement dans la région interne de la couche limite, tel que cela est rapporté par Yaglom et Kader (1974) pour des nombre de Reynolds assez forts (dans notre cas, le nombre de Reynolds de couche limite est de l'ordre de 30000 pour $u_{\text{ref}} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$).

Tableau II-7 : coefficients a et b , hauteurs z_{th} pour chaque u_{ref} et chaque $\Delta T_{surface-air}$ moyen sur le verre et l'enduit de façade.

Surface	u_{ref} (m s ⁻¹)	$\Delta T_{surface-air}$ (K)	a (K m ^{-(1-b)})	b (sans unité)	z_{th} (mm)
Verre	1,3	2,2 ± 0,1	-1,56	-0,93	3,3
		6,8 ± 0,1	-4,72	-0,93	7,8
		10,8 ± 0,1	-8,03	-0,92	7,2
		30,5 ± 0,4	-27,48	-0,88	21,3
	5,0	2,4 ± 0,1	-1,42	-0,97	1,6
		6,1 ± 0,1	-3,41	-0,98	2,8
		10,6 ± 0,3	-6,74	-0,96	4,7
		30,1 ± 0,1	-22,51	-0,93	13,4
	9,9	1,8 ± 0,1	-0,98	-0,97	0,4
		5,6 ± 0,3	-3,27	-0,97	1,1
		10,3 ± 0,1	-6,23	-0,96	1,9
		28,0 ± 0,5	18,90	-0,95	5,9
Enduit de façade	1,3	2,2 ± 0,1	-1,43	-0,94	2,1
		5,6 ± 0,1	-4,21	-0,92	4,2
		9,8 ± 0,1	-8,1	-0,90	5,7
		27,3 ± 0,5	-22,48	-0,89	13,5
	5,0	1,6 ± 0,1	-1,26	-0,90	0,8
		4,3 ± 0,2	-3,21	-0,92	1,9
		9,1 ± 0,3	-7,80	-0,89	2,4
		26,1 ± 0,7	-21,71	-0,90	9,6
	9,9	1,7 ± 0,3	-0,86	-0,99	0,3
		3,8 ± 0,1	-2,98	-0,91	1,3
		7,9 ± 0,2	-7,04	-0,89	1,7
		24,2 ± 0,9	-22,75	-0,88	3,8

II.3.3 PARAMETRISATION DE LA VITESSE DE DEPOT EN FONCTION DE LA VITESSE DE L'ECOULEMENT ET DE L'ECART DE TEMPERATURE SURFACE-AIR

Les modèles de dépôt sec utilisent préférentiellement la vitesse de frottement comme paramètre permettant de représenter l'influence de la turbulence en proche paroi. Par contre, pour des applications environnementales, ils ne prennent généralement pas en compte la thermophorèse. Une paramétrisation de la vitesse de dépôt de l'aérosol de fluorescéine est ici proposée à partir des vitesses de dépôt mesurées en soufflerie pour évaluer l'importance des phénomènes rencontrés *in situ*. L'approche proposée est d'ajouter la contribution des différents phénomènes (gravité, turbulence, thermophorèse) sous la forme d'une loi simple dont la justification est donnée ci-dessous.

Dans la canopée urbaine, le développement et l'existence de couches limites établies dues au vent sur les surfaces urbaines (toits, murs, sols...), avec établissement d'une turbulence et des vitesses de frottement paramétrables en fonction des conditions locales, ne semblent pas évidents du fait de l'hétérogénéité des types de surfaces ou encore des effets de sillage dans l'écoulement. De plus, l'utilisation *in situ* d'une anémométrie aux fils chauds croisés pour estimer ce paramètre à partir de mesures de profils ou de mesures hautes fréquences n'est pas envisagée dans notre étude. L'utilisation de la vitesse du vent comme paramètre déterminant à la place de la vitesse de frottement peut être une solution pratique pour évaluer les vitesses de dépôt sec. En effet, les surfaces étudiées dans ce chapitre sont aussi utilisées *in situ* et la vitesse du vent est un paramètre plus facilement mesurable que la vitesse de frottement. De plus, la Figure II-30 montre une relation presque linéaire entre les vitesses de vent et les vitesses de frottement mesurées en soufflerie pour chaque surface, ce qui permet de lier pour une surface donnée la vitesse de frottement à la vitesse du vent. En conclusion, un calcul de vitesses de dépôt sec basé sur la vitesse de vent peut s'avérer plus opérationnel car cette vitesse de vent est plus facilement mesurable, voire modélisable, en milieu urbain. Par contre, les paramétrisations de ce type restent dépendantes et limitées aux surfaces et aux aérosols étudiés. En première approche, une paramétrisation linéaire de la vitesse de dépôt en fonction de la vitesse du vent est proposée sous la forme de l'Équation II-27.

$$V_d(u_{ref}) = V_s + V_{dyn}(u_{ref}) = V_s + A \times u_{ref} \quad \text{Équation II-27}$$

La vitesse de dépôt est abordée comme une addition du dépôt par gravité (V_s pour la vitesse de sédimentation ; pas prise en compte pour des surfaces verticales) et du dépôt provoqué par les phénomènes dynamiques (V_{dyn} pour vitesse de dépôt dynamique ; résultante de l'impaction, de l'interception et de la diffusion brownienne).

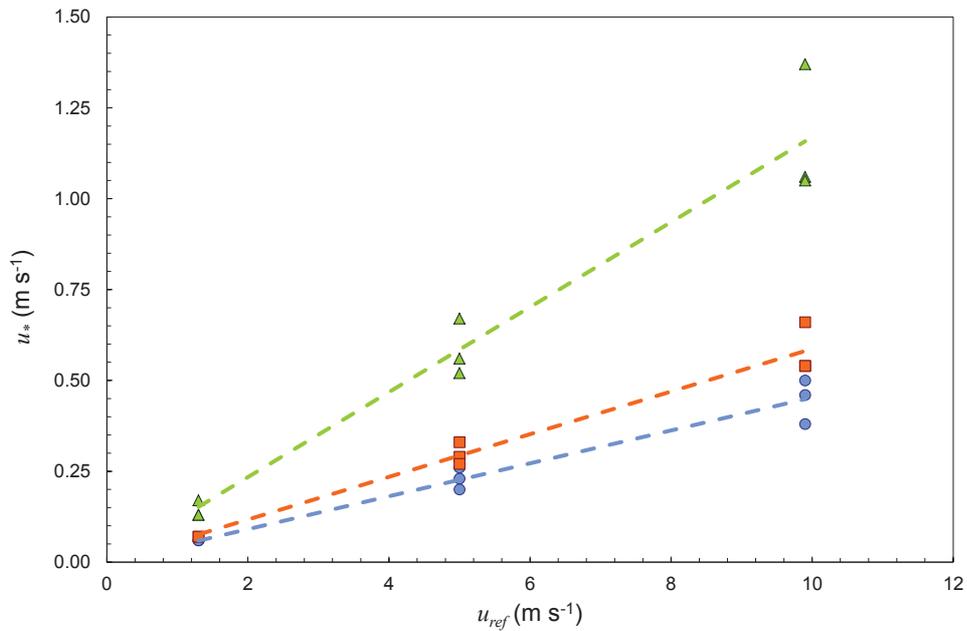


Figure II-30 : représentation de u_* en fonction de u_{ref} sur le verre classique, l'enduit de façade et l'herbe synthétique.

● verre classique, ■ enduit de façade, ▲ herbe synthétique.

Le coefficient A (sans unité) est ajusté aux points expérimentaux, dépendant des surfaces étudiées et ses valeurs sont données dans le Tableau II-8.

Tableau II-8 : valeurs de la vitesse de sédimentation V_s et du coefficient A pour chaque surface et pour l'aérosol de fluorescéine utilisé.

Surface	A (sans unité)	V_s (m s ⁻¹)
Verre classique	$2,8 \cdot 10^{-6}$	
Enduit de façade	$6,4 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$
Herbe synthétique	$1,2 \cdot 10^{-4}$	

Le résultat de cette paramétrisation pour les surfaces de verre, d'enduit de façade et d'herbe synthétique est présenté sur la Figure II-31 et comparé aux vitesses de dépôt mesurées en soufflerie, pour une large gamme de vitesse de vent.

Dans le cas du dépôt turbulent, une loi exponentielle réduirait les écarts entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées pour de faibles vitesses de vent. Cependant, elle donnerait un dépôt turbulent non nul pour une vitesse de vent nulle. La paramétrisation linéaire utilisée dans cette étude constitue une bonne première approximation qui permet de réduire le dépôt turbulent pour une vitesse de vent faible. En effet, les erreurs relatives moyennes entre les valeurs mesurées et calculées

sont de 15, 21 et 27 % pour respectivement le verre classique (horizontal et vertical), l'enduit de façade (horizontal et vertical) et l'herbe synthétique, avec une erreur toujours sensiblement plus importante pour les faibles vitesses de vent. Les résultats donnés par ces paramétrisations (dont le but est de reproduire les résultats expérimentaux obtenus) semblent raisonnablement bons en comparaison des valeurs théoriques données par les modèles de dépôt sec présentés précédemment (cf. paragraphe II.3.1.3). En conclusion, cette paramétrisation pourra être utilisée pour l'analyse des données acquises *in situ* avec ces surfaces.

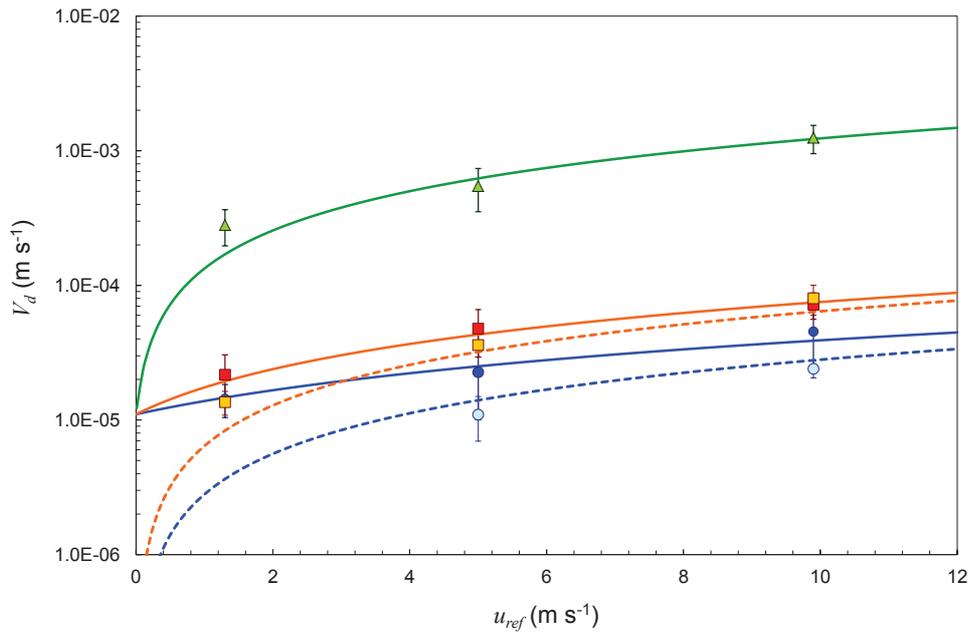


Figure II-31 : représentation des paramétrisations et des points expérimentaux de V_d en soufflerie en fonction de u_{ref} .

Paramétrisations : --- verre vertical, — verre horizontal ;
 --- enduit de façade vertical, — enduit de façade horizontal ;
 — herbe synthétique horizontale.

V_d expérimentales : ○ verre vertical, ● verre horizontal ;
 □ enduit de façade vertical, ■ enduit de façade horizontal ;
 ▲ herbe synthétique horizontale.

Dans le but d'estimer l'importance que peut avoir la thermophorèse *in situ*, dans des conditions urbaines réelles, la prise en compte d'une vitesse de thermophorèse dans la loi empirique précédente (Équation II-27) s'avère nécessaire. Cependant, à l'instar de la vitesse de frottement, le gradient de température *in situ*, engendré par une surface chauffée, est difficile à déterminer et sa mesure n'a pas été envisagée dans le cadre de nos expérimentations. Il semble plus intéressant de proposer une estimation de la vitesse de thermophorèse en fonction de la vitesse du vent u_{ref} et de l'écart de température surface-air $\Delta T_{surface-air}$, ajustée aux points expérimentaux obtenus. L'expression suggérée pour la paramétrisation de la vitesse de dépôt est donnée par l'Équation II-28.

$$V_d = V_s + V_{dyn}(u_{ref}) - V_{th}(u_{ref}, \Delta T_{surface-air}) \quad \text{Équation II-28}$$

$V_{th}(u_{ref}, \Delta T_{surface-air})$ est la vitesse de thermophorèse, dépendante de la vitesse du vent et de l'écart de température entre la surface et l'air. La vitesse de thermophorèse doit être soustraite à la vitesse de dépôt car dans le cas de surfaces chauffées, les gradients de températures sont négatifs donc les vitesses de thermophorèse sont positives.

La paramétrisation de cette vitesse de thermophorèse est faite directement avec l'Équation II-21. Selon cette équation, il suffit de paramétrer le gradient de température avec u_{ref} et $\Delta T_{surface-air}$. Ce gradient est relié à la « hauteur de thermophorèse » z_{th} avec l'Équation II-26 et, grâce au travail déjà réalisé précédemment, il est choisi de paramétrer z_{th} et les coefficients a et b en fonction de u_{ref} et $\Delta T_{surface-air}$ pour que la vitesse de thermophorèse prenne finalement la forme de l'Équation II-29.

$$\vec{V}_{th} = \sum_{i=1}^{12} \frac{-3\nu C_{ci} H_i a(u_{ref}, \Delta T_{surface-air}) z_{th}(u_{ref}, \Delta T_{surface-air})^{b(u_{ref}, \Delta T_{surface-air})}}{2\rho_g T} \times m_{ni} \quad \text{Équation II-29}$$

Le développement d'un modèle simple paramétrique pour V_{th} est donc fait en deux étapes : une première de recherche des meilleurs coefficients a et b permettant de calculer le gradient de température en fonction de z_{th} ; une seconde de recherche d'une loi paramétrique simple pour z_{th} .

Le coefficient a est représenté en fonction de $\Delta T_{surface-air}$ pour le verre et l'enduit de façade sur la Figure II-32.

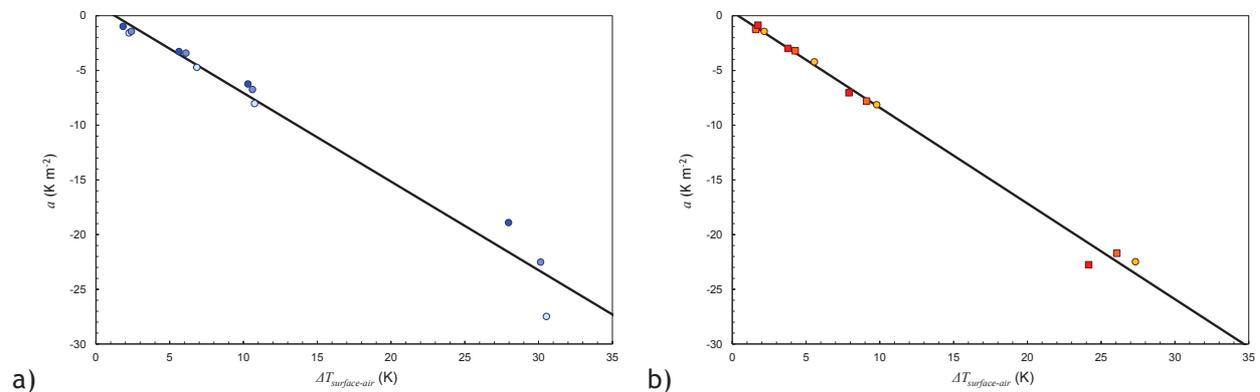


Figure II-32 : représentation de a en fonction de $\Delta T_{surface-air}$ pour le verre classique et l'enduit de façade.

Verre classique : $\circ u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, $\bullet u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, $\bullet u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;
 enduit de façade : $\square u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, $\square u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, $\square u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;
 paramétrisation : — $a = a_1 \times \Delta T_{surface-air} + a_2$.

Il apparaît sur cette figure que le coefficient a peut être représenté comme une fonction linéaire de l'écart de température entre la surface et l'air pour les deux surfaces. Les coefficients directeurs a_1 et ordonnées à l'origine a_2 du verre et de l'enduit de façade sont donnés dans le Tableau II-9.

Etant donné les valeurs prises par b dans le Tableau II-7, ce coefficient est considéré constant pour chaque type de surface. Ses valeurs sont prises égales à la moyenne des valeurs pour le verre et l'enduit de façade, et présentées dans le Tableau II-9.

Tableau II-9 : valeurs des coefficients de la paramétrisation de V_{th} .

Surface	a_1 ($m^{-(1-b)}$)	a_2 ($K m^{-(1-b)}$)	b (sans unité)	c_1 ($s K^{-1}$)	c_2 ($m K^{-1}$)
Verre classique	-0,81	1,0	-0,94	$-5,89 \cdot 10^{-5}$	$7,75 \cdot 10^{-4}$
Enduit de façade	-0,88	0,35	-0,91	$-3,62 \cdot 10^{-5}$	$4,82 \cdot 10^{-4}$

Afin de paramétrer z_{th} avec u_{ref} et $\Delta T_{surface-air}$, cette grandeur est dans un premier temps représentée en fonction de $\Delta T_{surface-air}$ (Figure II-33).

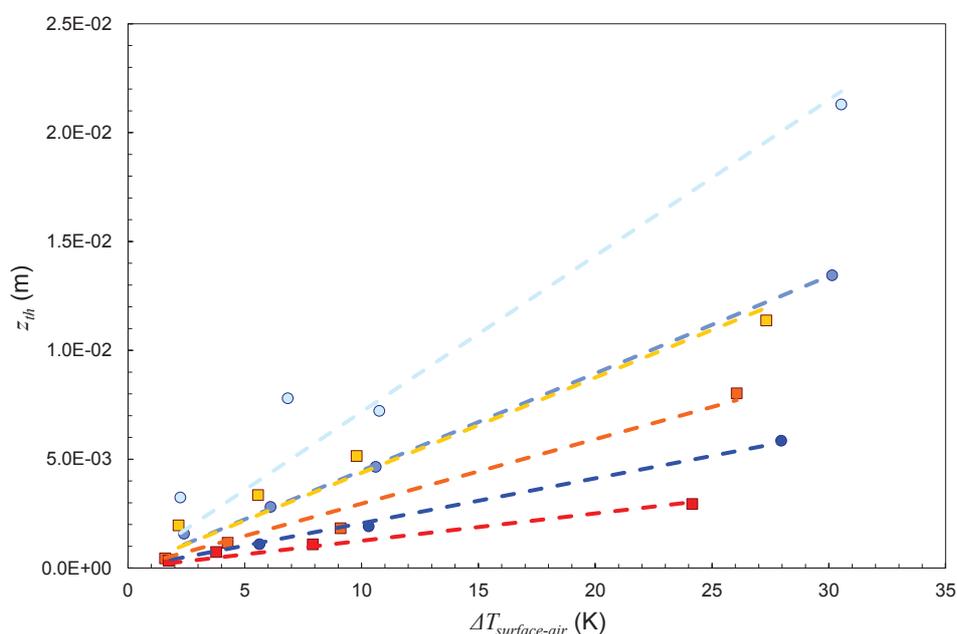


Figure II-33 : représentation de z_{th} en fonction de $\Delta T_{surface-air}$ pour le verre classique et l'enduit de façade.

Verre classique : \circ $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, \bullet $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, \bullet $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;
 enduit de façade : \square $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, \square $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, \square $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$.

La hauteur de thermophorèse est représentée dans cette figure comme une fonction de linéaire de l'écart de température entre la surface et l'air (droites en pointillés), avec une ordonnée à l'origine nulle (car cette hauteur est supposée inexistante en l'absence de gradient de température), pour chaque vitesse d'écoulement d'air. Les coefficients directeurs c ($m K^{-1}$) des droites sont présentés en fonction de la vitesse d'écoulement d'air u_{ref} pour chaque surface (Figure II-34).

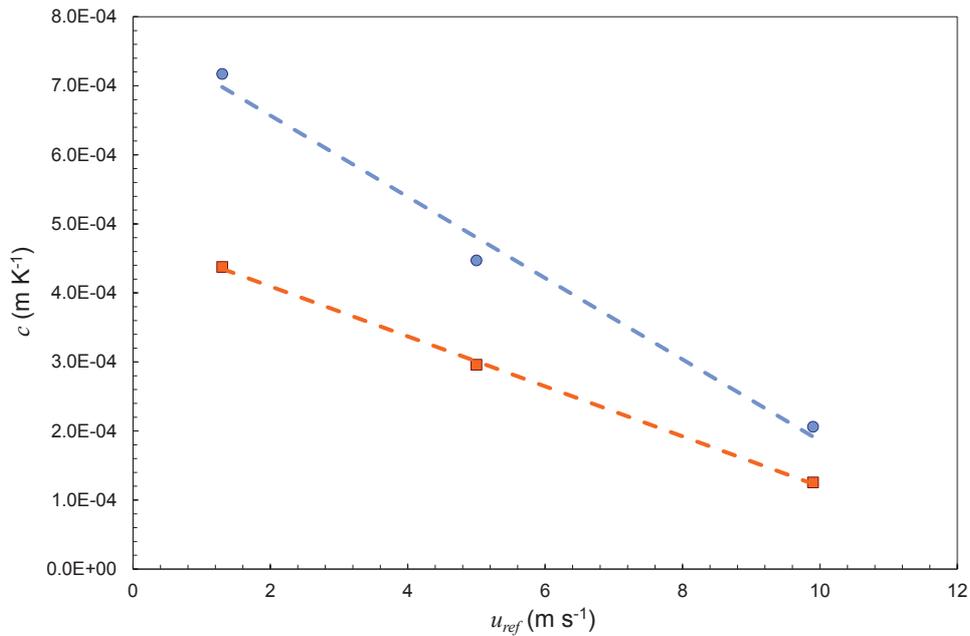


Figure II-34 : représentation de c en fonction de u_{ref} pour le verre classique et l'enduit de façade.

● verre classique ; ■ enduit de façade.

Le coefficient directeur c est représenté comme une fonction linéaire de u_{ref} avec un coefficient directeur c_1 et une ordonnée à l'origine c_2 pour le verre et l'enduit de façade (droites en pointillés). Les valeurs de ces deux coefficients sont données dans le Tableau II-9.

A présent, avec ces paramétrisations, la vitesse de thermophorèse peut être représentée comme une fonction de u_{ref} et de $\Delta T_{surface-air}$. Les résultats expérimentaux sur les surfaces de verre et d'enduit de façade chauffées sont comparés aux résultats de calculs réalisés pour les mêmes conditions de u_{ref} et de $\Delta T_{surface-air}$ grâce à l'Équation II-28 et à l'Équation II-29. La Figure II-35 présente la comparaison de ces résultats.

Les valeurs des vitesses de dépôt sec expérimentales $V_{dexpérimentation}$ sont données en abscisse. Les valeurs des vitesses de dépôt calculées $V_{dparamétrisation}$ pour les mêmes u_{ref} et $\Delta T_{surface-air}$ sont représentées en ordonnée. L'axe représenté correspond à la situation idéale de $V_{dparamétrisation} = V_{dexpérimentation}$. La figure montre une surestimation quasi-systématique de V_d sur le verre par le calcul, sauf pour $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, et une sous-estimation de V_d sur l'enduit de façade.

La tendance pour le verre peut s'expliquer par le fait que la paramétrisation ne calcule pas une vitesse de dépôt indépendante de la vitesse de vent en présence d'un gradient de température, alors que cela semble être plutôt le cas en réalité. Certains points calculés donnent des vitesses de dépôt négatives, probablement à cause de la forme très simplifiée de la paramétrisation. Pour ces cas, la vitesse de thermophorèse peut être supérieure à la vitesse de dépôt dynamique mais il est probable que l'absence de paramétrisation du dépôt par diffusion brownienne ne permette pas d'estimer le flux de dépôt résiduel mesuré quand le dépôt dynamique est compensé par la thermophorèse. Une solution peut être d'imposer $V_d = 0$ lorsque la valeur calculée est négative, c'est-à-dire de négliger le dépôt résiduel et d'estimer qu'il n'y a pas de dépôt sec pour ces situations.

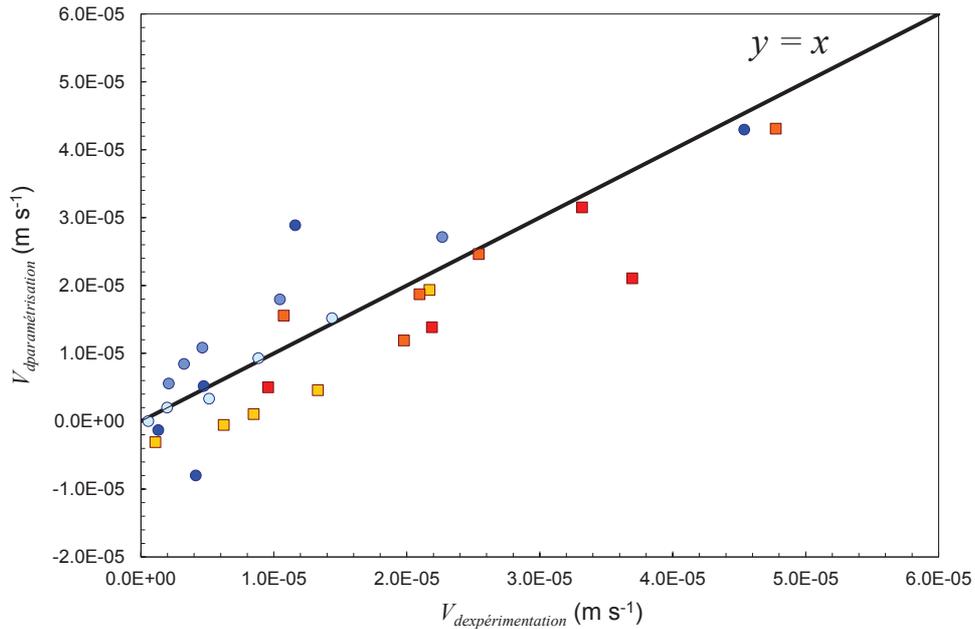


Figure II-35 : comparaison des résultats expérimentaux ($V_{d\text{détermination}}$) et des résultats de calculs de la paramétrisation de la vitesse de dépôt en fonction de ($V_{d\text{paramétrisation}}$) u_{ref} et de $\Delta T_{\text{surface-air}}$.

Verre classique : \circ $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, \circ $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, \bullet $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$;
 enduit de façade : \square $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$, \square $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$, \square $u_{ref} = 9,9 \text{ m s}^{-1}$.

Si l'on ne prend pas en compte les points pour lesquels $V_{d\text{paramétrisation}}$ est négatif, les écarts relatifs moyens et médians sont respectivement de 265 et 54 % pour le verre et de 99 et 45 % pour l'enduit de façade. Selon la Figure II-35 et ces écarts relatifs, il semble que la paramétrisation utilisée estime assez correctement les vitesses de dépôt sur le verre et l'enduit de façade pour la large gamme de vitesses d'écoulement et d'écarts de températures entre la surface et l'air. Bien que n'estimant pas très finement les vitesses de dépôt mais prenant en compte la thermophorèse, elle respecte bien les ordres de grandeur et peut être utilisé en première approximation pour faire le lien entre les données de soufflerie de ce chapitre et celles acquises pour les mêmes surfaces *in situ*, et ainsi rendre compte de l'importance de la thermophorèse.

II.4 CONCLUSIONS

Ces expérimentations en soufflerie constituent la première étape expérimentale de l'étude phénoménologique du dépôt sec sur des surfaces urbaines. Les conditions simplifiées d'écoulement d'air vis-à-vis d'un écoulement en milieu urbain permettent d'y étudier le dépôt sous l'influence d'un nombre limité de paramètres. Les objectifs étaient notamment d'y étudier l'influence de la turbulence générée par la vitesse d'écoulement de l'air, de la nature des surfaces urbaines et de la sédimentation sur le dépôt d'un aérosol submicronique polydispersé de fluorescéine. Une attention particulière a été apportée à l'étude de la diminution du dépôt sec par thermophorèse en chauffant des surfaces horizontales.

Dans un premier temps, des vitesses de dépôt sont mesurées pour trois vitesses d'écoulement d'air dans la soufflerie (1,3, 5,0 et 9,9 m s⁻¹) et trois surfaces urbaines non chauffées, horizontales et verticales : du verre classique, de l'enduit de façade et de l'herbe synthétique. Des mesures anémométriques à haute fréquence permettent de quantifier la turbulence au-dessus de chaque surface horizontale pour chaque vitesse d'écoulement. Les vitesses de dépôt sec mesurées sont comparées aux données de la littérature et aux modèles de Lai et Nazaroff (2000) et de Zhang *et al.* (2001). Dans un second temps, les surfaces horizontales de verre et d'enduit sont chauffées afin de mesurer les vitesses de dépôt sec pour quatre écarts de températures entre les surfaces et l'air. Les gradients de température associés aux conditions d'écoulement et de température des surfaces sont quantifiés. Enfin, une paramétrisation simple de la vitesse de dépôt de l'aérosol de fluorescéine sur les trois surfaces et tenant compte de la vitesse d'écoulement et de l'écart de température est ajustée sur les points expérimentaux.

Les vitesses de dépôt mesurées sans chauffage peuvent varier de plus de deux ordres de grandeur selon le type de surface considéré, son orientation et la vitesse d'écoulement de l'air. Ces résultats confirment l'importance des phénomènes turbulents dans le dépôt (interception, impaction) et mettent en évidence celle de la sédimentation sous certaines conditions (surfaces horizontales lisses à peu rugueuses et faibles vitesses de vent). Alors que le rapport de la vitesse de dépôt par la vitesse de frottement montre l'importance croissante du dépôt par turbulence quand la taille des rugosités des surfaces augmente, il semble que la vitesse de dépôt sec pourrait être directement liée à l'intensité de turbulence à proximité immédiate de la surface sans distinction du type de surface. Ce résultat devra cependant être confirmé par d'autres études expérimentales. Le modèle de Lai et Nazaroff (2000) s'avère bien adapté au calcul de la vitesse de dépôt sec sur des surfaces lisses alors que celui de Zhang *et al.* (2001) pour l'herbe manque de précision et néglige surement l'importance des phénomènes turbulents.

L'étude de la thermophorèse met en évidence son efficacité pour de faibles écarts de températures entre la surface et l'air. Les évolutions de la vitesse de dépôt, selon l'écart de température, sont différentes entre le verre et l'enduit de façade. Ces résultats suggèrent que la thermophorèse peut être un phénomène majeur en milieu urbain. L'étude des profils de température montre que, dans les couches limites turbulentes, le gradient de température doit être pris en compte sur une hauteur variable selon les conditions, pouvant varier du millimètre à la dizaine de millimètres. Donc il influence le dépôt, par thermophorèse, au-delà de la zone proche de la surface.

Ces résultats montrent l'importance d'une estimation locale des dépôts dans les milieux urbains dans le cadre des études de transferts des polluants à l'échelle d'un bassin versant ou du dépôt de radionucléides. La paramétrisation proposée à partir de ces résultats est limitée à l'aérosol de fluorescéine et aux trois surfaces étudiées. Par contre, elle propose des prédictions presque aussi précises que le modèle de Lai et Nazaroff (2000), avec une prise en compte de la thermophorèse. Elle passe par l'utilisation de paramètres facilement mesurables en milieu urbain. Elle s'avère donc adaptée à l'objectif de cette étude, à savoir l'estimation du dépôt dans le milieu urbain.

Cette étude en soufflerie a abordé un nombre limité de paramètres et de types de surfaces. Mais elle était nécessaire au vue du manque de données disponibles pour la vitesse de dépôt sec d'aérosols fins. Les processus de dépôts secs ont été étudiés sous des conditions simples mais avec des paramètres de turbulence bien contrôlés et quantifiés. Il en résulte, pour les surfaces rugueuses, des informations permettant de mieux appréhender l'importance des différents phénomènes physiques prenant part au dépôt.

Cette étude en soufflerie permet de hiérarchiser l'importance relative de l'impaction turbulente, de la sédimentation et de la thermophorèse sur le dépôt sec selon les conditions environnementales rencontrées. Elle ne peut cependant représenter qu'une première étape de l'étude du dépôt sur des surfaces urbaines étant donné le faible nombre de paramètres mis en jeu.

Certains auteurs ont récemment progressé sur des modèles à résolution numérique (Piskunov, 2009 ; Hussein *et al.*, 2012). D'autres expérimentations sur plusieurs surfaces aux rugosités de formes différentes et simples, dont les géométries seraient bien quantifiées, pour de larges gammes de vitesses de vent et de tailles de particules, pourraient aider à la mise au point et à l'amélioration de ces modèles et plus généralement à la compréhension du processus de dépôt. D'autre part, il existe un nombre très limité d'études de la thermophorèse en conditions d'écoulements turbulents et surtout pour des surfaces rugueuses. Une première conséquence est que peu de modèles la calculent, et aucun ne la prend en compte dans l'environnement. Pourtant, vu l'impact de ce phénomène sur le dépôt, il devra être systématiquement considéré *in situ*.

L'approche *in situ* développée dans le chapitre suivant est indispensable pour confronter les résultats obtenus en soufflerie aux conditions réellement rencontrées en milieu urbain. En effet, dans la canopée urbaine, c'est-à-dire à l'échelle d'un bâtiment ou d'une rue, l'hétérogénéité des surfaces, les effets de sillages sur la turbulence et les conditions atmosphériques apportent certainement des instabilités non rencontrées en soufflerie. De plus, l'influence de la thermophorèse, bien que déjà relevée, doit être confirmée.

CHAPITRE III. ETUDE DU DEPOT SEC *IN SITU* SUR UNE COURTE DUREE

La première étape de l'étude du dépôt sur des surfaces urbaines, en soufflerie, a permis de quantifier des vitesses de dépôt sec pour dans des conditions expérimentales simplifiées et contrôlées. Elle a aussi permis de hiérarchiser l'importance de chaque phénomène physique de dépôt étudié selon les conditions imposées de vitesse d'écoulement d'air, de température et d'orientation des surfaces. Une étude *in situ* du dépôt est indispensable pour confirmer ou infirmer la possibilité d'utiliser en milieu urbain les connaissances acquises en soufflerie. Le but final est la quantification, pour chaque type de surface urbaine (toit, mur, sol), des vitesses de dépôt sec en fonction des conditions météorologiques et micrométéorologiques réellement rencontrées dans un milieu urbain.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la description de la turbulence atmosphérique et de la couche limite atmosphérique. Ces rappels permettent de se rendre compte du positionnement de l'étude à l'échelle de la couche limite atmosphérique. Ils définissent l'échelle de temps des expérimentations par rapport aux différents phénomènes météorologiques, et définissent par conséquent le domaine de validité des vitesses de dépôt qui sont mesurées dans cette seconde étape. La seconde partie du chapitre présente la méthode expérimentale utilisée pour quantifier les vitesses de dépôt sec d'aérosols submicroniques sur des surfaces typiques du milieu urbain sur une courte durée (60 minutes). Elle présente aussi les mesures environnementales (paramètres météorologiques, vitesses de vent...) réalisées en parallèle de la mesure des vitesses de dépôt. Les résultats obtenus sont présentés et discutés dans une troisième partie. Ils sont notamment comparés à ceux de soufflerie et de la littérature afin de mettre en évidence et hiérarchiser les phénomènes physiques les plus importants dans ces conditions d'exposition des surfaces urbaines à des particules sur de courtes durées. Finalement, des conclusions sur les résultats de cette seconde partie de l'étude et des perspectives de poursuite de travaux, suite à ces expérimentations, sont données.

III.1 CARACTERISATION DE LA TURBULENCE ET DE LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE

La couche limite atmosphérique est la partie inférieure de la troposphère en contact direct avec le sol. Dans cette partie du chapitre, la turbulence qui règne dans cette couche limite est d'abord présentée, puis sa structure est décrite pour replacer l'échelle des expérimentations menées dans cette seconde étape de l'étude.

III.1.1 LA TURBULENCE ATMOSPHERIQUE

Différentes échelles temporelles et spatiales sont associées aux événements météorologiques. La classification proposée par Orlanski (1975), souvent retrouvée dans la littérature, permet de comprendre les caractéristiques de ces échelles. Elle est présentée sur la Figure III-1.

Scales	Time Length	1 Month	1 Day	1 Hour	1 Min	1 Sec
		Macro α	10'000 km	Stationary and Ultralong Waves		
Macro β	1'000 km	Baroclinic Waves				
Meso α	100 km		Fronts Hurricanes			
Meso β	10 km		Nocturnal Jets Mountain Effects Sea Breezes			
Meso γ	1 km			Thunderstorms Urban Effects CAT		
Micro α	100 m			Shallow Convection Tornadoes Gravity Waves		
Micro β	10m				Dust Devils Thermal Waves	
Micro γ	1m					Plumes Roughness
		Scales				
		Climato-logical	Synoptic	Meso	Turbulence	

Figure III-1 : échelle des mouvements atmosphériques selon Orlandi (1975).

Les échelles climatologiques et synoptiques, perturbations ou encore passages de fronts, correspondent aux plus grandes échelles de temps, de l'ordre de la journée à un mois. La méso-échelle, intermédiaire et de l'ordre de l'heure à la journée, est relative à des événements à des échelles locales à régionales, brises de mer ou de montagne par exemple. Les plus petites échelles de temps, inférieures à une heure, ou micro-échelles, ont trait aux phénomènes de turbulence, dispersion turbulente et transferts turbulents au sein de la couche limite atmosphérique.

La turbulence atmosphérique est engendrée par les forces de flottabilité et le frottement du vent sur le sol (Mestayer, 2007). Cette turbulence correspond aux fluctuations de la vitesse et de la direction du vent et elle est (ou peut être) constituée par des tourbillons de différentes tailles. La Figure III-2 présente le spectre en énergie de cette turbulence associée aux mouvements horizontaux de l'atmosphère, c'est-à-dire l'énergie de chacune des fréquences des tourbillons apportée au mouvement global.

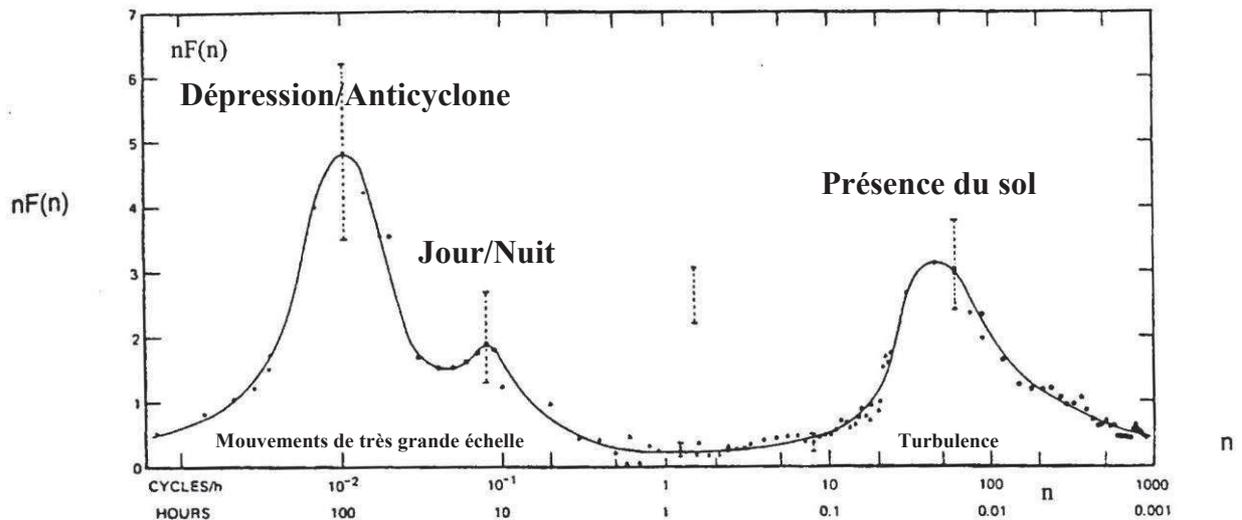


Figure III-2 : représentation spectrale de la turbulence, spectre typique de la vitesse à 100 m de hauteur (d'après Van der Hoven, 1957).

Ce spectre s'étend sur des périodes allant de quelques secondes (à droite de l'abscisse) à plusieurs jours (à gauche de l'abscisse) et présente deux pics principaux, un à environ 1 minute et le second à environ 100 heures. Entre ces deux pics, un minimum est atteint, centré sur la période de 1 heure et s'étendant environ des périodes 30 minutes à 2 heures. Les deux principaux pics sont séparés par ce minimum car ils correspondent à des processus indépendants : les périodes inférieures à 30 minutes correspondent aux processus turbulents (échelle micrométéorologique) et les périodes supérieures à 2 heures correspondent aux cycles journaliers et aux processus météorologiques (échelle synoptique). Afin d'étudier les variations journalières des processus dans la couche limite atmosphérique, il convient de moyenniser sur une trentaine de minutes, voire sur une heure, les paramètres étudiés afin de lisser leurs fluctuations existant à des fréquences supérieures.

III.1.2 LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE

Dans l'atmosphère, la turbulence à petites échelles, ou micrométéorologique, existe dans une zone située près du sol. Cette couche limite atmosphérique (CLA) est caractérisée par des gradients verticaux importants. Elle présente certaines analogies avec la couche limite existant dans un écoulement en soufflerie.

III.1.2.1 Généralités sur la structure de la couche limite atmosphérique

La CLA est définie comme la partie de la troposphère directement influencée par la présence de la surface terrestre et répondant aux forçages de la surface à des échelles de temps de l'ordre ou inférieures à une heure (Stull, 1988). Ces forçages incluent les échanges (flux) de chaleur, d'humidité et de quantité de mouvement ainsi que de polluants et d'aérosols. La Figure III-3 schématise la structure de la CLA, c'est-à-dire les différentes couches d'air qui la composent, ainsi que ses variations au cours d'un cycle journalier entier.

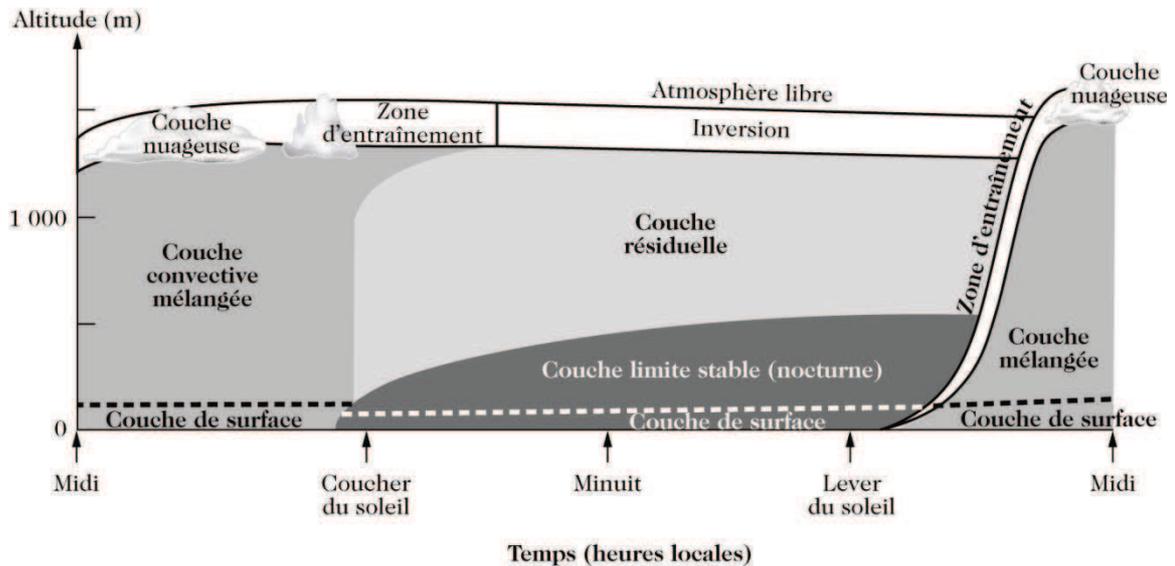


Figure III-3 : schématisation des couches d'air composant la couche limite atmosphérique (Delmas et al., 2005 ; d'après Stull, 1988).

L'épaisseur de la CLA varie de quelques centaines de mètres à un ou deux kilomètres, son évolution dépend du cycle journalier. Cette figure met en évidence sa structure en deux couches : une couche supérieure, dite couche de mélange, et une couche inférieure ou couche de surface. La couche supérieure est peu dépendante des effets de frottement au sol mais dépend plutôt des effets convectifs (Stull, 1988).

La couche de surface est la partie de la CLA directement en contact avec le sol, les influences respectives de la force de Coriolis et de la diffusion moléculaire y sont considérées négligeables. Son épaisseur est de l'ordre de 10 % de celle de la CLA (Stull, 1988). La turbulence y est d'origine mixte, mécanique et thermique, et c'est dans cette couche que les transferts turbulents sont étudiés (Mestayer, 2007). Dans la couche de surface, la turbulence ne dépend pas de chaque élément de rugosité du sol mais d'une rugosité globale du sol, liée au couvert, même dans le cas d'un milieu urbain (Dupont, 2001). La variation des flux turbulents y est inférieure à 10 % (Kotroni et Lagouvardos, 1994) et ces flux sont considérés conservatifs (indépendants de la hauteur), on parle alors de couche à flux constant. En condition de stabilité neutre, c'est-à-dire quand la turbulence est produite par des contraintes de cisaillement et peu par les effets de flottabilité, le profil de vitesse du vent suit la loi logarithmique, dépendante des surfaces et donnée par l'Équation II-11.

Les grandeurs caractéristiques de la turbulence sont décrites dans la couche de surface par la théorie de similitude de Monin-Obukhov (1954). Ces grandeurs sont l'échelle de vitesse u_* , l'échelle de température θ_* et l'échelle de longueur L (équation Equation III-1).

$$L = \frac{u_*^2}{\kappa \left(\frac{g}{T_0} \right) \theta_*} \quad \text{Equation III-1}$$

κ (sans unité) est la constante de Von Karman, g ($m\ s^{-2}$) l'accélération de pesanteur et T_0 (K) la température caractéristique. Cette échelle de longueur L , appelée longueur de Monin-Obukhov, est proportionnelle à la hauteur au-dessus du sol pour laquelle les facteurs de flottabilité dominent la production mécanique de turbulence (Stull, 1988). Elle est notamment utilisée pour classer les conditions de stabilité atmosphérique qui caractérisent l'intensité des mélanges dans la CLA. Les classes de stabilité couramment utilisées ont été proposées par Pasquill (1974, cité par Leroy, 2008) : A, B, C (instable à légèrement instable) pour une atmosphère convective, D (neutre) pour des vents plus forts et E, F (stable) en l'absence de rayonnement.

