



HAL
open science

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA POLLUTION PARTICULAIRE: RÔLE DES PAROIS, RÔLE DE LA VENTILATION

Marc O. Abadie

► **To cite this version:**

Marc O. Abadie. CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA POLLUTION PARTICULAIRE: RÔLE DES PAROIS, RÔLE DE LA VENTILATION. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de la Rochelle, 2000. Français. NNT: . tel-00010527

HAL Id: tel-00010527

<https://theses.hal.science/tel-00010527>

Submitted on 10 Oct 2005

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.

THESE

présentée devant L'UNIVERSITE DE LA ROCHELLE

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR

Spécialité : GENIE CIVIL ET SCIENCES DE L'HABITAT

par

Marc ABADIE

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA POLLUTION PARTICULAIRE : RÔLE DES PAROIS, RÔLE DE LA VENTILATION

*Soutenance prévue pour l'après-midi du 19 Septembre 2000 devant la commission d'examen
composée de :*

F. ALLARD	Professeur Université de La Rochelle	Examineur
G. GUARRACINO	Maître de Conférences ENTPE - Lyon	Examineur
M.C. LEMAIRE	Ingénieur ADEME – Sophia Antipolis - Valbonne	Examineur
K. LIMAM	Maître de Conférences Université de La Rochelle	Examineur
J. PADET	Professeur Université de Reims	Rapporteur
J.J. ROUX	Professeur INSA de Lyon	Rapporteur

RESUME

La présente étude s'inscrit dans la thématique de la pollution particulaire de l'air intérieur et plus particulièrement dans le développement et la mise au point d'outils de prédiction du comportement de l'air chargé en particules à l'intérieur des bâtiments.

La première partie présente un état de l'art des connaissances de la pollution particulaire. Les différentes particules rencontrées à l'intérieur des bâtiments sont recensées et classées selon leurs origines et leurs tailles. Le problème de la prédiction du mouvement des particules est introduit par l'étude de la diversité des forces élémentaires qui s'exercent sur les particules.

La seconde partie est consacrée au développement d'un modèle de prédiction des concentrations en particules dans l'air à l'intérieur d'une enceinte monozone. Ce modèle considère l'air pollué comme une entité unique, et traite les échanges avec l'extérieur et les parois du bâtiment dans leurs globalités. Une expérimentation sur maquette a été mise au point afin d'étudier le dépôt des particules sur les revêtements du bâtiment. Cette étude a permis à la fois de quantifier ce dépôt et de mettre au point un principe de classification des revêtements vis-à-vis du dépôt particulaire.

La dernière partie traite de la modélisation numérique du comportement des particules au sein d'écoulements confinés tels que ceux rencontrés dans le bâtiment. L'extension à la troisième dimension de l'espace du code de calcul développé au LEPTAB, a été validée par l'étude de la dispersion des particules au sein d'un écoulement turbulent de grille. Deux lois caractérisant l'interaction entre une particule et un revêtement ont pu être testées et comparées par la simulation de l'expérimentation sur maquette.

Les perspectives à la fois sur le développement et la validation du modèle global ainsi que sur l'amélioration du code numérique de calcul de la dispersion des particules sont présentées et argumentées en conclusion.

MOTS - CLES : Pollution intérieure, particule, polluant, dépôt, revêtement pariétal, simulation numérique.

ABSTRACT

The present study is in line with the indoor air particle pollution and more precisely in the development and the perfecting of modelling tools.

The first part starts with a state of art of the indoor particle pollution knowledge. Indoor air particles are listed and classified depending on their origins and sizes. The difficulties of predicting the particle movement are put into relief by the study of numerous elementary forces acting on particles.

The second part is dedicated to the development of a indoor concentration prediction model in a monozonal room. Air particles are considered from a global point of view, particle pollution is deduced by identifying interactions between the entire polluted air and the building envelope. An experiment made on a scale model has been designed to study the particle deposition on wall textures. This experimental study permits to quantify the deposition and to elaborate a classification of wall textures versus particle pollution.

The last part deals with numerical simulations of particle transport in confined flows such as those encountered in buildings. The development of the LEPTAB particle dispersion numerical model permits to estimate the particle trajectories in the three-dimensional space. Our contribution