A l'échelle de la couche limite urbaine (CLU), la surface est considérée homogène en rugosité. Cependant, à l'approche du sol et pour prendre en compte la présence de bâtis, la couche de surface peut être décomposée en trois sous-couches présentées sur la Figure III-4.

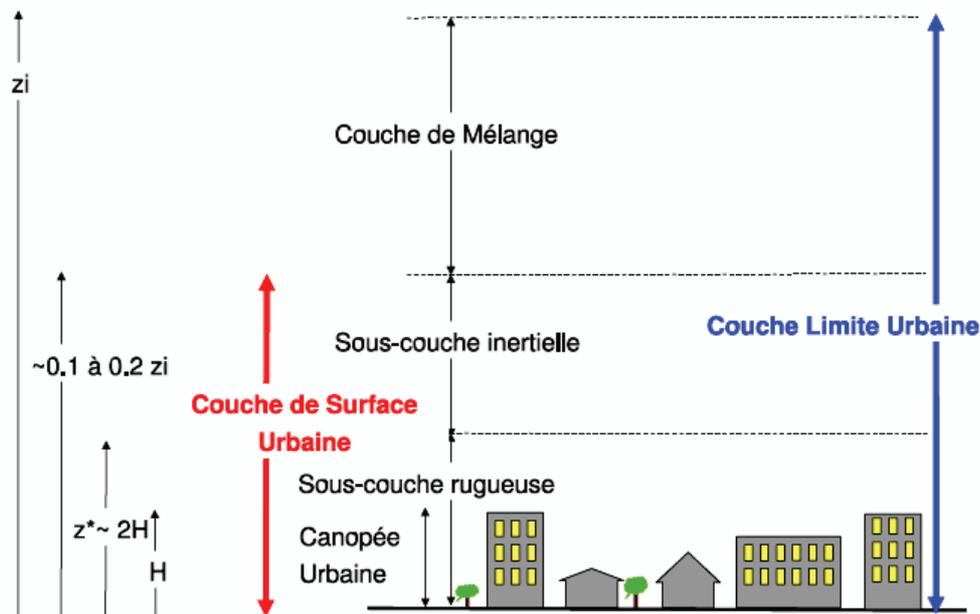


Figure III-4 : description de la couche limite urbaine (Milliez, 2006). Ici, z_i est la hauteur de couche limite, z^* la hauteur de sous-couche rugueuse et H la hauteur moyenne de canopée.

La sous-couche en équilibre, ou sous-couche inertielle, est structurée comme si la surface était de rugosité homogène. L'écoulement moyen y est homogène horizontalement et sa structure est celle d'une couche à flux constant (Dupont, 2001). La sous-couche de rugosité, ou sous-couche rugueuse, située juste au-dessus de la canopée, possède une turbulence directement influencée par la présence des éléments de la canopée (Kaimal et Finnigan, 1994 ; Rotach, 1999). Les transferts de quantité de mouvement et de chaleur se font par la turbulence engendrée par les sillages des obstacles (Dupont, 2001). Enfin, la sous-couche de canopée existe dans le cas d'éléments de la rugosité d'épaisseurs élevées. L'air circule entre les éléments de rugosité et peut remonter dans la couche supérieure par convection ou entraînement lors de rencontre avec des obstacles (Dupont, 2001). Les processus

physiques qui s'y opèrent sont très complexes, du fait de l'existence de sources et de puits de quantités de mouvement, de chaleur et d'humidité.

III.1.2.2 Cas particulier de la couche de surface en milieu urbain

Au-dessus d'un sol hétérogène urbain, la structure de la couche de surface est similaire à celle existant au-dessus d'un sol homogène mais avec une sous-couche rugueuse urbaine plus épaisse (Dupont, 2001). Cette sous-couche peut avoir une extension verticale de l'ordre de quelques dizaines de mètres au-dessus des éléments urbains. Sa turbulence doit être prise en compte dans la modélisation des écoulements et de la dispersion des quantités comme la température ou les polluants (Rotach, 1999). Dans la canopée urbaine (ou sous-couche de canopée urbaine), la vitesse du vent varie peu en moyenne sur la verticale (Rotach, 1995), elle augmente ensuite rapidement au niveau des toits.

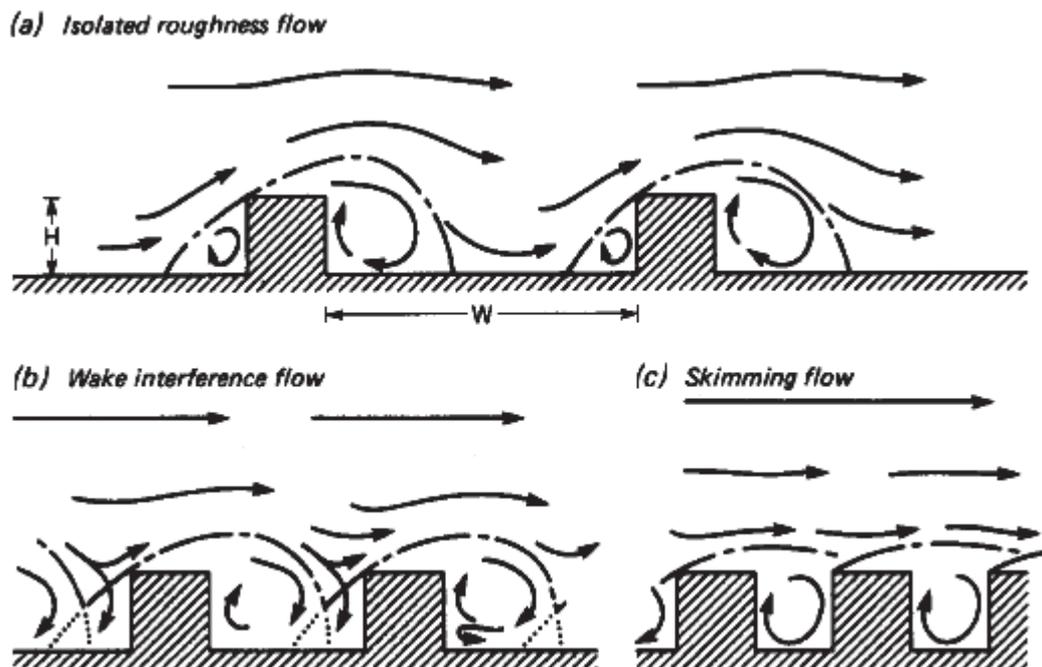


Figure III-5 : représentation des écoulements d'air dans ou au-dessus des rues canyon, dans le cas d'un vent perpendiculaire aux rues et pour différentes densités de bâti (Oke, 1988).

Cependant, le milieu urbain ne peut pas toujours être considéré comme un tapis rugueux, particulièrement pour le dépôt sur les différentes surfaces qui le composent. Un exemple de canopée urbaine souvent étudié dans la littérature est la configuration en rue canyon. La Figure III-5 en présente quelques exemples, schématisant des écoulements d'air dans ou au-dessus des rues canyons pour différentes densités du bâti. Les directions et vitesses des écoulements d'air dans la canopée sont dépendantes des conditions de vent au-dessus de la canopée. Selon la direction du vent au-dessus des toits (dans la sous-couche de rugosité) par rapport à la direction des rues, des écoulements canalisés ou des vortex peuvent être rencontrés dans les rues (Nakamura et Oke, 1988). Par contre, la vitesse du vent dans la rue canyon n'est pas obligatoirement proportionnelle à la vitesse du vent dans la

sous-couche de rugosité, surtout pour de faibles vitesses de vent au-dessus des toits. De plus, l'hétérogénéité des tailles des bâtiments peut générer des variations locales dans l'écoulement (Longley *et al.*, 2004). Enfin, les conditions de stabilité atmosphérique et le trafic routier ont une influence sur les conditions de turbulence dans la canopée urbaine (Rotach, 1995 ; Vardoulakis *et al.*, 2003 ; Longley *et al.*, 2004).

La distribution des températures dans une rue canyon est tributaire de la géométrie et de l'orientation de cette dernière (Niachou *et al.*, 2008). Les températures des surfaces sont dépendantes des conditions d'exposition au soleil des différents murs et de la nature des matériaux (Nakamura et Oke, 1988 ; Niachou *et al.*, 2008). La distribution verticale de la température de l'air au centre de la rue ne présente pas forcément de variations, par contre elle peut en montrer à l'approche des surfaces (Niachou *et al.*, 2008).

Cet exemple de la rue canyon met en évidence l'importance de mesurer les paramètres associés aux vitesses de dépôt sec (vitesse du vent, température de l'air) à proximité immédiate des surfaces dans la rue. Dans une première approche, et malgré l'influence qu'ils peuvent avoir, les paramètres turbulents de la CLA tels que la vitesse de frottement ou la longueur de Monin-Obukhov, habituellement associés aux flux de dépôt, ne seront pas considérés. La vitesse du vent dans la rue, au niveau des surfaces urbaines, est mesurée en priorité car elle est soumise aux effets de sillage des éléments urbains dans la canopée urbaine.

Grâce à cette description de la CLU et de ses différentes sous-couches, il apparaît que la mesure de vitesses de dépôt sec dans la canopée urbaine, sur différents types de surface, correspond à une étude du dépôt à la plus petite échelle atmosphérique. Les vitesses de dépôt mesurées sont représentatives de la dernière étape du transfert des particules, de l'atmosphère vers une surface urbaine. Ces vitesses de dépôt doivent être considérées comme liées aux concentrations d'aérosols au plus près des surfaces urbaines, suite à leur transfert par advection et turbulence dans toute l'épaisseur de la couche de surface urbaine. Par analogie avec les modèles de dépôt utilisant la notion de résistance (cf. paragraphe I.2.5.1), les vitesses de dépôt mesurées doivent être assimilées à l'inverse d'une résistance de surface. Ces considérations les rendent directement comparables aux vitesses de dépôt mesurées en soufflerie.

III.2 METHODE EXPERIMENTALE

Les expérimentations sont réalisées au LRC, de l'IRSN. Elles sont menées sur deux périodes d'observations, une première en hiver dans la période décembre 2010 - janvier 2011, une seconde en été dans la période juillet - août 2011, permettant de rencontrer des conditions atmosphériques variées. Une méthode de traçage par génération d'aérosols est retenue pour mesurer les vitesses de dépôt sur des surfaces urbaines : du verre et de l'enduit de façade verticaux ; de l'herbe synthétique et du bitume horizontaux ; de l'ardoise, de la tuile et du zinc obliques. Le protocole expérimental adopté se base sur celui de Connan *et al.* (2006). Cependant, un certain nombre de modifications sont apportées pour que le montage utilisé soit mobile d'une expérimentation à l'autre et puisse être mis en œuvre par deux personnes au minimum. Le déroulement de chaque expérimentation est typiquement : préparation du dispositif expérimental selon la direction du vent prévue pour une

période de 60 minutes ; génération de l'aérosol en amont de l'écoulement d'air, exposition d'éprouvettes (flux de dépôt de particules), prélèvement sur filtre (concentration en particules dans l'air) et mesure des paramètres environnementaux en aval de l'écoulement et simultanément pendant la période de vent favorable ; fin de génération, retrait et mesure des échantillons. Certaines mesures et informations additionnelles sur les conditions rencontrées peuvent être ajoutées d'une expérimentation sur l'autre dans le but d'améliorer de façon continue la méthode expérimentale et enrichir les données associées aux vitesses de dépôt sec.

III.2.1 SITE D'ETUDE

Le LRC se situe à Cherbourg-Octeville dans la Manche (50 ; latitude : 49,634°, longitude : -1,646°) sur le site universitaire (Figure III-6). Son environnement est représentatif d'un milieu urbain hétérogène composé de bâtiments universitaires de surfaces imposantes, de résidences individuelles et collectives, de rues, de parkings et d'espaces verts (herbe et haies) (Figure III-6-a). Ce type d'environnement se rapproche d'un quartier de zone pavillonnaire selon les quartiers types décrits par Theurer (1999) ou Dupont (2001).

Le LRC se trouve à l'extrémité sud-ouest du site universitaire de Cherbourg-Octeville. C'est un bâtiment de configuration simple avec une base carrée de 30 m de côté et une hauteur de mur de 7,5 m. Il est entouré de parkings et de haies sur ses façades nord-est et sud-est, et d'une rue et de bâtiments résidentiels sur ses façades nord-ouest et sud-ouest. Plus particulièrement, ses façades nord-est et sud-est sont bordées de parkings (entourés en rouge sur la Figure III-6-b) utilisés pour disposer le montage expérimental lors des expérimentations. Les axes horizontaux parallèles à ces façades sont orientés selon les directions horizontales 30°-210° et 120°-300° (traits verts sur la Figure III-6-b). Les vents venant de ces directions sont donc préférentiellement étudiés.

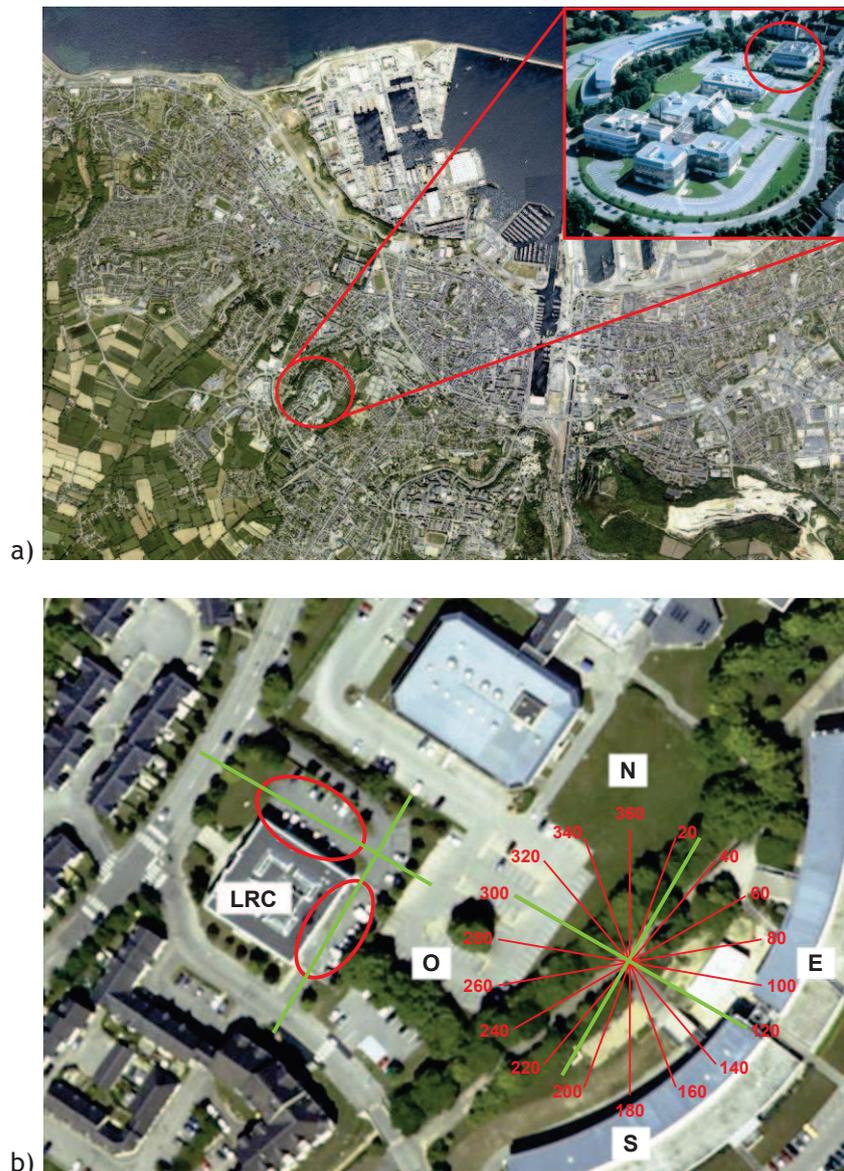


Figure III-6 : localisation du Laboratoire de Radioécologie de Cherbourg-Octeville dans la ville et sur le site universitaire (a), vue du dessus du laboratoire (b), emplacements privilégiés pour les expérimentations (entourés en rouge) et directions de vent privilégiées (traits verts).

(source : <http://www.geoportail.gouv.fr>)

III.2.2 MESURE DES VITESSES DE DEPOT SEC IN SITU AVEC UN AEROSOL TRACEUR

Les vitesses de dépôt mesurées dans cette partie de l'étude doivent être les plus représentatives possible de celles qui peuvent être typiquement rencontrées dans un milieu urbain. Les éprouvettes de verre lisse classique, d'enduit de façade et d'herbe synthétique, utilisées en soufflerie (cf. paragraphe II.2.1.2), sont de nouveau utilisées dans cette partie. Des éprouvettes de bitume, d'ardoise, de tuile plate en terre cuite et de zinc sont ajoutées pour diversifier les types de surfaces urbaines étudiés (Figure III-7). Chaque éprouvette a une surface carrée de 200 mm de côté. Elles sont

composées d'une base de polystyrène adaptée pour glisser sur un rail de fixation, d'une plaque de bois collée à la base de polystyrène et d'un substrat carré de surface urbaine collé à la plaque de bois.

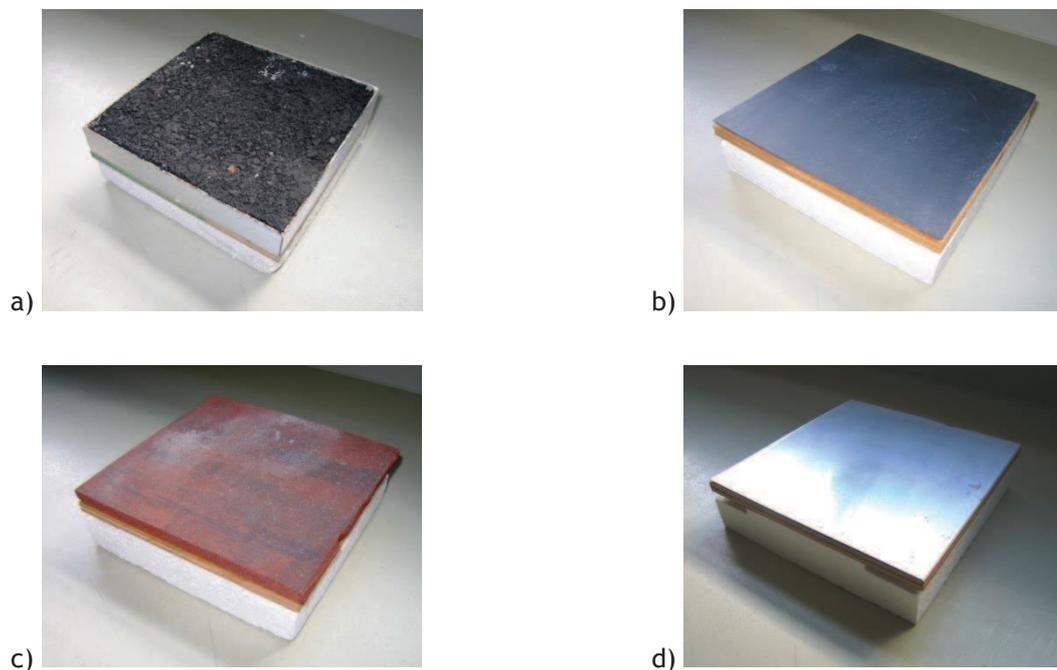


Figure III-7 : éprouvettes carrées de 200 mm de côté de bitume (a), d'ardoise (b), de tuile (c) et de zinc (d).

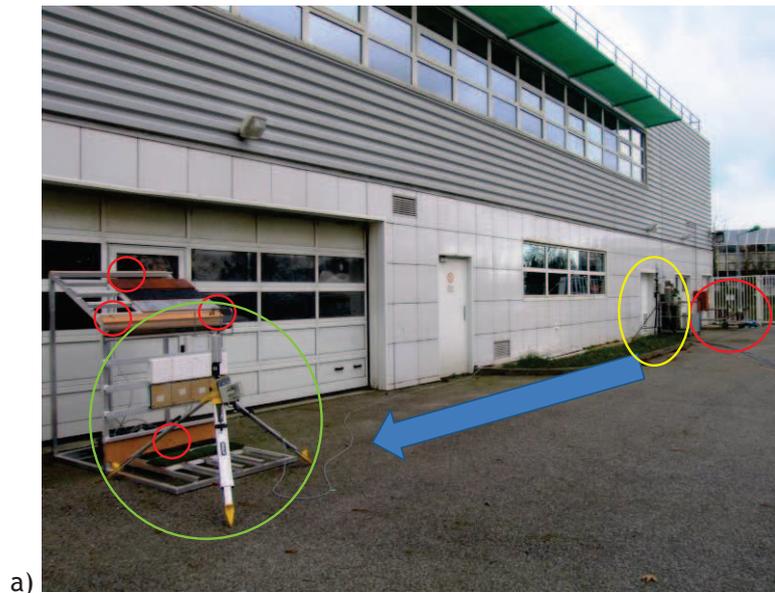
Afin d'être exposées aux aérosols dans des conditions expérimentales les plus proches possibles de celles réellement rencontrées en milieu urbain, les éprouvettes sont disposées sur un bâti-support spécifiquement conçu pour cette étude *in situ* (Figure III-8). Ce bâti est constitué de trois panneaux de 1,2 m par 1,0 m, en carré d'aluminium, sur lesquels sont fixés des rails destinés à y glisser les éprouvettes. Un panneau est horizontal au sol, le second est vertical et le troisième est en position oblique à 30° avec son segment le plus bas à 1 m du sol. La hauteur totale du bâti est de 1,67 m, sa largeur (face aux éprouvettes) de 1,2 m et sa profondeur (de côté) de 1,87 m. Les éprouvettes de bitume et d'herbe synthétique sont placées sur le panneau horizontal au sol, celle de verre et d'enduit de façade sur le panneau vertical et celles d'ardoise, de tuile et de zinc sur le panneau oblique (Figure III-8).



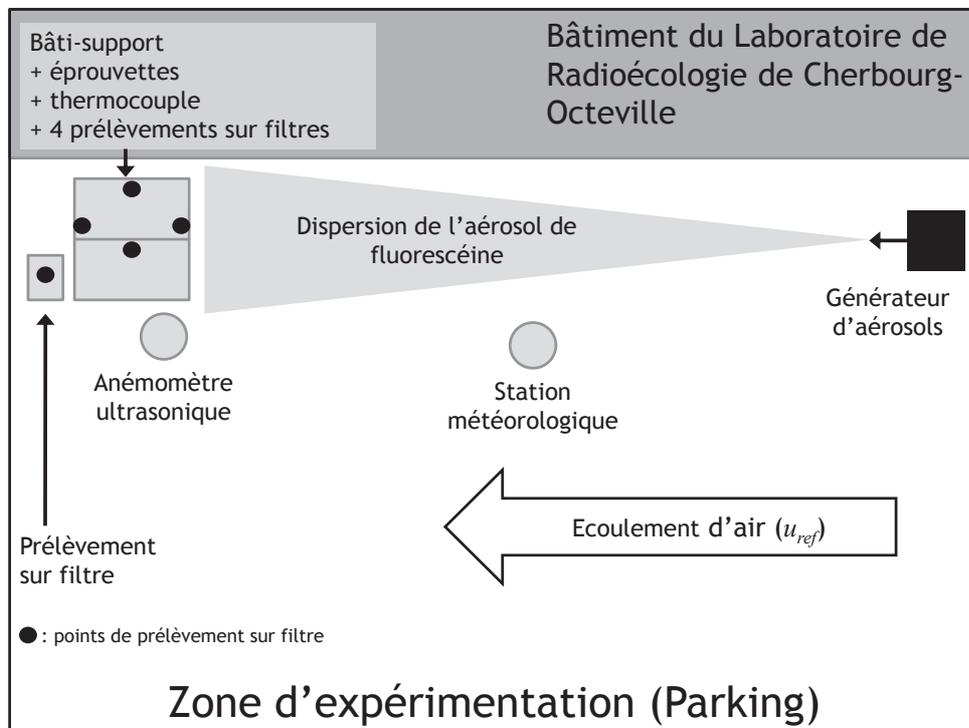
Figure III-8 : bâti-support équipé des éprouvettes urbaines (verre et enduit de façade verticaux, bitume et herbe horizontaux, ardoise, tuile et zinc obliques à 30°) et valise mobile de prélèvement sur filtre (à gauche). Une éprouvette de chaque surface (sauf l'herbe) est équipée d'un thermocouple (en blanc dans les cercles rouges). Les points de prélèvements d'aérosols sur filtres sont encerclés en vert.

Les éprouvettes sont disposées sur le bâti la veille de chaque expérimentation. L'ensemble éprouvettes-bâti est placé à l'extérieur du laboratoire la veille de chaque expérimentation, et jusqu'à leur début, pour que les éprouvettes soient à la température de l'air extérieur (Figure III-9-a). De cette façon, les éprouvettes ne sont pas artificiellement plus chaudes ou plus froides mais en équilibre thermique avec l'air ce qui évite un biais expérimental qui serait dû à une thermophorèse artificielle. Ce biais pourrait exister si les éprouvettes étaient sorties au dernier moment avant leur exposition à l'aérosol traceur.

Le matin de chaque expérimentation, le bâti est positionné sur un des deux parkings du LRC selon les prévisions de directions de vents établies la veille. Son orientation vis-à-vis des conditions de vent dès le matin (environ 8 h locale) permet d'exposer les éprouvettes aux rayonnements du soleil en l'absence de couverture nuageuse (Figure III-9-a), donc de chauffer les surfaces pour induire un probable effet de thermophorèse qui pourrait être naturellement rencontré.



a)



b)

Figure III-9 : a) illustration de la configuration d'une expérimentation pour un vent venant de la direction 30° expérimentation sur la façade sud-est du LRC : bâti (premier plan), générateur (cercle rouge à droite), station météorologique (cercle jaune à droite), anémomètre ultrasonique (cercle vert à gauche), têtes de prélèvement d'aérosols (cercles rouges à gauche) et direction moyenne du vent (flèche bleue) ;
b) schéma de principe d'une expérimentation *in situ* de courte durée (vue de dessus).

La mesure directe de vitesses de dépôt sec sur des surfaces urbaines sur de courtes périodes rend obligatoire l'utilisation d'un traceur absent de l'atmosphère afin qu'il soit détectable même pour de faibles quantités déposées. L'aérosol de fluorescéine utilisé en soufflerie, de distribution granulométrique submicronique et polydispersée (Figure II-8), est donc de nouveau employé. Il est

généralisé directement dans l'air avec le même dispositif pneumatique. Une canne de séchage est fixée en sortie de générateur pour canaliser le débit d'air sec et de particules, afin de sécher ces dernières avant leur émission dans l'air et afin d'orienter le panache vers le bâti.

De la même façon qu'en soufflerie, les vitesses de dépôt sont déterminées par la mesure de flux de dépôt sec sur la surface exposée et par la mesure de la concentration en aérosols dans l'air selon l'Équation II-17 et l'Équation II-18. La durée $t = 60$ min de l'expérimentation correspond au temps de génération de l'aérosol de fluorescéine donc au temps d'exposition des éprouvettes.

L'aérosol généré est transporté et dispersé vers le bâti et les éprouvettes par le vent, comme le présente la flèche bleue sur la Figure III-9-a. Les parkings situés aux abords du laboratoire sont utilisés pour séparer le générateur et le bâti d'une distance d'environ 15 m. Ainsi, le panache d'aérosol est assez large au niveau du bâti pour englober entièrement le support des éprouvettes. L'axe générateur-bâti est toujours orienté dans le sens du vent, le long du laboratoire, pour que le panache d'aérosol de fluorescéine soit canalisé par le bâtiment vers le bâti. Ainsi, seuls les vents provenant des directions 30° , 210° , 120° et 300° sont étudiés.

Cette disposition représente la situation la plus favorable pour avoir un panache allant directement vers le bâti, sans qu'il ne se disperse dans des recirculations d'air provoquées par le mobilier urbain. Cependant, les niveaux de fluorescéine déposés sur les éprouvettes et mesurés au cours de ces expérimentations sont souvent assez faibles. Pour mesurer ces quantités, la méthode de lavage des éprouvettes employée est la même que celle utilisée en soufflerie (cf. paragraphe II.2.2.3) mais les volumes de solution ammoniacuée sont plus faibles pour éviter une dilution trop importante de la fluorescéine récupérée (50 mL de solution à pH 9 au lieu de 100 mL).

Étant donné que les éprouvettes sont exposées à l'atmosphère pendant une nuit avant les expérimentations, des mesures de niveaux de « blanc » (ou de bruit de fond) sont systématiquement réalisées sur une éprouvette de chaque type de surface. Ces éprouvettes de « blancs » sont positionnées sur le bâti et sorties en même temps que les autres éprouvettes. Elles sont enlevées du bâti juste avant le début de la génération d'aérosol puis mesurées. Cela permet de vérifier qu'aucun composé fluoresçant dans les mêmes longueurs d'ondes que la fluorescéine ne s'est déposé sur les autres éprouvettes avant leur exposition à l'aérosol de fluorescéine. Sans cela, un composé « interférant » qui se serait déposé pourrait être détecté en même temps que la fluorescéine dans les solutions de lavage des éprouvettes exposées à la fluorescéine et fausser les résultats des expérimentations.

En parallèle de l'échantillonnage de l'aérosol de fluorescéine sur les surfaces des éprouvettes, des prélèvements sur filtres sont réalisés à proximité immédiate pour calculer les concentrations dans l'air. Les mêmes filtres en cellulose (Whatmann, diamètre 47 mm) que ceux utilisés en soufflerie sont employés. Ils sont placés dans des portes-filtres, eux-mêmes fixés sur le bâti et reliés à des pompes Becker VT 4.4. Les débits de prélèvement sont mesurés avec le débitmètre massique TSI 4000 Series, juste avant et juste après l'expérimentation. Quatre montages de ce type sont utilisés et positionnés sur le bâti. Les têtes de prélèvement des portes-filtres sont mises en évidence sur les Figure III-9-a et b. Un cinquième prélèvement est ajouté sur certaines expérimentations. Placé sous le vent juste derrière les éprouvettes de bitume et d'herbe synthétique à 500 mm du sol et décalé de 500 mm de la

face verticale du bâti (Figure III-8), il donne une information sur le mélange des aérosols de fluorescéine dans l'air, dû à la dispersion du panache d'aérosols et à son « battement » avec le vent.

Une attention particulière est apportée à la manipulation du générateur et des échantillons pour éviter de « polluer » ces derniers. En effet, une solution de fluorescéine de 80 g L^{-1} est utilisée au niveau du générateur alors que les masses de fluorescéine déposées sur les éprouvettes sont de l'ordre du nanogramme. Un transfert de fluorescéine du générateur aux éprouvettes, par exemple avec les mains, s'avérerait critique et rendrait les résultats de spectroscopie inutilisables pour le calcul de vitesses de dépôt.

III.2.3 MESURES DES PARAMETRES MICROMETEOROLOGIQUES ASSOCIES

Les paramètres micrométéorologiques associés aux vitesses de dépôt lors de ces expérimentations sont la vitesse et la direction du vent, la température des surfaces, la température et l'humidité relative de l'air. Tous ces paramètres sont mesurés simultanément à la génération d'aérosol pendant la totalité des 60 minutes.

Les trois composantes de la vitesse du vent sont mesurées à haute fréquence (10 Hz) avec un anémomètre ultrasonique Young 81000. Il permet le calcul des trois composantes de la vitesse et sa direction (horizontale). La vitesse moyenne (sur 60 s) est utilisée dans cette seconde étape, puis la troisième étape expérimentale de l'étude. L'anémomètre est placé à proximité immédiate du bâti (Figure III-9), à environ 1,2 m du sol. La température et l'humidité relative de l'air sont mesurées avec une station météorologique Spectrum WatchDog 2000 placée à mi-distance entre le générateur et le bâti. Les températures et humidités relatives sont données et enregistrées en moyennes toutes les 10 minutes.

Enfin, les températures des surfaces des éprouvettes sont mesurées avec des thermocouples de type K branchés à une station d'acquisition Ahlborn Almemo 5990-2. Chaque thermocouple est collé à une cinquième éprouvette de chaque type de surface (Figure III-8). Cette éprouvette est exposée aux mêmes conditions environnementales (sortie la veille, exposée durant les 60 min) et placée en aval des autres sur le bâti par rapport à la direction de l'écoulement d'air. Du fait de la présence du thermocouple et de son fil, ces éprouvettes ne servent pas à l'échantillonnage et la mesure de flux de dépôt sec.

III.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

Au total, huit expérimentations ont pu être réalisées lors des deux campagnes de décembre 2010-janvier 2011 et juillet-août 2011. Les principaux facteurs limitant le nombre d'expérimentations ont été les épisodes pluvieux et les directions de vent défavorables, c'est-à-dire différentes de celles recherchées et présentées précédemment. Dans cette partie, une synthèse des conditions météorologiques rencontrées lors de chaque expérimentation est d'abord donnée. Puis les vitesses de dépôt mesurées pour chaque type de surface sont présentées. Enfin, les données acquises sont comparées à celles mesurées en soufflerie et aux données de la littérature obtenues aussi sur des

échelles de temps courtes, typiquement inférieures ou égales à 60 min, correspondantes à l'échelle de temps des processus turbulents.

III.3.1 *CONDITIONS METEOROLOGIQUES*

Les résultats des mesures météorologiques et les observations visuelles notées pendant les expérimentations sont rassemblés dans le Tableau III-1. Deux expérimentations ont été réalisées en période hivernale et six en période estivale.

Les prédictions des directions de vent rapportées dans le tableau sont données par le modèle du système READY de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), pour un vent à 10 m aux coordonnées GPS du LRC. Les expérimentations ont été réalisées selon ces prévisions, lorsque la direction du vent prévue par le modèle était favorable aux directions souhaitées et stable pendant la demi-journée correspondant aux 60 min de génération d'aérosol prévues. Les directions horizontales de l'écoulement d'air sont calculées à partir des données de l'anémomètre ultrasonique. Les pourcentages de vent favorable correspondent aux périodes pendant lesquelles le vent souffle dans la direction allant du générateur vers le bâti, sur une plage de 180° correspondant à l'axe générateur-bâti plus ou moins 90°. Les pourcentages rapportés montrent que le vent a pu tourner pendant les expérimentations, jusqu'à la moitié du temps. Cette instabilité du vent oblige à réaliser les expérimentations sur des périodes de 60 min, pour avoir des quantités quantifiables de fluorescéine déposées sur les éprouvettes, plutôt que sur des périodes de 30 min souvent préférées dans la littérature. Celles-ci correspondent à l'échelle de temps micrométéorologique pendant laquelle les conditions météorologiques et turbulentes sont stationnaires.

De même que pour la direction, les vitesses moyennes de vent présentées dans le tableau sont aussi calculées à partir des données correspondant à des directions de vent favorables à la dispersion des particules de fluorescéine vers le bâti. Ces vitesses sont mesurées dans les trois dimensions par l'anémomètre ultrasonique. Pour l'ensemble des expérimentations, les vents rencontrés sont faibles et compris entre 0,5 et 2,2 m s⁻¹ en moyenne sur 60 minutes. Cependant, les écart-types associés à ces vitesses moyennes montrent que les fluctuations de vitesses de vent peuvent être assez fortes pendant les 60 minutes.

Les températures moyennes présentées sont calculées sur les valeurs mesurées par la station météorologique sur les 60 min. Ces valeurs moyennes ne sont pas directement utilisées pour calculer des écarts moyens de température entre les différentes surfaces et l'air (l'écart de température moyen entre chaque type de surface et l'air est calculé à partir des écarts de températures instantanés). Les écart-types associés aux températures moyennes de l'air montrent que celles-ci varient très peu (de l'ordre de 4 % au maximum) durant les expérimentations. Les humidités relatives mesurées sont données à titre informatif et ne seront pas réutilisées pour interpréter les vitesses de dépôt mesurées.

Tableau III-1 : données et observations visuelles caractérisant les conditions météorologiques rencontrées lors des expérimentations *in situ* de courte durée.

Indice	Date et heure de réalisation	Direction prévue du vent (°)	Pourcentage de direction de vent favorable (%)	Vitesse moyenne du vent (m s ⁻¹)	Température moyenne de l'air (°C)	Humidité relative moyenne (%)	Observations visuelles	Estimation de la classe de stabilité
1	15/12/2010 ; 10h35 - 11h20	301 - 20	85	1,03 ± 0,36	4,9 ± 0,2	51	---	D
2	20/01/2011 ; 09h07 - 10h07	5 - 20	98	1,07 ± 0,55	7,1 ± 0,3	---	Couverture nuageuse peu épaisse sans éclaircies	D
3	26/07/2011 ; 10h47 - 11h47	---	67	0,53 ± 0,31	18,1 ± 0,3	71	Couverture nuageuse sans éclaircies	D
4	28/07/2011 ; 12h30 - 13h30	330 - 350	61	0,57 ± 0,23	21,9 ± 0,4	57	Très ensoleillé	B
5	02/08/2011 ; 10h09 - 11h09	110 - 130	52	0,72 ± 0,23	20,2 ± 0,5	77	Ciel voilé avec éclaircies	C
6	03/08/2011 ; 14h08 - 15h08	280	100	2,21 ± 0,76	21,8 ± 0,4	58	Ensoleillé avec nuages	B - C
7	09/08/2011 ; 10h05 - 11h05	288 - 300	100	1,43 ± 0,48	16,9 ± 0,2	64	Ciel voilé avec éclaircies	C - D
8	11/08/2011 ; 9h41 - 10h41	226 - 229	68	0,77 ± 0,41	16,7 ± 0,6	80	Couverture nuageuse peu épaisse sans éclaircies	D

*Les classes données sont estimées selon la définition des classes de stabilité de Pasquill : A, très instable ; B, modérément instable ; C, légèrement instable ; D, neutre ; E, modérément stable ; F, très stable.

Les conditions micrométéorologiques expérimentales peuvent être classées en termes de stabilité atmosphérique selon les classes de Pasquill à partir des vitesses de vent et des observations visuelles sur les conditions d'ensoleillement. Les conditions de stabilités atmosphériques rencontrées sont majoritairement neutres ou proches du neutre (légèrement instables). Les conditions de fortes instabilités atmosphériques n'ont *a priori* pas été rencontrées lors de ces séries d'expérimentations.

III.3.2 CONCENTRATIONS, FLUX DE DEPOT SEC ET VITESSES DE DEPOT SEC

Les particules de fluorescéines dans l'air étant échantillonnées en cinq points autour des éprouvettes, les vitesses de dépôt sur chaque type de surface sont calculées avec une moyenne des concentrations mesurées au plus près de ces éprouvettes. Ainsi, les vitesses de dépôt des éprouvettes en position toit sont calculées à partir d'une moyenne des concentrations mesurées au point de prélèvement haut et aux deux points bas de la face « toit » du bâti (Figure III-8). De même, pour les éprouvettes du mur, la concentration utilisée est une moyenne de celles mesurées aux trois points de prélèvement, haut et bas, de la face « mur » plus celle du prélèvement en aval du bâti. Enfin, pour les éprouvettes du sol, la moyenne est calculée sur la position basse de la face « mur » du bâti et le prélèvement aval. Notons que l'écart relatif maximum moyen entre la concentration moyenne et les concentrations minimales et maximales observées est de $21 \pm 7\%$. Il semble que sur les 60 minutes que dure chaque expérimentation, les effets de panache sur la concentration en particules de fluorescéine, c'est-à-dire une concentration plus élevée au centre du panache que sur ses bords, ne soient pas visibles au niveau du bâti. Les fortes fluctuations verticales et horizontales de la direction du vent lors de ces expérimentations peuvent expliquer une homogénéisation des concentrations à l'échelle du bâti.

Mesurés sur 3 éprouvettes de chaque type de surface à chaque expérimentation, les flux de dépôt sec peuvent varier sensiblement d'une éprouvette à l'autre pour un même type de surface. Ces variations peuvent être expliquées soit par un apport de fluorescéine sur une éprouvette lors de sa manipulation, soit par des variations locales des conditions d'écoulement de l'air, soit, plus probablement, des hétérogénéités de surface entre les différentes éprouvettes, par exemple des distributions de rugosité différentes pour des surfaces rugueuses de même nature ou des températures de surfaces différentes. L'écart relatif moyen entre les flux de dépôt sec mesurés sur des éprouvettes d'un même type lors d'une expérimentation et la moyenne de ces flux est de 111 % et l'écart relatif médian est de 27 %. L'écart relatif moyen est important mais la valeur médiane montre que les différents flux de dépôt mesurés sont proches pour les éprouvettes d'une même surface lors d'une expérimentation donnée. Des flux de dépôt sec moyens sont donc calculés pour chaque type de surface à chaque expérimentation. Par contre, selon les conditions météorologiques rencontrées, les flux de dépôt ont parfois été non quantifiables sur certains types d'éprouvettes et plus particulièrement sur les éprouvettes verticales de verre et d'enduit de façade.

Les vitesses de dépôt sec moyennes sont présentées sur la Figure III-10 et dans le Tableau III-2 et le Tableau III-3. Pour chaque série d'éprouvettes d'un même type de surface, les flux de dépôt des éprouvettes présentant des valeurs aberrantes en comparaison des flux de dépôt des deux autres éprouvettes du même type ne sont pas pris en compte dans ces calculs de flux de dépôt moyen. De

cette façon, les vitesses de dépôt moyennes calculées ne surestiment ou ne sous-estiment pas les valeurs qui devraient être réellement mesurées. Les nombres d'éprouvettes retenues pour calculer les vitesses de dépôt moyennes sont donnés entre parenthèses dans le Tableau III-2. Les vitesses de dépôt calculées présentent en moyenne des valeurs allant de $9,6 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ pour l'enduit de façade vertical à $7,2 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ pour l'herbe synthétique horizontale. Ces valeurs sont dans les ordres de grandeur des vitesses de dépôt mesurées en soufflerie pour les mêmes types de surface pour une vitesse d'écoulement d'air de $u_{ref} = 1,3 \text{ m s}^{-1}$.

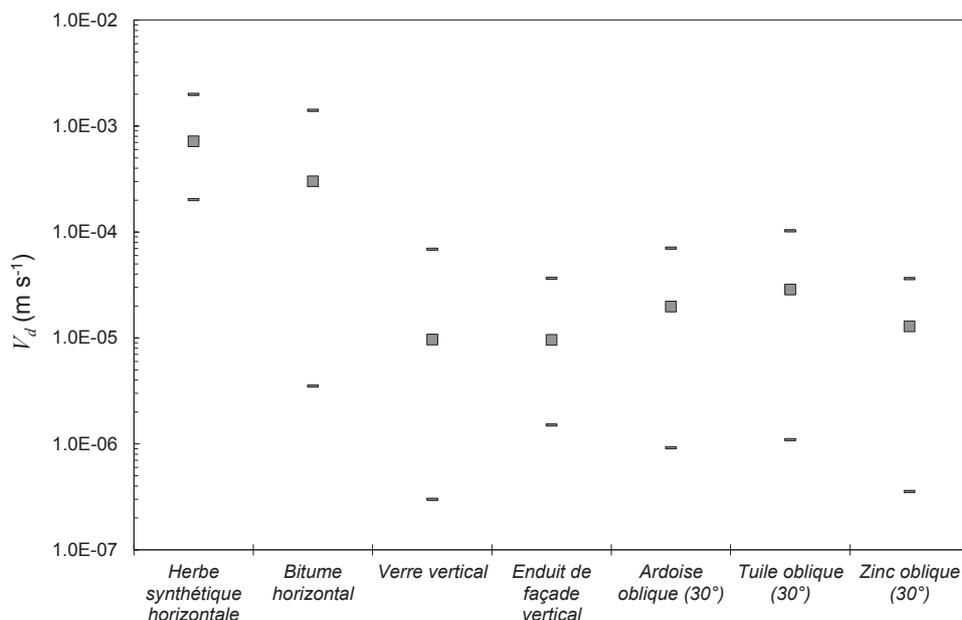


Figure III-10 : vitesses de dépôt sec moyennes, minimum et maximum de l'aérosol de fluorescéine mesurées sur les éprouvettes urbaines lors des expérimentations *in situ* de courte durée.

■ V_d moyenne, = V_d minimum et maximum

Le Tableau III-3 présente les vitesses de dépôt moyennes, minimum et maximum calculées pour chaque surface sur l'ensemble des données acquises lors des expérimentations. Il montre que les variations de ces vitesses de dépôt peuvent s'étendre sur un à plus de deux ordres de grandeurs entre les valeurs minimales et maximales mesurées, selon les types de surfaces considérés. Plus particulièrement, les surfaces de bitume, de verre et de zinc montrent les variations les plus fortes avec des rapports des valeurs minimum et maximum de respectivement 400, 230 et 102, alors que l'herbe synthétique montre des variations d'un facteur 10. Les variations de vitesses de dépôt entre les différents types de surfaces montrent l'importance des phénomènes turbulents (lié à la rugosité des surfaces et à la turbulence) et de la sédimentation (liée à l'orientation des surfaces). Les variations importantes de V_d sur les surfaces de bitume, de verre, d'ardoise, de tuile et de zinc suggèrent une influence importante de la thermophorèse sur ces surfaces sensibles au chauffage par le soleil, là où l'herbe et l'enduit de façade, moins sensibles, montrent des variations de V_d moins fortes.

Tableau III-2 : vitesses de dépôt, températures de l'air, des surfaces et vitesses moyennes du vent lors des expérimentations *in situ* de courte durée.

Indice	Date de réalisation		Type de surface (les nombres d'éprouvettes utilisées pour calculer les V_d moyennes sont donnés entre parenthèses)						Vitesse du vent u_{ref} ($m s^{-1}$)	Température de l'air ($^{\circ}C$)		
			Herbe synthétique horizontale	Bitume horizontal	Verre vertical	Enduit de façade vertical	Ardoise oblique (30°)	Tuile oblique (30°)			Zinc oblique (30°)	
1	15/12/2010	V_d ($m s^{-1}$)	Moyenne	$2,7 \cdot 10^{-4}$ (4)	$4,0 \cdot 10^{-5}$ (2)	$2,9 \cdot 10^{-5}$ (4)	$2,6 \cdot 10^{-5}$ (3)	$1,1 \cdot 10^{-5}$ (1)	$1,6 \cdot 10^{-5}$ (4)	---	1,03	5,0
			Minimum	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	---	$1,3 \cdot 10^{-5}$	---		
			Maximum	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$6,9 \cdot 10^{-5}$	$6,9 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	---	$1,7 \cdot 10^{-5}$	---		
		Température de surface ($^{\circ}C$)	---	---	---	---	---	---	---			
2	20/01/2011	V_d ($m s^{-1}$)	Moyenne	$5,0 \cdot 10^{-4}$ (4)	$5,2 \cdot 10^{-6}$ (3)	$1,1 \cdot 10^{-5}$ (1)	$7,5 \cdot 10^{-6}$ (2)	$6,8 \cdot 10^{-6}$ (2)	$3,1 \cdot 10^{-5}$ (4)	$1,6 \cdot 10^{-5}$ (4)	1,07	---
			Minimum	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	---	$3,7 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-6}$		
			Maximum	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-6}$	---	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$8,4 \cdot 10^{-5}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$		
		Température de surface ($^{\circ}C$)	---	---	---	---	---	---	---			
3	26/07/2011	V_d ($m s^{-1}$)	Moyenne	---	$8,6 \cdot 10^{-6}$ (2)	---	$3,2 \cdot 10^{-6}$ (2)	---	$4,3 \cdot 10^{-5}$ (2)	---	0,53	18,1
			Minimum	---	$6,8 \cdot 10^{-6}$	---	$1,5 \cdot 10^{-6}$	---	$3,2 \cdot 10^{-5}$	---		
			Maximum	---	$1,0 \cdot 10^{-5}$	---	$4,9 \cdot 10^{-6}$	---	$5,5 \cdot 10^{-5}$	---		
		Température de surface ($^{\circ}C$)	---	21,8	20,8	19,8	---	4,7	5,8			

Tableau III 2 (suite) : vitesses de dépôt, températures de l'air, des surfaces et vitesses moyennes du vent lors des expérimentations *in situ* de courte durée.

Indice	Date de réalisation		Type de surface (les nombres d'éprouvettes utilisées pour calculer les V_d moyennes sont donnés entre parenthèses)						Vitesse du vent u_{ref} ($m s^{-1}$)	Température de l'air ($^{\circ}C$)		
			Herbe synthétique horizontale	Bitume horizontal	Verre vertical	Enduit de façade vertical	Ardoise oblique (30°)	Tuile oblique (30°)			Zinc oblique (30°)	
4	28/07/2011	V_d ($m s^{-1}$)	Moyenne	$6,2 \cdot 10^{-4}$ (3)	$2,9 \cdot 10^{-4}$ (3)	$7,4 \cdot 10^{-7}$ (3)	$5,6 \cdot 10^{-6}$ (3)	$1,3 \cdot 10^{-5}$ (2)	$5,3 \cdot 10^{-5}$ (3)	0,57	22,1	
			Minimum	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$			$3,5 \cdot 10^{-7}$
			Maximum	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$			$3,5 \cdot 10^{-5}$
		Température de surface ($^{\circ}C$)	---	---	---	---	---	---	---			
5	02/08/2011	V_d ($m s^{-1}$)	Moyenne	$4,9 \cdot 10^{-4}$ (3)	$4,2 \cdot 10^{-4}$ (3)	$2,1 \cdot 10^{-6}$ (3)	$9,3 \cdot 10^{-6}$ (3)	$4,4 \cdot 10^{-5}$ (3)	$3,7 \cdot 10^{-5}$ (3)	0,72	20,4	
			Minimum	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$8,4 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$			$1,1 \cdot 10^{-5}$
			Maximum	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$			$2,2 \cdot 10^{-5}$
		Température de surface ($^{\circ}C$)	---	---	---	---	---	---	---			
6	03/08/2011	V_d ($m s^{-1}$)	Moyenne	$1,9 \cdot 10^{-3}$ (3)	$1,3 \cdot 10^{-3}$ (3)	$1,3 \cdot 10^{-5}$ (3)	$1,1 \cdot 10^{-5}$ (3)	$5,1 \cdot 10^{-5}$ (3)	$4,3 \cdot 10^{-5}$ (3)	2,21	21,9	
			Minimum	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$			$1,2 \cdot 10^{-5}$
			Maximum	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-5}$			$3,5 \cdot 10^{-5}$
		Température de surface ($^{\circ}C$)	---	35,9	28,1	25,3	36,5	33,2	31,8			

Tableau III 2 (fin) : vitesses de dépôt, températures de l'air, des surfaces et vitesses moyennes du vent lors des expérimentations *in situ* de courte durée.

Indice	Date de réalisation		Type de surface (les nombres d'éprouvettes utilisées pour calculer les V_d moyennes sont donnés entre parenthèses)						Vitesse du vent u_{ref} ($m s^{-1}$)	Température de l'air ($^{\circ}C$)		
			Herbe synthétique horizontale	Bitume horizontal	Verre vertical	Enduit de façade vertical	Ardoise oblique (30°)	Tuile oblique (30°)			Zinc oblique (30°)	
7	09/08/2011	V_d ($m s^{-1}$)	Moyenne	$7,0 \cdot 10^{-4}$ (3)	$2,4 \cdot 10^{-4}$ (3)	$2,5 \cdot 10^{-6}$ (1)	$5,3 \cdot 10^{-6}$ (3)	$9,1 \cdot 10^{-6}$ (3)	$5,3 \cdot 10^{-6}$ (3)	$8,1 \cdot 10^{-7}$ (2)	1,43	17,1
			Minimum	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	---	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$6,9 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$6,3 \cdot 10^{-7}$		
			Maximum	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	---	$8,2 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$	$9,8 \cdot 10^{-7}$		
		Température de surface ($^{\circ}C$)	---	22,4	20,5	18,2	26,1	22,7	23,1			
8	11/08/2011	V_d ($m s^{-1}$)	Moyenne	$6,0 \cdot 10^{-4}$ (3)	$9,1 \cdot 10^{-5}$ (3)	---	---	$3,1 \cdot 10^{-6}$ (3)	$1,4 \cdot 10^{-6}$ (2)	$1,1 \cdot 10^{-5}$ (3)	0,77	16,8
			Minimum	$5,1 \cdot 10^{-4}$	$8,9 \cdot 10^{-5}$	---	---	$9,2 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$		
			Maximum	$7,2 \cdot 10^{-4}$	$9,4 \cdot 10^{-5}$	---	---	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$		
		Température de surface ($^{\circ}C$)	---	17,7	17,2	16,9	---	18,0	---			

Tableau III-3 : valeurs des V_d moyennées sur l'ensemble des expérimentations, valeurs minimum et maximum pour chaque type de surface et chaque orientation.

V_d (10^{-5} m s^{-1})	Type de surface						
	Horizontale		Verticale		Oblique (30°)		
	Herbe synthétique	Bitume	Verre classique	Enduit de façade	Ardoise	Tuile	Zinc
Moyenne	72	30	0,97	0,96	2,0	2,9	1,3
Minimum	20	0,35	0,03	0,15	0,09	0,11	0,04
Maximum	200	140	6,9	3,7	7,0	10	3,6

Rappel pour l'aérosol de fluorescéine : $V_s = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$.

III.3.3 DISCUSSIONS

Les vitesses de dépôt moyennes sont comparées sur la Figure III-11 aux données de la littérature pour le même type d'expérimentations, c'est-à-dire pour des expérimentations réalisées sur une échelle de temps permettant de prendre en compte l'ensemble des phénomènes turbulents (60 min). Les données de cette étude sont centrées sur $d_p = 0,27 \mu\text{m}$ (le point correspondant à l'enduit de façade est légèrement décalé sur $0,3 \mu\text{m}$ pour faire apparaître celui du verre).

Les vitesses de dépôt rencontrées dans la littérature pour ce type d'expérimentations sont peu nombreuses et les valeurs très variables. Cependant, V_d moyenne pour l'herbe dans notre étude est concordante avec celles mesurées par Damay (2010). De même, la valeur moyenne mesurée sur le verre vertical est du même ordre de grandeur que celles données par Connan *et al.* (2006). Par contre, V_d moyenne pour l'enduit de façade est plus faible que celles données par ces derniers, d'un facteur 8. Les vitesses de dépôt mesurées sur le bitume, l'ardoise, la tuile et le zinc n'ont, *a priori*, pas encore d'équivalent dans la littérature.

En moyenne, les vitesses de dépôt sont les plus faibles pour les surfaces verticales, supérieures pour les surfaces obliques et maximales pour les surfaces horizontales. En soufflerie, la sédimentation joue un rôle important dans le dépôt sur des surfaces horizontales lisses (le verre) ou peu rugueuses (l'enduit de façade). Pour le verre horizontal et une faible vitesse d'écoulement, la sédimentation peut même être le principal phénomène de dépôt (*cf.* paragraphe II.3.1.1). Ceci explique les vitesses de dépôt observées sur ces expérimentations *in situ* pour lesquelles les conditions météorologiques sont peu diversifiées, c'est-à-dire de faibles vitesses de vent et des conditions atmosphériques neutres ou proches du neutre.

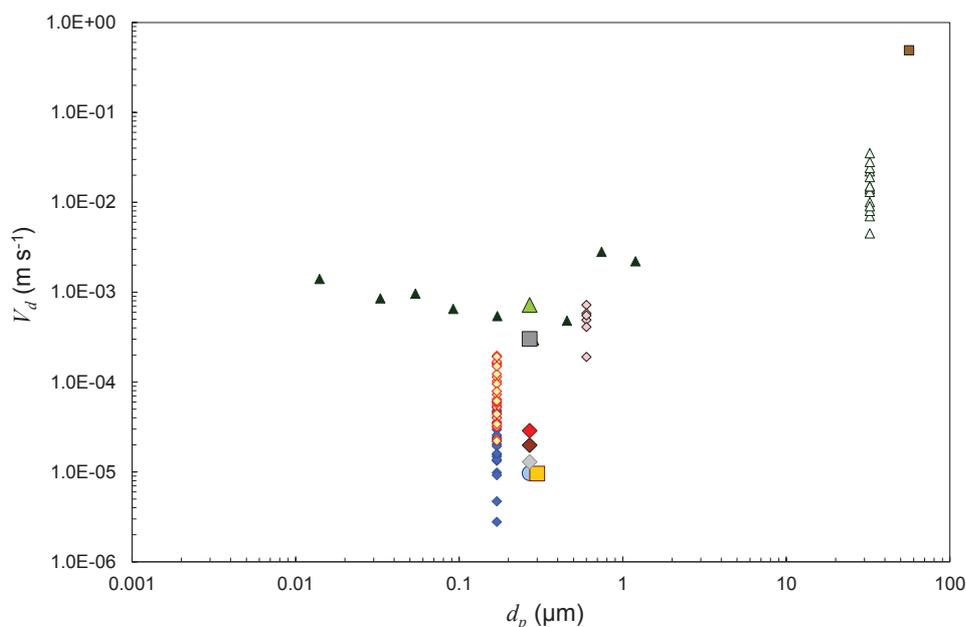


Figure III-11 : vitesses de dépôt sec moyennes des expérimentations *in situ* de courte durée et données de la littérature pour des expositions courtes à des aérosols.

Expérimentations *in situ* de courte durée : surfaces horizontales : ▲ herbe synthétique, ■ bitume ;
surfaces verticales : ○ verre classique, □ enduit de façade ;
surfaces obliques (30°) : ◆ ardoise, ◆ tuile, ◆ zinc ;

Données de la littérature : surfaces horizontales : △ Chamberlain (1967), ▲ Damay (2010),
◇ Aksu et al. (1996), ■ Kim *et al.* (2000) ;

surfaces verticales : Connan *et al.* (2006) : ◆ verre, ◆ enduit de façade.

Les surfaces représentatives des toits montrent des vitesses de dépôt assez proches. Cependant, elles sont un peu plus fortes pour la tuile que pour l'ardoise et sont les plus faibles pour le zinc (Figure III-10 et Figure III-11). Ces différences de vitesses de dépôt peuvent probablement trouver leur explication dans la différence des rugosités de chaque type de surface. En effet, comme cela a été montré par les expérimentations en soufflerie, la rugosité d'une surface favorise le dépôt turbulent par impaction et interception. Visuellement, les éprouvettes de zinc présentent des surfaces lisses régulières, les éprouvettes d'ardoise des surfaces lisses au grain fin mais irrégulières du fait de leur structure en lamelles et les éprouvettes de tuile des surfaces lisses régulières au grain plus grossier présentant des rugosités visibles. Les rugosités de ces surfaces n'ont pas été caractérisées par des mesures dans cette étude. Cependant, il est probable que la quantification des paramètres de rugosités de l'ardoise, de la tuile et du zinc pourrait appuyer l'hypothèse d'un dépôt par turbulence plus important sur la tuile que sur les deux autres surfaces.

Les vitesses de dépôt des surfaces verticales de verre et d'enduit de façade sont faibles. Leurs valeurs moyennes sont de l'ordre de $1 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (Tableau III-3). Selon les résultats de soufflerie, le dépôt sur les surfaces verticales de verre et d'enduit est faible et principalement dû aux phénomènes turbulents. Les vitesses de dépôt de l'enduit de façade devraient être supérieures à celle du verre dont la surface lisse engendre moins de dépôt par turbulence qu'une surface rugueuse. La valeur de V_d pour le verre

semble donc élevée au regard de celle de l'enduit de façade. Etant donné les valeurs de V_d pour ces deux surfaces sur l'ensemble des expérimentations, il est possible que la différence de dépôt réelle ne soit pas quantifiable du fait des incertitudes liées à la méthode expérimentale utilisée.

Les surfaces horizontales présentent les V_d moyennes les plus élevées. Celles de l'herbe synthétique sont du même ordre de grandeur que celles mesurées en soufflerie (quelques 10^{-4} m s^{-1}). Par contre, les vitesses de dépôt mesurées sur le bitume sont inférieures d'un facteur 2 à celles de l'herbe synthétique, soit dans le même ordre de grandeur (Figure III-10). Ces vitesses de dépôt sur le bitume semblent élevées étant donné les différences évidentes entre leurs rugosités respectives. En effet, bien qu'elle ne soit pas quantifiée par des mesures, la surface de bitume présente une rugosité d'aspect visuel similaire à la rugosité de l'enduit de façade. Par contre, les natures chimiques des surfaces de bitume et d'enduit de façade sont différentes. Le bitume est un dérivé du pétrole, alors que l'enduit de façade est composé de sable, de ciment, de chaux et de copolymère. Ces compositions chimiques différentes pourraient influencer le dépôt, par exemple par des micro-aspérités différentes à leurs surfaces, des efficacités de rebond différentes... Cependant, les moyens expérimentaux mis en œuvre pour ces expérimentations ne permettent pas de déterminer l'influence de la nature chimique de la surface sur les vitesses de dépôt.

Les vitesses de dépôt acquises *in situ* sur le verre, l'enduit de façade et l'herbe synthétique peuvent être comparées aux ajustements réalisés à partir des données en soufflerie et présentés au paragraphe II.3.3. Par contre, les résultats acquis sur les surfaces d'ardoise et de tuile ne peuvent être comparés avec ces ajustements qu'à titre informatif car ces derniers ne sont pas représentatifs de ces surfaces. Le zinc, d'aspect lisse peut éventuellement être comparé à la loi d'ajustement correspondante au verre.

Les vitesses de dépôt moyennes, minimum et maximum de chaque expérimentation, mesurées sur le verre et l'enduit de façade verticaux ainsi que sur l'herbe synthétique horizontale, sont présentées sur la Figure III-12 en fonction de la vitesse moyenne du vent u_{ref} mesurée avec l'anémomètre ultrasonique. Les résultats des ajustements développés au Chapitre II et les données acquises en soufflerie, sans chauffage de surface pour le verre classique et l'enduit de façade verticaux et pour l'herbe synthétique horizontale, sont aussi présentés sur cette figure.

Les valeurs *in situ* de V_d du verre et de l'enduit de façade semblent augmenter pour des vitesses de vent croissantes. Cette tendance est en accord avec les résultats obtenus en soufflerie et met en évidence l'importance des phénomènes turbulents, c'est-à-dire l'impaction turbulente et l'interception. Selon cette figure, les ajustements de V_d pour le verre et l'enduit de façade verticaux semblent estimer correctement les vitesses de dépôt sec. Sans la prise en compte de l'effet de thermophorèse dans ces estimations, les erreurs relatives moyennes entre les résultats expérimentaux et les valeurs calculées sont de 468 % (erreur médiane de 303 %) pour le verre et de 169 % (erreur médiane de 138 %) pour l'enduit de façade. Ces valeurs semblent élevées mais pourraient être pour partie expliquées par les fortes variations des vitesses de dépôt sec sous l'effet de la thermophorèse pour des vitesses de vent très proches. Les résultats de soufflerie montrent que la thermophorèse peut avoir un impact important sur ces valeurs de V_d . Par ailleurs, en considérant les données de soufflerie acquises sur des surfaces non chauffées et les lois d'ajustement présentées, il semble que les vitesses

de dépôt mesurées *in situ* soient plus fortes que celles qui pourraient être obtenues en soufflerie pour les mêmes vitesses de vent.

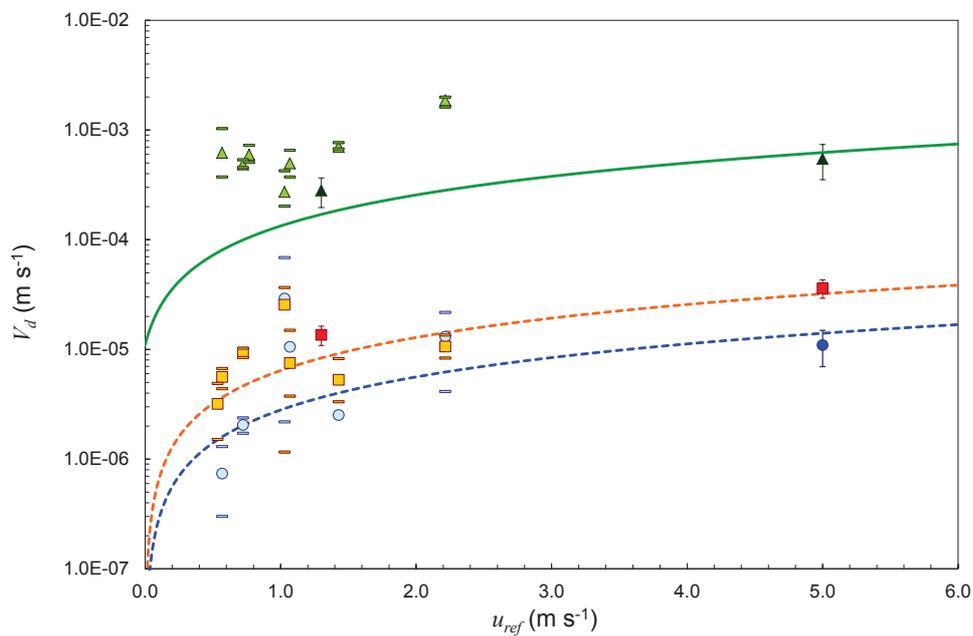


Figure III-12 : vitesses de dépôt sec moyennes, minimum et maximum, et ajustements sur les données de soufflerie pour le verre classique, l'enduit de façade et l'herbe synthétique en fonction de u_{ref} .

In situ : verre classique vertical : \circ V_d moyenne, $=$ V_d minimum et maximum ;
 enduit de façade vertical : \square V_d moyenne, $=$ V_d minimum et maximum ;
 herbe synthétique horizontale : \triangle V_d moyenne, $=$ V_d minimum et maximum ;
 soufflerie : \bullet verre classique vertical ; \blacksquare enduit de façade vertical ;
 \blacktriangle herbe synthétique horizontale ;
 ajustements : $---$ verre classique vertical ; $---$ enduit de façade vertical ;
 $---$ herbe synthétique horizontale.

Les vitesses de dépôt mesurées sur l'herbe synthétique sont croissantes pour des vitesses de vent à partir de $u_{ref} > 1 \text{ m s}^{-1}$. Pour $u_{ref} < 1 \text{ m s}^{-1}$, les points sont dispersés et ne montrent pas de tendance nette. Pour $u_{ref} > 1 \text{ m s}^{-1}$, la croissance de V_d avec la vitesse du vent est due aux phénomènes turbulents de dépôt (l'impaction turbulente et l'interception). Par contre, les vitesses de dépôt mesurées *in situ* semblent systématiquement supérieures à celles mesurées en soufflerie et aux estimations de l'ajustement pour des vitesses de vent égales.

Cette observation de vitesses de dépôt systématiquement plus fortes *in situ* pour l'herbe synthétique a aussi été constatée pour le verre et l'enduit de façade. Cependant, les résultats obtenus *in situ* tendent à montrer que les phénomènes physiques participant au dépôt sec dans nos conditions expérimentales sont les mêmes que ceux étudiés précédemment en soufflerie, c'est-à-dire l'impaction, l'interception, la sédimentation, la thermophorèse et la diffusion brownienne.

Une première hypothèse pouvant être avancée pour expliquer les vitesses de dépôt plus fortes mesurées *in situ* est l'instationnarité du vent pendant les 60 min d'expérimentation. Contrairement

aux conditions rencontrées en soufflerie, l'écoulement d'air dans une rue n'est pas constant en vitesse et en direction. Les rafales de vent peuvent engendrer des directions et des vitesses instantanées du vent fortement variables, modifiant continuellement les conditions de turbulence au-dessus des éprouvettes urbaines. Ces instationnarités pourraient expliquer les différences constatées entre les V_d mesurées *in situ* et les valeurs mesurées en soufflerie.

Une seconde hypothèse est une possibilité d'effet de bord de la géométrie des éprouvettes sur l'écoulement d'air, provoquant des écoulements plus turbulents sur les bords des éprouvettes, donc des dépôts de particules par impaction et interception plus importants. Cet effet de bord a été observé par Pesava et Horvath (1999) dans le cas de dépôt de particules submicroniques sur un rectangle de verre. Leurs résultats montrent que le dépôt augmente de quelques pourcents sur les arêtes par rapport au dépôt moyen sur l'ensemble de l'éprouvette du fait des turbulences. Un tel effet de bord n'a pu être rencontré en soufflerie du fait de la configuration expérimentale adoptée, c'est-à-dire un développement de chaque type de surface sur l'ensemble de la paroi (horizontale ou verticale) avec des éprouvettes insérées dans ces surfaces. Des expérimentations *in situ* de dépôt sur des superficies plus grandes et continues de chaque type de surface urbaines, avec des éprouvettes insérées et affleurant au reste des surfaces, permettraient de se soustraire de cet effet de bord et d'être le plus proche possible des résultats qui seraient observés sur une façade.

Les vitesses de dépôt sec du verre et de l'enduit de façade peuvent être comparées à celles obtenues par Connan *et al.* (2006) dont le dispositif expérimental est similaire (aérosol, types de surfaces urbaines, orientation de ces surfaces et mesure de la vitesse du vent). Leurs vitesses de dépôt, celles acquises *in situ* dans cette partie de l'étude et les résultats des ajustements sur les données de soufflerie pour ces surfaces sans prises en compte de la température des surfaces sont présentés sur la Figure III-13.

Comme pour notre étude, les vitesses de dépôt de Connan *et al.* (2006) présentent de fortes variations. D'une part, leurs V_d augmentent avec la vitesse du vent, d'autre part les fortes variations observées pour des vitesses de vent proches sont attribuées par les auteurs à l'effet de la thermophorèse sur leurs surfaces chauffées par le soleil. Leurs vitesses de dépôt sont supérieures aux lois ajustées sur les données de soufflerie de notre étude. Elles semblent aussi supérieures aux données de nos expérimentations *in situ*, leurs données les plus faibles, influencées par la thermophorèse, étant dans leur ensemble assez proche de nos vitesses de dépôt les plus élevées et, *a priori*, non soumises à la thermophorèse. Cette différence pourrait s'expliquer par les légères différences de méthode entre les deux études : leurs éprouvettes sont très proches d'un mur de bâtiment et la mesure de la vitesse de vent n'est pas située à la même distance des éprouvettes. Cependant, l'ensemble des vitesses de dépôt présentées sur la Figure III-13 respectent les mêmes ordres de grandeurs et sont complémentaires au vu de la gamme de vitesses de vent qu'elles recouvrent.

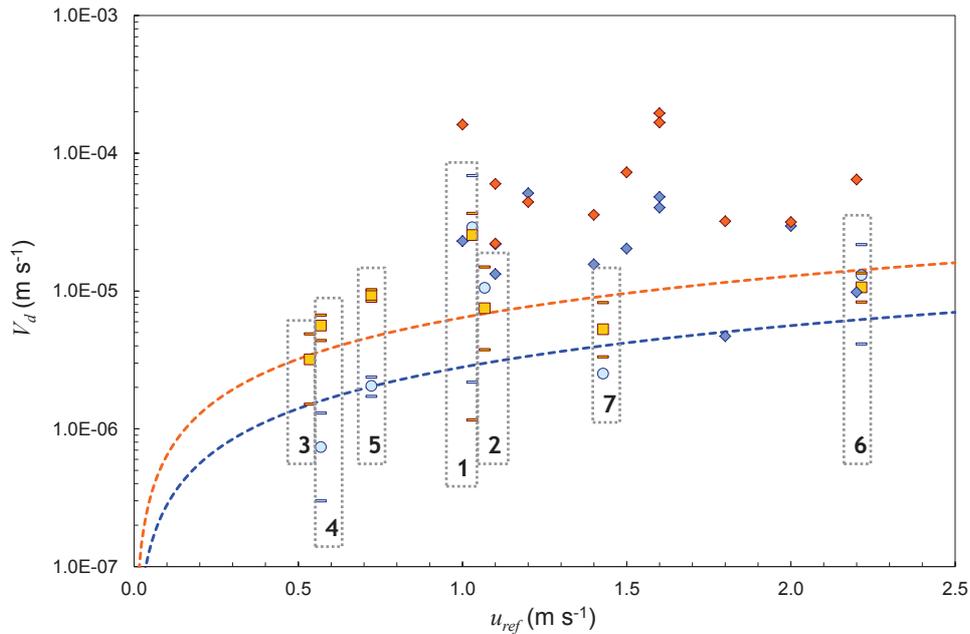


Figure III-13 : vitesses de dépôt sec moyennes, minimum et maximum de cette étude, vitesses de dépôt de Connan *et al.* (2006) et résultats des ajustements sur les données de soufflerie pour le verre classique et l'enduit de façade.

Cette étude *in situ* : verre classique vertical : ○ V_d moyenne, = V_d minimum et maximum ;
 enduit de façade vertical : ■ V_d moyenne, ▬ V_d minimum et maximum ;
 (les points sont encadrés et référencés avec leur numéro d'expérimentation, c.f. Tableau III-2)
 Connan *et al.* (2006) Soufflerie : ◆ verre classique vertical ; ◆ enduit de façade vertical ;
 ajustements : - - - verre classique vertical ; - - - enduit de façade vertical.

Pour déterminer l'influence ou non de la thermophorèse *in situ*, les vitesses de dépôt sec moyennes mesurées sur le verre et l'enduit de façade peuvent être comparées aux lois ajustées aux données de soufflerie qui prennent en compte la thermophorèse. Pour cela, il faut connaître un écart de température. Cela est possible en utilisant les mesures de température des surfaces et de l'air réalisées avec les thermocouples *in situ*. Le Tableau III-4 synthétise les écarts relatifs moyens et médians entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées. Sur l'ensemble des données, ces écarts entre les observations et les prédictions sont en moyenne de 433 % (159 % en médiane) pour le verre, contre 468 % (303 % en médiane) sans la prise en compte de la thermophorèse, et de 74 % pour l'enduit de façade, contre 169 % sans prise en compte de la thermophorèse. Dans le cas des points expérimentaux dont les températures des surfaces étaient supérieures aux températures de l'air, donc *a priori* sous influence de la thermophorèse, l'écart moyen est de 159 % pour le verre (264 % sans prise en compte de la thermophorèse dans le calcul) et de 36 % pour l'enduit de façade (257 % sans prise en compte de la thermophorèse dans le calcul). Ces comparaisons concernent seulement trois vitesses de dépôt moyennes pour le verre et trois pour l'enduit de façade. De plus, les incertitudes sur l'estimation de V_d par le calcul sont plus fortes pour le verre que pour l'enduit car les ajustements sur le verre ne modélisent pas l'indépendance de V_d à u_{ref} dans la soufflerie pour $\Delta T_{surface-air} > 2$ K. Cependant la prise en compte de la thermophorèse réduit systématiquement l'écart pour ces deux surfaces. Ces résultats semblent confirmer que la thermophorèse a une influence *in situ* au même titre

qu'en soufflerie et que sa prise en compte dans l'étude du dépôt sur des surfaces urbaines est importante.

L'ensemble des résultats du verre, de l'enduit et de l'herbe montrent que pour des conditions similaires, les vitesses de dépôt mesurées *in situ* sont plus dispersées qu'en soufflerie. Les éprouvettes d'un même type de surface, exposées aux mêmes conditions micrométéorologiques, présentent des résultats compris dans le même ordre de grandeur mais dispersés. Ces différences sont sans doute dues aux conditions expérimentales moins stables qu'en soufflerie : les températures des surfaces peuvent varier d'une éprouvette à une autre ; la température de l'air peut varier ; les vitesses et directions du vent sont instationnaires).

Tableau III-4 : récapitulatif des erreurs relatives moyennes et médianes entre les V_d expérimentales et calculées avec les ajustements réalisés sur les données de soufflerie, avec et sans prise en compte de la thermophorèse.

	Verre		Enduit de façade	
	Erreur relative moyenne (%)	Erreur relative médiane (%)	Erreur relative moyenne (%)	Erreur relative médiane (%)
Sans prise en compte de la thermophorèse	468	303	169	138
Avec prise en compte de la thermophorèse	433	159	74	68

Les vitesses de dépôt sec mesurées sur les surfaces représentatives des toits placées en position obliques sont présentées en fonction de la vitesse du vent sur la Figure III-14.

Les ajustements issus des expérimentations en soufflerie pour le verre et l'enduit de façade sont représentés à titre de comparaison. La part de dépôt par sédimentation a été corrigée pour tenir compte de l'inclinaison à 30° des éprouvettes. Les vitesses de dépôt sec mesurées sur ces surfaces sont très variables selon les conditions rencontrées. Du fait d'une faible variabilité de la vitesse du vent sur les campagnes expérimentales, V_d ne montre pas de croissance nette avec la vitesse du vent pour ces surfaces. Les valeurs mesurées sont de l'ordre de grandeur de celles attendues pour des surfaces de verre ou d'enduit de façade orientées de la même façon. Notamment, le zinc semble présenter des vitesses de dépôt moins fortes que les deux autres surfaces et plus proches des résultats attendus pour du verre.

Les températures des surfaces n'ont pas été mesurées régulièrement pendant les expérimentations, cependant, quelques commentaires peuvent être faits à partir des vitesses de dépôt mesurées, des températures mesurées avec les thermocouples ou encore à partir des observations visuelles réalisées pendant les expérimentations. D'après le Tableau III-1 et le Tableau III-2, les températures des éprouvettes d'ardoise ont été mesurées lors des expérimentations 6 et 7 (respectivement $u_{ref} = 2,21$ et $1,43 \text{ m s}^{-1}$), celle de tuile lors des expérimentations 3, 6, 7 et 8 (respectivement $u_{ref} = 0,53, 2,21, 1,43$ et $0,77 \text{ m s}^{-1}$) et celle du zinc lors des expérimentations 3, 6 et 7. Ce manque de mesure est dû à la priorité qui a été donnée à la mesure des températures des surfaces de verre et d'enduit de façade.

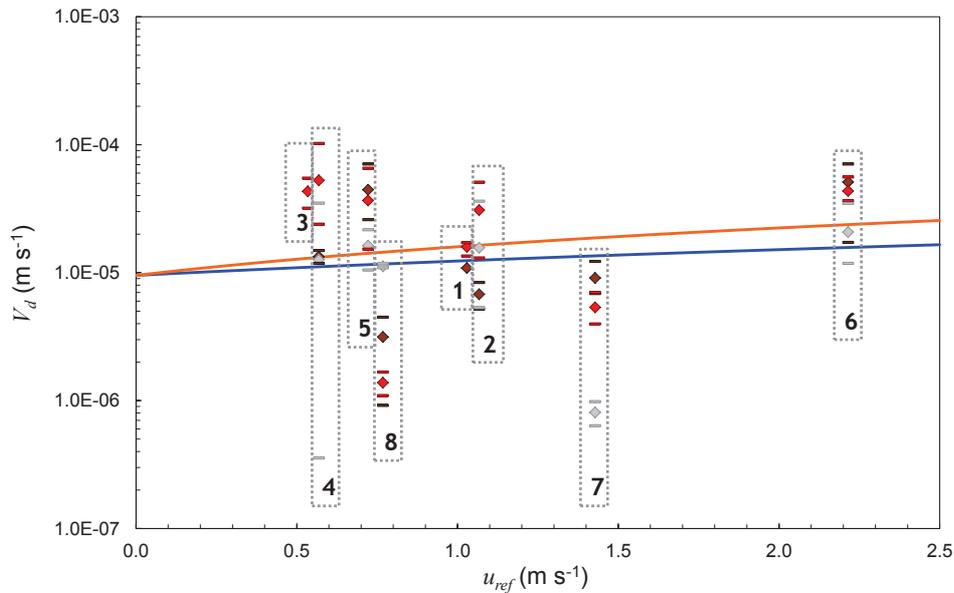


Figure III-14 : vitesses de dépôt sec moyennes, minimum et maximum mesurées sur les surfaces d'ardoise, de tuile et de zinc, ajustements des vitesses de dépôt pour le verre classique et l'enduit de façade.

- Ardoise : \blacklozenge V_d moyenne, — V_d minimum et maximum ;
 tuile : $\color{red}\blacklozenge$ V_d moyenne, — V_d minimum et maximum ;
 zinc : \blacklozenge V_d moyenne, — V_d minimum et maximum ;
 (les points sont encadrés et référencés avec leur numéro d'expérimentation, c.f. Tableau III-2)
 ajustements : — verre classique oblique 30° ; — enduit de façade oblique 30° .

Pour les expérimentations 6 et 7, les écarts de températures $\Delta T_{\text{ardoise-air}}$ étaient respectivement de 14,6 et 9,0 K. Un effet de la thermophorèse induit par cet écart de température pourrait expliquer que V_d de l'expérimentation 7 soit inférieure à la valeur estimée pour une surface de verre sans effet de thermophorèse et que V_d de l'expérimentation 6 soit très proche de celle mesurée lors de l'expérimentation 2. L'ensoleillement expliquerait aussi la valeur beaucoup plus faible de V_d pour l'expérimentation 4 ($u_{\text{ref}} = 0,57 \text{ m s}^{-1}$) que pour l'expérimentation 5 ($u_{\text{ref}} = 0,72 \text{ m s}^{-1}$), car il était plus important lors de l'expérimentation 4, ce qui aurait pu chauffer l'ardoise et limiter le dépôt par effet de thermophorèse.

Les écarts de température entre la tuile et l'air $\Delta T_{\text{tuile-air}}$ lors des expérimentations 3, 6, 7 et 8 étaient respectivement de 4,7, 11,3, 5,6 et 1,2 K. La comparaison des expérimentations 6 et 7 à l'expérimentation 2 et à l'estimation de la loi ajustée pour le verre montre des résultats cohérents. Par contre, les observations visuelles réalisées lors des expérimentations ne permettent pas d'expliquer les valeurs proches pour les expérimentations 3 et 4, ni la valeur très faible tirée de l'expérimentation 8 par rapport à celle obtenue pour des conditions *a priori* plus ensoleillées lors de l'expérimentation 5. L'absence de données de températures pour les expérimentations 4 et 5 s'avère ici handicapante pour interpréter plus finement les résultats.

Enfin, les écarts de températures entre le zinc et l'air $\Delta T_{\text{zinc-air}}$ étaient de 5,8, 9,9 et 6,0 K pendant les expérimentations 3, 6 et 7. Les explications données pour les expérimentations 6 et 7 pour l'ardoise et

la tuile sont de nouveaux valables pour le zinc. Il semble de plus que, pour ces deux expérimentations, les vitesses de dépôt mesurées sur le zinc soient inférieures à celles mesurées sur l'ardoise et la tuile. Cela rappelle la comparaison réalisée en soufflerie entre le verre et l'enduit de façade lors du chauffage de ces surfaces, à savoir que la thermophorèse est très efficace pour une surface lisse et que pour celle-ci le dépôt par processus turbulents semble être absent. Dans le cas du zinc *in situ*, le dépôt sec ne serait pas provoqué par la turbulence, contrairement à l'ardoise et la tuile qui sont des surfaces faiblement rugueuses, d'où des V_d très faibles. De plus, la valeur de V_d beaucoup plus faible de l'expérimentation 7 par rapport à l'expérimentation 6 est cohérente avec une V_d plus dépendante de l'écart de température entre l'air et la surface lisse que de la vitesse du vent. Il est possible que pour l'expérimentation 3, dont la vitesse de vent est très faible ($u_{ref} = 0,53 \text{ m s}^{-1}$), la diminution du dépôt engendré par un effet de thermophorèse n'ait pas permis de quantifier le flux de dépôt. Dans leur ensemble, le reste des vitesses de dépôt mesurées semble être du même ordre de grandeur que celui estimé par la loi d'ajustement pour le verre lisse. On constate aussi que les V_d mesurées lors des expérimentations 2, 4, 5 et 8 sont peu dispersées.

La Figure III-15 présente les données acquises sur le bitume et l'herbe synthétique, ainsi que les résultats des ajustements sur l'enduit de façade et l'herbe synthétique avec des éprouvettes horizontales.

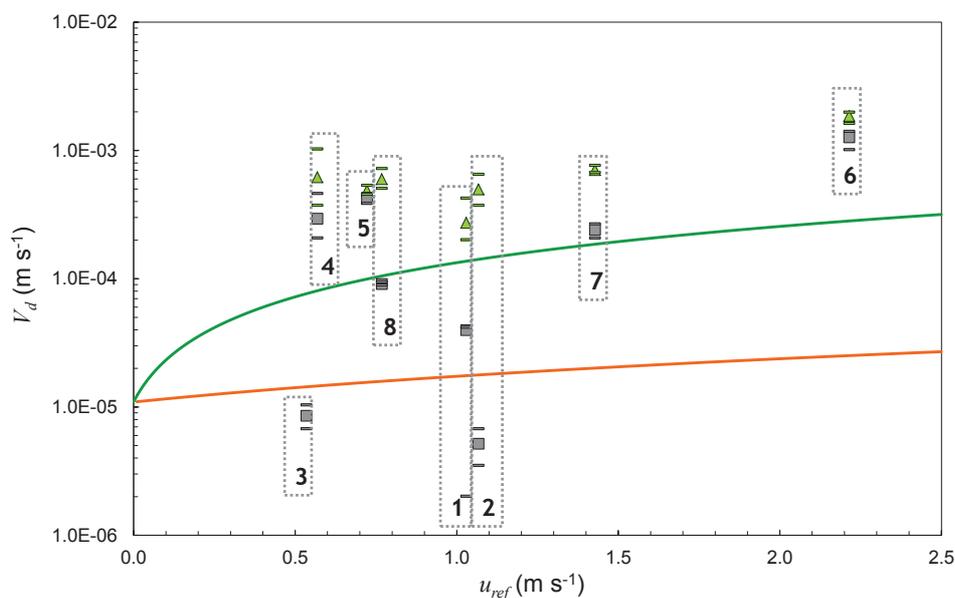


Figure III-15 : vitesses de dépôt sec moyennes, minimum et maximum mesurées sur les surfaces de bitume et d'herbe synthétique, vitesses de dépôt données par les lois d'ajustement pour l'herbe synthétique et l'enduit de façade.

- Bitume horizontal : ■ V_d moyenne, = V_d minimum et maximum ;
- Herbe synthétique horizontale : ▲ V_d moyenne, = V_d minimum et maximum ;
- (les points sont encadrés et référencés avec leur numéro d'expérimentation, c.f. Tableau III-2)
- ajustements : — enduit de façade horizontal ; — herbe synthétique horizontale.

Les valeurs de V_d mesurées sur les éprouvettes de bitume sont fortement dispersées, même pour des vitesses de vents très proches (par exemple les expérimentations 3 et 4 ou les expérimentations 5 et 8). Les variations vont jusqu'à plus de deux ordres de grandeur entre l'expérimentation 2 et l'expérimentation 6. Les valeurs mesurées lors des expérimentations 4, 5 et 6 sont étonnamment proches de celles mesurées sur l'herbe synthétique. Dans l'ensemble, les vitesses de dépôt mesurées sont fortement supérieures aux résultats donnés par la loi d'ajustement pour l'enduit de façade sans prise en compte de la thermophorèse.

Les températures des éprouvettes de bitume ont été mesurées lors des expérimentations 3, 6, 7 et 8. Les écarts de températures entre les surfaces de bitume et l'air $\Delta T_{\text{bitume-air}}$ étaient alors respectivement de 3,5, 14,0, 5,3 et 0,9 K. Le plus fort écart de température de 14,0 K (expérimentation 6) n'est pas associé à la plus grande différence de V_d entre le bitume et l'herbe synthétique alors que la thermophorèse devrait diminuer fortement le dépôt. L'expérimentation 3 montre une valeur très faible de V_d en comparaison des résultats des autres expérimentations, ce qui pourrait être dû à une faible turbulence et un effet de la thermophorèse. L'expérimentation 7 montre aussi un écart de la vitesse de dépôt avec celle de l'herbe synthétique, probablement dû à l'écart de température entre la surface et l'air. Par contre, les valeurs mesurées lors des expérimentations 1 et 2 semblent faibles et les valeurs des expérimentations 4 et 5 plutôt fortes, mais ces observations ne peuvent pas être interprétées du fait d'absence de données sur les températures des surfaces.

Les résultats obtenus sur les différentes surfaces confirment ceux obtenus en soufflerie, à savoir que, pour l'aérosol submicronique de fluorescéine :

- la sédimentation joue un rôle sur les surfaces horizontales peu rugueuses, typiquement les éprouvettes de toit, pour de faibles vitesses de vent,
- l'impaction turbulente et l'interception sont des processus de dépôt très importants pour les surfaces rugueuses, même faiblement rugueuses,
- la thermophorèse est un processus important qui peut diminuer le dépôt sec dans le cas d'une surface chauffées, surtout pour les surfaces lisses verticales.

Ces résultats montrent l'importance, d'une part, de discerner les différents types de surfaces dans l'estimation du dépôt en milieu urbain (rugosité, orientation, exposition au soleil) et, d'autre part, de considérer les conditions de turbulence à l'échelle des bâtiments (vitesse du vent, turbulence de l'écoulement) pour finalement connaître la répartition du dépôt sec dans l'environnement urbain. Par contre, le faible nombre d'expérimentations couplé à un manque de données sur les températures des surfaces ne permet pas de quantifier la contribution de chaque phénomène.

III.4 CONCLUSIONS

Cette série d'expérimentations *in situ* constitue la seconde étape du travail sur le dépôt sec sur des surfaces urbaines. Son but principal est de quantifier dans un site urbain les vitesses de dépôt sec et les paramètres micrométéorologiques pour ensuite mettre en évidence et hiérarchiser l'importance des différents processus physiques intervenant sur le dépôt dans les conditions expérimentales rencontrées.

Les conditions météorologiques rencontrées sur 60 minutes correspondent à l'échelle de temps de la turbulence atmosphérique, donc les paramètres météorologiques sont peu variables durant une expérimentation donnée. Les vitesses de dépôt sec sont mesurées avec l'aérosol submicronique de fluorescéine sur diverses surfaces urbaines, dont celles déjà utilisées en soufflerie. Cela permet ensuite de comparer les résultats obtenus à ceux acquis dans l'étape précédente afin de mettre en évidence plus facilement l'importance des différents phénomènes de dépôt qui peuvent intervenir *in situ*.

Les expérimentations ont été réalisées en périodes hivernales et estivales pour diversifier les conditions météorologiques rencontrées. La méthode expérimentale a été mise au point puis améliorée au fil des expérimentations. Des surfaces de bitume, d'ardoise, de tuile et de zinc ont été utilisées en plus des surfaces de verre, d'enduit de façade et d'herbe synthétique, et positionnées sur un bâti afin de les orienter dans des configurations proches de celles rencontrées dans les milieux urbains. Les paramètres météorologiques ont été quantifiés à proximité des surfaces avec un anémomètre ultrasonique et une station météorologique. Des températures des surfaces ont pu être mesurées avec des thermocouples. Par contre, des paramètres comme la vitesse de frottement et le flux de chaleur n'ont pas été quantifiés, les conditions de stabilité sont estimées grâce aux vitesses de vent et aux observations visuelles de l'ensoleillement. Les vitesses de dépôt acquises lors de ces expérimentations sont comparées aux données de la littérature et aux expérimentations en soufflerie du Chapitre II.

Les vitesses de dépôt ont été mesurées pour des vitesses de vent faibles. Elles montrent de fortes variations entre les différentes surfaces mais aussi pour une même surface. Elles peuvent en moyenne varier de deux ordres de grandeur pour une même expérimentation selon le type de surface considéré. L'ensemble des données acquises semble cependant se trouver dans les ordres de grandeurs des données de la littérature. Les résultats obtenus, comparés aux lois ajustées sur les données de soufflerie, montrent que les mêmes phénomènes de dépôt sont mis en jeu (sédimentation, impaction turbulente, interception et thermophorèse) et dans des proportions similaires. Par contre, il semble que les vitesses de dépôt mesurées avec la méthode employée soient légèrement supérieures à celles mesurées en soufflerie. Des effets de bord sur ces éprouvettes « isolées » ou des instationnarités des vitesses de vent pourraient expliquer ces différences.

Cette seconde étape aborde le dépôt sec *in situ* sur une échelle de temps micrométéorologique avec des conditions diurnes et pour un nombre assez restreint d'expérimentations. Elle met en évidence le manque de données pour le milieu urbain mais aussi pour l'ensemble de la distribution granulométrique de l'aérosol atmosphérique, des particules nanométriques aux particules microniques. Il en résulte une difficulté à développer des lois paramétriques précises du dépôt sec dans ce milieu. Mais, dans leur ensemble, les résultats obtenus confirment qu'en milieu urbain il est primordial de prendre en compte les particularités locales des surfaces (type de surface, orientation, température) pour accéder à la répartition du dépôt sec dans la canopée urbaine. En effet, les vitesses de dépôt sont très variables selon les surfaces et les conditions rencontrées. Ceci est surtout vrai dans le cas de l'étude du dépôt de radionucléides ou du transferts de polluants de l'atmosphère vers l'exutoire d'un bassin versant.

Pour aller plus loin sur la mesure des vitesses de dépôt sur l'échelle temporelle micrométéorologique, la série d'expérimentations réalisée ici devrait être complétée par d'autres, en suivant un protocole expérimental similaire, afin de rencontrer beaucoup plus de conditions météorologiques. La méthode expérimentale développée dans ce chapitre permettrait ainsi de caractériser et quantifier plus précisément les paramètres les plus importants qui influencent le dépôt. La méthode actuelle pourrait certainement être améliorée par une quantification des paramètres micrométéorologiques dans la couche de surface de la couche limite atmosphérique pour étudier l'influence éventuelle de la stabilité atmosphérique sur la turbulence dans la canopée et donc son influence sur le dépôt. Des mesures sur des éprouvettes plus grandes (des murs entiers par exemple) permettraient d'exclure une surestimation potentielle de V_d par des effets de bord. Une quantification des rugosités de l'ardoise, de la tuile et du bitume, ainsi que des expérimentations en soufflerie sur ces surfaces, chauffées et non chauffées, pourraient contribuer à la compréhension des différences observées sur les mesures du dépôt sec. Enfin, la mise en évidence de parois plus froides que l'air par certains auteurs (Nakamura et Oke, 1988 ; Niachou *et al.*, 2008) devra amener à l'étude du dépôt sec par thermophorèse pour ces conditions.

CHAPITRE IV. ETUDE DU DEPOT SEC *IN SITU* SUR DE LONGUES DUREES

Les deux premières étapes expérimentales de cette étude, en soufflerie et *in situ* de courte durée, ont permis de quantifier des vitesses de dépôt sec, de mettre en évidence les mêmes mécanismes de dépôt et de hiérarchiser leur importance selon les conditions rencontrées (sédimentation par faible vent, dépôt turbulent sur les surfaces rugueuses, thermophorèse pour des surfaces chauffées par le soleil...). Cependant lors de la seconde étape, le nombre d'expérimentations réalisées est limité, les variations de la turbulence urbaine à l'échelle micrométéorologique (< 60 min) n'ont pas été suffisamment variées. Les conditions météorologiques locales (température de l'air, humidité relative...) étaient alors stationnaires sur chaque expérimentation. Cette troisième et dernière étape expérimentale s'inscrit sur l'échelle météorologique la plus large définie par Orlanski (1975, voir chapitre III.1.1) et doit permettre de compléter les données et connaissances déjà acquises en rencontrant des variations plus grandes de l'ensemble des paramètres météorologiques. Cependant, afin d'être comparées, les deux étapes expérimentales menées *in situ* doivent avoir en commun leurs éprouvettes, représentatives d'une même échelle vis-à-vis de la canopée urbaine, et des prélèvements d'aérosols dans l'air qui permettent de calculer des vitesses de dépôt comparables, c'est-à-dire avec des prélèvements sur filtres réalisés en des positions équivalentes par rapport au bâti dans la canopée urbaine.

Cela sera réalisé grâce à l'utilisation du béryllium 7 (^7Be) atmosphérique comme traceur. L'origine du béryllium 7 atmosphérique sous forme particulaire, son utilisation en tant que traceur de l'aérosol atmosphérique et la méthode de sa mesure au Laboratoire de Radioécologie de Cherbourg-Octeville sont décrites en premier lieu dans ce chapitre. Le dispositif expérimental, utilisé pour mesurer des vitesses de dépôt sec à l'aide du ^7Be ainsi que les paramètres environnementaux associés, est détaillé dans la seconde partie. Les conditions météorologiques rencontrées et les vitesses de dépôt acquises sont ensuite présentées et discutées vis-à-vis des données de la littérature et de celles présentées dans les deux précédents chapitres. Enfin, les conclusions qui peuvent être tirées de cette étape et les perspectives de futures études sur de longues durées sont proposées.

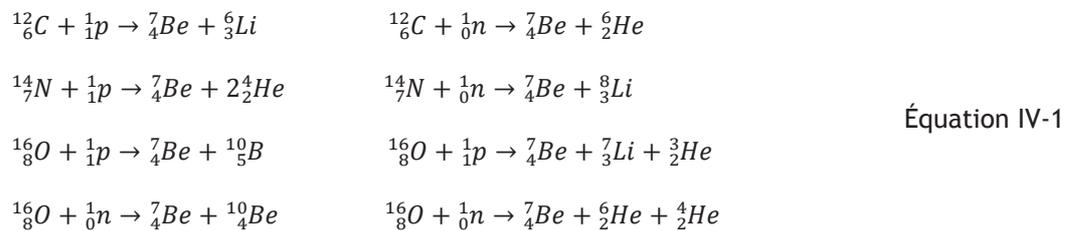
IV.1 LE BERYLLIUM 7, TRACEUR DE L'AEROSOL ATMOSPHERIQUE

Les radionucléides présents dans l'atmosphère peuvent être d'origine naturelle ou artificielle et sont régulièrement utilisés comme traceurs de processus atmosphériques. Les radionucléides artificiels sont principalement issus des essais et des accidents nucléaires comme par exemple le césium 137, produit par la fission de l'uranium, qui a pu être utilisé comme traceur des mécanismes de rémanence des radionucléides dans l'atmosphère par Piga (2010). Les radionucléides naturels sont principalement d'origine cosmique (béryllium 7, sodium 22) ou tellurique (radon 222 et ses descendants, potassium 40)

et peuvent être utilisés comme traceurs des masses d'air ou des mécanismes de transfert entre l'atmosphère et les surfaces (Connan *et al.*, 2008).

IV.1.1 ORIGINE DU BERYLLIUM 7 ATMOSPHERIQUE

Le ${}^7\text{Be}$ est naturellement produit dans l'atmosphère, dans la haute troposphère et la basse stratosphère (66 % dans la stratosphère et 33 % dans la troposphère ; Gaggeler, 1995) par réactions de spallation des noyaux atmosphériques légers de l'air comme le carbone ($Z = 6$), l'azote ($Z = 7$) et l'oxygène ($Z = 8$). La spallation est une réaction nucléaire de fragmentation de noyaux par des particules (protons ou neutrons) de grandes énergies, provenant du rayonnement cosmique, selon les équations suivantes (Équation IV-1 ; Papastefanou et Ioannidou, 1995) :



Le ${}^7\text{Be}$ a une demi-vie $t_{1/2}$ de 53,3 jours et se désintègre en émettant un photon gamma de 477,6 keV (Figure IV-1).

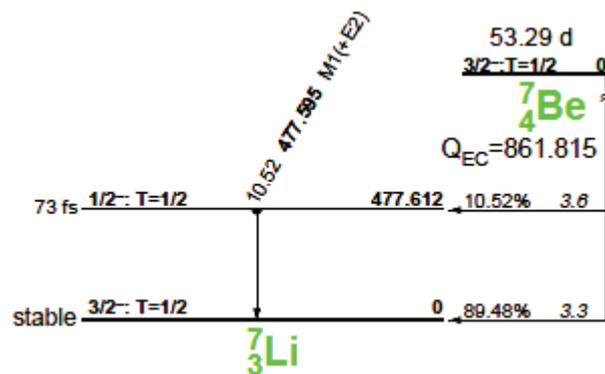


Figure IV-1 : schéma de désintégration du béryllium 7.

Suite à sa formation, il se fixe rapidement à la surface de l'aérosol atmosphérique présent en haute atmosphère, donc à la surface de l'aérosol fin ($< 1 \mu\text{m}$), et ne se retrouve pas à la surface de l'aérosol grossier ($> 1 - 2 \mu\text{m}$; Papastefanou et Ioannidou, 1996 ; Gaffney *et al.*, 2004).

Les concentrations en ${}^7\text{Be}$ dans l'air dépendent de l'intensité du rayonnement cosmique, des échanges atmosphériques (échanges stratosphère-troposphère, transport vertical dans la troposphère) et des dépôts secs et humides des particules qui le transportent. Les concentrations généralement relevées

dans la littérature sont de l'ordre de quelques mBq m⁻³. Le Tableau IV-1 présente quelques niveaux de ⁷Be rencontrés dans la littérature. Ces données correspondent à des prélèvements réalisés au sol, donc dans la couche de surface de la CLA.

Le ⁷Be pourrait aussi avoir une origine artificielle ponctuelle dont les effets ont pu être relevés au niveau de la stratosphère. En effet, Doering (2007) rapporte un certain nombre de travaux mettant en évidence une augmentation de la concentration de certains radioéléments d'origine cosmique, dont le ⁷Be, pendant la période des essais nucléaires soviétiques et américains des années 60.

Tableau IV-1 : activités en ⁷Be dans la couche de surface de l'atmosphère tirées de la littérature.

Auteurs	Gamme de concentration en ⁷ Be (mBq m ⁻³)	Lieu de prélèvement
Cannizzaro <i>et al.</i> , 2004	0,3 - 15,3	Palerme (Italie)
Fogh <i>et al.</i> , 1999	1,1 - 5,6	Roskilde (Danemark)
Gaffney <i>et al.</i> , 2004	1,3 - 5,1	Pittsburgh (Etats-Unis)
Ioannidou, 2011	1,0 - 11,9	Thessalonique (Grèce)
Papastefanou et Ioannidou, 1995	3,2 - 9,5	Thessalonique (Grèce)
Pham <i>et al.</i> , 2011	0,9 - 13,1	Monaco

La concentration en ⁷Be atmosphérique peut varier en fonction de la latitude (Kulan *et al.*, 2006). Cependant, localement, les concentrations en ⁷Be ne montrent pas de variabilité spatiale (Lal et Peters, 1967, cité par Laguionie, 2007) mais présente des variations temporelles (Figure IV-2). A l'échelle de la décennie, la production de ⁷Be suit le cycle solaire qui a une périodicité de 11 ans. Lors de ses périodes d'activité plus intenses (nombre important de Sunspot, ou tâches solaires), le soleil protège la Terre du rayonnement cosmique avec son champ magnétique, ce qui diminue la production de ⁷Be. A l'échelle de l'année, les concentrations en ⁷Be montrent des valeurs plus élevées au printemps et en été du fait de la diminution des précipitations, de l'humidité relative et du transport vertical plus intense (intrusions de la stratosphère dans la troposphère ; Feely *et al.*, 1989 ; Cannizzaro *et al.*, 2004 ; Piñero García *et al.*, 2012). Les activités en béryllium 7 peuvent être plus élevées en été lorsque la convection verticale avec la troposphère est plus intense (Connan *et al.*, 2008). A l'échelle du mois, la concentration en ⁷Be peut varier du fait d'épisodes pluvieux lessivant l'atmosphère de ses particules.

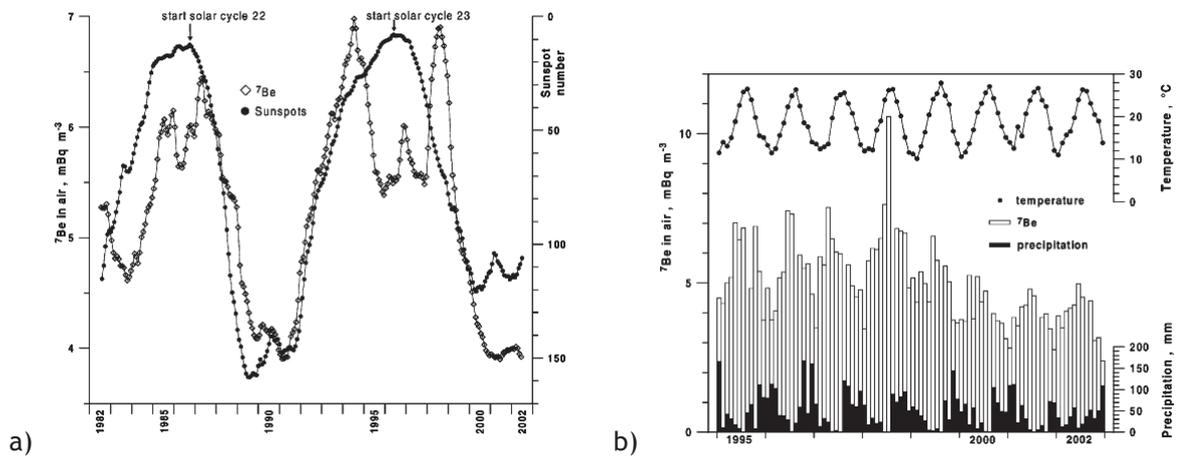


Figure IV-2 : concentrations du ^7Be atmosphérique liées aux cycles de productions, aux échelles décennales (a) et annuelles (b) (Cannizzaro *et al.*, 2004).

IV.1.2 ASSOCIATION DU BERYLLIUM 7 A L'AEROSOL ATMOSPHERIQUE

Le ^7Be est préférentiellement associé aux aérosols fins ($0,3 \mu\text{m}$, Gaffney *et al.*, 2004). Environ 60 à 95 % du ^7Be se retrouve sur les particules de diamètres inférieurs à $1,1 \mu\text{m}$ (Young et Silker, 1980 ; Papastefanou et Ioannidou, 1995 ; Gründel et Porstendörfer, 2004). La Figure IV-3 présente un exemple de distribution granulométrique du ^7Be qui peut être typiquement retrouvée dans la littérature. Le Tableau IV-2 récapitule des diamètres aérodynamiques médians en activité (AMAD, pour Activity Median Aerodynamic Diameter) issus de la littérature.

Etant donné sa distribution, le comportement du ^7Be est représentatif du comportement du mode accumulation de l'aérosol atmosphérique (Papastefanou et Ioannidou, 1995), plus particulièrement de la distribution en surface de cet aérosol. Il peut être utilisé comme traceur lié à ce mode et constitue donc un bon indicateur du transport des aérosols fins (Ioannidou, 2012).

Papastefanou et Ioannidou (1995) relèvent que la distribution du ^7Be est dépendante de l'altitude du prélèvement, avec des AMAD plus faibles en altitude. Ce résultat serait dû au temps de résidence de l'aérosol dans l'atmosphère et au fait que l'aérosol croît continuellement par coagulation. Ils relèvent aussi que l'AMAD tend vers les diamètres plus larges du fait de l'humidité de l'air lors des épisodes de pluie (Papastefanou et Ioannidou, 1995). Ceci est aussi vrai pendant les épisodes météorologiques secs, avec des AMAD croissant linéairement d'environ $0,5$ à $1,2 \mu\text{m}$ pour des taux d'humidité relative compris entre 50 et 85 % (Ioannidou, 2011), à l'image du grossissement des particules atmosphériques par condensation pendant ces périodes. D'ailleurs, Piñero García *et al.* (2012) avancent que la diminution de l'activité en ^7Be dans l'air est due à l'augmentation du diamètre des particules atmosphériques et un dépôt sec par sédimentation des particules submicronique plus important suite à leur grossissement. Par contre, il semblerait que l'AMAD soit inversement proportionnelle à la vitesse du vent et puisse diminuer pour des vents forts (Ioannidou, 2011).

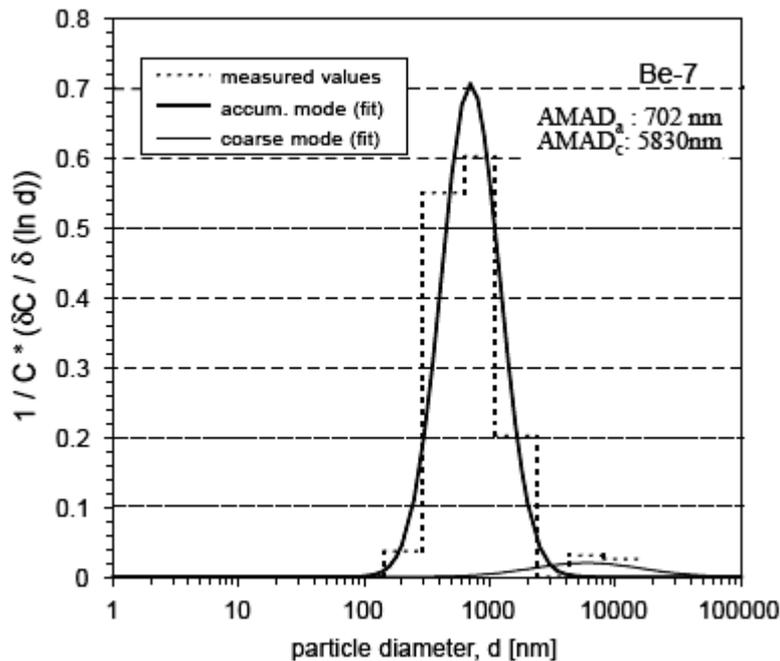


Figure IV-3 : distribution granulométrique du ⁷Be lié à l'aérosol atmosphérique (Gründel et Porstendörfer, 2004).

Ioannidou (2011) et Percot *et al.* (2011) montrent que le ⁷Be a une distribution très proche de certains métaux polluants (cadmium, nickel, plomb...). L'étude du dépôt du ⁷Be peut donc s'apparenter à une étude du dépôt du mode accumulation de l'aérosol atmosphérique et des polluants stables et radioactifs qui y sont liés.

Tableau IV-2 : diamètres aérodynamiques médians en activité (AMAD) du ⁷Be associé à l'aérosol atmosphérique et rencontrés dans la littérature.

Auteurs	AMAD (µm)	Lieu de prélèvement
Gründel et Porstendörfer, 2004	0,7	Göttingen (Allemagne)
Ioannidou, 2012	0,58 - 1,22	Thessalonique (Grèce)
Papastefanou et Ioannidou, 1995	0,76 - 1,18	Thessalonique (Grèce)
Percot <i>et al.</i> , 2011	0,59	Nantes (France)

Le ⁷Be présente plusieurs avantages pour étudier les processus de transport atmosphérique : sa source est connue, il a une demi-vie relativement courte, il est lié à l'aérosol atmosphérique, il est relativement simple à mesurer (Doering, 2007). Il a déjà fait l'objet d'utilisations comme traceur pour l'étude de mécanismes de circulation des masses d'air et de transferts des particules dans

l'atmosphère. Par exemple, Young et Silker (1980) calculent son flux sur les océans Atlantique et Pacifique et l'utilisent pour calculer une vitesse de dépôt sur l'eau. Ou encore, Papastefanou *et al.* (1995) mesurent des flux de dépôt totaux dans des collecteurs (entonnoirs). Plus récemment, Connan *et al.* (2006) ont utilisé le ^7Be pour mesurer des vitesses de dépôt sec en milieu urbain.

Il apparaît donc que le ^7Be est un traceur très bien adapté à l'étude du dépôt de la fraction fine de l'aérosol atmosphérique. De plus, son mode de production et de transfert assure sa présence dans la couche de surface toute l'année, quel que soit le régime de vents, contrairement aux radioéléments d'origine terrestre (par exemple le radon 222 et ses descendants) qui sont principalement produits dans certaines régions volcaniques, granitiques ou uranifères.

IV.2 METHODE EXPERIMENTALE

La méthode de mesure des vitesses de dépôt avec du ^7Be atmosphérique et des éprouvettes urbaines sur de longues durées est basée sur le même principe que celle utilisée dans le chapitre précédent, avec un aérosol de fluorescéine. Les différences notables sont principalement dues à la durée d'exposition et au traitement du ^7Be .

IV.2.1 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Cette étude du dépôt sur de longues durées doit être complémentaire des expérimentations de courte durée pour mettre en évidence d'éventuelles différences dans les contributions respectives des phénomènes physiques de dépôt. Le protocole utilisé a été étudié afin que les résultats obtenus puissent être comparés à ceux de l'étape précédente. Il est basé sur celui de Connan *et al.* (2006) qui ont déjà utilisé le ^7Be comme traceur pour mesurer des vitesses de dépôt sec. Cependant, des modifications sur le dispositif expérimental et des mises au point des méthodes de traitement des échantillons ont été apportées. Le site d'étude, le matériel expérimental et la méthode de traitement des échantillons sont présentés dans cette partie.

IV.2.1.1 Site d'étude

Le site d'étude se trouve à Bouguenais (44), sur le site de l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR ; latitude : $47,156^\circ$; longitude : $-1,638^\circ$). Bouguenais est situé en périphérie de la ville de Nantes, au sud-ouest à la limite de la zone urbaine et de la campagne environnante, à proximité de l'aéroport de Nantes. L'IFSTTAR est localisé par rapport à Nantes sur la Figure IV-4-a. La zone d'expérimentation sur le site de l'IFSTTAR est présentée sur la Figure IV-4-b. L'IFSTTAR de Nantes constitue un centre scientifique situé hors du centre de Bouguenais. Il est principalement constitué d'espaces verts (herbe et haies), de parkings et de bâtiments. Il peut s'apparenter à un quartier du type « ceinture verte » selon les types de quartiers définis par Dupont (2001).

L'emplacement du dispositif expérimental est présenté sur la Figure IV-4-b. Il est situé sur une parcelle d'herbe au pied de la façade sud du bâtiment Darcy qui est un bâtiment constitué d'un rez-de-

chaussée et d'un étage, d'environ 30 m de côté, avec un hangar accolé à sa façade est et un parking au pied de sa façade ouest.

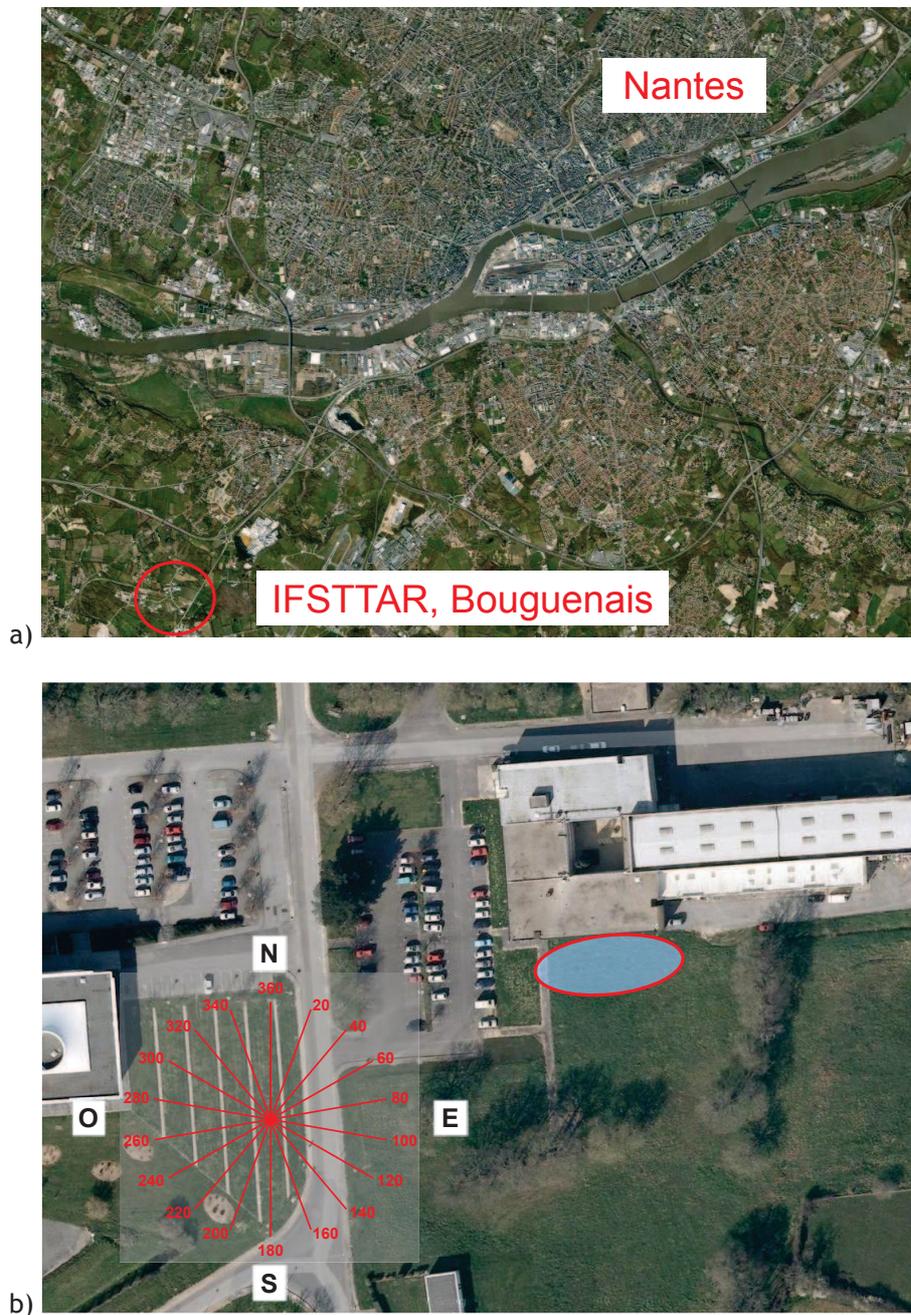


Figure IV-4 : localisation de l'IFSTTAR à Bouguenais près de Nantes (a, cercle rouge) et vue du dessus du site d'étude et de la zone d'étude (b, zone ellipse rouge et bleue).
(source : <http://www.geoportail.gouv.fr>)

IV.2.1.2 Echantillonnage du dépôt sec et des concentrations de béryllium 7

Une vue d'ensemble du dispositif expérimental employé pour réaliser les expérimentations est présenté sur la Figure IV-5.



Figure IV-5 : dispositif expérimental pour la mesure des vitesses de dépôt sec et des paramètres environnementaux *in situ* sur de longues durées.

Cette photographie présente le dispositif d'étude du dépôt sec. Il est constitué d'un bâti-support et d'éprouvettes, composées des surfaces urbaines, identiques à ceux utilisés lors des expérimentations *in situ* de courtes durées, d'un store de protection contre la pluie (en position repliée sur la photo, il se déploie automatiquement en cas de pluie), d'un Partisol® 2000 FRM pour la collection d'aérosols sur filtres (au second plan à droite), d'un anémomètre ultrasonique Young 81000 (au second plan à gauche) et d'une station météorologique Spectrum WatchDog 2000 (au premier plan au centre). Cet ensemble a été monté au début de la période expérimentale, qui a débuté en septembre 2010 et qui a duré 16 mois. Il est resté fixe durant toute cette période. Seuls les échantillons (éprouvettes et filtres) sont changés tous les mois.

Les éprouvettes sont exposées à l'aérosol atmosphérique pendant un mois. De cette façon, l'aérosol atmosphérique, et avec lui le ^7Be qui sert de traceur, se dépose sur les éprouvettes urbaines. Les flux de dépôt sec ainsi échantillonnés sont caractéristiques de chaque type de surface urbaine. Les sept types de surfaces déjà étudiés précédemment sont de nouveau utilisés et positionnés sur le bâti selon des orientations généralement rencontrés en milieu urbain : herbe synthétique et bitume horizontaux au sol ; verre lisse et enduit de façade verticaux sur le mur ; ardoise, tuile et zinc obliques à 30° sur le toit.

Pour ces expérimentations, la configuration du bâti diffère légèrement de celle adoptée pour les expérimentations *in situ* courtes afin de mieux résister aux différentes conditions rencontrées et plus particulièrement aux fortes rafales de vent. Quatre éprouvettes de chaque type de surfaces sont

disposées sur le bâti, alignées verticalement. Chaque rangée verticale d'éprouvettes urbaines servant à l'échantillonnage du flux de dépôt est séparée par une rangée d'éprouvettes de verre. Utilisées pendant l'ensemble des 16 mois de la période expérimentale, ces rangées d'éprouvettes de verre servent à combler les espaces libres sur chacune des faces du bâti. Les faces ne comportant pas de rangées d'éprouvettes sont recouvertes de plaques de bois, de cette façon, les rafales de vent ne risquent pas d'arracher les supports en polystyrène des éprouvettes.

Le ^7Be fixé sur l'aérosol atmosphérique doit être prélevé sur la même période que l'échantillonnage du dépôt sec et mesuré afin de calculer des vitesses de dépôt sec. Un Partisol® 2000 FRM de la marque Thermo Scientific est utilisé. Cet appareil permet de programmer un prélèvement à débit constant sur une durée déterminée. Le prélèvement est réalisé à l'aide de filtres de diamètre 47 mm et le débit de prélèvement est mesuré en continu par l'appareil à l'aide d'un débitmètre. La combinaison des mesures du débitmètre, d'une sonde de température et de pression permet au microprocesseur du Partisol® de corriger automatiquement le débit d'air pour qu'il reste égal au débit d'air programmé. L'appareil enregistre les volumes d'air pompés pendant le prélèvement. Ces volumes sont ensuite utilisés pour le calcul de l'activité volumique moyenne en ^7Be lors des expérimentations. Une tête de prélèvement TSP (particules totales) est montée sur le tuyau de prélèvement afin d'échantillonner toutes les classes granulométriques de l'aérosol atmosphérique. Des filtres hydrophobes en fibres de Quartz QMA, de la marque Whatmann, et un débit de prélèvement d'air de 10 L min^{-1} sont choisis afin d'éviter le colmatage des filtres par l'humidité ambiante pendant les prélèvements de longues durées. Ces filtres sont placés sur des cassettes portes-filtres placées dans le Partisol®.

IV.2.1.3 Mesure des paramètres météorologiques locaux

De même que pour les expérimentations *in situ* de courtes durées, les paramètres mesurés sont la vitesse du vent, la température et l'humidité relative de l'air. La pression atmosphérique et la pluviométrie sont aussi mesurées en continu et une mesure du rayonnement global a été ajoutée à ces paramètres à partir du septième mois d'expérimentations.

La vitesse et la direction du vent sont mesurées avec un anémomètre ultrasonique Young 81000 positionné à proximité immédiate du bâti pour se rapprocher le plus possible de la configuration des expérimentations *in situ* de courtes durées. Les données acquises correspondent à des vitesses et directions moyennes du vent sur 10 min. La vitesse du vent est calculée à partir des données sur les trois composantes de vitesses. Par contre, sa direction peut ne pas être représentative de la direction du vent à 10 m car le dispositif peut *a priori* être sous influence du bâtiment voisin. Cette direction du vent n'est donc pas prise en compte.

Une station météorologique WatchDog 2000 est de nouveau utilisée pour mesurer les paramètres météorologiques sur des moyennes de 10 min. Elle est aussi placée à proximité immédiate du bâti.

IV.2.2 *TRAITEMENT DES ECHANTILLONS*

Suite au prélèvement sur filtre et à l'exposition des éprouvettes à l'aérosol atmosphérique pendant 1 mois, les échantillons (filtre + éprouvettes) sont retirés et remplacés par de nouveaux échantillons pour un nouveau mois d'expérimentation.

Les filtres destinés au prélèvement de l'aérosol atmosphérique sont placés dans les portes-filtres au laboratoire en atmosphère propre. L'ensemble filtre - porte-filtre est mis en sachet plastique fermé par un zip pour être à l'abri de toute source de pollution de ^7Be durant le transport vers le site d'étude. Les éprouvettes destinées à être exposées à l'aérosol atmosphérique sont transportées dans des boîtes conçues sur-mesure pour leur transport. Elles y sont positionnées horizontalement, la face correspondant à la surface urbaine orientée vers le haut, et calées de façon à ce que la surface urbaine de chaque éprouvette ne touche pas une des parois de sa boîte.

Sur site, l'expérimentation en cours est d'abord stoppée. Le prélèvement mensuel sur filtre est arrêté, l'ensemble filtre - porte-filtre est placé dans un sachet zippé pour être transporté jusqu'au laboratoire et le volume d'air passé pendant le prélèvement est noté. Les éprouvettes qui ont été exposées pendant un mois sont retirées du bâti et rangées dans un jeu de boîtes de transport vides et propres. Lorsque l'ensemble des échantillons du mois passé sont retirés du dispositif, des éprouvettes propres sont placées sur le bâti et le prélèvement sur filtre est relancé avec un nouveau filtre. La manipulation des éprouvettes est systématiquement faite avec des gants, changés entre chaque jeu d'éprouvettes.

Au laboratoire, le filtre récupéré est placé dans une géométrie de comptage pour être directement mesuré par spectrométrie gamma. Les éprouvettes sont lavées avec des solutions d'acide nitrique à pH 1 pour mettre le ^7Be en solution puis en géométrie de comptage. Un échantillon unique pour chaque type de surface, contenant l'ensemble du béryllium déposé sur les quatre éprouvettes, est mesuré par spectrométrie gamma. La procédure de lavage des différentes surfaces et de mise en géométrie des solutions de lavage est décrite de façon plus exhaustive en annexe B.

Suite à ce traitement, les éprouvettes sont rincées, brossées, séchées puis remises dans des boîtes de transport propres dans l'attente d'une future exposition d'un mois à l'aérosol atmosphérique. Deux jeux d'éprouvettes ont été utilisés pour ces expérimentations. Les filtres et les solutions de lavage sont finalement stockés après leur mesure.

IV.2.3 *MESURE DU BERYLLIUM 7*

L'activité en ^7Be des échantillons est mesurée par spectrométrie gamma. Ce type d'analyse nécessite une mise en géométrie spécifique des échantillons. Ces géométries spécifiques sont des contenants (boîtes, flacons) de dimensions connues et pour lesquelles les spectrométries gamma sont préalablement étalonnées. Les volumes des échantillons contenus dans ces géométries sont fixés et correspondent aux volumes des étalons utilisés.

Les filtres utilisés pour le prélèvement des particules atmosphériques et du ^7Be peuvent être mesurés directement après être placés dans une géométrie de type boîte cylindrique B 17 (12 mm de hauteur et 52 mm de diamètre, Figure IV-6). Le ^7Be déposé sur les éprouvettes urbaines doit être mis en géométrie sous forme liquide, dans des bidons SG 50 T de 50 mL (47 mm de hauteur et 40 mm de

diamètre, Figure IV-6) en polyéthylène translucide (GTR 5, 1982), pour être mesuré car les éprouvettes ne peuvent pas être mesurées directement par spectrométrie gamma.



Figure IV-6 : géométries de comptage pour les filtres (à gauche) et pour les solutions de lavage des éprouvettes (à droite).

Afin de recueillir le ^{7}Be déposé, les éprouvettes urbaines sont lavées suite à leur exposition à l'aérosol atmosphérique. Dans la littérature, des solutions acides sont généralement employées pour mettre le ^{7}Be en solution ou éviter qu'il ne s'adsorbe sur les surfaces des contenants (Papastefanou *et al.*, 1995 ; Doering, 2007). Ces solutions sont ensuite partiellement évaporées pour les réduire au volume de la géométrie. La méthode utilisée dans notre étude est présentée en annexe B.

Une majeure partie des échantillons (filtres et solutions de lavages) est mesurée au LRC sur un détecteur gamma de type semi-conducteur au germanium hyper pur, coaxial, de type N (Figure IV-7).

Le détecteur est composé d'un cristal de germanium dédié à la détection des photons gamma, d'une réserve d'azote liquide pour le maintenir froid, d'un capot de protection du cristal et d'une chaîne d'électronique pour l'acquisition et l'amplification du signal. Le cristal et son capot de protection sont placés dans un coffre de plomb pour diminuer le bruit de fond dû au rayonnement cosmique et à la radioactivité naturelle. Les échantillons sont directement posés sur le capot du détecteur. Les photons d'énergie 477,6 keV, caractéristiques du ^{7}Be , interagissent avec le détecteur, en l'occurrence ses électrons, par effet photoélectrique ou Compton. Lors d'une interaction par effet photoélectrique, le photon cède toute son énergie à un électron du semi-conducteur pour créer un signal électrique qui est détecté et amplifié, marquant le spectre de comptage par un pic d'énergie total ou pic photoélectrique. Les photons ont une probabilité connue d'interaction avec le détecteur par effet photoélectrique qui permet de déterminer l'activité en ^{7}Be de l'échantillon. Lors d'interactions par effet Compton, les photons ne cèdent pas toute leur énergie aux électrons, d'où l'apparition d'un plateau Compton sur une large gamme d'énergie du spectre (Figure IV-8).

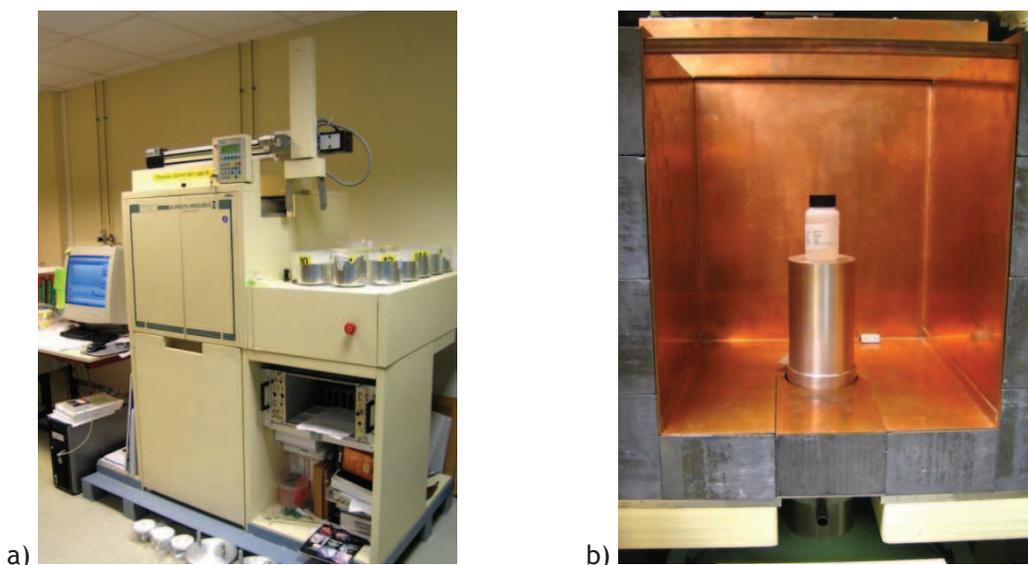
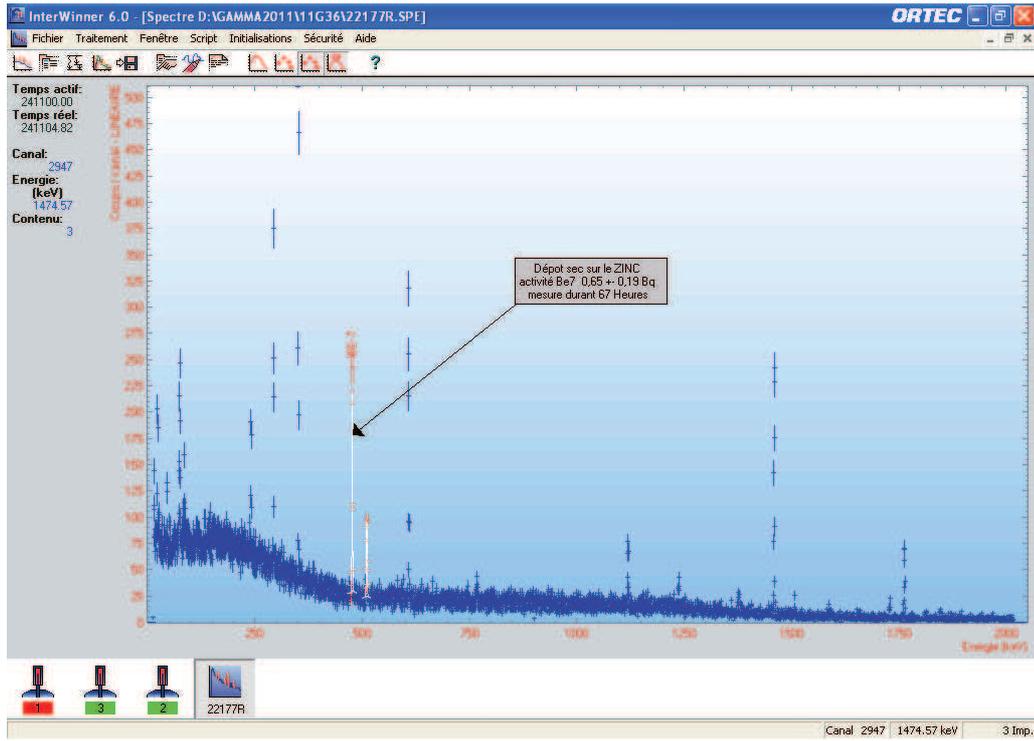


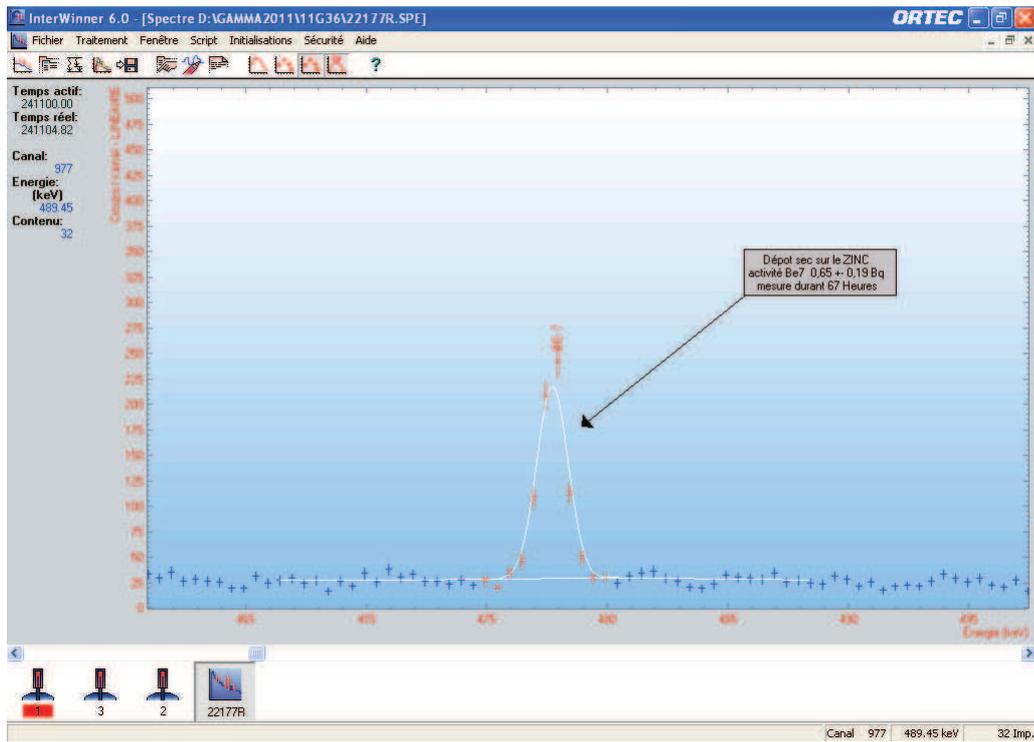
Figure IV-7 : chaîne de spectrométrie gamma du LRC utilisée pour mesurer les échantillons de ^7Be , filtres et solutions : passeur d'échantillons, coffre blindé en plomb et ordinateur d'acquisition (a) ; échantillon sous forme de géométrie liquide 50 mL sur le capot du détecteur dans le coffre blindé du détecteur (b).

Pour déterminer les activités des échantillons, le détecteur doit compter un nombre suffisant de photons gamma afin que le pic photoélectrique soit bien défini et quantifiable. Afin d'avoir une statistique suffisante d'interactions photoélectriques, le temps d'exposition du détecteur à l'échantillon doit être suffisamment long, selon l'activité de l'échantillon. Cependant, ce temps d'exposition ne doit pas être trop long afin de pouvoir mesurer l'ensemble des échantillons. Pour les éprouvettes de cette étude, seulement exposées à de la radioactivité naturelle donc à de faibles niveaux de radioactivité, les temps de comptage vont typiquement de 9 h à 120 h. Les incertitudes associées à ces activités vont de 10 à 80 %.

Les échantillons prélevés présentent des activités en ^7Be très différentes. Notamment les surfaces lisses et verticales de verre ont des flux de dépôt assez faibles, donc les échantillons qui en sont tirés contiennent généralement peu de ^7Be . Dans ce cas, les échantillons dont les faibles activités ne sont pas détectées au laboratoire sont mesurés sur une chaîne de spectrométrie du même type dans le laboratoire souterrain de la montagne du Roule de Cherbourg-Octeville (géré par la Marine Nationale et l'IRSN, Figure IV-9). Grâce à l'épaisseur de roche faisant office de protection au rayonnement cosmique, le bruit de fond y est beaucoup plus faible qu'au laboratoire de métrologie du LRC et permet de gagner un facteur 2,5 en limite de détection lors des mesures. De très faibles activités en ^7Be peuvent donc y être quantifiées. Les temps de comptage vont de 72 h à 96 h pour déterminer correctement les activités des échantillons.



a)



b)

Figure IV-8 : spectres de comptage gamma de la solution de lavage du zinc correspondant à la période 28 août - 19 septembre 2011 et mesurée au LRC ; vue du spectre sur l'ensemble des canaux de comptage (a, 0 - 2000 keV) ; zoom sur le pic correspondant au ^7Be (b, 477,6 keV).

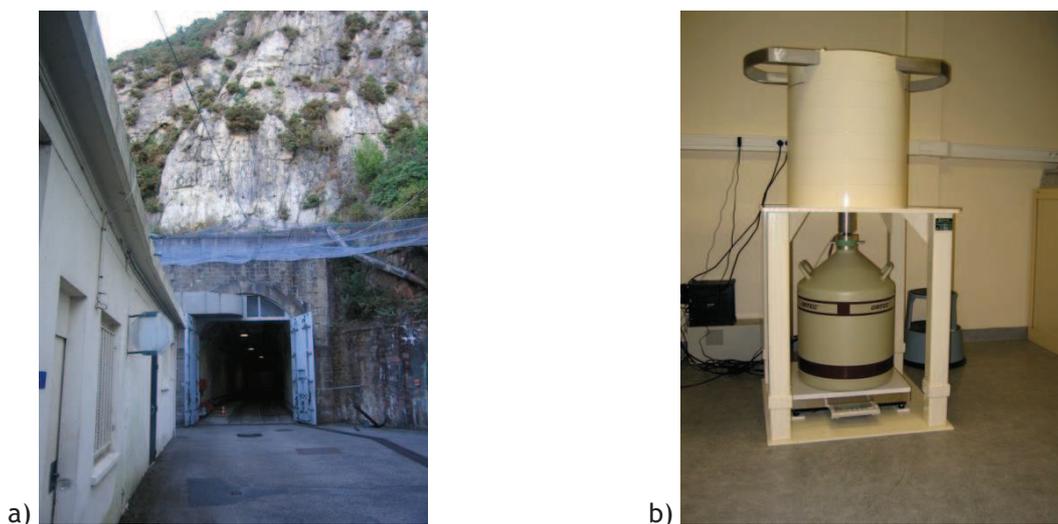


Figure IV-9 : laboratoire souterrain de la montagne du Roule : entrée du souterrain (a) et spectrométrie utilisée pour les mesures d'échantillons de faibles activités en ^7Be (b).

IV.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

La période d'expérimentations s'étend du 9 septembre 2010 au 9 janvier 2012, soit 16 mois. Ainsi, les éprouvettes ont été exposées à une large gamme de conditions météorologiques pouvant être rencontrées sur une année. Les périodes de prélèvement ne sont pas systématiquement égales à 30 jours mais sont comprises entre 27 à 43 jours. Des problèmes d'ordres techniques (coupures d'électricité, dysfonctionnements du store de protection) ont engendré la perte de certains échantillons et de données sur un total de 3 mois d'expérimentations. Les conditions météorologiques rencontrées et les résultats de vitesses de dépôt sec obtenus sur la période d'expérimentations sont présentés. Ces résultats sont ensuite comparés aux données de la littérature et interprétés.

IV.3.1 *CONDITIONS METEOROLOGIQUES*

Les conditions météorologiques rencontrées sur l'ensemble de la période expérimentale sont assez variées. L'ensemble des données moyennes, minimum et maximum sont rassemblées dans le Tableau IV-3. Les vitesses moyennes de vent mesurées avec l'anémomètre ultrasonique sur chaque mois d'expérimentation sont représentées sur la Figure IV-10, la moyenne mobile (sur 24 h) sert à lisser le signal et à mettre en évidence les fortes variations de la vitesse du vent.

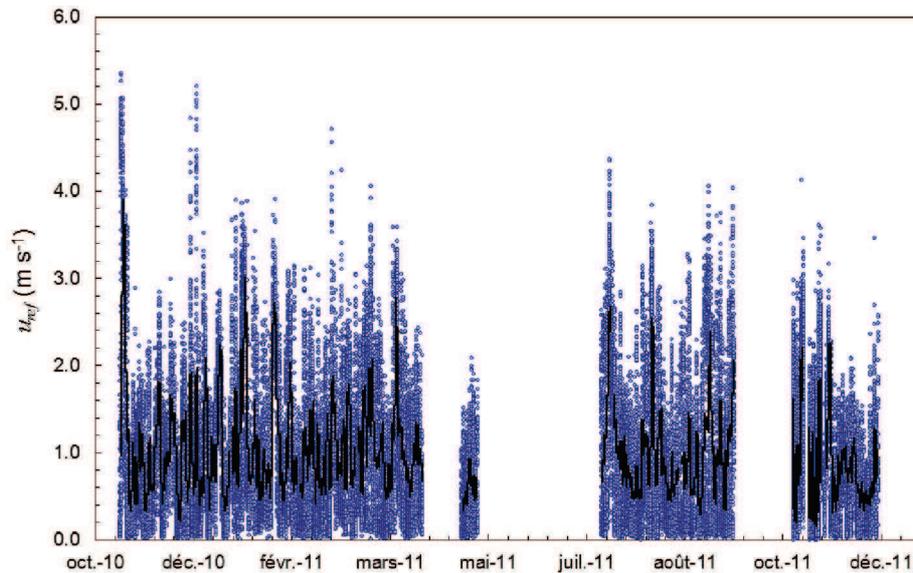


Figure IV-10 : vitesses moyennes de vent u_{ref} sur 10 min mesurées sur l'ensemble des 16 mois de la période expérimentale et valeurs moyennes mobiles sur 24 h de ces vitesses de vent.

○ moyenne sur 10 min, — moyenne mobile sur 24 h.

Les valeurs minimale et maximale de la vitesse moyenne du vent sur 10 min sont respectivement de 0,0 à 5,4 m s^{-1} . Les vitesses moyennes mensuelles de vent varient de $0,8 \pm 0,5$ à $1,2 \pm 0,9$ m s^{-1} et la vitesse moyenne du vent sur l'ensemble des 16 mois de la période d'expérimentations est de $1,0 \pm 0,8$ m s^{-1} . Ces vitesses moyennes de vent et leurs écarts-types (Tableau IV-3) indiquent que des conditions de vents faibles ont été majoritairement rencontrées lors de l'exposition des éprouvettes à l'aérosol atmosphérique.

Les températures et humidités relatives mesurées par la station météorologique pendant les 16 mois d'expérimentations sont présentées sur la Figure IV-11. La période de données manquantes correspond à une panne de la station météorologique.

Pendant cette période de 16 mois, la température moyenne de l'air sur 10 min a varié de $-7,2$ à $36,8^\circ\text{C}$ et de $2,5$ à $18,9^\circ\text{C}$ pour les moyennes mensuelles. Le taux d'humidité relative a quant à lui varié de 19,9 à 100 % pour les moyennes sur 10 min et de 68,4 à 90,2 % pour les moyennes mensuelles. Ces valeurs de températures et d'humidités relatives mettent en évidence des variations relativement peu importantes et un air assez humide caractéristiques d'un climat océanique.

Tableau IV-3 : récapitulatif des données météorologiques moyennes, minimum et maximum pour chaque mois d'expérimentation.

Date de début	09/09/10	08/10/10	10/11/10	07/12/10	06/01/11	09/02/11	11/03/11	15/06/11	19/07/11	23/08/11	20/09/11	03/11/11	
Date de fin	08/10/10	09/11/10	07/12/10	05/01/11	08/02/11	10/03/11	13/04/11	18/07/11	22/08/11	19/09/11	02/11/11	01/12/11	
Vitesse du vent (m s ⁻¹)	Moyenne	---	---	1,1 ± 1,0	1,0 ± 0,8	1,2 ± 0,9	1,0 ± 0,7	1,1 ± 0,8	---	0,9 ± 0,7	1,0 ± 0,9	---	0,8 ± 0,5
	Minimum	---	---	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	---	0,0	0,0	---	0,0
	Maximum	---	---	5,4	5,2	3,9	4,7	4,1	---	3,9	4,1	---	3,5
Température (°C)	Moyenne	15,1	11,4	4,8	2,5	6,4	7,7	12,2	18,2	18,9	17,0	---	11,4
	Minimum	1,2	-2,3	-7,2	-6,9	-5,2	-0,6	1,6	7,7	7,6	5,9	---	1,3
	Maximum	28,4	26,3	15,5	10,3	16,0	17,9	27,8	36,8	31,5	29,6	---	19,4
Humidité relative (%)	Moyenne	80,4	81,0	88,2	85,1	82,5	77,0	71,0	68,4	77,6	81,9	---	90,5
	Minimum	25,0	37,9	50,7	51,0	44,3	32,3	25,7	19,9	29,1	39,5	---	48,2
	Maximum	100,0	100,0	99,8	98,6	97,6	97,1	100,0	100,0	100,0	100,0	---	99,5
Pluviométrie (mm)	78,4	72,8	113,0	73,3	51,3	43,3	16,2	57,8	67,1	66,1	---	9,9	
Absence de précipitation (% du temps total)	94,3	97,3	91,3	94,0	96,2	96,2	98,7	96,9	96,3	96,5	---	98,7	

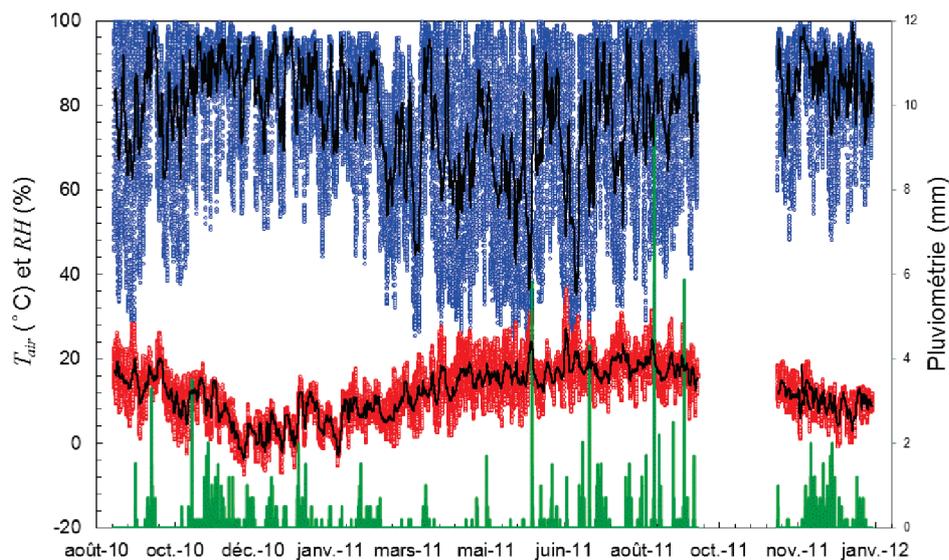


Figure IV-11 : température de l'air T_{air} et humidité relative RH moyennes sur 10 min, précipitations cumulées sur 10 min, mesurées sur la totalité de la période expérimentale et moyennes mobiles sur 24 h.

○ RH moyenne sur 10 min, ○ T_{air} moyenne sur 10 min, — moyennes mobiles sur 24 h,
— précipitations cumulées sur 10 min.

Les précipitations cumulées sur chaque mois sont comprises entre 16,2 et 113,0 mm. A partir de ces données de pluviométrie, les périodes de mesures de 10 min sont séparées selon l'absence ou la présence de précipitations. De cette façon, il est déterminé que le temps passé sans précipitations est en moyenne de 96,0 % (pourcentage de temps sec par rapport au temps total des expérimentations). Le pourcentage de temps sec montre que la probabilité d'un rejet de polluants particulaires stables ou radioactifs par temps sec est beaucoup plus forte que par temps humide dans cette région. Cette donnée confirme que, malgré sa faible efficacité vis-à-vis du dépôt humide, le dépôt sec de particules doit être étudié car il est potentiellement le mode de transfert majoritaire des particules lors d'un rejet accidentel.

Par contre, dans le cas d'un rejet chronique, Fogh *et al.* (1999) considèrent que le dépôt sec d'aérosols submicroniques ne représente que 10 % du dépôt total de l'aérosol atmosphérique. Le rabatement de ces aérosols par la pluie est plus efficace et contribue pour 90 % du dépôt total. Ils utilisent cependant un collecteur de dépôt de particules qui n'est pas représentatif des surfaces urbaines et qui peut être soumis à la thermophorèse ou à des forces électrostatiques. Cela peut conduire à de fortes incertitudes sur la contribution du dépôt sec au dépôt total dans leur étude. La présente étude du dépôt sec sur de longues durées reste donc pertinente pour mieux connaître l'impact de rejets chroniques d'aérosols.

IV.3.2 VITESSES DE DEPOT SEC

Les vitesses de dépôt sec sont calculées à partir des activités en ^7Be , mesurées sur les filtres et dans les solutions de lavage des éprouvettes, en remplaçant la masse de fluorescéine en kilogramme de l'Équation II-17 et de l'Équation II-18 par les activités en becquerel des échantillons. Le volume d'air V utilisé dans l'Équation II-17 est celui donné par le Partisol® 2000 FRM, l'aire A des surfaces urbaines dans l'Équation II-18 est égale à celle de quatre éprouvettes, soit $0,16 \text{ m}^2$, et le temps t correspond à la durée de l'expérimentation. Les vitesses de dépôt obtenues sont présentées dans le Tableau IV-4 et en fonction de leurs dates d'exposition sur la Figure IV-12. Les barres d'incertitudes associées à ces V_d représentent les incertitudes liées à la mesure par spectrométrie gamma.

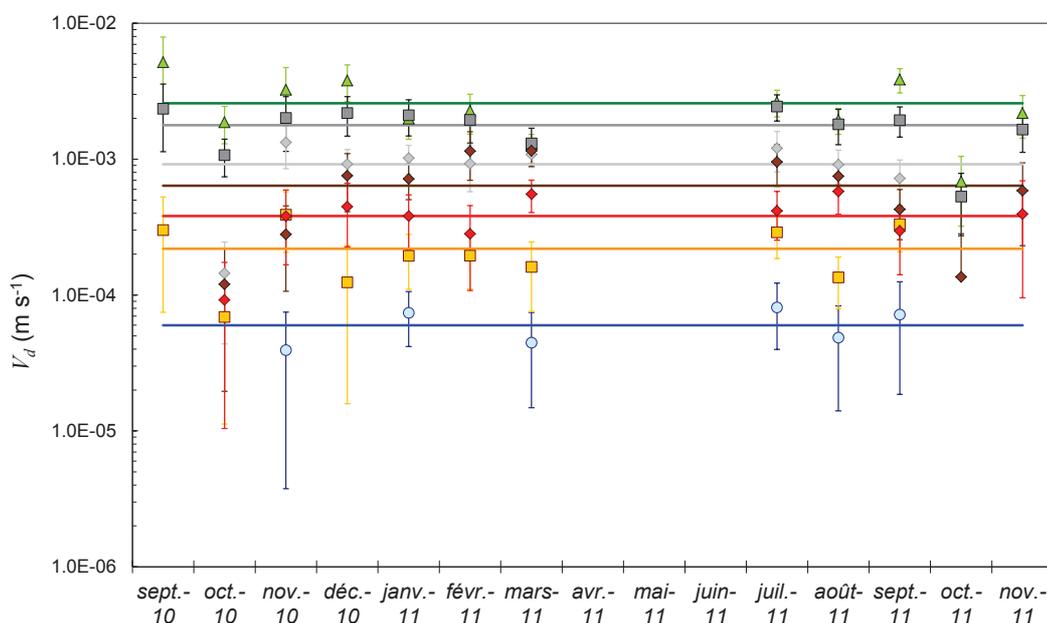


Figure IV-12 : vitesses de dépôt sec mesurées avec les éprouvettes urbaines pour chaque mois d'expérimentation et vitesses de dépôt moyenne pour chaque surface sur l'ensemble de la campagne expérimentale *in situ* de longue durée.

V_d mensuelles : surfaces horizontales : ▲ herbe synthétique, ■ bitume ;
surfaces verticales : ○ verre classique, ■ enduit de façade ;
surfaces obliques (30°) : ◆ ardoise, ◆ tuile, ◆ zinc ;

V_d moyennes : — herbe synthétique, — bitume, — verre classique, — enduit de façade,
— ardoise, — tuile, — zinc.

Les vitesses de dépôt mesurées sont variables entre les différentes surfaces urbaines. La vitesse de dépôt minimale est de $3,9 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ et elle est mesurée sur le verre vertical en novembre 2010. La vitesse de dépôt maximale est de $5,2 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ et elle est mesurée sur l'herbe synthétique en septembre 2010, soit un facteur 133 d'écart entre ces deux vitesses de dépôt. Une nouvelle fois, et en accord avec les expérimentations en soufflerie et *in situ* de courtes durées, le dépôt dépend très fortement de la surface urbaine considérée. L'absence de données du 13 avril au 15 juin 2011 correspond à une période de problèmes techniques sur le store qui n'ont pas permis la protection

automatique des éprouvettes à la pluie, empêchant la détermination des flux de dépôt sec sur les différentes surfaces urbaines. Pour une même surface, l'écart entre V_d minimale et maximale est de l'ordre d'un facteur 2 pour le verre classique vertical et d'un facteur 10 pour l'ardoise oblique comme le montre le Tableau IV-4.

Tableau IV-4 : vitesses de dépôt sec moyennes, maximales et minimales de chaque surface urbaine pour l'ensemble des expérimentations *in situ* de longues durées.

Surface	V_d moyenne (m s ⁻¹)	V_d minimale (m s ⁻¹)	V_d maximale (m s ⁻¹)
Herbe synthétique	2,6 10 ⁻³	6,9 10 ⁻⁴	5,2 10 ⁻³
Bitume	1,8 10 ⁻³	5,3 10 ⁻⁴	2,4 10 ⁻³
Verre classique	6,0 10 ⁻⁵	3,9 10 ⁻⁵	8,1 10 ⁻⁵
Enduit de façade	2,2 10 ⁻⁴	6,9 10 ⁻⁵	3,9 10 ⁻⁴
Ardoise	6,4 10 ⁻⁴	1,2 10 ⁻⁴	1,2 10 ⁻³
Tuile	3,8 10 ⁻⁴	9,2 10 ⁻⁵	5,8 10 ⁻⁴
Zinc	9,2 10 ⁻⁴	1,4 10 ⁻⁴	1,3 10 ⁻⁴

L'ensemble de ces écarts de vitesses de dépôt confirme qu'en milieu urbain, et dans le cas d'une exposition chronique à une source de polluants particulaires, les flux de dépôt sec peuvent être différents selon les surfaces considérées. Par contre, rien ne permet d'affirmer que ces vitesses de dépôt sont très dépendantes des conditions de turbulence atmosphérique. Alors que Damay (2010) a mis en évidence une augmentation forte du flux de dépôt sec pour les conditions atmosphériques convectives par rapport aux conditions neutres et stables, en moyenne d'un facteur 5, les variations de V_d de cette étude, pour chaque surface et sur une année, ne montrent pas d'augmentation significative pendant les mois de juillet et d'août 2011 pourtant favorables au CLA instables. Des vitesses de dépôt sec moyennes sont donc calculées pour chaque type de surface. Ces moyennes sont représentées par les droites horizontales colorées sur la Figure IV-12. Le Tableau IV-4 présente leurs valeurs ainsi que les valeurs minimales et maximales mesurées sur chaque surface urbaine.

Les vitesses de dépôt sec moyennes des surfaces verticales de verre et d'enduit de façade sont inférieures à celles des autres types de surface et celles de l'herbe synthétique et du bitume sont nettement supérieures à celles mesurées sur les éprouvettes représentatives des toits. Cette dépendance de la vitesse de dépôt à l'orientation des surfaces, notamment lorsqu'on compare les surfaces de verre et d'enduit avec les surfaces d'ardoise, de tuile et de zinc obliques (30°), montre l'importance du dépôt par sédimentation dans les flux de dépôt de ⁷Be mesurés.

IV.3.3 DISCUSSIONS

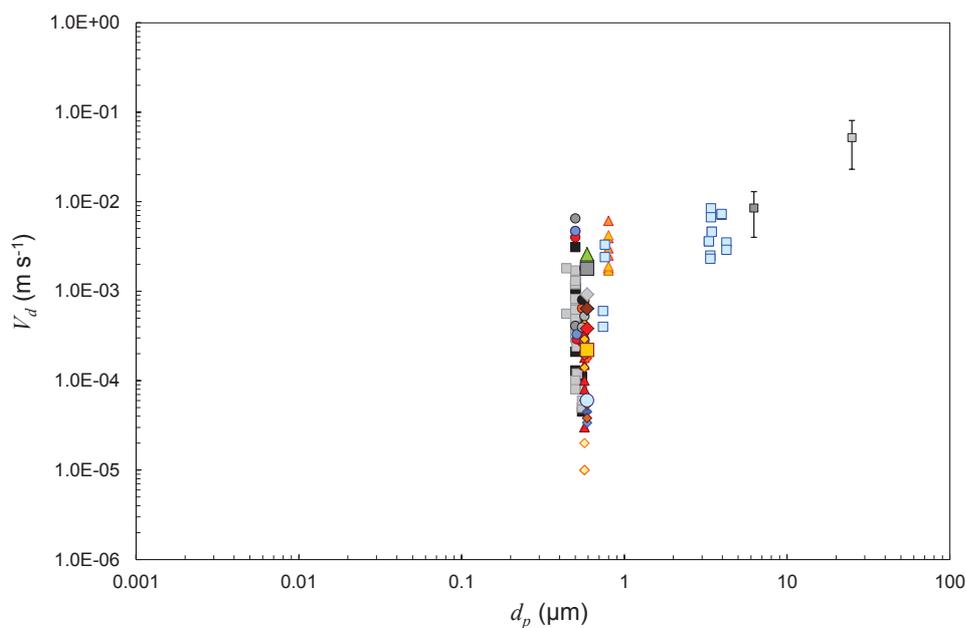
Les vitesses de dépôt sec mesurées lors de ces expérimentations *in situ* de longues durées peuvent être comparées aux données de la littérature pour lesquelles la durée d'exposition des surfaces aux particules est supérieure à un cycle journalier (Figure IV-13), même si les temps exacts d'échantillonnage des flux de dépôt et des concentrations en aérosols, pour le calcul de V_d , sont rarement donnés par les auteurs.

Un diamètre de particule de 0,6 μm est associé aux vitesses de dépôt mesurées dans cette étude. Ce diamètre correspond au diamètre aérodynamique médian en activité du ^7Be déterminé par Percot *et al.* (2011) sur le site atelier pluridisciplinaire du Pin Sec à Nantes à l'aide d'un LPI (*cf.* paragraphe 0).

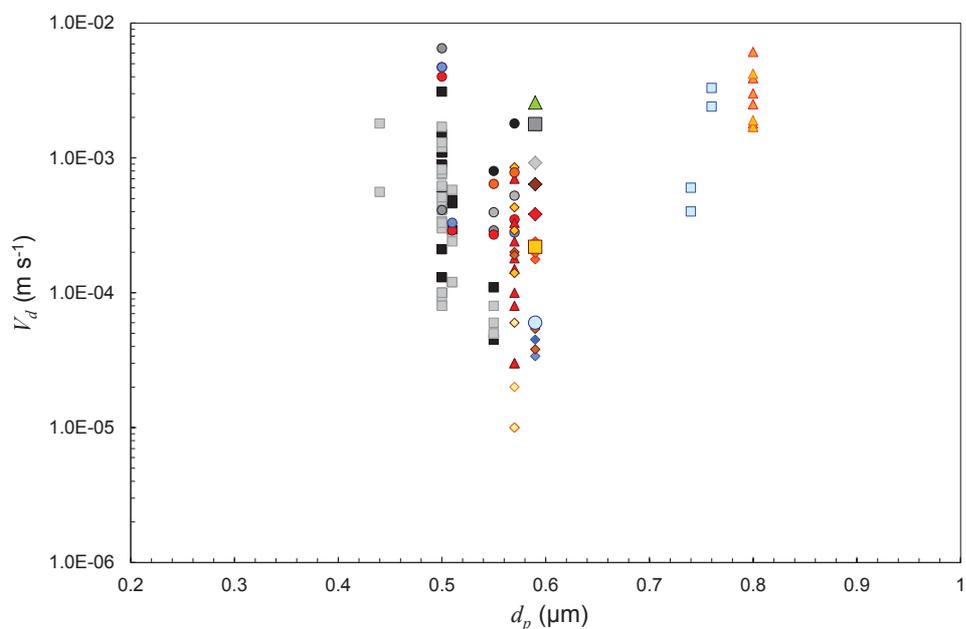
Les données acquises dans cette étude sont comparées aux résultats de Damay (2010, *cf.* paragraphe 0 et paragraphe III.3.3), acquis grâce à une méthode de corrélation turbulente au-dessus d'une prairie d'herbe, et donc représentatifs des mécanismes de dépôt sec à l'échelle micrométéorologique et des courtes périodes de temps (30 minutes). Il s'avère que les vitesses de dépôt sec mesurées grâce au ^7Be sont supérieures aux valeurs moyennes de Damay (2010) qui sont comprises entre $2,9 \cdot 10^{-4}$ et $2,8 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ pour le mode accumulation de l'aérosol atmosphérique.

Pour le bitume, alors que les vitesses de dépôt mesurées par Roed (1987) couvrent près de deux ordres de grandeur (entre $4,5 \cdot 10^{-5}$ et $3,1 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$), celles mesurées dans cette étude sont comprises dans moins d'un ordre de grandeur (Tableau IV-4) et correspondent aux valeurs les plus fortes de Roed (1987).

Les valeurs de V_d mesurées sur le verre classique vertical et celles de Connan *et al.* (2006), acquises sur du verre vertical pour des conditions expérimentales proches, avec du ^7Be comme traceur, sont du même ordre de grandeur même si, en moyenne, les valeurs de cette étude sont plus élevées de 50 %. Les données de Connan *et al.* (2006) sur enduit de façade vertical sont aussi comparées aux résultats de cette étude sur ce même type de surface. Dans ce cas, les résultats des deux études sont très proches, leur V_d moyennes respectives sont différentes de seulement 7 %. Les vitesses de dépôt sec de Roed (1985, 1987) et Nicholson (1987) sur murs enduits et murs de briques, respectivement égales à $1,2 \cdot 10^{-4}$, $1,3 \cdot 10^{-5}$ et $6,0 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, sont du même ordre de grandeur mais inférieures aux données de cette étude et de celle de Connan *et al.* (2006) sur enduit de façade. Tandis que celles de Roed (1983), mesurées sur des murs enduits et des murs de briques, comprises entre $3,0 \cdot 10^{-5}$ et $8,5 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$, sont très proches en moyenne ($2,73 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$). Notons que dans l'étude de Connan *et al.* (2006) les mesures de concentrations en ^7Be dans l'air ne sont pas réalisées au même endroit que l'échantillonnage des flux de dépôt ce qui peut engendrer des incertitudes supplémentaires sur les vitesses de dépôt sec. De même, Roed (1983, 1985, 1987) et Nicholson (1987) ne précisent pas si l'emplacement de mesure des radionucléides traceurs est le même que celui des prélèvements des radionucléides déposés.



a)



b)

Figure IV-13 : vitesses de dépôt sec moyennes des expérimentations *in situ* de longue durée et données de la littérature pour des expositions longues *in situ* à des aérosols : a) ensemble du spectre granulométrique, b) diamètres compris entre 0,2 et 1 μm .

Expérimentations *in situ* de longue durée : surfaces horizontales : \blacktriangle herbe synthétique, \blacksquare bitume ;
surfaces verticales : \circ verre classique, \blacksquare enduit de façade ;
surfaces obliques (30°) : \blacklozenge ardoise, \blacklozenge tuile, \blacklozenge zinc ;

Données de la littérature : surfaces horizontales : Roed (1987) : \blacksquare bitume, \square dalle béton ;
Davidson *et al.* (1985) : \blacktriangle plaque téflon, \blacktriangle boîte pétri ; Tanner *et al.* (2001) : \square boîte pétri ;
Tasdemir *et al.* (2004) \square déposimètre ; Langner *et al.* (2011) : \blacksquare déposimètre ;

surfaces verticales : Roed (1983) : \blacklozenge enduit, \blacktriangle brique ; Roed (1985) : \blacklozenge mur ;
Roed (1987) : \blacklozenge enduit ; Nicholson (1987) : \blacklozenge brique ; Connan *et al.* (2006) : \blacklozenge verre, \blacklozenge enduit ;
toits : Roed (1987) : \bullet ciment, \bullet tuile, \bullet éternite ; Nicholson (1987) : \bullet tuile, \bullet ciment, \bullet bitume.

Pour les surfaces de toit, aucun équivalent aux V_d mesurées sur l'ardoise et le zinc n'a été trouvé dans la littérature. Seules les valeurs de Roed (1987) et de Nicholson (1987) pour des toits en tuiles peuvent être comparées aux valeurs mesurées sur les éprouvettes de tuile. En moyenne, les valeurs données par Roed (1987) et Nicholson (1987) sont supérieures à celle de cette étude respectivement d'un facteur 5 et d'un facteur 2. Par contre, leurs gammes de données sont étendues sur un peu plus d'un ordre de grandeur, ce qui n'est pas le cas des résultats de cette étude pour de la tuile.

En conclusion, les données mesurées dans cette étude sont proches et complémentaires des données de la littérature. De plus, les variations des vitesses de dépôt de chaque type de surface urbaine de cette étude sont beaucoup moins importantes que celles qui ont pu être relevées dans la littérature.

La Figure IV-14 présente les vitesses de dépôt sec moyennes, minimum et maximum mesurées dans cette étude avec le ^{7}Be *in situ* sur de longues durées et avec la fluorescéine *in situ* sur de courtes durées. La comparaison de ces V_d met en évidence les valeurs moyennes systématiquement plus élevées des expérimentations de longues durées par rapport aux expérimentations de courtes durées.

Cependant, l'évolution de V_d en fonction du type de surface pour les expérimentations de courtes durées et de longues durées montre certaines similarités : V_d est plus forte sur les surfaces horizontales que sur les surfaces obliques et plus forte sur les surfaces obliques que sur les surfaces verticales ; V_d sur le bitume est très proche de V_d sur l'herbe synthétique. Cette figure montre aussi quelques différences notables entre ces deux types d'expérimentations, pour celles de longue durée : V_d sur l'enduit de façade est nettement supérieure à V_d sur le verre ; V_d sur l'ardoise devient supérieure à V_d sur la tuile et V_d sur le zinc est supérieure aux valeurs de l'ardoise et de la tuile. Le dépôt plus important sur l'enduit que sur le verre est dû aux rôles de l'impaction et de l'interception, engendrées par les rugosités de l'enduit de façade. Par contre, de la même façon que pour le bitume sur des expositions courtes, la nature chimique du zinc pourrait éventuellement être responsable de cette augmentation de V_d sur cette surface considérée jusqu'ici comme lisse. En effet, le zinc était systématiquement retrouvé oxydé à la fin de chaque période d'exposition, modifiant l'aspect lisse de la surface des éprouvettes en une surface légèrement rugueuse par endroits. Cet aspect plus rugueux de la surface pourrait expliquer un dépôt plus important par impaction et par interception. Le lavage du zinc à l'eau acidifiée pour récupérer le ^{7}Be déposé lui rendait un aspect lisse avant d'être de nouveau exposées *in situ* à l'aérosol atmosphérique.

Les valeurs moyennes de V_d pour les surfaces horizontales d'herbe synthétique et de bitume sont plus fortes que les valeurs maximales mesurées *in situ* avec de la fluorescéine. Toujours en moyenne, V_d sur les expérimentations de longues durées est supérieure d'un facteur 4 et 6 pour respectivement l'herbe synthétique et le bitume à celles des expérimentations de courtes durées. Le même constat peut être fait pour les surfaces verticales de verre lisse classique et d'enduit de façade, mis à part que la valeur maximale mesurée sur le verre avec la fluorescéine est légèrement supérieure à la valeur moyenne des mesures faites avec le ^{7}Be comme traceur. Les rapports entre les V_d moyennes de chaque type d'expérimentations (longues ou courtes) sont cette fois d'un facteur 6 et d'un facteur 23 pour le verre et l'enduit de façade. Enfin pour les éprouvettes d'ardoise et de zinc en position « toit », les valeurs minimales des vitesses de dépôt des expérimentations de longues durées sont supérieures aux vitesses de dépôt maximales mesurées sur de courtes durées. Dans le cas de la tuile ces deux valeurs sont

sensiblement égales. Les rapports entre les valeurs moyennes de V_d entre les expérimentations de longues et de courtes durées sont de 32, 13 et 71 pour respectivement l'ardoise, la tuile et le zinc.

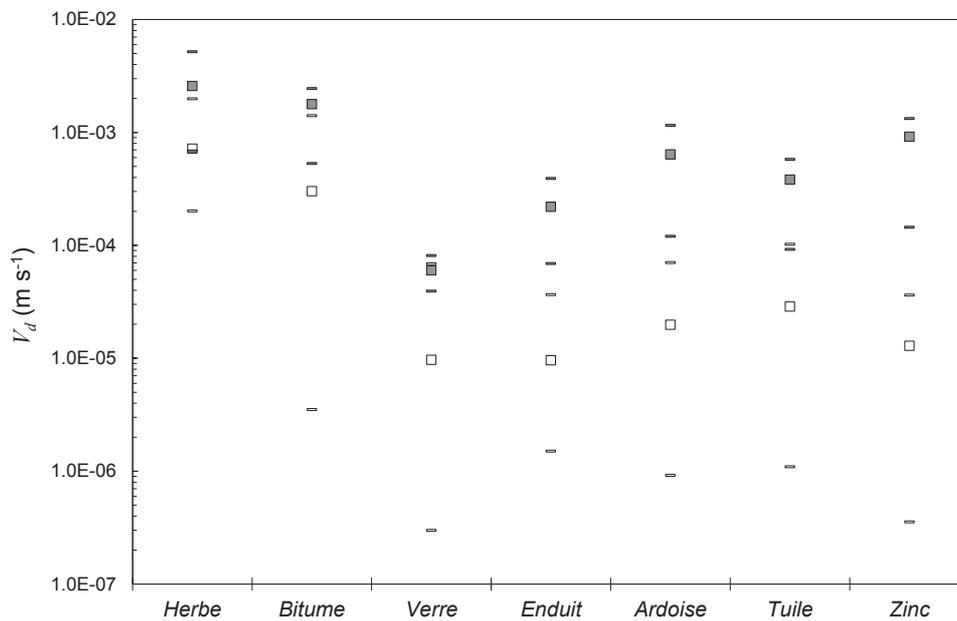


Figure IV-14 : vitesses de dépôt sec moyennes, minimum et maximum sur l'ensemble des données acquises avec chaque type de surface urbaine pour les expérimentations *in situ* de courtes durées et de longues durées.

In situ de longues durées : ■ V_d moyenne, = V_d minimum et maximum ;
in situ de courtes durées : □ V_d moyenne, = V_d minimum et maximum.

Etant donné les différences d'ordre de grandeur de V_d pour ces deux types d'expérimentations, il semble que la thermophorèse ait un rôle peu important sur les longues durées et qu'il soit inutile de prendre en considération une diminution du dépôt par thermophorèse sur des expositions de surfaces aux particules atmosphériques sur de longues durées. Par exemple, les valeurs de V_d mesurées sur les mois de juillet, août et septembre 2011 (Figure IV-12), correspondant aux mois d'été plus ensoleillés, ne montrent pas de valeurs systématiquement inférieures aux V_d moyennes. Ceci confirme que la diminution du dépôt sec par thermophorèse semble être négligeable en comparaison d'autres mécanismes de dépôt lors d'expositions de surfaces urbaines à des particules pendant un mois.

Les lois ajustées sur les résultats de soufflerie et dépendant uniquement de la vitesse de vent u_{ref} pour les surfaces de verre, d'enduit de façade et d'herbe synthétique sont utilisées en prenant la vitesse mesurée par l'anémomètre ultrasonique comme vitesse de référence pour calculer des vitesses de dépôt moyennes sur certains mois d'exposition (Figure IV-15). Les vitesses de dépôt ainsi calculées sous-estiment systématiquement la vitesse de dépôt de l'aérosol atmosphérique, avec en moyenne des sous-estimations de facteurs 16, 32 et 19 pour respectivement le verre vertical, l'enduit de façade vertical et l'herbe synthétique horizontale.

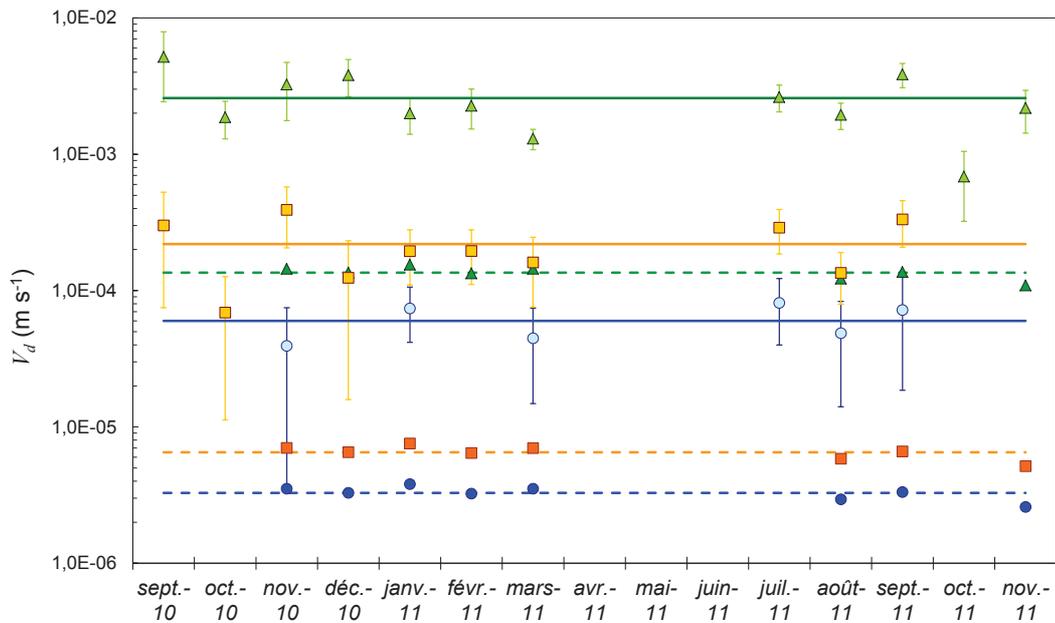


Figure IV-15 : comparaison des vitesses de dépôt sec mesurées avec le ^7Be et des résultats donnés par les ajustements sur les résultats de soufflerie.

V_d mensuelles : ^7Be : \blacktriangle herbe synthétique, \circ verre classique, \blacksquare enduit de façade ;
ajustements : \blacktriangle herbe synthétique, \bullet verre classique, \blacksquare enduit de façade ;

V_d moyennes : ^7Be : — herbe synthétique, — verre classique, — enduit de façade ;
ajustements : - - - herbe synthétique, - - - verre classique, - - - enduit de façade.

Pour expliquer cette différence, une première hypothèse peut être que la différence de diamètres médians des granulométries des aérosols de fluorescéine ($0,3 \mu\text{m}$) et du ^7Be ($0,6 \mu\text{m}$) a une influence sur les différences de V_d mesurées avec ces deux traceurs. Le modèle de Lai et Nazaroff (2000) pour les surfaces lisses verticales, donnant de bons résultats pour l'aérosol de fluorescéine en soufflerie, est utilisé pour calculer la valeur de V_d de particules de densité 1,5 sur du verre vertical pour des diamètres de $0,3$ et $0,6 \mu\text{m}$ et pour des vitesses de frottement u_* égales à $0,1$ et 1 m s^{-1} . Une température de l'air de 20°C est utilisée. Les vitesses de dépôt calculées avec ce modèle et présentées dans le Tableau IV-5 sont comparées aux résultats expérimentaux. Les valeurs calculées avec le modèle de Zhang *et al.* (2001) pour une surface d'herbe, surestimant les résultats des expérimentations de soufflerie, sont aussi données.

Les modèles calculent des vitesses de dépôt systématiquement plus faibles pour $d_p = 0,6 \mu\text{m}$ que pour $d_p = 0,3 \mu\text{m}$ pour les deux u_* utilisés, ce qui est cohérent avec la combinaison d'une diminution de l'efficacité de dépôt par diffusion brownienne et une sédimentation très faible pour cette gamme de diamètres de particules (*cf.* paragraphe I.2.5). Par contre, cette évolution de V_d en fonction de d_p est contraire à celle observée entre les résultats obtenus avec la fluorescéine et le ^7Be . La différence de diamètres médians des distributions granulométriques des aérosols de fluorescéine et du béryllium n'explique donc pas les fortes différences de V_d mesurées avec ces deux traceurs, les modèles prédisant même des V_d plus fortes pour $d_p = 0,3 \mu\text{m}$ que pour $d_p = 0,6 \mu\text{m}$.

Tableau IV-5 : vitesses de dépôt calculées avec les modèles de Lai et Nazaroff (2000) et de Zhang *et al.* (2001) pour des particules de 0,3 et 0,6 µm de diamètre.

V_d (m s ⁻¹), verre lisse vertical, Lai et Nazaroff (2000)		
u_* (m s ⁻¹)	$d_p = 0,3 \mu\text{m}$	$d_p = 0,6 \mu\text{m}$
0,1	$3,1 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$
1,0	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$
V_d (m s ⁻¹), herbe horizontale, Zhang et al. (2001)		
u_* (m s ⁻¹)	$d_p = 0,3 \mu\text{m}$	$d_p = 0,6 \mu\text{m}$
0,1	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$
1,0	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$

Les résultats obtenus avec ces expérimentations *in situ* de longues durées montrent donc qu'il existe un ou plusieurs processus de dépôt sec importants sur de grandes échelles de temps, augmentant fortement les flux de dépôt sec, qui n'existent pas ou sont négligeables à des échelles de temps plus courtes correspondant aux petites échelles de la turbulence atmosphérique. Différentes pistes peuvent être abordées mais seules quelques-unes sont privilégiées et explorées dans cette étude.

L'augmentation du dépôt par effet électrostatique n'est pas retenue dans notre étude. En effet, l'aérosol atmosphérique est à l'équilibre de Boltzmann. De plus, des contrôles des éprouvettes avec un champmètre (Eltex EMF 58) lors des débuts et fins d'expositions mensuelles ont montré que d'une part les éprouvettes d'herbe synthétique, déchargées de leur électricité statique avant exposition, ne présentaient pas de charges électrostatiques à la fin du mois d'exposition et d'autre part que les autres éprouvettes urbaines ne présentaient pas non plus de charges électrostatiques au début et à la fin des expérimentations.

La diffusiophorèse, envisagée dans la littérature pour des conditions rencontrées dans des réacteurs nucléaires en situation d'accident et restreinte aux particules ultrafines ($d_p < 0,1 \mu\text{m}$) (cf. paragraphe I.1.2.5), semble effective sous des conditions trop spécifiques pour être envisagée comme seule source d'augmentation du dépôt dans les conditions normales de température et de flux de vapeur d'eau rencontrées dans l'environnement. Par contre, c'est un phénomène associé au flux de Stefan, qui engendre un courant aérodynamique à proximité d'une surface liquide se condensant ou s'évaporant et qui pourrait engendrer du dépôt sec par turbulence, même en l'absence de vent. L'Équation IV-2 donnée par Glodsmith et May (1966, d'après Hinds, 1999) est une expression empirique d'une vitesse V_{dsf} (m s⁻¹), résultante de la diffusiophorèse et du flux de Stephan pour de la vapeur d'eau dans l'air à des conditions standards de température et de pression, et dépendante du gradient de pression partielle de vapeur d'eau (kPa m⁻¹).

$$V_{dsf} = -1,9 \times 10^{-7} \frac{dp}{dx} \quad \text{Équation IV-2}$$

Selon cette expression, un dépôt pourrait être engendré par une surface en condensation. Le gradient de pression partielle nécessaire pour les ordres de grandeurs de vitesses de dépôt mesurées sur les longues durées serait de l'ordre de 100 à 1000 kPa m⁻¹. Cependant, ces gradients de pressions partielles ne peuvent pas être quantifiés dans notre étude et ce phénomène de dépôt ne peut pas vraiment être étudié.

Dans la littérature, certains auteurs ont relevé que la température des surfaces urbaines dans des rues canyons pouvait être inférieure à la température de l'air. Dans ce cas, du fait de l'existence de gradients de températures aux parois, un effet de thermophorèse entraînant les particules de l'air vers les surfaces urbaines pourrait augmenter le dépôt, d'une façon inverse à celle étudiée pour des parois chaudes. Des gradients de température associés à des vitesses de thermophorèse peuvent être calculés à partir de la formule de Brock (1962, Équation I-30) pour des particules de diamètre 0,6 µm, de composition connue et des conditions normales de température et de pression. Le Tableau IV-6 rassemble les valeurs de gradients de température calculés avec cette formule, pour des aérosols de sodium ($k = 6,6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), de carbone ($k = 4,2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) et d'eau ($k = 0,59 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), pour une température de l'air de 20°C et pour des vitesses de thermophorèse égales aux vitesses de dépôt sec moyennes du verre vertical et du bitume horizontal mesurées avec le ⁷Be. Le dépôt par phénomènes turbulents et sédimentation des particules de 0,6 µm est considéré négligeable étant donné les observations tirées des comparaisons avec les modèles qui ont été faites précédemment.

Tableau IV-6 : normes des vecteurs gradients de températures calculés avec la formule de vitesse de thermophorèse de Brock (1962), pour des vitesses de thermophorèse égales aux vitesses de dépôt du verre et du bitume.

Nature chimique des particules	$V_{th} = 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1} = V_{dverre}$	$V_{th} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1} = V_{dbitume}$
	$\overline{\nabla T_{\infty}} \text{ (K m}^{-1}\text{)}$	
Chlorure de sodium		
	5551	166540
Carbone		
	5336	160094
Eau		
	5336	160094

Les gradients de températures calculés pour le verre et qui doivent être rencontrés par la particule à l'approche des surfaces urbaines sont, en valeur absolue, beaucoup plus grands (d'un facteur 16 à 511 si l'on considère les valeurs extrêmes hautes et basses des gradients de températures) que ceux rencontrés en soufflerie lors des expérimentations avec chauffage des surfaces urbaines. Quant aux gradients calculés pour le bitume, ils sont en valeur absolue au minimum supérieurs de deux ordres de grandeur à ceux rencontrés en soufflerie. En considérant que les profils de températures de l'air au-dessus des surfaces soient logarithmiques, comme en soufflerie, ces ordres de grandeur paraissent assez peu réalistes vis-à-vis des conditions de températures des parois qui pourraient être rencontrées dans l'environnement. Ils montrent que le phénomène de dépôt par thermophorèse sur des parois plus froides que l'air ne peut *a priori* pas être le seul contributeur à l'augmentation des vitesses de dépôt

sec. Le dépôt par thermophorèse peut éventuellement exister et contribuer au dépôt en milieu urbain. Cependant, pour des gradients de température de normes égales à celles rencontrées en soufflerie pour un $\Delta T_{\text{surface-air}}$ de 2 K et de sens inverses (pour des parois froides), il devient négligeable en comparaison des ordres de grandeur des vitesses de dépôt mesurées sur ces expérimentations de longues durées.

Finalement, l'hypothèse privilégiée dans cette étude est l'augmentation du dépôt sec due à un grossissement épisodique des particules atmosphériques sous certaines conditions météorologiques. En effet, les vitesses de dépôt sec des particules de diamètres compris entre 0,1 et 1 μm sont généralement les plus faibles car elles sont représentatives de la contribution de différents mécanismes de dépôt dont l'efficacité est faible pour cette gamme de tailles (cf. paragraphes 1.2.4 et 1.2.5). Par contre, pour des diamètres supérieurs à 1 μm , V_d croît fortement en fonction du diamètre d_p . Une plus grande taille des particules leur confère une masse plus importante (pour des particules de densités égales) et donc un nombre de Stokes plus grand. Le résultat est que V_d augmente du fait de l'inertie plus importante des particules, donc d'un dépôt par impaction turbulente plus important, mais aussi du fait d'une vitesse de sédimentation V_s plus grande.

Dans un air contenant de la vapeur d'eau, les particules peuvent varier en taille si le taux d'humidité varie (cf. paragraphe 1.1.2.6). Ces variations peuvent d'ailleurs être importantes pour des taux d'humidité couramment rencontrés dans l'atmosphère. Dans l'environnement, le grossissement des particules fines ($0,1 \mu\text{m} < d_p < 1 \mu\text{m}$) est par exemple impliqué dans la formation des nuages (Delmas *et al.*, 2005). Cette formation des nuages a lieu en présence d'un air saturé en vapeur d'eau qui présente une humidité relative RH égale à 100 % : la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air est égale à la pression de vapeur saturante de l'eau à la température donnée de l'air ce qui provoque la condensation de l'eau (Triplet et Roche, 1986). L'eau condense sur les particules en suspension qui grossissent jusqu'à former des gouttes.

Au niveau du sol dans la CLA, le phénomène de rosée correspond à des périodes de condensation de la vapeur d'eau de l'air (Triplet et Roche, 1986). La température du point de rosée T_d correspond à la température à laquelle une masse d'air contenant de la vapeur d'eau se retrouve à la pression de vapeur saturante de l'eau par refroidissement isobare. Lorsque la température de l'air T_{air} diminue jusqu'à être inférieure à la température du point de rosée T_d , la masse d'air ne peut plus contenir toute la vapeur d'eau et l'excédent se condense sur les surfaces présentes (sol, végétaux, objets, murs...). Ce mécanisme qui conduit à des conditions de saturation de l'air en vapeur d'eau peut, de la même façon que pour la formation des nuages, amener à la formation de brouillards nocturnes par condensation de la vapeur d'eau sur les particules atmosphériques qui servent de noyaux de condensation (Pandis *et al.*, 1990).

Le cycle de vie d'un brouillard ou d'un nuage est alors décomposé en 3 étapes : une première de conditionnement ou RH augmente jusqu'à un seuil RH_c (souvent pris égale à 99 %, Pandis *et al.*, 1990), une seconde de croissance rapide (RH dépasse RH_c) et une troisième dite de dissipation. Les particules condensées peuvent atteindre des diamètres moyens (ou effectifs) compris entre 5 et 40 μm (Collett *et al.*, 2005) et sont loin d'être monodispersées (Puppacher et Klett, 1980 ; cité par Pandis *et al.*, 1990).

La taille finale d'une particule, suite à son grossissement, est dépendante de plusieurs facteurs dont sa composition chimique (par exemple la solubilité de ses composants, Delmas *et al.*, 2005)

C'est ce phénomène de grossissement par condensation lors des épisodes de rosées (ou de saturation en vapeur d'eau) qui est suspecté de grossir épisodiquement l'aérosol atmosphérique et d'augmenter les flux de dépôt sec dans le cas des surfaces urbaines exposées pendant de longues périodes. En effet, les périodes de condensation ou de croissance rapide ($RH = 100\%$) ont représenté un pourcentage non négligeable du temps lors des périodes d'exposition des éprouvettes à l'aérosol atmosphérique. Ce pourcentage de temps varie de 1,2 à 30,2 % en moyennes mensuelles (13,5 % du temps en moyenne sur l'ensemble des expérimentations menées ; Figure IV-16), avec des valeurs visiblement moins élevées en hiver et au printemps.

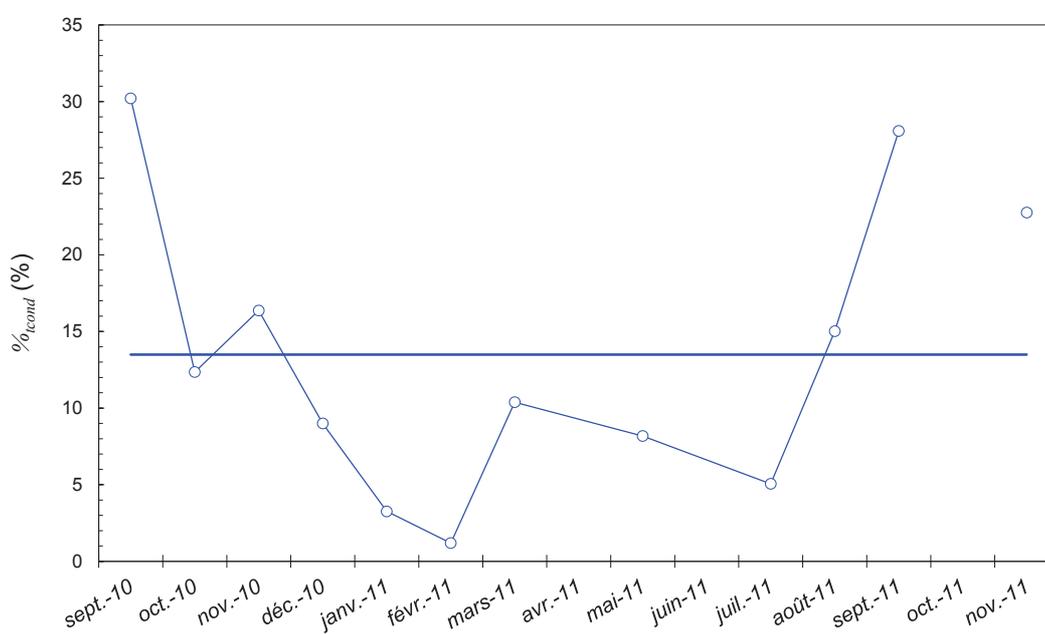


Figure IV-16 : pourcentage du temps d'expérimentation $\%t_{cond}$ correspondant à des périodes de rosée ($RH = 100\%$), pour chaque mois et en moyenne sur l'ensemble des expérimentations.

○ valeur mensuelle, — moyenne.

Le diamètre des particules est un des paramètres indispensables pour étudier leur dépôt. Le principal problème dans notre cas est que la granulométrie de l'aérosol atmosphérique n'est pas caractérisée par des mesures en continu ou des prélèvements pendant les expérimentations. L'étude du grossissement de l'aérosol et l'estimation de son diamètre ne peut être faite qu'à partir des V_d mesurées et des mécanismes de dépôt mis en jeu. A partir du protocole expérimental suivi et des données acquises, deux solutions sont envisagées : la première est d'estimer le diamètre des particules déposées à partir des vitesses de dépôt mesurées sur les éprouvettes, exposées à l'aérosol atmosphérique, selon leurs orientations et présentées au paragraphe IV.2.1.2 ; la seconde est d'utiliser des éprouvettes orientées différemment pour faire intervenir ou non les différents mécanismes de dépôt sec (plus particulièrement la sédimentation), ce qui a été réalisé sur les dernières

expérimentations menées. Dans les deux cas, le dépôt sec pendant les épisodes de grossissement est considéré comme prépondérant par rapport aux dépôts intervenant pendant le reste du temps d'exposition.

Pour appliquer la première solution, certaines hypothèses simplificatrices sur les mécanismes de dépôt doivent être faites. Dans le cas d'un grossissement de particules, leur dépôt par diffusion brownienne perd en efficacité et leurs dépôts par mécanismes d'interception, d'impaction et de sédimentation deviennent prépondérants.

Une première hypothèse simple, mais réaliste, est de considérer cette diffusion brownienne négligeable dans le dépôt sec et de ne pas en tenir compte.

La seconde hypothèse porte sur l'interception et l'impaction qui sont des phénomènes dynamiques liés à la turbulence de l'écoulement d'air à la proximité des surfaces exposées. La quantification de cette turbulence, plus particulièrement des vitesses de frottement, est nécessaire pour étudier la part de ces mécanismes dans le dépôt sec. Dans cette étude, la quantification de la turbulence à la surface des éprouvettes n'est cependant pas possible à partir des données acquises lors des expérimentations. Les mesures à haute fréquence réalisées avec l'anémomètre ultrasonique permettraient de quantifier la turbulence atmosphérique au niveau du bâti mais pas au niveau de chaque type de surface urbaine. De plus, les faibles vitesses de vent mesurées suggèrent, qu'en moyenne, la turbulence n'est pas élevée au niveau du bâti. La seconde hypothèse est de considérer que ces mécanismes turbulents de dépôt n'interviennent pas, donc que les particules se déposent seulement par sédimentation, d'où $V_d = V_s$. Cette hypothèse est très restrictive et les incertitudes associées à son utilisation sont fortes, obligeant à ne considérer les diamètres calculés que comme des ordres de grandeur.

La troisième hypothèse est que la masse volumique de l'aérosol est $\rho_p = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ suite à son grossissement par condensation de vapeur d'eau. Ainsi, le diamètre des particules déposées peut être estimé avec l'Équation IV-3, déduite de l'Équation I-19 pour la sédimentation (en considérant que les particules grossissent assez pour que $C_u = 1$).

$$d_p = \sqrt{\frac{V_s 18 \mu_a}{g \rho_p C_u}} \quad \text{Équation IV-3}$$

Par contre, cette équation permet de calculer seulement un diamètre alors que V_d est représentative du dépôt d'une distribution de particules de diamètres différents. Les diamètres calculés avec cette équation sont donc des diamètres moyens représentatifs de la granulométrie des particules déposées (chaque classe granulométrique pondérant V_d part sa masse de ${}^7\text{Be}$ déposé).

Des diamètres sont calculés avec cette méthode à partir des vitesses de dépôt moyennes, minimum et maximum des surfaces d'herbe, de bitume, d'ardoise, de tuile et de zinc présentées dans le Tableau IV-4. Les V_d des surfaces de toit sont corrigées pour tenir compte d'une surface projetée plus petite exposée à la sédimentation du fait de la pente de 30° présentée par les éprouvettes de toit. Les résultats obtenus sont donnés le Tableau IV-7.

Avec cette méthode, les diamètres des particules déposées sont en moyenne de $6,0 \mu\text{m}$. Ils peuvent varier de $1,8$ à $12 \mu\text{m}$ sur l'ensemble de la période d'expérimentations. Les valeurs calculées avec les

V_d de l'herbe synthétique doivent être considérées comme une gamme haute de ces diamètres étant donné que c'est *a priori* la surface la plus soumise aux dépôts secs par interception et impaction. Les valeurs mesurées sur les surfaces représentatives des toits, plus lisses, et comprises entre 1,8 et 7,0 μm sont probablement plus représentatives des particules déposées.

Tableau IV-7 : diamètres d_p (μm) des particules estimés à partir de $V_d = V_s$.

Type de surface	d_p (μm)		
	Moyen	Maximum	Minimum
Herbe synthétique	8,4	12	4,3
Bitume	7,0	8,2	3,8
Ardoise	4,8	6,5	2,1
Tuile	3,7	4,6	1,8
Zinc	5,8	7,0	2,3
Moyenne	6,0	7,6	2,9

Ces diamètres sont donnés pour des vitesses de dépôt moyennes sur chaque durée d'exposition. Mais la période de grossissement des particules par condensation est limitée à seulement certaines périodes de certaines journées qui peuvent être caractérisées par des températures de l'air inférieures aux températures de point de rosée. Si l'on considère ce phénomène prépondérant dans le dépôt, les flux de dépôt sec doivent être corrigés pour être représentatifs de la part du temps pendant laquelle a lieu le dépôt suite au grossissement des particules. Les vitesses de dépôt V_{dcond} (m s^{-1}) ainsi corrigées peuvent être calculées avec l'Équation IV-4.

$$V_{dcond} = \frac{-F \times 100}{\%_{tcond} \bar{C}} = \frac{V_d \times 100}{\%_{tcond}} \quad \text{Équation IV-4}$$

Dans cette équation, $\%_{tcond}$, défini comme un pourcentage de temps de condensation, peut être calculé à partir des données de la station météorologique, sur des pas de 10 minutes. Ces pourcentages de temps varient de 1,2 % (période du 9 février au 10 mars 2011) à 30,2 % (période du 9 septembre au 8 octobre 2010) et représentent en moyenne 13,5 % du temps dans l'année. Les diamètres de particules corrigés d_{pcond} varient alors en moyenne de 14 μm sur la tuile à 29 μm sur l'herbe synthétique, avec des valeurs de 26, 20 et 23 μm pour respectivement le bitume, l'ardoise et le zinc. En moyenne, ce diamètre est de 22 μm .

La seconde méthode utilisée pour déterminer les diamètres de particules déposées pendant les expérimentations *in situ* consiste en l'exposition simultanée d'éprouvettes, constituées du même type de surface, selon des orientations différentes. Ce type d'essai a pu être réalisé à six reprises : 4 expérimentations avec des éprouvettes de verre horizontales et verticales, 2 expérimentations avec de l'herbe synthétique horizontale et verticale. Les V_d mesurées avec cette méthode sont présentées sur

la Figure IV-17-a et la Figure IV-17-b. Les valeurs moyennes représentées sont calculées sur l'ensemble des vitesses de dépôt mesurées pour les éprouvettes d'un même type de surface dans une même orientation donnée.

La différence entre le dépôt sur parois verticales et horizontales d'un même type de surface urbaine est seulement due à la sédimentation (cette hypothèse est faite pour l'herbe verticale malgré son épaisseur qui représente une surface sur laquelle les particules peuvent se déposer par sédimentation). Cette vitesse de sédimentation V_s est donnée par l'Équation IV-5 et peut être calculée pour chaque mois d'exposition dont les données sur de mêmes surfaces horizontales et verticales sont disponibles.

$$V_s = V_{dh} - V_{dv} \quad \text{Équation IV-5}$$

Dans cette équation, V_{dh} est la vitesse de dépôt sur une paroi horizontale et V_{dv} la vitesse de dépôt sur une paroi verticale. Des diamètres de particules déposées peuvent de nouveau être calculés avec ces vitesses de sédimentation. Les résultats sont donnés dans le Tableau IV-8. Les valeurs moyennes sont calculées à partir des valeurs moyennes de V_d pour chaque orientation de chaque type de surface sur l'ensemble des expérimentations.

Tableau IV-8 : pour le verre et l'herbe, diamètres d_p (μm) des particules déposées estimés à partir des V_s données par la différence entre les vitesses de dépôt mesurées sur les surfaces verticales et horizontales. Valeurs calculées à partir des V_d de août et septembre 2011 et à partir des valeurs moyennes de V_d sur l'ensemble des données.

Type de surface		d_p (μm)	
		Non corrigée avec $\%_{i\text{cond}}$	Corrigée avec $\%_{i\text{cond}}$
Verre	août-11	4,2	11
	sept-11	4,6	8,7
	Moyennes annuelles	4,5	12
Herbe synthétique	oct-11	0,9	---
	nov-11	4,6	13
	Moyennes annuelles	6,5	18

Les diamètres calculés à partir des vitesses de sédimentation sont compris entre 0,9 et 4,6 μm . Une fois corrigés avec le pourcentage de temps de condensation, ils sont compris entre 8,7 et 13 μm (la valeur manquante est due à une absence de donnée de la station météorologique). A partir des valeurs moyennes des vitesses de dépôt sur l'ensemble des données acquises pour chaque orientation des surfaces de verre et d'herbe synthétique, les diamètres moyens calculés avec et sans correction par $\%_{i\text{cond}}$ sont respectivement de 4,5 et 12 μm pour le verre, et de 6,5 et 18 μm pour l'herbe synthétique.

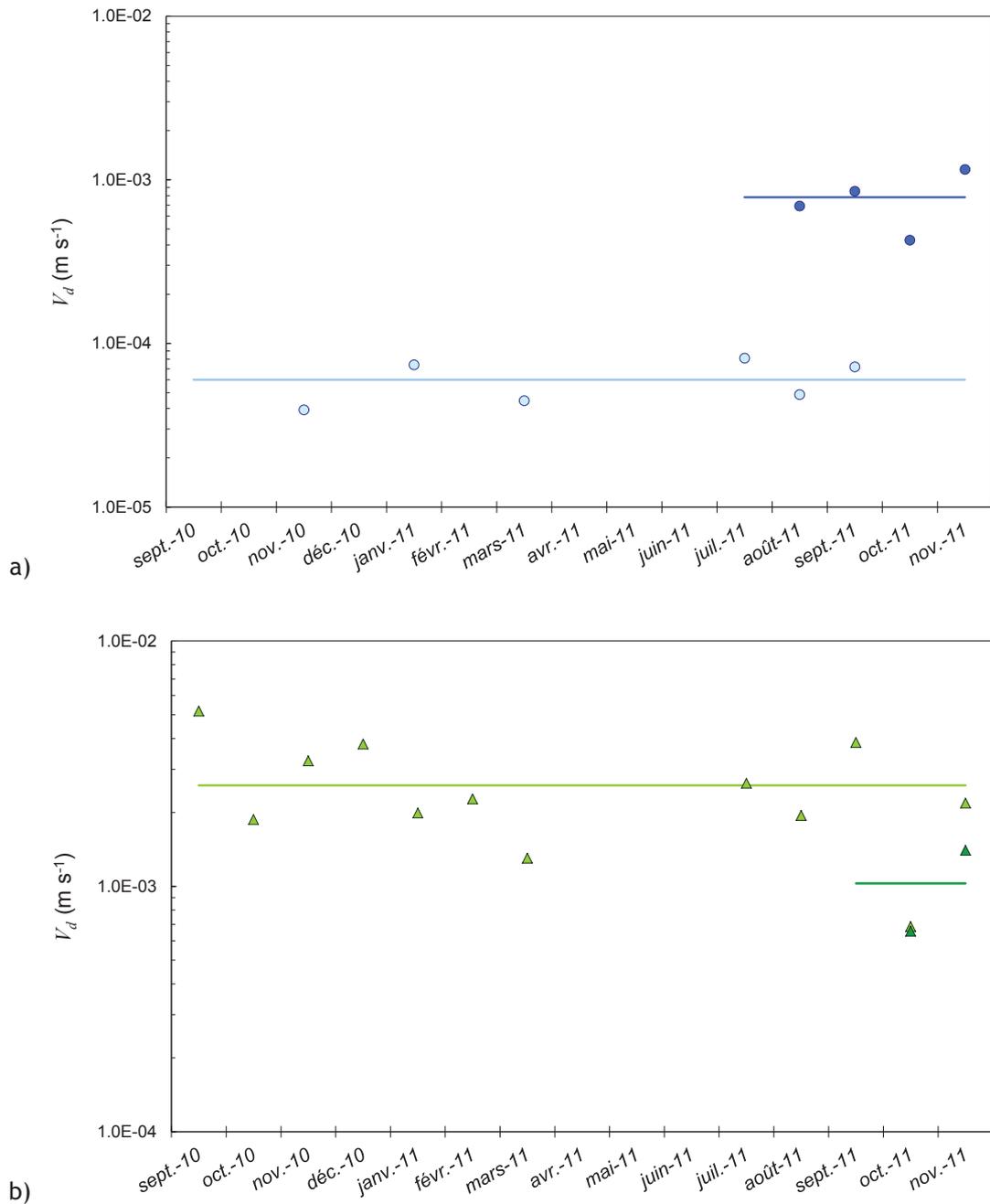


Figure IV-17 : vitesses de dépôt sec mesurées sur des éprouvettes horizontales et verticales de verre (a) et d’herbe synthétique (b) et vitesses de dépôt sec moyennes.

Verre classique : ○ vertical, — moyenne vertical, ● horizontal, — moyenne horizontal ;
 herbe synthétique : ▲ verticale, — moyenne verticale, △ horizontale, — moyenne horizontale.

Avec des diamètres moyens de 6,0 et 6,5 μm (sans correction par $\%_{\text{cond}}$) et de 22 et 48 μm (avec correction par $\%_{\text{cond}}$), les deux méthodes d'estimation du diamètre des particules déposées donnent des résultats de mêmes ordres de grandeur. Ces diamètres sont largement supérieurs aux diamètres du mode accumulation de l'aérosol atmosphérique. Des particules de ce diamètre sont fortement soumises au dépôt par sédimentation, surtout dans le cas de vents de faible vitesse comme c'est le cas en moyenne sur les conditions météorologiques rencontrées. Enfin, ces diamètres de particules estimés à partir des vitesses de sédimentation sont compatibles avec les diamètres rapportés par Collett *et al.* (2005) pour des brouillards ou encore par Mason (1971) pour des nuages. Le processus de grossissement de l'aérosol pendant les périodes de rosée doit donc être considéré comme prépondérant pour le dépôt des particules atmosphériques. A ce titre, il doit être pris en compte dans l'étude du dépôt sec d'aérosols submicroniques sur de grandes échelles de temps.

IV.4 CONCLUSIONS

Les expérimentations *in situ* de longues durées menées à l'IFSTTAR de Nantes sont la troisième et dernière étape d'expérimentations de cette étude sur le dépôt sec d'aérosols submicroniques sur des surfaces urbaines. Le but de cette étape est de mesurer des vitesses de dépôt sec de l'aérosol atmosphérique submicronique sur une échelle de temps supérieure à l'échelle de la micrométéorologie et sur les surfaces urbaines déjà utilisées dans la seconde étape expérimentale. Il est aussi de mesurer les paramètres météorologiques rencontrés dans des conditions réelles d'expositions chroniques d'un milieu urbain à des particules. Cette méthode doit être complémentaire des expérimentations *in situ* de courtes durées pour finalement mettre en évidence les principaux phénomènes physiques de dépôt pour ces conditions expérimentales.

Des expositions mensuelles *in situ* d'éprouvettes urbaines à l'aérosol atmosphérique et l'utilisation du ^7Be , un radionucléide naturel, comme traceur de son mode accumulation ont permis de mesurer des vitesses de dépôt sec représentatives de celles mesurées sur des surfaces urbaines réelles, sur une période couvrant l'ensemble des échelles de temps météorologiques. Le suivi de ces expérimentations sur une période de 16 mois a permis d'exposer les éprouvettes urbaines aux diverses conditions météorologiques. Ainsi, les périodes de stabilité atmosphérique stable, neutre et instable, plus ou moins fréquentes selon la période de l'année (printemps, été, automne hiver), sont toutes rencontrées sur l'ensemble des expérimentations. Un bâti-support et des éprouvettes de surfaces urbaines (herbe synthétique, bitume, verre, enduit de façade, ardoise, tuile et zinc) identiques à ceux utilisés pendant les expérimentations *in situ* de courtes durées ont été utilisés. Les paramètres météorologiques ont aussi été quantifiés avec un anémomètre ultrasonique et une station météorologique à proximité de ses éprouvettes, dans la sous-couche de rugosité de la couche limite atmosphérique. Comme pour les expérimentations *in situ* de courtes durées, les paramètres micrométéorologiques n'ont pas été quantifiés.

Les mesures météorologiques révèlent qu'en moyenne les conditions de vent rencontrées sont plutôt des conditions de vents faibles, de l'ordre de 1 m s^{-1} . Cependant, les vitesses moyennes du vent sur 10 min peuvent aller de 0 à plus de 5 m s^{-1} sur un même mois d'expérimentation. Les conditions de

vent subies par une même éprouvette peuvent donc être très variables. La température et l'humidité relative de l'air peuvent aussi varier assez fortement.

Les vitesses de dépôt mesurées présentent des différences importantes (plus de deux ordres de grandeur), avec une valeur minimum pour le verre vertical et une valeur maximum pour l'herbe synthétique. Elles sont comprises dans les mêmes ordres de grandeur que celles relevées dans la littérature (qui présentent aussi des variations sur deux ordres de grandeur). Cependant, elles sont beaucoup plus fortes que celles mesurées avec l'aérosol de fluorescéine sur de courtes durées ainsi que celles estimées avec les paramétrisations ajustées sur les données de soufflerie. Les principaux phénomènes physiques de dépôt sec à prendre en compte doivent être reconsidérés par rapport aux deux premières étapes expérimentales.

Les vitesses de dépôt sec peuvent varier pour une même surface d'une expérimentation à une autre, au maximum d'un ordre de grandeur, mais aucune influence saisonnière ne peut être mise en évidence. La turbulence atmosphérique ainsi que la thermophorèse ne semblent donc pas être des phénomènes majeurs à prendre en compte dans l'étude du dépôt sec sur de longues périodes de temps et pour les conditions rencontrées. V_d est plus fortement impactée par la nature de la surface et par son orientation (horizontale ou verticale) que par les phénomènes cités précédemment. Ces observations confirment une fois de plus l'importance de discerner les différents types de surfaces d'un milieu urbain, que ce soit pour l'étude des flux de polluants, à l'échelle d'un quartier ou d'un bassin versant urbanisé, mais aussi pour des études d'impacts des dépôts de radionucléides sur l'exposition externe des habitants. Par contre, les différences de vitesses de dépôt entre les surfaces de toits (ardoise tuile et zinc) et les fortes valeurs du bitume ne peuvent pas être expliquées avec les mêmes arguments que pour les expérimentations *in situ* de courtes durées.

Les augmentations de dépôts par thermophorèse (pour des surfaces plus froides que l'air), par effets électrostatiques ou encore dus à la différence mesurée entre les diamètres aérodynamiques médians de la fluorescéine ($d_{amm} = 0,3 \mu\text{m}$) et du ^{7}Be ($d_{ama} = 0,6 \mu\text{m}$) sont considérées comme négligeables pour les conditions expérimentales rencontrées. L'effet combiné de la diffusiophorèse et du flux de Stephan ne peuvent être quantifiés et ne sont *a priori* pas considérés prépondérant.

L'hypothèse retenue dans le cadre de cette étude pour expliquer ces vitesses de dépôt plus fortes est un grossissement épisodique de l'aérosol par condensation de la vapeur d'eau de l'air à sa surface. Ce grossissement par condensation, rencontré dans l'environnement dans le cas de la formation des nuages ou des brouillards, est susceptible d'intervenir pendant des épisodes de saturation de l'atmosphère en vapeur d'eau (par exemple des épisodes de rosée). Les phénomènes de sédimentation et d'impaction turbulente deviennent alors prépondérants et font croître la vitesse de dépôt en même temps que la distribution de l'aérosol tend vers des diamètres plus grands. Les diamètres des particules déposées, estimés à partir des V_d mesurées, concordent avec les observations de grossissement des particules par condensation lors des formations de brouillards et de nuages. Il est donc probable que ce processus de dépôt soit le processus à prendre en compte principalement dans le cas d'expositions chroniques de milieux urbains à des polluants particuliers.

Cependant, les diamètres de particules déterminés dans cette partie de l'étude ne peuvent être considérés que comme des ordres de grandeurs car ils sont déduits de vitesses de dépôt intégrant

environ un mois d'exposition à différentes conditions météorologiques. Le protocole expérimental utilisé devra être amélioré afin de déterminer plus précisément l'importance des différents phénomènes physiques sur le dépôt de particules atmosphériques submicroniques et d'autres campagnes expérimentales devront être menées. Une mesure en continu de la distribution de l'aérosol sur l'ensemble du spectre, des plus petits diamètres ($< 0,1 \mu\text{m}$) aux plus grands ($> 10 \mu\text{m}$), en parallèle de la mesure des paramètres météorologiques, permettrait d'étayer l'hypothèse du grossissement épisodique des particules. Elle permettrait aussi de mesurer précisément la taille des particules se déposant sur les surfaces urbaines. Des prélèvements séquentiels avec des impacteurs en cascades pour mesurer la distribution en ^{7}Be sur l'aérosol atmosphérique pendant ces épisodes complèteraient le suivi granulométrique.

L'impact des phénomènes de diffusiophorèse et de flux de Stephan n'étant pas totalement écarté, une étude devra être menée pour quantifier leur influence.

Une fréquence plus grande d'exposition des éprouvettes et de prélèvement de l'aérosol sur filtre présenterait le double avantage de mesurer des vitesses de dépôt intégrant de moins grandes variations des conditions météorologiques et de faciliter le suivi granulométrique de l'aérosol atmosphérique.

Enfin ces expérimentations ont été menées dans un environnement très végétalisé en comparaison du centre d'une grande ville. Des expérimentations dans un environnement très fortement urbanisé permettraient d'exposer les surfaces à des conditions météorologiques différentes, par exemple typiques des îlots de chaleur urbains.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSIONS

Le dépôt sec des aérosols est un mécanisme complexe dépendant de plusieurs facteurs liés à l'aérosol, aux surfaces de dépôt et aux conditions météorologiques. Le milieu urbain a jusqu'à présent fait l'objet d'un nombre trop limité d'études expérimentales pour que les mécanismes soient bien connus et prédits de façon précise par les modèles. Ce manque de connaissances est régulièrement rapporté par différents auteurs dans la littérature (Underwood, 1987 ; Brown *et al.*, 2006 ; Jonsson *et al.*, 2008 ; Fowler *et al.*, 2009). La mise en évidence très récente de l'importance de la thermophorèse en présence de surfaces urbaines chauffées par Connan *et al.* (2006) confirme ces lacunes.

La présente étude a particulièrement été axée sur le dépôt des particules fines composant le mode accumulation de l'aérosol atmosphérique, potentiel vecteur de polluants et de radionucléides. Une synthèse bibliographique est consacrée à des rappels généraux sur la physique du dépôt sec d'aérosols et à une synthèse des données expérimentales et des modèles qui ont trait au milieu urbain. Il apparaît clairement dans cette partie de l'étude que les données sur le dépôt d'aérosols en milieu urbain sont assez peu nombreuses, disparates du point de vue méthodologique et souvent peu représentatives de surfaces urbaines réelles.

L'étude s'inscrit dans deux cadres différents (l'IRSN et le projet INOGEV de l'ANR Villes durables) dont le besoin final est commun : avoir accès à une quantification précise des dépôts sec dans un milieu urbain. La dépendance de la vitesse de dépôt sec aux caractéristiques de l'aérosol, de la surface de dépôt et aux conditions météorologiques couplée à ce besoin rendent nécessaire la discrimination des différentes surfaces pouvant composer un milieu urbain. Ces travaux de thèse doivent aussi fournir des vitesses de dépôt sec associées à des conditions de turbulence et des conditions météorologiques pour qu'elles soient utiles à la mise au point et à la validation de futurs modèles de dépôt dédiés au milieu urbain.

A partir de ce constat de besoin de connaissances et de données expérimentales sur le dépôt sec en milieu urbain, trois objectifs principaux sont définis :

- quantifier des vitesses de dépôt sec pour des aérosols submicroniques, représentatifs du mode accumulation de l'aérosol atmosphérique, sur des surfaces urbaines, représentatives de celles rencontrées dans les milieux urbains, et pour différentes conditions de météorologie et de turbulence ;
- mettre en évidence et hiérarchiser les principaux phénomènes physiques contribuant au dépôt sec en milieu urbain, quantifier les paramètres environnementaux associés aux vitesses de dépôt ;
- étudier le rôle de la thermophorèse dans le processus de dépôt des aérosols submicroniques sur des surfaces urbaines chauffées.

Pour satisfaire à ces objectifs, une approche expérimentale originale est développée et mise en œuvre. Cette approche se décompose en trois étapes présentant des conditions environnementales différentes

et complémentaires : une première étape en soufflerie avec des conditions simplifiées et contrôlées, deux étapes *in situ* pour des échelles de temps différentes (60 min et 1 mois) faisant référence à des phénomènes météorologiques différents. La quantification des vitesses de dépôt est basée sur l'utilisation de deux traceurs d'aérosols : la fluorescéine et le béryllium 7. Ces traceurs permettent la mesure de V_d sur des éprouvettes de surfaces urbaines réelles. Ainsi, les données acquises sont les plus représentatives possibles du dépôt réel en milieu urbain.

En soufflerie, première étape de l'étude, les contributions des phénomènes turbulents de dépôt (impaction et interception), de la sédimentation et de la thermophorèse au dépôt de l'aérosol de fluorescéine sont étudiées au travers d'expérimentations sur des surfaces de verre lisse, d'enduit de façade et d'herbe synthétique. Trois configurations de soufflerie sont utilisées pour quantifier V_d selon différentes conditions de vitesses d'écoulements d'air, de types de surfaces, d'orientations et de températures des surfaces. La turbulence, notamment la vitesse de frottement, les écarts de températures entre les surfaces et l'air, et les gradients de températures au-dessus des surfaces chauffées sont quantifiés pour chacune des différentes conditions rencontrées. Les vitesses de dépôt sont comparées aux données de la littérature ainsi qu'aux modèles de Lai et Nazaroff (2000) et de Zhang *et al.* (2001).

Sans chauffage des surfaces, les vitesses de dépôt mesurées montrent des variations sur deux ordres de grandeurs en fonction de la vitesse du vent, de la rugosité de la surface et de son orientation. En présence de surfaces chauffées, V_d peut diminuer d'un facteur 2 à un facteur 35 en fonction de l'écart de température imposé entre la surface et l'air. Une hiérarchisation des phénomènes physiques contribuant au dépôt peut être dégagée à partir des résultats expérimentaux. Cependant, cette hiérarchie est évolutive selon les conditions environnementales rencontrées. Ainsi, les phénomènes turbulents de dépôt (impaction, interception) contribuent de façon importante au dépôt sur des surfaces lisses et rugueuses, même pour ces particules de fluorescéines de diamètres inférieurs à 1 μm . La thermophorèse apparaît aussi comme un phénomène majeur à prendre en compte, car elle diminue fortement le dépôt même pour de faibles écarts de températures entre les surfaces et l'air. Enfin, les données montrent que le dépôt par sédimentation ne doit pas être négligé dans des conditions de surfaces lisses à peu rugueuses et/ou de faibles vitesses de vent.

La comparaison des modèles aux résultats de soufflerie fait ressortir des prédictions correctes des vitesses de dépôt sur des surfaces lisses, sans prise en compte de la thermophorèse, mais des prédictions trop imprécises pour l'herbe. Ces incertitudes sont certainement liées au manque de données de vitesses de dépôt sec dans la littérature, surtout pour des surfaces rugueuses. Cependant, des comparaisons avec des modèles mécanistes, pour des surfaces rugueuses, résolus numériquement, par exemples les modèles récents de Piskunov (2009) ou de Hussein *et al.* (2012), pourraient montrer des écarts moins importants.

Les expérimentations *in situ* de courte durée constituent la seconde étape expérimentale. Leur but est de transposer l'étude des phénomènes physiques de dépôt sec, de la soufflerie à un environnement urbain réel, avec une turbulence urbaine éventuellement différente de la turbulence de couche limite développée en soufflerie. L'intérêt de ce type d'expérimentation est de mesurer V_d pour des conditions environnementales simplifiées n'intégrant pas l'ensemble des processus qui peuvent être rencontrés

dans la réalité. Seules des conditions météorologiques et turbulentes diurnes sont étudiées, les paramètres météorologiques ne varient pas trop fortement pendant chaque expérimentation.

Un protocole expérimental similaire à celui de Connan *et al.* (2006) est employé et amélioré afin de mesurer V_d le plus précisément possible. Des éprouvettes représentatives de sept surfaces urbaines (bitume, herbe synthétique, verre, enduit de façade, ardoise, tuile et zinc) sont exposées pendant 60 min à l'aérosol de fluorescéine, ce qui correspond à l'échelle de temps de la turbulence atmosphérique. Les expérimentations se situent au niveau du sol dans la canopée urbaine. Les paramètres météorologiques, la vitesse du vent à proximité des éprouvettes et les températures des surfaces urbaines, associés aux vitesses de dépôt, sont quantifiés. Les paramètres turbulents de la couche limite atmosphérique ne sont pas mesurés en même temps. Huit expérimentations ont pu être menées pour des conditions météorologiques sèches.

Des conditions de vents faibles ont été rencontrées sur l'ensemble des essais. Les vitesses de dépôt mesurées varient fortement en fonction du type de surface et des conditions météorologiques rencontrées. Cependant pour le verre, l'enduit de façade et l'herbe synthétique, V_d a les mêmes ordres de grandeur qu'en soufflerie. Les mêmes phénomènes physiques interviennent donc dans des proportions comparables en soufflerie et sur ces expérimentations. De plus, l'influence de la thermophorèse *in situ* est confirmée.

La dernière étape, les expérimentations *in situ* de longue durée, a pour but de mesurer V_d sur les mêmes surfaces urbaines que sur les expériences de courte durée mais en intégrant l'ensemble des phénomènes physiques rencontrés en environnement et pouvant contribuer au dépôt des particules fines sur des surfaces urbaines. Les expérimentations se sont déroulées dans la sous-couche de canopée, de la même façon que pour les courtes durées, mais sur une période de temps recouvrant l'ensemble des échelles météorologiques d'Orlanski (1975).

Le ^{7}Be , radionucléide naturel, est utilisé comme traceur des particules, plus particulièrement de la fraction fine potentiellement porteuse de polluants et de radionucléides. Les éprouvettes urbaines sont exposées pendant 1 mois à l'aérosol atmosphérique. Elles sont donc soumises aux variations de l'ensemble des paramètres météorologiques. Ces derniers sont quantifiés en parallèle de l'exposition des surfaces aux particules atmosphériques. Par contre les paramètres turbulents de la couche limite atmosphérique ne sont pas quantifiés. Ces expérimentations ont été menées durant 15 mois.

Les conditions météorologiques rencontrées sont variées à la fois au regard de l'ensemble de la période d'expérimentation, mais aussi pour chaque exposition de 1 mois. Les vitesses de dépôt mesurées sont très différentes selon le type de surface considéré et sont variables d'un mois à un autre pour une même surface, mais dans une moindre mesure. Cependant, les variations de V_d ne semblent pas dépendantes des différentes périodes de l'année. La turbulence atmosphérique n'a donc pas d'influence visible sur le dépôt sec pour des expositions de longue durée. Les vitesses de dépôt de ces expérimentations *in situ* de longue durée sont en moyenne supérieures d'un facteur 4 à 71 aux vitesses de dépôt des expérimentations *in situ* de courte durée. La hiérarchie des phénomènes physiques participant au dépôt sec lors des deux premières étapes doit être reconsidérée pour cette troisième étape. Déjà, la diminution du dépôt sec par thermophorèse sur les surfaces chauffées n'est plus à envisager sur de longues durées étant donné les ordres de grandeur des vitesses de dépôt mesurées.

Le grossissement épisodique des particules par condensation de la vapeur d'eau de l'air à leur surface est l'hypothèse la plus probable pour expliquer les résultats obtenus. Lors de ces épisodes, les particules peuvent grossir pour passer de quelques centaines de nanomètres de diamètres à quelques micromètres voire quelques dizaines de micromètres de diamètre. Les dépôts par impaction turbulente et sédimentation sont croissants pour des diamètres croissants. Les fortes vitesses de dépôt mesurées sont donc probablement dues à des dépôts par impaction et sédimentation liés au grossissement des particules portant le ^7Be .

Les trois étapes expérimentales proposées sont complémentaires pour étudier le dépôt sec sur des surfaces urbaines. Elles sont nécessaires à la compréhension du processus de dépôt en milieu urbain et à l'étude des différents phénomènes physique mis en jeu. Elles ont permis de hiérarchiser l'importance de ces phénomènes selon le type d'exposition d'une surface à des polluants particulaires, aigue (accidentelle, de courte durée) ou chronique (de longue durée). De plus, les campagnes expérimentales réalisées contribuent à combler un manque de données pourtant nécessaires au développement et à la validation de modèles de dépôt sec pour l'environnement urbain.

Les résultats obtenus attestent l'importance d'une estimation très locale des dépôts dans la canopée urbaine lors de l'étude des flux de dépôt de polluants stables ou radioactifs. Les vitesses de dépôt acquises lors de cette étude sont très variables selon le type de surface étudiée, selon son orientation et selon sa température, donc son exposition au soleil. Elles sont aussi dépendantes de la turbulence. L'hétérogénéité de la répartition des surfaces et des aménagements des milieux urbains contribue donc à l'hétérogénéité des flux de dépôt à l'échelle d'un bâtiment, d'un quartier ou d'une ville. Ces considérations devront être prises en compte pour de futures études sur le dépôt sec de particules en milieux urbains. Surtout si la finalité de ces études est d'étudier les flux de polluants vers les exutoires (par remobilisation par la pluie par exemple), ou d'évaluer l'exposition des habitants à des rayonnements ionisants à la suite d'incidents ou d'accidents impliquant des éléments radioactifs.

PERSPECTIVES

Les résultats obtenus apportent de nouvelles connaissances sur la thématique encore peu étudiée du dépôt de particules en milieu urbain. Cependant, l'ensemble de la problématique ne peut être traité dans cette seule étude et de nombreux points devront faire l'objet d'études spécifiques. Ces travaux doivent donc être considérés comme un point de départ pour de futures études. Notamment, les principaux phénomènes physiques participant au dépôt sont à présent hiérarchisés mais ils devront faire l'objet d'études plus poussées pour être mieux quantifiés et pour diminuer les incertitudes associées aux vitesses de dépôt. Ensuite, l'ensemble des paramètres et phénomènes à prendre en compte dans le dépôt en environnement (taille et composition de l'aérosol, stabilité atmosphérique, géométrie des rugosités des surfaces, thermophorèse, Stephan flow...) pourront être étudiés progressivement.

La synthèse bibliographique du chapitre I montre que les travaux menés dans cette étude ont apporté de nouvelles données sur V_d , pour des particules submicroniques et avec des conditions météorologiques et turbulentes quantifiées. Cependant, elle montre aussi les manques de V_d dans les

autres gammes granulométriques importantes pour l'environnement urbain. Il existe peu de données pour des particules de diamètres supérieurs à 1 μm et celles qui existent ont été acquises sur des substrats peu représentatifs de surfaces urbaines. De plus, il n'existe *a priori* pas de données pour les particules de diamètres inférieurs à 0,1 μm . Pourtant, le milieu urbain est connu pour être une source d'émissions de particules ultrafines (par les échappements, les industries...) et de particules grossières (par abrasion). Des méthodes de génération de différentes gammes granulométriques d'aérosols devront être mises en œuvre pour les trois étapes expérimentales, pour mesurer des vitesses de dépôt sec de particules nanométriques et microniques sur des surfaces urbaines et combler ces manques. Plus généralement, un apport de données pour ces classes granulométriques permettrait certainement d'améliorer les paramétrisations du dépôt sec sur des surfaces lisses et rugueuses.

Les modèles de dépôt adaptés aux surfaces lisses ont été assez largement étudiés pour des milieux confinés et des conduites aérauliques. Une tendance récente d'évolution de ces modèles est l'élaboration de paramétrisations pour des surfaces rugueuses, comme le montre les travaux de Piskunov (2009) et de Hussein *et al.* (2012). Ces derniers relèvent le manque de données pour des surfaces dont la géométrie des rugosités serait bien quantifiée. Des campagnes expérimentales en soufflerie devront à terme être menées. Une première étape pourra être de quantifier V_d en soufflerie sur des surfaces de rugosités géométriquement simples, de formes différentes (rugosités cylindriques, cubiques, sphériques par exemple), de densités quantifiées, pour une large gamme de vitesses d'écoulement et pour plusieurs tailles de particules. Les conditions de turbulence développées dans les couches limites devront nécessairement être quantifiées à l'aide de mesures anémométriques. Ce type d'étude permettrait de mieux comprendre l'apport des phénomènes turbulents au dépôt et apporterait des données pour contraindre les modèles.

L'étude expérimentale de l'effet de la thermophorèse pour des surfaces chauffées et des couches limites turbulentes en soufflerie devra être étendue à des écarts de températures inférieurs à 2 K, et devra être complétée avec des écarts de températures supérieurs à 2 K plus nombreux et différents de ceux étudiés. Elle pourra aussi être réalisée sur des surfaces urbaines moins rugueuses que l'enduit de façade, représentatives des surfaces de toit, telles que la tuile ou l'ardoise qui sont plus exposées au soleil et donc plus susceptibles de chauffer dans un environnement urbain réel.

Les conditions météorologiques rencontrées lors des expérimentations *in situ* de courte durée sont toutes des conditions de vent faible. De nouvelles séries d'expérimentations devront donc être menées en veillant à élargir les conditions météorologiques rencontrées. Ainsi, de nouvelles données pourront alimenter la littérature et permettre la paramétrisation du dépôt en fonction des conditions météorologiques. A cette occasion, une mesure des paramètres de turbulence de la couche limite atmosphérique pourrait s'avérer intéressante pour quantifier l'influence de la stabilité atmosphérique sur la turbulence au niveau des surfaces dans la sous-couche de canopée urbaine, donc sur le dépôt sur les surfaces.

Les vitesses de dépôt de ces expérimentations de courtes durées semblent supérieures à celles obtenues en soufflerie pour de mêmes vitesses de vent. Il sera donc judicieux de déterminer si ces différences sont dues à un effet de bord des éprouvettes ou à des instationnarités du vent. De plus, les résultats surprenant sur le bitume devront faire l'objet d'études pour déterminer l'origine de la

différence forte observée entre les V_d mesurées sur cette surface et sur l'enduit de façade, alors qu'elles présentent visuellement des rugosités de tailles équivalentes.

Les expérimentations *in situ* de longues durées ont mis en exergue le rôle du grossissement des particules sur leur dépôt. Par contre, les diamètres de ces particules suite à leur grossissement n'est pas encore connu précisément et devra faire l'objet de caractérisations. Cela passera nécessairement par une amélioration du protocole expérimental, pour mesurer en continu la distribution granulométrique de l'aérosol atmosphérique sur une plage de diamètres 0,1 - 100 μm , ou pour prélever le ^{7}Be particulaire sur les épisodes de rosée et avoir accès à la distribution de l'aérosol lors de ces événements. Des campagnes expérimentales supplémentaires devront donc être menées. Une fréquence d'exposition plus élevée (hebdomadaire par exemple) faciliterait le suivi continu de la granulométrie et intégrerait moins de variations météorologiques que sur un mois. L'influence des épisodes de grossissement des particules serait par exemple plus simple à étudier.

Les résultats obtenus permettront certainement de contraindre les modèles qui seront développés pour les milieux urbains et intégrés dans les modèles de dispersion atmosphérique. L'IRSN devra prendre en compte les différents ordres de grandeurs de V_d pour les différentes surfaces et les différentes échelles de temps, pour mieux prévoir l'impact de rejets atmosphériques de radionucléides vers les milieux urbains. Enfin, les vitesses de dépôt de cette étude seront, à court terme, intégrées dans le modèle en résistance développé par Chérin *et al.* (2012) dans le cadre du projet ANR Inogev.

REFERENCES

- Abadie M., Limam K., Allard F., 2001. Indoor particle pollution: effect of wall textures on particle deposition. *Building and Environment* 36, 821-827.
- Aksu R., Horvath H., Kaller W., Lahounik S., Pesava P., Toprak S., 1996. Measurement of the deposition velocity of particulate matter to building surfaces in the atmosphere. *Journal of Aerosol Science* 27, S675-S676.
- Allen A. G., Nemitz E., Shi J. P., Harrison R. M., Greenwood J. C., 2001. Size distribution of trace metals in atmospheric aerosols in the United Kingdom. *Atmospheric Environment* 35, 4581-4591.
- Antonia R. A., Luxton R. E., 1971. The response of a turbulent boundary layer to a step change in surface roughness, Part 1. Smooth to rough. *Journal of Fluid Mechanics* 48, 721-761.
- Bae G.-N., Lee C. S., Park S. O., 1995. Measurements and control of particle deposition velocity on a horizontal wafer with thermophoretic effect. *Aerosol Science and Technology*, 321-330.
- Baltensperger U., Gäggeler H. W., Jost D. T., 1987. Chernobyl radioactivity in size-fractionated aerosol. *Journal of Aerosol Science* 18, 685-688.
- Baron P. A., Willeke K., 2001. *Aerosol Measurement, Principles, Techniques and Applications*. Second Edition. Wiley InterScience, New York, ISBN 0-471-35636-0.
- Bricard J., 1977a. *Physique des Aérosols ; 1^{ère} Partie : Propriété Générale, Théorie Cinétique, Mécanique, Diffusion, Coagulation*. Rapport CEA-R-4831(1).
- Bricard J., 1977b. *Physique des Aérosols ; 2^{ème} Partie : Nucléation, Condensation, Ions, Electrification, Propriétés optiques*. Rapport CEA-R-4831(2).
- Brock J. R., 1962. On the theory of thermal forces acting on aerosol particles. *Journal of Colloid Science* 17, 768-780.
- Brown J., Andersson K. G., Jones J. A., Meckbach R., Müller H., Roed J., 2006. Requirements of future models for inhabited areas. *Journal of Environmental Radioactivity* 85, 344-360.
- Byrne M. A., Goddard A. J. H., Lange C., Roed J., 1995. Stable tracer aerosol deposition measurements in a test chamber. *Journal of Aerosol Science* 26, 645-653.
- Camuffo D., 2001. Dry deposition of pollutants. *Sciences and Technologies of the materials and of the environment for the protection of stained glass and stone monuments*. Report 14, European Commission, R.-A. Lefèvre edition, 117-131
- Camuffo D., Bernardi A., 1993. Microclimatic factors affecting the Trajan Column. *The Science of the Total Environment* 128, 227-255.

- Camuffo D., Bernardi A., 1996. Deposition of urban pollution on the Ara Pacis, Rome. *The Science of the Total Environment* 189/190, 235-245.
- Cannizzaro F., Greco G., Raneli M., Spitale M. C., Tomarchio E., 2004. Concentration measurements of ^7Be at ground level air at Palermo, Italy - comparison with solar activity over a period of 21 years. *Journal of Environmental Radioactivity* 72, 259-271.
- Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 2002. Avis technique 7/01-1342, enduit mince sur polystyrène expansé collé, Fema-Therm-WDVS Typ ABC Collé.
- Chamberlain A. C., 1967. Transport of Lycopodium spores and other small particles to rough surfaces. *Proceedings of the Royal Society London*, 296 A.
- Chamberlain A. C., Chadwick R. C., 1966. Transport of iodine from atmosphere to ground. *Tellus XVII(2)*, 226-237.
- Chassaing P., 2000. *Turbulence en Mécanique des Fluides ; Analyse du phénomène en vue de sa modélisation à l'usage de l'ingénieur*. Cépaduès-édition, collection Polytech, Paris, ISBN 2-85428-483-6
- Cherin N., Roustan Y., Seigneur C., 2012. Dry deposition modeling of air pollutants over urban areas. 2nd Urban Environmental Pollution Conference, Amsterdam (NL), 17-20 juin.
- Clarke A. G., Azadi-Boogar G. A., Andrews G. E., 1999. Particle size and chemical composition of urban aerosols. *The Science of the Total Environment* 235, 15-24.
- Collett J. L., Herckes P., Chang H., Lee T., Pandis S. N., Fahey K., 2005. Examination of the influence of California Regional Particulate Air Quality Study; Fog episodes on aerosol formation and removal. Final report.
- Connan O., Maro D., Hébert D., Rozet M., Solier L., Boulaud D., Tenailleau L., 2006. Mesure des vitesses de dépôt sec des aérosols de 0,2 μm sur différents types de substrats urbains, projet Primequal : campagnes Salifa 2005-2006. Rapport IRSN DEI/SECRE/2006-44.
- Connan O., Maro D., Hébert D., Solier L., Masson O., Bourcier L., Le Roux G., 2008. Radioactivité dans l'air, comparaison entre un site d'altitude et deux sites voisins. Rapport IRSN DEI/SECRE 08-004.
- Cousteix J., 1989. *Aérodynamique ; Turbulence et couche limite*. Cépaduès-Edition, Toulouse, ISBN 2-85428-210-8, 627.
- Crump J. G., Seinfeld J. H., 1981. Turbulent deposition and gravitational sedimentation of an aerosol in a vessel of arbitrary shape. *Journal of Aerosol Science* 12, 405-415.
- Dai W., Davidson C. I., Etyemezian V., Zufall M., 2001. Wind tunnel studies of particle transport and deposition in turbulent boundary layer flows. *Aerosol Science and Technology* 35, 887-898.

- Damay P., 2010. Détermination expérimentale de la vitesse de dépôt sec des aérosols submicroniques en milieu naturel : influence de la granulométrie, des paramètres micrométéorologiques et du couvert. Thèse de doctorat, INSA de Rouen, rapport ISRN/IRSN-2010/134, 218.
- Damay P. E., Maro D., Coppalle A., Lamaud E., Connan O., Hébert D., Talbaut M., Irvine M., 2009. Size-resolved eddy covariance measurements of fine particle vertical fluxes. *Journal of Aerosol Science* 40, 1050-1058.
- Davidson C. I., Lindberg S. E., Schmidt J. A., Cartwright L. G., Landis L. R., 1985. Dry deposition of sulfate onto surrogate surfaces. *Journal of Geophysical Research* 90, 2121-2130.
- Delmas R., Mégie G., Peuch V.-H., 2005. *Physique et Chimie de l'Atmosphère*. Collection Echelles, éditions Belin, ISBN 2-7011-3700-4.
- Devell L., Todeval H., Bergstrom U., Appelgren A., Chyssler J., Andersson L., 1986. Initial observations of fallout from the reactor accident at Chernobyl. *Nature* 321, 192-193.
- Doering C., 2007. Measurements of the distribution of Beryllium-7 in the natural environment. PhD by publication, Queensland University of Technology.
- Donateo A., Damay P. E., Contini D., Maro D., Roupsard P., 2010. Similarities and differences in dry deposition velocity normalized to friction velocity over maize, grass, bare soil and ice measured with different instruments. 8^{ème} International Aerosol Conference, Helsinki (FI), 29 août - 3 septembre.
- Dorsey, J. R., Nemitz E., Gallagher M. W., Fowler D., Williams P. I., Bower K. N., Beswick K. N., 2002. Direct measurements and parameterization of aerosol flux concentration and emission velocity above a city. *Atmospheric Environment* 36, 791-800.
- Dupont S., 2001. Modélisation dynamique et thermodynamique de la canopée urbaine : réalisation du modèle de sols urbains pour SUBMESO. Thèse de doctorat, Université de Nantes.
- Feely H. W., Larsen R. J., Sanderson C. G., 1989. Factors that cause seasonal variations in Beryllium-7 concentrations in surface air. *Journal of Environmental Radioactivity* 9, 223-249.
- Flori J.P., Giraud D., Olive F., Ruot B., Sini J.F, Rosant J.-M., Mestayer P., Connan O., Maro D., Hébert D., Rozet M., Talbaut M., Coppalle A., 2007. Salissures de façades (SALIFA), Programme PRIMEQUAL, rapport final. EN-CAPE 07.129 C.
- Fogh C. L., Roed J., Andersson K. G., 1999. Radionuclide resuspension and mixed deposition at different height. *Journal of Environmental Radioactivity* 46, 67-75.

Fowler D., Pilegaard K., Sutton M.A., Ambus P., Raivonen M., Duyzer J., Simpson D., Fagerli H., Fuzzi S., Schjoerring J.K., Granier C., Neftel A., Isaksen I.S.A., Laj P., Maione M., Monks P.S., Bukhardt J., Daemmgen U., Neiryck J., Personne E., Wichink-Kruit R., Butterbach-Bahl K., Flechard C., Tuovinen J.P., Coyle M., Gerosa G., Loubet B., Altimir N., Gruenhage L., Ammann C., Cieslik S., Paoletti E., Mikkelsen T.N., Ro-Poulsen H., Cellier P., Cape J.N., Horváth L., Loreto F., Niinemets U., Palmer P.I., Rinne J., Misztal P., Nemitz E., Nilsson D., Pryor S., Gallagher M.W., Vesala T., Skiba U., Brüggemann N., Zechmeister-Boltenstern S., Williams J., O'Dowd C., Facchini M.C., de Leeuw G., Flossman A., Chaumerliac N., Erisman J.W., 2009. Atmospheric composition change: Ecosystems-Atmosphere interactions. *Atmospheric Environment* 43, 5193-5267.

Friedlander S. K., 1977. *Smoke, Dust and Haze*. John Wiley, New York.

Friedlander S. K., Johnstone H. F., 1957. Deposition of suspended particles from turbulent gas stream. *Industrial and Engineering Chemistry* 49, 1151

Fuchs N. A., 1964. *Mechanics of Aerosols*. Pergamon Press, Oxford.

Gaffney J. S., Marley N. A., Cunningham M. M., 2004. Natural radionuclides in fine aerosols in the Pittsburgh area. *Atmospheric Environment* 38, 3191-3200.

Gaggeler H. W., 1995. Radioactivity in the atmosphere. *Radiochimica Acta* 70, 345-353.

Garland J. A., 2001. On the size dependence of particle deposition. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* 1, 323-332.

Goldsmith P., May F. G., 1966. Diffusiophoresis and Thermophoresis in water vapor systems. *Aerosol Science*, Chapter VII, Davies C. N., Academic Press, London.

Gromaire-Mertz M.-C., 1998. La pollution des eaux pluviales urbaines en réseau d'assainissement unitaire. Caractéristiques et origines. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Gründel M., Porstendörfer J., 2004. Differences between the activity size distributions of the different natural radionuclides aerosols in outdoor air. *Atmospheric Environment* 38, 3723-3728.

GTR 5 « Méthodes de mesure de laboratoire du Comité d'Instrumentation de Radioprotection », 1982. Normalisation des flacons utilisés en spectrométrie gamma. Rapport CEA-R-5145.

Guha A., 1997. A unified eulerian theory of turbulent deposition to smooth and rough surfaces. *Journal of Aerosol Science* 28, 1517-1537.

Hewitt C. N., Jackson A. V., 2003. *Handbook of atmospheric science; Principles and applications*. Blackwell Publishing, ISBN 978-0-632-05286-8.

Hinds W. C., 1999. *Aerosol Technology; Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles*. Second Edition. Wiley-Interscience, New York, ISBN 0-471-19410-7.

- Holub R. F., Raes F., Van Dingenen R., Vanmarcke H., 1988. Deposition of aerosols and unattached radon daughters in different chambers; theory and experiment. *Radiation Protection Dosimetry* 24, 217-220.
- Horvath H., Kasahara M., Pesava P., 1996a. The size distribution and composition of the atmospheric aerosol at a rural and nearby urban location. *Journal of Aerosol Science* 27, 417-435.
- Horvath H., Pesava P., Toprak S., Aksu R., 1996b. Technique for measuring the deposition velocity of particulate matter to building surfaces. *The Science of the Total Environment* 189/190, 255-258.
- Hussein T., Hruška A., Dohányosová P., Džumbová L., Hemerka J., Kulmala M., Smolík J., 2009a. Deposition rates on smooth surfaces and coagulation of aerosol particles inside a test chamber. *Atmospheric Environment* 43, 905-914.
- Hussein T., Kubincová L., Džumbová L., Hruška A., Dohányosová P., Hemerka J., Smolík J., 2009b. Deposition of aerosol particles on rough surfaces inside a test chamber. *Building and Environment* 44, 2056-2063.
- Hussein T., Smolík J., Kerminen V.-M., Kulmala M., 2012. Modeling dry deposition of aerosol particles onto rough surfaces. *Aerosol Science and Technology* 46, 44-59.
- Ioannidou A., 2011. Activity size distribution of ^7Be in association with trace metals in the urban area of the city of Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Environment* 45, 1286-1290.
- Ioannidou A., 2012. ^7Be aerosols and their deposition on the sea: a possible method to estimate trace metals deposition on the sea. *Journal of Environmental Radioactivity* 108, 29-32.
- Jackson P. S., 1981. On the displacement height in the logarithmic velocity profile. *Journal of Fluid Mechanics* 111, 15-25.
- Jaenicke R., 1988. *Landolt-Börnstein; Numerical Data and Functional Relationship in Science and Technology; Group V: Geophysics and Space Research; Volume 4; Meteorology; Subvolume b Physical and Chemical Properties of the Air*. Springer-Verlag, Berlin.
- Johnk R. E., Hanratty T. J., 1962a. Temperature profiles for turbulent flow of air in pipe - I. The fully developed heat-transfer region. *Chemical Engineering Science* 17, 867-879.
- Johnk R. E., Hanratty T. J., 1962b. Temperature profiles for turbulent flow of air in pipe - II. The thermal entrance region. *Chemical Engineering Science* 17, 881-892.
- Jonsson L., Karlsson E., Jönsson P., 2008. Aspects of particulate dry deposition in the urban environment. *Journal of Hazardous Materials* 153, 229-243.
- Jost D. T., Gaggeler H. W., Baltensperger U., Zinder B., Haller P., 1986. Chernobyl fallout in size-fractionated aerosol. *Nature* 324, 22-23.

- Kader B. A., 1981. Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 24, 1541-1544.
- Kaimal J. C., Finnigan J. J., 1994. Atmospheric boundary layer flows; their structure and measurement. Oxford University Press, New York, ISBN 0-19-506239-6.
- Katata G., Terada H., Nagai H., Chino M., 2011. Numerical reconstruction of high dose rate zones due to Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity* 111, 2-12.
- Kelly G. N., 1987. The importance of the urban environment for accident consequences. *Radiation Protection Dosimetry* 21, 13-20.
- Kim E., Kalman D., Larson T., 2000. Dry deposition of large, airborne particles onto surrogate surface. *Atmospheric Environment* 34, 2387-2397.
- Klebanoff P. S., 1955. Characteristics of turbulence in a boundary layer with zero pressure gradient. National Advisory Committee for Aeronautics, Report 1247, 1135-1153.
- Kotroni V., Lagouvardos K., 1994. Dynamic structure and evolution of the prefrontal boundary layer: three case studies of FRONTS 87. *Atmospheric Research* 35, 55-70.
- Krogstad P.-Å., Antonia R. A., 1999. Surface roughness effects in turbulent boundary layers. *Experiment in fluids* 27, 450-460.
- Kulan A., Aldahan A., Possnert G., Vintersved I., 2006. Distribution of ^7Be in surface air of Europe. *Atmospheric Environment* 40, 3855-3868.
- Kulmala M., Vehkamäki H., Petäjä T., Dal Maso M., Lauri A., Kerminen V.-M., Birmili W., McMurry P. H., 2004. Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observations. *Journal of Aerosol Science* 35, 143-176.
- Lagouarde J.-P., Moreau P., Irvine M., Bonnefond J.-M., Voogt J. A., Sollic F., 2004. Airborne experimental measurements of the angular variations in surface temperature over urban areas: case study of Marseille (France). *Remote Sensing of Environment* 93, 443-462.
- Laguionie P., 2007. Mesures *in situ* et modélisation du transport des sédiments en rivière. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, Mémoires du CAREN n°21.
- Lai A. C. K., Byrne M. A., Goddard J. H., 2001. Aerosol deposition in turbulent channel flow on a regular array of three-dimensional roughness elements. *Journal of Aerosol Science* 32, 121-137.
- Lai A. C. K., Nazaroff W.W., 2000. Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces. *Journal of Aerosol Science* 31, 463-476.
- Lai A. C. K., Nazaroff W.W., 2005. Supermicron particle deposition from turbulent chamber flow onto smooth and rough vertical surfaces. *Atmospheric Environment* 39, 4893-4900.

Lal D., Peters B., 1967. Cosmic ray produced radioactivity on the earth. Handbuch der Physik 46 (ed. K. Sitte) Springer Verlag.

Langner M., Kull M., Endlicher W. R., 2011. Determination of PM₁₀ deposition based on antimony flux to selected urban surfaces. Environmental Pollution 159, 2028-2034.

Laurent C., 1997. Technique de mesure de l'efficacité des filtres T.H.E. au moyen d'un aérosol de fluorescéine sodée. Rapport IPSN DPRE-OAR/THE/GUI-02.

Leroy C., 2008. Analyse dynamique de la pollution de l'air dans la troposphère. Thèse de doctorat, Université du Littoral-Côte d'Opale.

Liu B. Y. H., Agarwal J. K., 1974. Experimental observation of aerosol deposition in turbulent flow. Aerosol Science 5, 145-155.

Lombardo T., 2002. Mécanismes d'altération du verre calco-sodique en atmosphère urbaine polluée. Thèse de doctorat, Université Paris XII - Val de Marne.

Longley I. D., Gallagher M. W., Dorsey J. R., Flynn M., Barlow J., F., 2004. Short-term measurements of airflow and turbulence in two street canyons in Manchester. Atmospheric Environment 38, 69-79.

Longley, I. D., Gallagher M. W., Dorsey J. R., Flynn M., 2004. A case-study of fine particle concentrations and fluxes measured in a busy street canyon in Manchester, UK. Atmospheric Environment 38, 3595-3603.

Madelaine G., 1982. Mesure de l'aérosol troposphérique. IV^{ème} symposium sur la recherche en matière de la pollution atmosphérique. Minist. Environnement Ed. T. 2.

Maro D., 2012. Transfert des radionucléides sous forme de gaz et d'aérosols dans les environnements complexes : études expérimentales de dispersion atmosphérique et d'échanges aux interfaces. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université des Sciences de Nantes, rapport ISRN/IRSN-2012/155.

Maro, D., Connan, O., Hébert, D., Rozet, M., Talbaut, M., Coppalle, A., Sini, J.F., Rosant, J.M., Mestayer, P., Sacré, C., Flori, J.P., Giraud, D., Olive, F., Ruot, B., Roupsard, P., 2010. Quantification of the dry deposition of aerosols in an urban environment: towards a new methodology. International Aerosol Conference 2010, Helsinki.

Mason B. J., 1971. The physics of clouds. Oxford University Press, London.

Meckbach R., Jacob P., Paretzke H. G., 1988a. Gamma exposures due to radionuclides deposited in urban environments. Part I: kerma rates from contaminated urban surfaces. Radiation Protection Dosimetry 25, 167-179.

Meckbach R., Jacob P., 1988b. Gamma exposures due to radionuclides deposited in urban environments. Part II: location factors for different deposition patterns. *Radiation Protection Dosimetry* 25, 181-190.

Mestayer P., 2007. L'atmosphère habitée : dynamique, thermodynamique et dispersion des polluants. Cours de l'Ecole Centrale de Nantes.

Milliez M., 2006. Modélisation micro-météorologique en milieu urbain : dispersion des polluants et prise en compte des effets radiatifs. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Monin A. S., Obukhov A. M., 1954. Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere near the ground. *Tr. Akad. SSSR. Geofiz. Inst.* 24, 163-187.

Montassier N., 1990. Etude du dépôt des aérosols par thermophorèse dans un écoulement laminaire. Thèse de doctorat, Université de Paris XII, rapport CEA-R-5533.

Nakamura Y., Oke T. R., 1988. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment* 22, 2691-2700.

Nerisson P., 2009. Modélisation du transfert des aérosols dans un local ventilé. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, rapport ISRN/IRSN-2009/112.

Niachou K., Livada I., Santamouris M., 2008. Experimental study of temperature and airflow distribution inside an urban street canyon during hot summer weather conditions - Part I: Air and surface temperatures. *Building and Environment* 43, 1383-1392.

Nicholson K. W., 1987. Deposition of caesium to surfaces of buildings. *Radioprotection Protection Dosimetry* 21, 37-42.

Nicholson K. W., 1988. The dry deposition of small particles: a review of experimental measurements. *Atmospheric Environment* 22, 2653-2666.

Nikuradse J., 1933. Laws of flow in rough pipes. National Advisory Committee for Aeronautics, Report 1292 (traduction de 1950).

Norme NF X 43-007, 2008. Qualité de l'air, air ambiant ; Détermination de la masse des retombées atmosphériques sèches, Prélèvement sur plaquettes de dépôt, préparation et traitement. AFNOR, La Plaine Saint-Denis.

Norme NF X 44-011, 1972. Séparateurs aérauliques ; Méthode de mesure de l'efficacité des filtres au moyen d'un aérosol d'uranine (fluorescéine). AFNOR, La Plaine Saint-Denis.

Odabasi M., Muezzinoglu A., Bozlaker A., 2002. Ambient concentrations and dry deposition fluxes of trace elements in Izmir, Turkey. *Atmospheric Environment* 36, 5841-5851.

- Ogorodnikov B. I., Budyka A. K., Skitovitch V. I., 1994. Radioactive aerosols near Chernobyl in 1986-1992. *Journal of Aerosol Science* 25, S269-S270.
- Oke T. R., 1988. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings* 11, 103-113.
- Oleson K. W., Bonan G. B., Feddema J., Vertenstein M., Grimmond C. S. B., 2008. An urban parameterization for a global climate model. Part I: Formulation and evaluation for two cities. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47, 1038-1060.
- Opiolka S., Schmidt F., Fissan H., 1994. Combined effects of electrophoresis and thermophoresis on particle deposition onto flat surfaces. *Journal of Aerosol Science* 25, 665-671.
- Orlanski I., 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society* 56, 527-530.
- Pandis S. N., Seinfeld J. H., Pilinis C., 1990. Chemical composition differences in fog and cloud droplets of different sizes. *Atmospheric Environment* 24A, 1957-1969.
- Papastefanou C., 2006. Residence time of tropospheric aerosols in association with radioactive nuclides. *Applied Radiations and Isotopes* 64, 93-100.
- Papastefanou C., 2008. *Radioactivity in the Environment; Volume 12*. Elsevier Science, Oxford, ISBN 978-0-08-044075-0.
- Papastefanou C., Ioannidou A., 1995. Aerodynamic size association of ^7Be in ambient aerosols. *Journal of Environmental Radioactivity* 26, 273-282.
- Papastefanou C., Ioannidou A., 1996. Influence of air pollutants in the ^7Be size distribution of atmospheric aerosols. *Aerosol Science and Technology* 24, 102-106.
- Papastefanou C., Ioannidou A., Stoulos S., Manopoulou M., 1995. Atmospheric deposition of cosmogenic ^7Be and ^{137}Cs from fallout of the Chernobyl accident. *The Science of the Total Environment* 170, 151-156.
- Percot S., Ruban V., Roupsard P., Maro D., Millet M., 2011. An original device for the measure of aerosol deposition. First results on the Pin Sec catchment in Nantes, France. 19^{ème} European Aerosol Conference, Manchester (UK), 4 - 9 septembre.
- Pesava P., Aksu R., Toprak S., Horvath H., Seidl S., 1999. Dry deposition of particles to building surfaces and soiling. *The Science of the Total Environment* 235, 25-35.
- Pesava P., Horvath H., 1999. Deposition of submicron particles in a separated turbulent flow. *Journal of Aerosol Science* 30, suppl. 1, S401-S402.
- Petroff A., 2005. Etude mécanique du dépôt sec d'aérosols sur couverts végétaux. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille II, rapport ISRN/IRSN-2005/50-FR.

- Petroff A., Mailliat A., Amielh M., Anselmet F., 2008. Aerosol dry deposition on vegetative canopies. Part I: Review of present knowledge. *Atmospheric Environment* 42, 3625-3653.
- Pham M. K., Betti M., Nies H., Povinec P. P., 2011. Temporal changes of ^7Be , ^{137}Cs and ^{210}Pb activity concentrations in surface air at Monaco and their correlation with meteorological parameters. *Journal of Environmental Radioactivity* 102, 1045-1054.
- Piga D., 2010. Processus engagés dans la rémanence au niveau du compartiment atmosphérique des radionucléides artificiels antérieurement déposés. Thèse de doctorat, Université du Sud Toulon Var.
- Piñero García F., Ferro García M. A., Azahra M., 2012. ^7Be behavior in the atmosphere of the city of Granada January 2005 to December 2009. *Atmospheric Environment* 47, 84-91.
- Piot E., 2008. Simulation numérique directe et analyse de stabilité de couches limites laminaires en présence de micro-rugosités. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- Piskunov V. N., 2009. Parameterization of aerosol dry deposition velocities onto smooth and rough surfaces. *Journal of Aerosol Science* 40, 664-679.
- Pouchain B., 1970. Contribution à l'étude sur maquette d'une soufflerie de simulations des interactions océans-atmosphère. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille.
- Pruppacher H. R., Klett J. D., 1980. *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Reidel, Dordrecht.
- Pryor S. C., Gallagher M., Sievering H., Larsen S; E., Barthelmie R. J., Birsan F., Nemitz E., Rinne J., Kulmala M., Grönholm T., Taipale R., Vesala T., 2007. A review of measurement and modeling results of particle atmosphere-surface exchange. *Tellus*, 60B, 42-75.
- Putaud J.-P., Raes F., Van Dingenen R., Brüggemann E., Facchini M.-C., Decesari S., Fuzzi S., Gehrig R., Hüglin C., Laj P., Lorbeer G., Maenhaut W., Mihalopoulos N., Müller K., Querol X., Rodriguez S., Schneider J., Spindler G., ten Brink H., Tørseth K., Wiedensohler A., 2004. A European aerosol phenomenology - 2 : chemical characteristics of particulate matter at roadside, urban, rural and background sites in Europe. *Atmospheric Environment* 38, 2579-2595.
- Raupach M. R., Antonia R. A., Rajagopalan S., 1991. Rough-wall turbulent boundary layers. *Applied Mechanics Reviews* 44, 1-25.
- Reeks M. W., 1983. The transport of discrete particles in inhomogeneous turbulence. *Journal of Aerosol Science* 14, 729-739.
- Renoux A. et Boulaud D., 1998. *Les Aérosols ; Physique et Métrologie*. Lavoisier Tec & Doc, Paris, ISBN 2-7430-0231-X.
- Roed J., 1983. Deposition velocity of caesium 137 on vertical building surfaces. *Atmospheric Environment* 17, 663-664.

- Roed J., 1985. Dry deposition on urban surfaces. Rapport RISØ-R-515 NKA/REK-1(84)701, ISBN 87-550-1069-5.
- Roed J., 1987. Dry deposition in rural and in urban areas in Denmark. *Radiation Protection Dosimetry* 21, 33-36.
- Rotach M. W., 1995. Profiles of turbulence statistics in and above an urban street canyon. *Atmospheric Environment* 29, 1473-1486.
- Rotach M. W., 1999. On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion. *Atmospheric Environment* 33, 4001-4008.
- Sagot B., Antonini G., Buron F., 2009. Annular flow configuration with high deposition efficiency for the experimental determination of thermophoretic diffusion coefficients. *Journal of Aerosol Science* 40, 1030-1049.
- Salma I., Maenhaut W., Zárny G., 2002. Comparative Study of elemental mass size distribution in urban atmospheric aerosol. *Journal of Aerosol Science* 33, 339-356.
- Schlichting H., 1968. *Boundary-Layer Theory*. McGraw Hill, New York.
- Schmauß A., 1920. Kolloidchemie and Meteorologie. *Meteorologische Zeitschrift* 37, 1/2, 1-8.
- Schmidt A., Klemm O., 2008. Direct determination of highly size-resolved turbulent particle fluxes with the disjunct eddy covariance method and a 12-stage electrical low pressure impactor. *Atmospheric Chemistry and Physics* 8, 7405-7417.
- Sehmel G. A., 1973. Particle eddy diffusivities and deposition velocities for isothermal flow and smooth surfaces. *Aerosol Science* 4, 125-138.
- Sehmel G. A., 1980. Particle and gas dry deposition: a review. *Atmospheric Environment* 14, 983-1011.
- Seinfeld J. H., Pandis S. N., 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics; From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley - Interscience, New York, ISBN 0-47117816.
- Shimada M., Okuyama K., Kousaka Y., Oshima K., 1987. Turbulent and Brownian diffusive deposition of aerosol particles onto a rough wall. *Journal of Chemical Engineering of Japan* 20, 57-64.
- Sippola M. R., Nazaroff W. W., 2004. Experiments measuring particle deposition from fully developed turbulent flow in ventilation ducts. *Aerosol Science and Technology* 38, 914-925.
- Slinn W. G. N., 1982. Predictions for particle deposition to vegetative canopies. *Atmospheric Environment* 16, 1785-1794.
- Sportisse B., 2008. *Pollution Atmosphérique ; Des processus à la modélisation*. Springer-Verlag, Paris, ISBN 978-2-287-74961.

- Stull R. B., 1988. An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic Publishers.
- Talbot L., Cheng R. K., Schefer R. W., Willis D. R., 1980. Thermophoresis of particles in a heated boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics* 101, 737-758.
- Tang I. N., Munkelwitz H. R., 1993. Composition and temperature dependence of the deliquescence properties of hygroscopic aerosols. *Atmospheric Environment* 27A, 467-473.
- Tanner P. A., Law P. T., Tam W. F., 2001. Comparison of aerosol and dry deposition sampled at two sites in Southern China. *Journal of Aerosol Science* 32, 461-472.
- Tasdemir Y., Odabasi M., Vardar N., Sofuoglu A., Murphy T. J., Holsen T. M., 2004. Dry deposition fluxes and velocities of polychlorinated biphenyls (PCBs) associated with particles. *Atmospheric Environment* 38, 2447-2456.
- Theurer W., 1999. Typical building arrangements for urban air pollution modelling. *Atmospheric Environment* 33, 4057-4066.
- Toprak S., Aksu R., Pesava P., Horvath H., 1997. The soiling of materials under simulated atmospheric conditions in a wind tunnel. *Journal of Aerosol Science* 28, supplement 1, S585-S586.
- Triplet J.-P., Roche G., 1986. *Météorologie générale*. Troisième édition. Météo-France, Trappes, ISBN 2-11-085 176-7.
- Underwood B. Y., 1987. Dry deposition to an urban complex. *Radiation Protection Dosimetry* 21, 21-32.
- VAMP, 1994. Modeling the deposition of airborne radionuclides into the urban environment. First report of the VAMP Urban Working Group. IAEA, Vienna, IAEA-Tecdoc-760.
- Vandenberg J. J., Knoerr K. R., 1985. Comparison of surrogate surface techniques for estimation of sulfate dry deposition. *Atmospheric Environment* 19, 627-635.
- Van der Hoven I., 1957. Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour. *Journal of Meteorology* 14, 160-164.
- Van Dingenen R., Raes F., Putaud J.-P., Baltensperger U., Charron A., Facchini M.-C., Decesari S., Fuzzi S., Gehrig R., Hansson H.-C., Harrison R. M., Hüglin C., Jones A. M., Laj P., Lorbeer G., Maenhaut W., Palmgren F., Querol X., Rodriguez S., Schneider J., ten Brink H., Tunved P., Tørseth K., Wehner B., Weingartner E., Wiedensohler A., Wåhlin P., 2004. A European aerosol phenomenology - 1: physical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe. *Atmospheric Environment* 38, 2561-2577.
- Vardoulakis S., Fisher B. E. A., Pericleous K., Gonzalez-Flesca N., 2003. Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment* 37, 155-182.

- Velasco E., Pressley S., Allwine E., Westberg H., Lamb B., 2005. Measurements of CO₂ fluxes from the Mexico City urban landscape. *Atmospheric Environment* 39, 7433-7446.
- Waldmann L., Schmitt K. H., 1966. Thermophoresis and diffusiophoresis of aerosols. *Aerosol Science*, Chapter VI, Davies C. N., Academic Press, London.
- Wang X., You C., Liu R., Yang R., 2011. Particle deposition on the wall driven by turbulence, thermophoresis and particles agglomeration in channel flow. *Proceedings of the Combustion Institute* 33, 2821-2828.
- Wells A. C., Chamberlain A. C., 1967. Transport of small particles to vertical surfaces. *British Journal of Applied Physics* 18, 1793-1799.
- Woo S.-H., Lee S.-C, Yook S.-J., 2012. Statistical lagrangian particle tracking approach to investigate the effect of thermophoresis on particle deposition onto a face-up flat surface in a parallel airflow. *Journal of Aerosol Science* 44, 1-10.
- Wood N. B., 1981. A simple method for the calculation of turbulent deposition to smooth and rough surfaces. *Journal of Aerosol Science* 12, 275-290.
- Yaglom A. M., Kader B. A., 1974. Heat and mass transfer between a rough wall and turbulent fluid flow at high Reynolds and Péclet numbers. *Journal of Fluid Mechanics* 62, 601-623.
- Young J. A., Silker W. B., 1980. Aerosol deposition velocities on the Pacific and Atlantic oceans calculated from ⁷Be measurements. *Earth and Planetary Science Letters* 50, 92-104.
- Zhang L., Gong S., Padro J., Barrie, L., 2001. A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module. *Atmospheric Environment* 35, 549-560.
- Zhao B., Wu J., 2006. Modeling particle deposition onto rough walls in ventilation duct. *Atmospheric Environment* 40, 6918-6927.
- Zheng F., 2002. Thermophoresis of spherical and non-spherical particles: a review of theories and experiments. *Advances in Colloid and Interface Science* 97, 255-278.
- Zufall M. J., Davidson C. I., Caffrey P. F., Ondov J. M., 1998. Airborne concentrations and dry deposition fluxes of particulate species to surrogate surfaces deployed in southern Lake Michigan. *Environmental Science and Technology* 32, 1623-1628.

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : diamètres équivalents pour une particule quelconque (Hinds, 1999).	20
Figure I-2 : distributions en nombre, surface et volume d'un même aérosol atmosphérique en épisode de « smog » mesurées à Los Angeles en 1969 (Whitby, 1975 ; cité par Papastefanou, 2008).	22
Figure I-3 : distribution granulométrique en nombre d'un aérosol typique d'un milieu urbain, contribution des modes ultrafin (— - -), Aitken (- - -) et accumulation (— — —) (Delmas <i>et al.</i> , 2005).	23
Figure I-4 : temps de résidence τ des particules en secondes (s, échelle de droite) et en jours (d, échelle de gauche) en fonction de leur rayon r (en μm) (Jaenicke, 1988).	24
Figure I-5 : processus de formation et de disparition des particules atmosphériques (Madelaine, 1982 ; cité par Renoux et Boulaud, 1998).	25
Figure I-6 : compositions moyennes d'aérosols représentatifs de milieux naturels (a, « bruit de fond »), péri-urbains (b) et urbains (c, au niveau d'une rue) (Delmas <i>et al.</i> , 2005).	26
Figure I-7 : distribution massique de métaux sur le spectre granulométrique (en diamètre aérodynamique) de l'aérosol atmosphérique : exemple du plomb Pb et du cadmium Cd (Allen <i>et al.</i> , 2001).	27
Figure I-8 : schéma de principe de la thermophorèse (d'après Montassier, 1990). T_1 et T_2 sont les températures du gaz ($T_1 < T_2$), v_{q1} et v_{q2} représentent les vitesses quadratiques du gaz, m est la masse de la particule.	30
Figure I-9 : taux relatif de croissance et de décroissance en masse d'un aérosol (composé de 66 % de KCl et de 33 % de NaCl, en masse) en fonction de l'humidité relative (%) (Tang et Munkelwitz, 1993 ; cité par Seinfeld et Pandis, 1998).	32
Figure I-10 : illustration du dépôt d'une particule sur un obstacle par diffusion brownienne (Hinds, 1999).	35
Figure I-11 : illustration du dépôt d'une particule sur un obstacle par impaction inertielle (Hinds, 1999).	36
Figure I-12 : illustration du dépôt d'une particule sur un obstacle par interception (Hinds, 1999).	37
Figure I-13 : vitesses de dépôt sec et inverses des écarts de températures verre - air pour cinq expérimentations (Maro <i>et al.</i> , 2010).	38
Figure I-14 : courbe en « V » de la vitesse de dépôt sec en fonction du diamètre des particules pour trois vitesses de vent (Slinn, 1982 ; d'après Maro, 2012).	40
Figure I-15 : vitesses de dépôt sec mesurées en milieu urbain par accumulation ou traçage.	46
Figure I-16 : vitesses de dépôt sec mesurées en conduites, en souffleries et en chambres de dépôt. ..	49

Figure I-17 : V_d mesurées sur l'herbe <i>in situ</i> (a) et rapports V_d/u_* moyens pour différents couverts ruraux en conditions de stabilités atmosphériques neutres et stables (b).	50
Figure I-18 : illustration du modèle de résistances pour le dépôt sec (Seinfeld et Pandis, 1998).	52
Figure I-19 : V_d calculée pour l'herbe avec le modèle de Zhang <i>et al.</i> (2001).	56
Figure I-20 : V_d calculées pour une surface lisse avec le modèle de Lai et Nazaroff (2000).	58
Figure I-21 : modèle de dépôt sec pour un canyon urbain (Chérin <i>et al.</i> , 2012)	60
Figure I-22 : schématisation de la démarche expérimentale employée.	62
Figure II-1 : illustration des différentes zones constituant une couche limite turbulente (tirée de Chassaing, 2000).	66
Figure II-2 : profils verticaux des tensions de Reynolds d'après Klebanoff (1955) : a) intensités de turbulence sur u , v et w , b) corrélation de u et v	67
Figure II-3 : illustration de profils verticaux de vitesses au-dessus d'une surface lisse et d'une surface rugueuse (tirée de Cousteix, 1989).	68
Figure II-4 : soufflerie à recirculation de l'IRPHE : a) vue d'ensemble de la soufflerie, b) vue de la veine d'essai recouverte d'enduit de façade.	71
Figure II-5 : illustration des paramètres de rugosité quantifiés pour l'enduit de façade (a, Flori <i>et al.</i> , 2007) et l'herbe synthétique (b).	73
Figure II-6 : illustration des trois configurations de la veine d'essai : a) dépôt sur surfaces horizontales non chauffées, b) dépôt sur surfaces verticales non chauffées et c) dépôt sur surfaces horizontales chauffées. Les zones grisées correspondent aux zones recouvertes par les surfaces étudiées, les carrés dans ces zones représentent les éprouvettes.	74
Figure II-7 : générateur pneumatique d'aérosols (a) et illustration de son principe de fonctionnement (b) (d'après Nerisson, 2009).	77
Figure II-8 : distribution granulométrique en masse normalisée de l'aérosol de fluorescéine.	79
Figure II-9 : éprouvettes carrées de 200 mm de côté, de verre posé sur un support polystyrène-bois (a), d'enduit de façade (b) et d'herbe synthétique (c).	80
Figure II-10 : sonde à fils chauds croisés sur son support au-dessus de l'enduit de façade.	82
Figure II-11 : mesure des températures de la surface d'enduit de façade avec des thermocouples.	83
Figure II-12 : illustration du rack de thermocouples et de son support pour le déplacement vertical. ...	84
Figure II-13 : V_d pour chaque type de surface horizontale non-chauffée et chaque u_{ref} en fonction du fetch x	86
Figure II-14 : V_d moyennes pour chaque type de surface en fonction de u_{ref}	87
Figure II-15 : profils verticaux de vitesses moyennes u , au fetch $x = 5,1$ m pour les trois surfaces et trois vitesses d'écoulement.	89

Figure II-16 : représentation des profils verticaux de vitesses $(u + \Delta u)^+ = f((z + d)^+)$ au fetch $x = 5,1$ m pour les trois surfaces et trois vitesses d'écoulement.	90
Figure II-17 : profils verticaux des intensités de turbulences sur w au fetch $x = 5,1$ m pour les trois surfaces et trois vitesses d'écoulement.	91
Figure II-18 : comparaison des valeurs de V_d de cette étude et des données la littérature issues d'expérimentations en soufflerie.	94
Figure II-19 : comparaison des modèles de Lai et Nazaroff (2000) et de Zhang <i>et al.</i> (2001) aux données de l'étude en fonction de u_*	95
Figure II-20 : rapports $(V_d - V_s)/u_*$ de cette étude comparés à des données de la littérature.	96
Figure II-21 : V_d en fonction du maximum de l'intensité de turbulence sur w	97
Figure II-22 : V_d en fonction de $\Delta T_{surface-air}$ pour chaque éprouvette de verre et d'enduit, et chaque u_{ref}	98
Figure II-23 : V_d et $\Delta T_{surface-air}$ moyens pour le verre classique et l'enduit de façade, et pour chaque u_{ref}	100
Figure II-24 : V_d/V_{d0} en fonction de $\Delta T_{surface-air}$ pour le verre et l'enduit de façade, et pour chaque u_{ref} . V_{d0} est la vitesse de dépôt pour $\Delta T_{surface-air} = 0$ K.	101
Figure II-25 : profils verticaux de températures mesurés au-dessus du verre classique (a) et de l'enduit de façade (b) pour les différents $\Delta T_{surface-air}$ et u_{ref} étudiés.	102
Figure II-26 : ajustement de la loi logarithmique de Kader (1981) sur les profils verticaux mesurés au-dessus du verre pour $u_{ref} = 5,0$ m s ⁻¹	103
Figure II-27 : T^* en fonction de $\Delta T_{surface-air}$. Pour chaque u_{ref} au-dessus du verre et de l'enduit de façade.	105
Figure II-28 : V_{thcal} en fonction de $\Delta T_{surface-air}$ pour chaque u_{ref} sur le verre et l'enduit de façade.	106
Figure II-29 : profils verticaux de gradients moyens et ajustements empiriques pour le verre pour	109
Figure II-30 : représentation de u_* en fonction de u_{ref} sur le verre classique, l'enduit de façade et l'herbe synthétique.	113
Figure II-31 : représentation des paramétrisations et des points expérimentaux de V_d en soufflerie en fonction de u_{ref}	114
Figure II-32 : représentation de a en fonction de $\Delta T_{surface-air}$ pour le verre classique et l'enduit de façade.	115
Figure II-33 : représentation de z_{th} en fonction de $\Delta T_{surface-air}$ pour le verre classique et l'enduit de façade.	116
Figure II-34 : représentation de c en fonction de u_{ref} pour le verre classique et l'enduit de façade.	117
Figure II-35 : comparaison des résultats expérimentaux ($V_{dexpérimentation}$) et des résultats de calculs de la paramétrisation de la vitesse de dépôt en fonction de ($V_{dparamétrisation}$) u_{ref} et de $\Delta T_{surface-air}$	118
Figure III-1 : échelle des mouvements atmosphériques selon Orlanski (1975).	122

Figure III-2 : représentation spectrale de la turbulence, spectre typique de la vitesse à 100 m de hauteur (d'après Van der Hoven, 1957).	123
Figure III-3 : schématisation des couches d'air composant la couche limite atmosphérique (Delmas <i>et al.</i> , 2005 ; d'après Stull, 1988).....	124
Figure III-4 : description de la couche limite urbaine (Milliez, 2006). Ici, z_i est la hauteur de couche limite, z^* la hauteur de sous-couche rugueuse et H la hauteur moyenne de canopée.	125
Figure III-5 : représentation des écoulements d'air dans ou au-dessus des rues canyon, dans le cas d'un vent perpendiculaire aux rues et pour différentes densités de bâti (Oke, 1988).	126
Figure III-6 : localisation du Laboratoire de Radioécologie de Cherbourg-Octeville dans la ville et sur le site universitaire (a), vue du dessus du laboratoire (b), emplacements privilégiés pour les expérimentations (entourés en rouge) et directions de vent privilégiées (traits verts).	129
Figure III-7 : éprouvettes carrées de 200 mm de côté de bitume (a), d'ardoise (b), de tuile (c).....	130
Figure III-8 : bâti-support équipé des éprouvettes urbaines (verre et enduit de façade verticaux, bitume et herbe horizontaux, ardoise, tuile et zinc obliques à 30°) et valise mobile de prélèvement sur filtre (à gauche). Une éprouvette de chaque surface (sauf l'herbe) est équipée d'un thermocouple (en blanc dans les cercles rouges). Les points de prélèvements d'aérosols sur filtres sont encerclés en vert. ...	131
Figure III-9 : a) illustration de la configuration d'une expérimentation pour un vent venant de la direction 30° expérimentation sur la façade sud-est du LRC : bâti (premier plan), générateur (cercle rouge à droite), station météorologique (cercle jaune à droite), anémomètre ultrasonique (cercle vert à gauche), têtes de prélèvement d'aérosols (cercles rouges à gauche) et direction moyenne du vent (flèche bleue) ;	132
Figure III-10 : vitesses de dépôt sec moyennes, minimum et maximum de l'aérosol de fluorescéine mesurées sur les éprouvettes urbaines lors des expérimentations <i>in situ</i> de courte durée.....	138
Figure III-11 : vitesses de dépôt sec moyennes des expérimentations <i>in situ</i> de courte durée et données de la littérature pour des expositions courtes à des aérosols.	143
Figure III-12 : vitesses de dépôt sec moyennes, minimum et maximum, et ajustements sur les données de soufflerie pour le verre classique, l'enduit de façade et l'herbe synthétique en fonction de u_{ref} . ..	145
Figure III-13 : vitesses de dépôt sec moyennes, minimum et maximum de cette étude, vitesses de dépôt de Connan <i>et al.</i> (2006) et résultats des ajustements sur les données de soufflerie pour le verre classique et l'enduit de façade.	147
Figure III-14 : vitesses de dépôt sec moyennes, minimum et maximum mesurées sur les surfaces d'ardoise, de tuile et de zinc, ajustements des vitesses de dépôt pour le verre classique et l'enduit de façade.	149
Figure III-15 : vitesses de dépôt sec moyennes, minimum et maximum mesurées sur les surfaces de bitume et d'herbe synthétique, vitesses de dépôt données par les lois d'ajustement pour l'herbe synthétique et l'enduit de façade.	150
Figure IV-1 : schéma de désintégration du béryllium 7.....	156

Figure IV-2 : concentrations du ^7Be atmosphérique liées aux cycles de productions, aux échelles décennales (a) et annuelles (b) (Cannizzaro <i>et al.</i> , 2004).	158
Figure IV-3 : distribution granulométrique du ^7Be lié à l'aérosol atmosphérique (Gründel et Porstendörfer, 2004).	159
Figure IV-4 : localisation de l'IFSTTAR à Bouguenais près de Nantes (a, cercle rouge) et vue du dessus du site d'étude et de la zone d'étude (b, zone ellipse rouge et bleue).	161
Figure IV-5 : dispositif expérimental pour la mesure des vitesses de dépôt sec et des paramètres environnementaux <i>in situ</i> sur de longues durées.	162
Figure IV-6 : géométries de comptage pour les filtres (à gauche) et pour les solutions de lavage des éprouvettes (à droite).	165
Figure IV-7 : chaîne de spectrométrie gamma du LRC utilisée pour mesurer les échantillons de ^7Be , filtres et solutions : passeur d'échantillons, coffre blindé en plomb et ordinateur d'acquisition (a) ; échantillon sous forme de géométrie liquide 50 mL sur le capot du détecteur dans le coffre blindé du détecteur (b).	166
Figure IV-8 : spectres de comptage gamma de la solution de lavage du zinc correspondant à la période 28 août - 19 septembre 2011 et mesurée au LRC ; vue du spectre sur l'ensemble des canaux de comptage (a, 0 - 2000 keV) ; zoom sur le pic correspondant au ^7Be (b, 477,6 keV).....	167
Figure IV-9 : laboratoire souterrain de la montagne du Roule : entrée du souterrain (a) et spectrométrie utilisée pour les mesures d'échantillons de faibles activités en ^7Be (b).....	168
Figure IV-10 : vitesses moyennes de vent u_{ref} sur 10 min mesurées sur l'ensemble des 16 mois de la période expérimentale et valeurs moyennes mobiles sur 24 h de ces vitesses de vent.	169
Figure IV-11 : température de l'air T_{air} et humidité relative RH moyennes sur 10 min, précipitations cumulées sur 10 min, mesurées sur la totalité de la période expérimentale et moyennes mobiles sur 24 h.	171
Figure IV-12 : vitesses de dépôt sec mesurées avec les éprouvettes urbaines pour chaque mois d'expérimentation et vitesses de dépôt moyenne pour chaque surface sur l'ensemble de la campagne expérimentale <i>in situ</i> de longue durée.	172
Figure IV-13 : vitesses de dépôt sec moyennes des expérimentations <i>in situ</i> de longue durée et données de la littérature pour des expositions longues <i>in situ</i> à des aérosols : a) ensemble du spectre granulométrique, b) diamètres compris entre 0,2 et 1 μm	175
Figure IV-14 : vitesses de dépôt sec moyennes, minimum et maximum sur l'ensemble des données acquises avec chaque type de surface urbaine pour les expérimentations <i>in situ</i> de courtes durées et de longues durées.	177
Figure IV-15 : comparaison des vitesses de dépôt sec mesurées avec le ^7Be et des résultats donnés par les ajustements sur les résultats de soufflerie.	178
Figure IV-16 : pourcentage du temps d'expérimentation $\%_{\text{cond}}$ correspondant à des périodes de rosée ($RH = 100\%$), pour chaque mois et en moyenne sur l'ensemble des expérimentations.	182

Figure IV-17 : vitesses de dépôt sec mesurées sur des éprouvettes horizontales et verticales de verre (a) et d'herbe synthétique (b) et vitesses de dépôt sec moyennes.	186
Figure annexe 1 : répartition des températures des surfaces de verre (a, b) et d'enduit de façade (c, d) selon la position (x, y) pour $\Delta T_{surface-air} = 10 \text{ K}$ et $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$	222
Figure annexe 2 : : températures des surfaces de verre (a, b) et d'enduit de façade (c, d) selon la position (x, y) pour $\Delta T_{surface-air} = 10 \text{ K}$ et $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$ calculées avec la loi ajustée.	223
Figure annexe 3 : rinçage à la seringue d'une éprouvette de bitume.	228
Figure annexe 4 : activités normalisées $A_{n^{7Be}}$ des tests de lavage de chaque type de surface.	228
Figure annexe 5 : bain de sable chauffant, plaques chauffantes et béciers (contenant des solutions de rinçage des éprouvettes) utilisés pour la réduction des volumes de solution.	230
Figure annexe 6 : activités en 7Be A_{7Be} mesurées sur les solutions entières, les filtrats et les résidus.	231
Figure annexe 7 : activités en 7Be A_{7Be} mesurées dans les solutions de rinçages successifs du bitume.	232

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : paramètres influençant le dépôt sec des particules en milieu urbain.	34
Tableau I-2 : vitesses de dépôt sec mesurées en milieux urbain.....	45
Tableau I-3 : LUC (Land Use Categories) et SC (Seasonal Categories) donnés par Zhang <i>et al.</i> (2001). .	55
Tableau II-1 : caractéristiques des surfaces de verre, d’enduit de façade et d’herbe synthétique.	72
Tableau II-2 : diamètres de coupure d_c et géométriques moyens d_{ai} du LPI.....	78
Tableau II-3 : valeurs des V_d moyennes pour chaque type de surface en fonction de u_{ref}	87
Tableau II-4 : données de turbulences et vitesses de dépôt pour chaque surface, chaque vitesse d’écoulement et chaque fetch.	92
Tableau II-5 : températures caractéristiques T^* estimées sur le verre et l’enduit de façade en fonction des vitesses d’écoulement d’air u_{ref} et des écarts de températures $\Delta T_{surface-air}$ moyens.	104
Tableau II-6 : V_d moyennes, V_{thexp} moyennes et ∇T calculés pour chaque u_{ref} et chaque $\Delta T_{surface-air}$ moyen pour le verre et l’enduit de façade.	107
Tableau II-7 : coefficients a et b , hauteurs z_{th} pour chaque u_{ref} et chaque $\Delta T_{surface-air}$ moyen sur le verre et l’enduit de façade.	111
Tableau II-8 : valeurs de la vitesse de sédimentation V_s et du coefficient A pour chaque surface et pour l’aérosol de fluorescéine utilisé.	113
Tableau II-9 : valeurs des coefficients de la paramétrisation de V_{th}	116
Tableau III-1 : données et observations visuelles caractérisant les conditions météorologiques rencontrées lors des expérimentations <i>in situ</i> de courte durée.	136
Tableau III-2 : vitesses de dépôt, températures de l’air, des surfaces et vitesses moyennes du vent lors des expérimentations <i>in situ</i> de courte durée.	139
Tableau III-3 : valeurs des V_d moyennées sur l’ensemble des expérimentations, valeurs minimum et maximum pour chaque type de surface et chaque orientation.	142
Tableau III-4 : récapitulatif des erreurs relatives moyennes et médianes entre les V_d expérimentales et calculées avec les ajustements réalisés sur les données de soufflerie, avec et sans prise en compte de la thermophorèse.	148
Tableau IV-1 : activités en 7Be dans la couche de surface de l’atmosphère tirées de la littérature. ...	157
Tableau IV-2 : diamètres aérodynamiques médians en activité (AMAD) du 7Be associé à l’aérosol atmosphérique et rencontrés dans la littérature.	159
Tableau IV-3 : récapitulatif des données météorologiques moyennes, minimum et maximum pour chaque mois d’expérimentation.	170

Tableau IV-4 : vitesses de dépôt sec moyennes, maximales et minimales de chaque surface urbaine pour l'ensemble des expérimentations <i>in situ</i> de longues durées.	173
Tableau IV-5 : vitesses de dépôt calculées avec les modèles de Lai et Nazaroff (2000) et de Zhang <i>et al.</i> (2001) pour des particules de 0,3 et 0,6 μm de diamètre.....	179
Tableau IV-6 : normes des vecteurs gradients de températures calculés avec la formule de vitesse de thermophorèse de Brock (1962), pour des vitesses de thermophorèse égales aux vitesses de dépôt du verre et du bitume.	180
Tableau IV-7 : diamètres d_p (μm) des particules estimés à partir de $V_d = V_s$	184
Tableau IV-8 : pour le verre et l'herbe, diamètres d_p (μm) des particules déposées estimés à partir des V_s données par la différence entre les vitesses de dépôt mesurées sur les surfaces verticales et horizontales. Valeurs calculées à partir des V_d de août et septembre 2011 et à partir des valeurs moyennes de V_d sur l'ensemble des données.	185
Tableau annexe 1 : valeurs des coefficients a, b, c, d, e et f à utiliser selon les couples d'écart de température et de vitesses d'écoulement de l'air.	225
Tableau annexe 2 : méthodes de lavages mises au point pour chaque type de surface.	229
Tableau annexe 3 : raisons q associées aux surfaces utilisées.....	232

ANNEXES

Annexe A : étude de la distribution des températures de surface sur le verre et l'enduit de façade chauffés en soufflerie.

Annexe B : mise au point de la mesure de flux de dépôt sec de béryllium sur les éprouvettes urbaines.

ANNEXE A : ETUDE DE LA DISTRIBUTION DES TEMPERATURES DE SURFACE SUR LE VERRE ET L'ENDUIT DE FAÇADE CHAUFFES EN SOUFFLERIE

Le plateau chauffant utilisé, conçu spécialement pour ces expérimentations et cette soufflerie, est principalement composé de deux résistances plates en silicone collées à une plaque en aluminium, elle-même destinée à recevoir les éprouvettes posées à même et conduire la chaleur des résistances vers les éprouvettes. Cette conception basée sur deux résistances collées côte à côte engendre un chauffage non-uniforme de toute la surface du plateau. Cette répartition hétérogène des températures se retrouve logiquement à la surface des éprouvettes utilisées pour échantillonner les flux de dépôt sec. Des expérimentations, sans génération de l'aérosol de fluorescéine, ont été menées pour d'une part mesurer les températures des surfaces lorsque qu'un écart de température entre l'air et la surface était imposé (et le plus proche possible des écart de références fixés pour l'étude), pour d'autre part estimer l'écart de température réel entre chaque éprouvette et l'air.

MESURE DES TEMPERATURES DES SURFACES DE VERRE ET D'ENDUIT DE FAÇADE

Le but de ces mesures est de connaître les valeurs des températures sur les éprouvettes et sur des points latéraux, à côté des éprouvettes, utilisés pendant les expérimentations de dépôt à titre de référence. Tous les thermocouples utilisés sont référencés selon leur position en x (coordonnée longitudinale dans la veine) et en y (coordonnée latérale). Ces informations sur leurs positions exactes seront utiles ensuite pour mettre au point une loi d'estimation des températures sur l'ensemble des surfaces chauffées.

Afin de positionner les sept thermocouples à la fois sur et à côté des éprouvettes et d'avoir le plus d'informations possibles sur l'ensemble des surfaces chauffées, certains thermocouples sont positionnés sur le centre de chaque éprouvette et d'autres sont alignés sur un même côté de ces éprouvettes. La distribution des températures est considérée symétriquement répartie selon une symétrie axiale, avec un axe de symétrie dans le sens de l'écoulement, en $y = 320$ mm. Ainsi, les données enregistrées d'un côté de l'éprouvette sont représentatives des températures qui devraient être mesurées de l'autre côté. Cette hypothèse semble vérifiée grâce aux mesures symétriques réalisées lors des expérimentations de dépôt sec sur les surfaces chauffées. La différence entre chaque côté est en moyenne de 7,3 % pour l'enduit (les thermocouples autour du verre ne sont pas positionnés de façon aussi symétriques et montrent une erreur moyenne plus importante de l'ordre de 20 %).

Pour les mesures de répartition des températures, trois thermocouples sont positionnés à côtés des éprouvettes à trois fetchs différents. Quatre autres thermocouples sont positionnés sur l'axe de symétrie en $y = 320$ mm, trois aux mêmes fetchs que les thermocouples latéraux et un en aval des éprouvettes. Les mesures sont réalisées pour chaque écart de température de référence et chaque vitesse d'écoulement de l'air.

La Figure annexe 1 présente la répartition axiale et latérale des températures sur le verre et l'enduit de façade pour $\Delta T_{surface-air} = 10 \text{ K}$ et $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$.

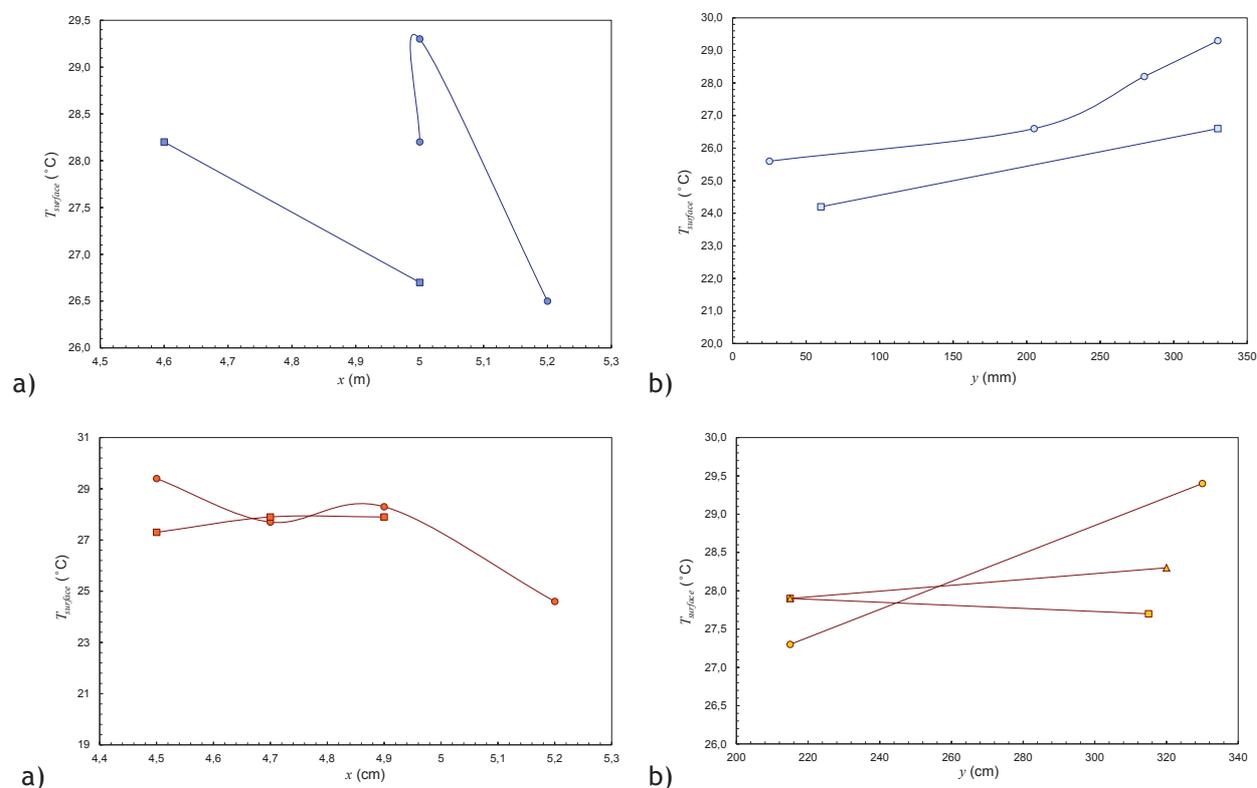


Figure annexe 1 : répartition des températures des surfaces de verre (a, b) et d'enduit de façade (c, d) selon la position (x, y) pour $\Delta T_{surface-air} = 10 \text{ K}$ et $u_{ref} = 5,0 \text{ m s}^{-1}$.

Verre : ● $y = 320 \text{ mm}$, ■ $y = 200 \text{ mm}$, ○ $x = 5,0 \text{ m}$, □ $x = 5,2 \text{ m}$;

enduit de façade : ● $y = 320 \text{ mm}$, ■ $y = 200 \text{ mm}$, ● $x = 4,5 \text{ m}$, ■ $x = 4,7 \text{ m}$, ▲ $x = 4,9 \text{ m}$.

Ces graphiques montrent que les températures mesurées peuvent varier déjà fortement selon la position considérée sur le plateau, pour les conditions de vitesse d'écoulement et de chauffage des surfaces rencontrées. Il semble cependant que pour un y donné la température soit relativement homogène entre $x = 4,5$ et $4,9 \text{ m}$, puis diminue pour un fetch croissant. Pour un x donné, les températures sont systématiquement plus forte au centre de la veine que sur les côtés avec un maximum qui doit être atteint sur l'axe de symétrie en $y = 320 \text{ mm}$.

Cette hétérogénéité des températures doit être bien estimée par extrapolation de ces mesures sur l'ensemble de la surface chauffée, afin de calculer les températures moyennes de surface des éprouvettes chauffées et exposées à l'aérosol de fluorescéine pour échantillonner des flux de dépôt sec.

MISE AU POINT D'UNE LOI DE REPARTITION DES TEMPERATURES DES SURFACES DE VERRE ET D'ENDUIT DE FAÇADE

Afin d'estimer les températures moyennes des éprouvettes de verre et d'enduit pour chaque couple d'écart de température et de vitesse d'écoulement d'air imposés, et d'après les séries de mesures réalisées au centre et sur le côté des éprouvettes, une combinaison linéaire de deux lois polynômiales de degré deux sur x et y est ajustée sur les points expérimentaux. Cette loi à ajuster sur les points expérimentaux est donnée par l'équation (1).

$$T(x, y) = a(x - f)^2 + b(x - f) + c + d(y - 30)^2 + e(y - 30) + T_{air} \quad (1)$$

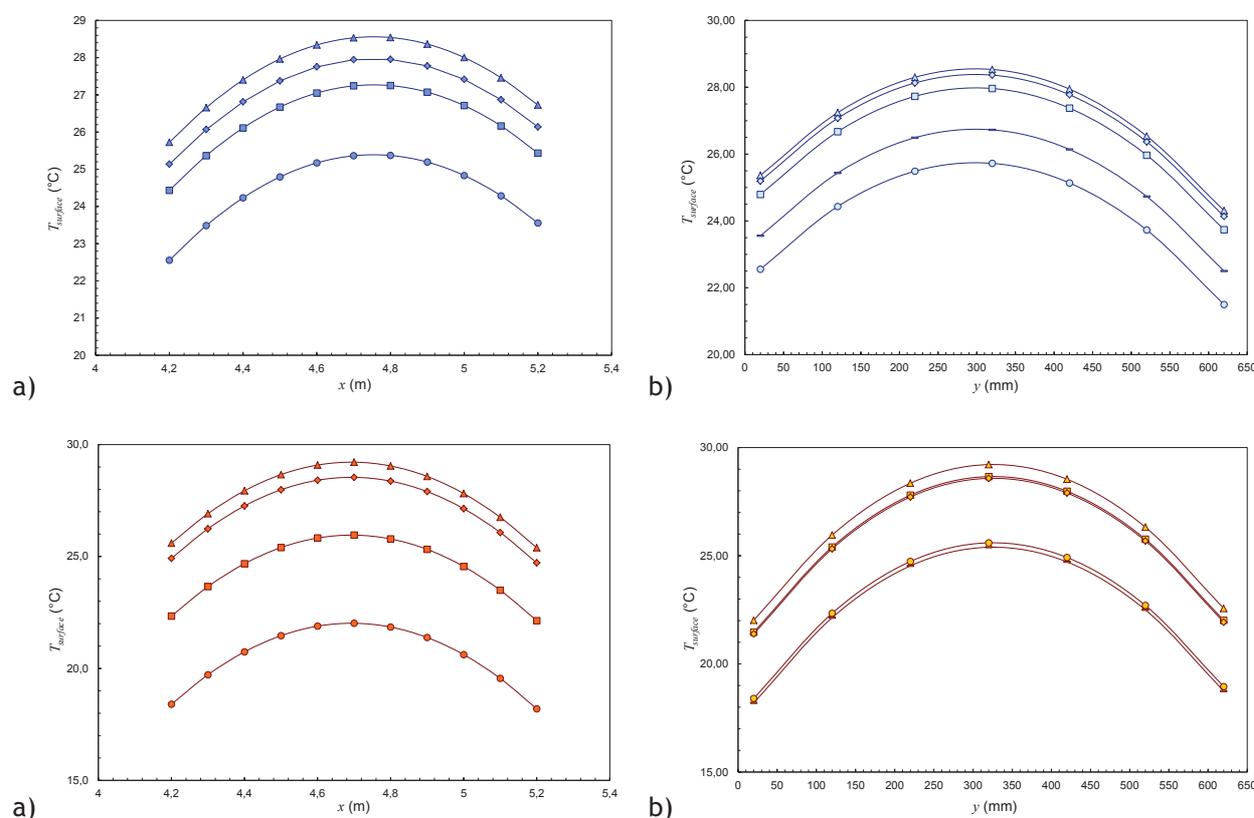


Figure annexe 2 : : températures des surfaces de verre (a, b) et d'enduit de façade (c, d) selon la position (x, y) pour $\Delta T_{surface-air} = 10$ K et $u_{ref} = 5,0$ m s⁻¹ calculées avec la loi ajustée.

- Verre : ● $y = 20$ mm, ■ $y = 120$ mm, ▲ $x = 320$ mm, ◆ $y = 420$ mm ;
 ○ $x = 4,2$ m, □ $x = 4,5$ m, △ $x = 4,7$ m, ◇ $x = 4,9$ m, ▢ $x = 5,2$ m ;
- enduit de façade : ● $y = 20$ mm, ■ $y = 120$ mm, ▲ $x = 320$ mm, ◆ $y = 420$ mm ;
 ○ $x = 4,2$ m, □ $x = 4,5$ m, △ $x = 4,7$ m, ◇ $x = 4,9$ m, ▢ $x = 5,2$ m.

Dans cette équation, les coordonnées x et y sont données en centimètres et relativement au plateau (avec l'origine (0 ; 0) du plateau au point (4,2 ; 0,002) pour des coordonnées en mètres). Les coefficients a , b , c , d , e et f sont les variables à ajuster aux point expérimentaux. Cette correction correspond concrètement à l'addition de degrés à la température de l'air T_{air} en fonction de la position considérée sur le plateau pour calculer la température imposée par le chauffage.

Le Tableau annexe 1 donne les valeurs des coefficients ajustés pour le verre et l'enduit de façade. La Figure annexe 2 présente les distributions de températures calculées avec cette loi et ces coefficients pour le verre et l'enduit de façade, un écart de température de 10 K et un écoulement de 5,0 m s⁻¹.

Des erreurs relatives sur les températures calculées avec cette loi, par rapport aux températures mesurées lors des expérimentations de dépôt, sont calculées. Elles sont en moyenne de 3,6 % pour les estimations sur le verre et de 2,5 % pour l'enduit de façade.

ESTIMATION DES TEMPERATURES MOYENNES DES EPROUVETTES

Les températures des éprouvettes représentées dans les figures du Chapitre II sont calculées avec la loi mise au point précédemment. La température de chaque éprouvette peut être calculée en intégrant l'équation (1) sur l'ensemble de la surface de ces éprouvettes selon l'équation (2).

$$\bar{T}_{\text{épreuve}} = \frac{\int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} T(x, y) dx dy}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \quad (2)$$

$$\int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} T(x, y) dx dy = (y_2 - y_1) \left[\begin{aligned} &\frac{a}{3}(x_2^3 - x_1^3) - af(x_2^2 - x_1^2) + af^2(x_2 - x_1) \\ &+ \frac{b}{2}(x_2^2 - x_1^2) - bf(x_2 - x_1) + c(x_2 - x_1) + T_{\text{air}} \end{aligned} \right] \\ + (x_2 - x_1) \left[\begin{aligned} &\frac{d}{3}(y_2^3 - y_1^3) - 30d(y_2^2 - y_1^2) + 900d(y_2 - y_1) \\ &+ \frac{e}{2}(y_2^2 - y_1^2) - 30e(y_2 - y_1) \end{aligned} \right] \quad (3)$$

La forme intégrée de l'équation (1) est alors donnée par l'équation (3). Les températures des éprouvettes sont calculées en fonction de leurs coordonnées en x et y sur le plateau chauffant, de la température de l'air et des coefficients du Tableau annexe 1.

Tableau annexe 1 : valeurs des coefficients a , b , c , d , e et f à utiliser selon les couples d'écart de température et de vitesses d'écoulement de l'air.

Surface	u_{ref} (m s ⁻¹)	$\Delta T_{surface-air}$ (K)	a (K m ⁻²)	b (K m ⁻¹)	c (K)	d (K m ⁻²)	e (K m ⁻¹)	f (10 ⁻² m)
Verre	1,3	2,2 ± 0,1	-1,1 10 ⁻⁴	1,3 10 ⁻³	2,3	-2,6 10 ⁻³	-3,7 10 ⁻³	6,8
		6,8 ± 0,1	-6,9 10 ⁻⁴	4,5 10 ⁻³	6,7	-2,6 10 ⁻³	-1,1 10 ⁻²	49
		10,8 ± 0,1	-1,6 10 ⁻³	4,5 10 ⁻³	10	-4,7 10 ⁻³	-1,5 10 ⁻²	56
		30,5 ± 0,4	-4,6 10 ⁻³	-3,3 10 ⁻³	31	-1,1 10 ⁻²	-4,4 10 ⁻²	59
	5,0	2,4 ± 0,1	-1,5 10 ⁻⁵	-5,7 10 ⁻³	2,6	-1,8 10 ⁻³	-4,5 10 ⁻³	-19
		6,1 ± 0,1	-4,7 10 ⁻⁴	2,2 10 ⁻²	4,9	-3,0 10 ⁻³	-9,5 10 ⁻³	29
		10,6 ± 0,3	-9,2 10 ⁻⁴	2,9 10 ⁻²	9,6	-4,1 10 ⁻³	-1,8 10 ⁻²	40
		30,1 ± 0,1	-2,5 10 ⁻³	1,1 10 ⁻⁴	31	-9,2 10 ⁻²	-5,2 10 ⁻²	51
	9,9	1,8 ± 0,1	0	-2,3 10 ⁻³	1,9	-1,5 10 ⁻³	-4,6 10 ⁻³	-18
		5,6 ± 0,3	-8,3 10 ⁻⁵	-3,1 10 ⁻³	5,6	-3,4 10 ⁻³	-9,5 10 ⁻³	15
		10,3 ± 0,1	-3,9 10 ⁻⁴	-5,0 10 ⁻⁴	8,2	-4,3 10 ⁻³	-1,5 10 ⁻²	43
		28,0 ± 0,5	-2,7 10 ⁻⁴	-5,4 10 ⁻⁴	32	-9,5 10 ⁻²	-6,1 10 ⁻²	-47
Enduit de façade	1,3	2,2 ± 0,1	-2,8 10 ⁻⁴	2,2 10 ⁻²	1,7	-1,5 10 ⁻³	5,5 10 ⁻³	8,9
		5,6 ± 0,1	-7,6 10 ⁻⁴	5,9 10 ⁻²	4,5	-3,9 10 ⁻³	8,3 10 ⁻³	10
		9,8 ± 0,1	-1,5 10 ⁻³	1,2 10 ⁻¹	8,9	-7,7 10 ⁻³	1,4 10 ⁻²	12
		27,3 ± 0,5	-4,3 10 ⁻³	2,8 10 ⁻¹	30	-2,6 10 ⁻²	3,9 10 ⁻²	14
	5,0	1,6 ± 0,1	-3,2 10 ⁻⁴	2,8 10 ⁻²	1,6	-1,3 10 ⁻³	3,9 10 ⁻³	9,1
		4,3 ± 0,2	-8,0 10 ⁻⁴	6,5 10 ⁻²	4,0	-3,5 10 ⁻³	4,1 10 ⁻³	10
		9,1 ± 0,3	-1,5 10 ⁻³	1,1 10 ⁻¹	8,7	-7,7 10 ⁻³	9,1 10 ⁻³	11
		26,1 ± 0,7	-4,2 10 ⁻³	2,6 10 ⁻¹	30	-2,9 10 ⁻²	9,2 10 ⁻³	13
	9,9	1,7 ± 0,3	-5,7 10 ⁻⁴	4,9 10 ⁻²	2,2	-1,9 10 ⁻³	1,1 10 ⁻³	9,8
		3,8 ± 0,1	-9,0 10 ⁻⁴	7,5 10 ⁻²	3,7	-3,1 10 ⁻³	1,1 10 ⁻³	11
		7,9 ± 0,2	-1,6 10 ⁻³	1,2 10 ⁻¹	8,4	-7,4 10 ⁻³	3,6 10 ⁻³	12
		24,2 ± 0,9	-5,2 10 ⁻³	3,3 10 ⁻¹	30	-3,9 10 ⁻²	3,9 10 ⁻³	14

ANNEXE B : MISE AU POINT DE LA MESURE DE FLUX DE DEPOT SEC DE BERYLLIUM SUR LES EPROUVETTES URBAINES.

Connan *et al.* (2006) ont déjà utilisé le ^7Be comme traceur de l'aérosol atmosphérique pour mesurer des vitesses de dépôt sec sur des surfaces verticales de verre et d'enduit de façade. C'est à partir de leurs travaux que les techniques de remise en solution du ^7Be sont élaborées et mises au point pour les surfaces urbaines utilisées dans cette étude. Les surfaces urbaines doivent être lavées pour récupérer le béryllium 7 dans des solutions et, ensuite, mettre ces solutions de lavages dans des géométries qui sont mesurées par spectrométrie gamma. Les techniques de lavage ne sont pas forcément efficaces à 100 % et une faible quantité de ^7Be peut rester sur les surfaces urbaines après leur traitement. Des corrections sur les flux de dépôt sec doivent être apportées dans ce cas pour, au final, ne pas sous-estimer les vitesses de dépôt sec. Ces corrections sont tirées des résultats d'un travail de mise au point des techniques de lavage.

Le but est de trouver pour chaque surface la technique de lavage la plus efficace pour mettre en solution le maximum de ^7Be pour la mesure nucléaire, tout en limitant le temps de lavage et le volume de solution utilisé. Une formule de correction des activités en ^7Be doit aussi être recherchée pour prendre en compte l'efficacité limitée des techniques de lavage et ne pas sous-estimer le dépôt sec sur les surfaces urbaines.

MISE AU POINT DES TECHNIQUES DE LAVAGE DES EPROUVETTES

Les choix d'amélioration des techniques de lavage sont faits empiriquement, suite aux résultats acquis au fur et à mesure des expérimentations. Ces techniques ont donc évolué pour chaque surface au cours de l'étude jusqu'à ce que des techniques efficaces se dégagent. Une solution d'acide nitrique de pH 1 est utilisée pour laver les éprouvettes. Les lavages consistent en de multiples rinçages à la seringue (60 mL) pour les surfaces de verre, d'enduit de façade, de tuile, d'ardoise, de zinc et de bitume, et des immersions dans la solution acide pour les éprouvettes d'herbe synthétique (Figure annexe 3). Des bacs en aluminium sont utilisés pour récupérer les solutions de lavage sous les éprouvettes. La même solution de lavage sert à laver les 4 éprouvettes de chaque type de surface. Les seringues et les bacs en aluminium sont à usage unique pour chaque lot de quatre éprouvettes.

Suite aux premiers lavages des éprouvettes, des seconds voir des troisièmes lavages sont réalisés puis mesurés pour connaître les quantités de ^7Be restant sur les éprouvettes à la fin du premier lavage. Les essais de lavages multiples ne peuvent pas être réalisés pour toutes les surfaces, tous les mois, car le nombre d'échantillons mesurables par mois est limité par les capacités de métrologie nucléaire. Plus particulièrement à cause des temps de comptage long pour les échantillons peu concentrés en ^7Be .



Figure annexe 3 : rinçage à la seringue d'une éprouvette de bitume.

La mise au point consiste à trouver, par amélioration continue, le nombre adéquat de rinçages à la seringue pour retrouver un maximum de ${}^7\text{Be}$ en solution, en un minimum d'étapes et de manipulation des éprouvettes, donc en un minimum de temps. La Figure annexe 4 présente l'ensemble des résultats obtenus pour la mise au point des techniques de lavage.

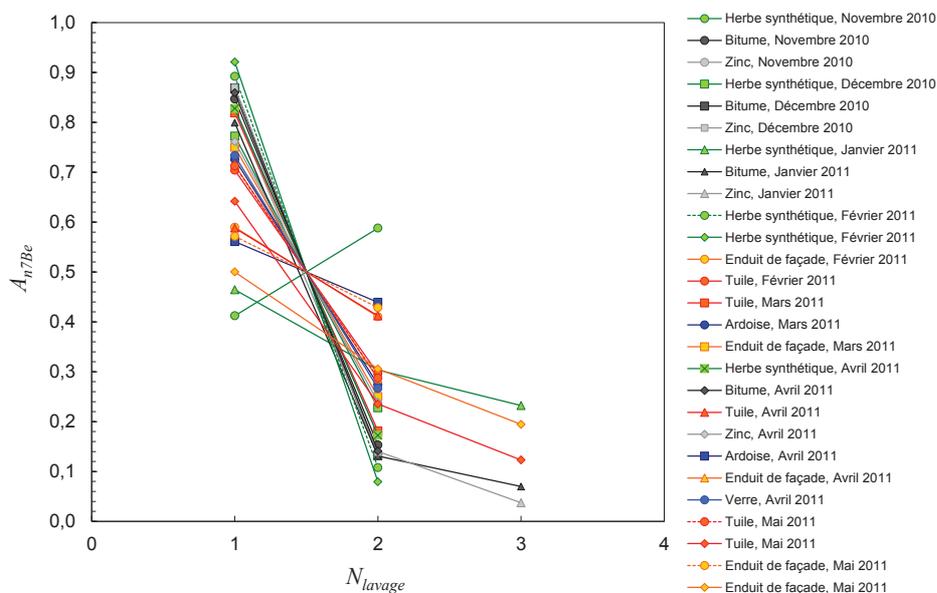


Figure annexe 4 : activités normalisées A_{n7Be} des tests de lavage de chaque type de surface.

N_{lavage} correspond au numéro de lavage de l'échantillon mesuré (égal à 1, 2 ou 3). $A_{n^{7Be}}$ est l'activité en 7Be du lavage N considéré, normalisée à la somme des activités de 7Be récupéré sur les éprouvettes lors des premiers, seconds voire troisièmes lavages réalisés. Le type de surface et le mois d'expérimentation correspondant sont reportés dans la légende.

Il apparaît sur cette figure que l'ensemble du 7Be n'est pas remis en solution dès le premier lavage, quel que soit le nombre de rinçages réalisés. Les activités des premiers lavages doivent être systématiquement corrigées pour ne pas sous-estimer les vitesses de dépôt présentées.

Le Tableau annexe 2 présente les méthodes les plus efficaces mises au point pour laver les éprouvettes de chaque surface.

Tableau annexe 2 : méthodes de lavages mises au point pour chaque type de surface.

Surface	Volume de solution d'acide nitrique pH 1 (mL)	Méthode de lavage des échantillons
Verre classique	700	- 4 rinçages à la seringue avec reprise de la solution d'acide dans le bac aluminium - 2 rinçages à la seringue avec de la solution d'acide « propre »
Enduit de façade	900	- 8 rinçages à la seringue avec reprise de la solution d'acide dans le bac aluminium - 3 rinçages à la seringue avec de la solution d'acide « propre »
Ardoise	900	- 8 rinçages à la seringue avec reprise de la solution d'acide dans le bac aluminium - 3 rinçages à la seringue avec de la solution d'acide « propre »
Tuile	900	- 8 rinçages à la seringue avec reprise de la solution d'acide dans le bac aluminium - 3 rinçages à la seringue avec de la solution d'acide « propre »
Zinc	700	- 4 rinçages à la seringue avec reprise de la solution d'acide dans le bac aluminium - 2 rinçages à la seringue avec de la solution d'acide « propre »
Bitume	900	- 5 rinçages à la seringue avec reprise de la solution d'acide dans le bac aluminium - 3 rinçages à la seringue avec de la solution d'acide « propre »
Herbe synthétique	900	- Immersion de l'échantillon côté brins dans la solution d'acide nitrique dans le bac aluminium (400 mL au départ) - Rinçage à la seringue des brins avec reprise de la solution d'acide dans le bac aluminium - Rinçage à la seringue des brins avec de la solution d'acide « propre »

CONDITIONNEMENT DES SOLUTIONS EN GEOMETRIE DE COMPTAGE

Les géométries utilisées pour le comptage par spectrométrie nucléaire sont des bidons de 50 mL. Les volumes de solution de lavage doivent être réduits pour obtenir finalement 50 mL de solution.

Les solutions de lavage sont transférées des bacs en aluminium dans des béchers de grands volumes (~ environ 1 L). Les bacs en aluminium sont rincés avec de la solution d'acide nitrique à pH 1 et les solutions de rinçage sont ajoutées aux solutions de lavage. Les béchers sont ensuite placés sur un bain de sable chauffant ou sur une plaque chauffante pour évaporer la solution d'acide nitrique jusqu'à obtention d'un volume inférieur à 50 mL (~ 10 - 20 mL) ou jusqu'à évaporation totale et obtention d'un dépôt sec dans le bécher (Figure annexe 5). Le bécher est ensuite rincé avec un petit volume de solution d'acide nitrique à pH 0 qui est versé dans le bidon de 50 mL. Le bécher est rincé une seconde fois avec de la solution à pH 0 qui est additionnée au premier volume et complète la géométrie de 50 mL alors prête pour le comptage.



Figure annexe 5 : bain de sable chauffant, plaques chauffantes et béchers (contenant des solutions de rinçage des éprouvettes) utilisés pour la réduction des volumes de solution.

Des tests de seconds lavages ont été réalisés sur les béchers suite à leur rinçage initial, pour vérifier qu'ils ne contiennent plus de ^7Be après leur utilisation. Les résultats de mesure de ces tests sont tous sous la limite de détections de la spectrométrie gamma ce qui indique que la totalité du ^7Be se retrouve dans la géométrie de comptage grâce à la méthode de rinçage du bécher utilisée.

Après le rinçage des éprouvettes, de la matière (poussière, pollens, déjections d'oiseaux) se trouvant éventuellement sur les éprouvettes arrive jusque dans la géométrie de comptage. Cette matière tend à se déposer au fond de la géométrie de comptage ou à flotter à la surface de la solution dans la géométrie. La Figure annexe 6 présente le résultat d'un test de filtration sur des échantillons, réalisé pour connaître la quantité de ^7Be contenue sur ces matières en suspension et qui pourrait éventuellement fausser la mesure de l'échantillon par spectrométrie gamma.

La légende présente les surfaces utilisées et les mois d'échantillonnage correspondant. Les résultats donnés correspondent aux mesures spectrométriques réalisées sur les échantillons issus du traitement des éprouvettes, aux mesures sur les filtrats et aux mesures sur les résidus issus de la filtration de ces échantillons. Il apparaît que la majorité du béryllium 7 est contenue dans les filtrats et que les résidus comportent très peu (voire pas) de béryllium 7. Lors des comptages, la présence de résidus déposés ou flottants dans l'échantillon n'influence donc pas la mesure car le ^7Be est en concentration homogène dans la géométrie. Dans la suite de l'étude, les échantillons ne sont donc pas filtrés avant d'être versés dans leur géométrie de comptage.

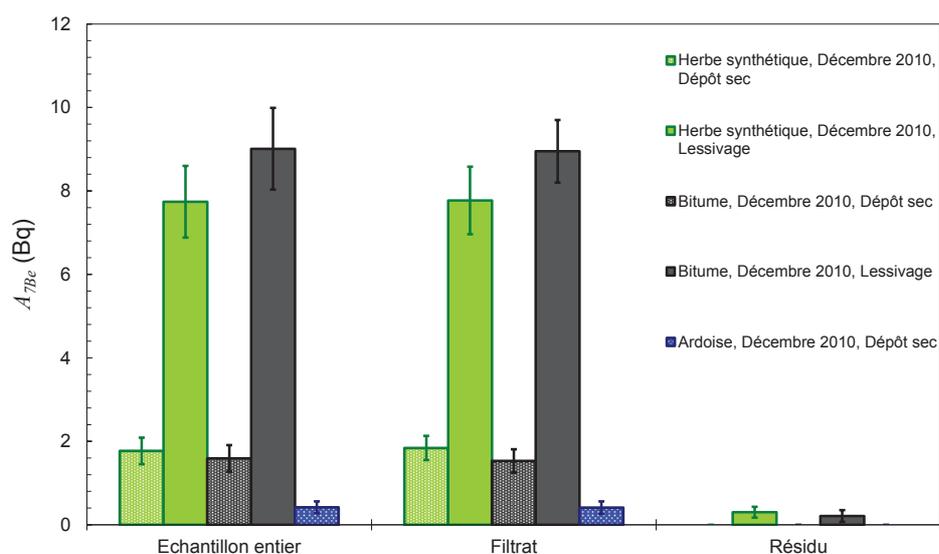


Figure annexe 6 : activités en ^7Be $A_{7\text{Be}}$ mesurées sur les solutions entières, les filtrats et les résidus.

CORRECTION DES ACTIVITES EN BERYLLIUM 7

Etant donné que la totalité du béryllium 7 n'est pas remobilisée dès le premier lavage, une correction est apportée pour estimer des vitesses de dépôt plus proches de celles qui devraient être réellement mesurées dans le cas idéal d'une mise en solution de la totalité du ^7Be dès le premier lavage des éprouvettes. Les résultats des premiers, seconds et troisièmes lavages montrent une décroissance de la quantité de ^7Be remobilisée à chaque lavage successif. Une loi de décroissance en suite géométrique (équation (4)) a été ajustée aux résultats des lavages successifs pour chaque surface afin de déterminer une raison q dépendante des surfaces et des méthodes de lavage.

$$A_{n+1} = A_n \times q \quad (4)$$

A_{n+1} (en Bq) est l'activité calculée du lavage $n+1$, A_n est l'activité mesurée ou calculée du lavage n (en Bq) et q (sans dimension) est la raison de la suite géométrique.

A_0 correspond à l'activité de l'échantillon mesuré, A_i à l'activité calculée ou mesurée du second lavage des éprouvettes et ainsi de suite. La Figure annexe 7 présente les ajustements de cette suite géométrique aux lavages réalisés sur le bitume comme exemple.

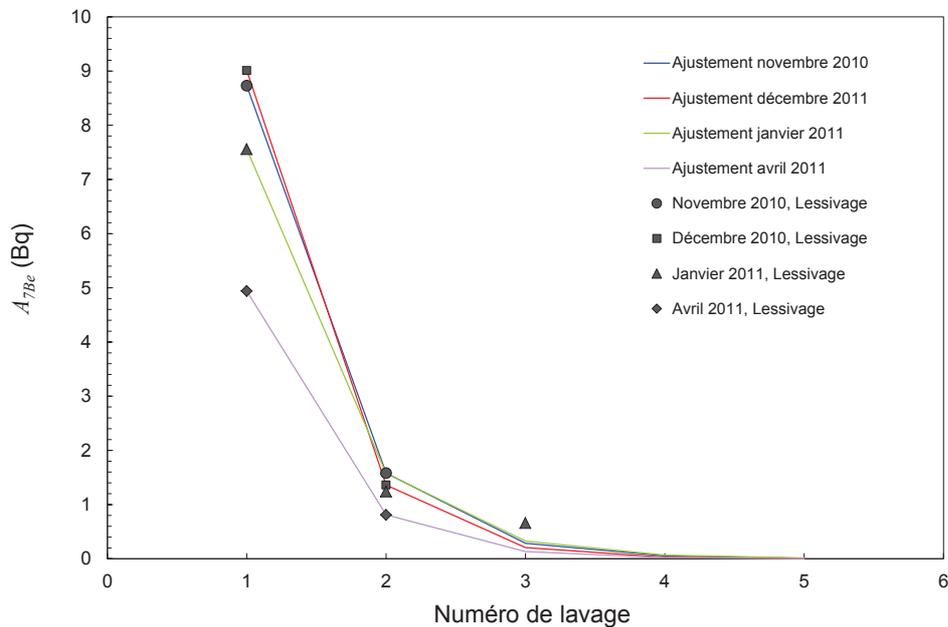


Figure annexe 7 : activités en ${}^7\text{Be}$ $A_{7\text{Be}}$ mesurées dans les solutions de rinçages successifs du bitume.

Etant donné les résultats obtenus, les corrections sur les activités sont réalisées en calculant les activités de seconds, troisièmes, quatrièmes et cinquièmes lavages à partir de l'activité A_0 du premier lavage et en sommant ces activités (équation (5)).

$$A_C = A_0 + A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \quad (5)$$

A_C (en Bq) est alors l'activité corrigée utilisée pour calculer les vitesses de dépôt corrigées. Le Tableau annexe 3 récapitule les raisons q associées aux techniques de lavages mises au point pour les surfaces.

Tableau annexe 3 : raisons q associées aux surfaces utilisées.

Surface	q (#)
Verre classique	0,37
Enduit de façade	0,57
Ardoise	0,12
Tuile	0,31
Zinc	0,50
Bitume	0,16
Herbe synthétique	0,22

Résumé

Etude phénoménologique du dépôt sec d'aérosols en milieu urbain : influence des propriétés des surfaces, de la turbulence et de la météorologie locale

Résumé

Actuellement, le dépôt sec d'aérosols en milieu urbain est peu connu du fait d'un manque de données. Ces connaissances sont pourtant indispensables pour comprendre les flux de polluants dans les villes et estimer l'exposition d'habitants à des rayonnements ionisants dans le cas d'aérosols radioactifs. Un apport de données permettrait en outre d'améliorer la modélisation du dépôt dans ce milieu. Une approche expérimentale originale est employée pour étudier le dépôt sec d'aérosols submicroniques sur des surfaces urbaines. L'association d'expérimentations en soufflerie et *in situ* et l'utilisation de traceurs permettent de mesurer des vitesses de dépôt sec et d'étudier les différents phénomènes physiques qui régissent ce dépôt en milieu urbain. Ces données sont associées à des conditions de météorologie et de turbulence quantifiées par des mesures. Cet ensemble permet de hiérarchiser l'influence des principaux phénomènes physiques pour chaque type d'expérimentation. Notamment, des phénomènes différents doivent être considérés prépondérants dans le cas d'expositions chroniques ou aiguës des surfaces urbaines aux particules atmosphériques.

Mots clés : aérosols, dépôt sec, environnement urbain, soufflerie, thermophorèse, traçage particulaire, vitesses de dépôt, particules fines.

Abstract

Phenomenological study of aerosol dry deposition in urban area: surface properties, turbulence and local meteorology influences

Abstract

Aerosol dry deposition is not much known for urban areas due to the lack of data. Knowledge on this phenomenon is necessary to understand pollutant fluxes in cities and to estimate inhabitant exposition to ionizing radiation of radioactive aerosols. A data providing could enable to enhance dry deposition models for these areas. An original experimental approach is performed to study submicron aerosol dry deposition on urban surfaces. Wind tunnel coupled to *in situ* experiments give results to study different physical phenomenon governing dry deposition. Dry deposition velocities are measured using aerosol tracers. These data are associated to turbulent and meteorological measured conditions. This database permits to classify the principal physical phenomenon for each experiment type. Finally, different phenomenon must be considered for chronic and acute exposition of urban surfaces to atmospheric particles.

Keywords: aerosols, dry deposition, urban environment, wind tunnel, thermophoresis, particulate tracing, deposition velocity, fine particles.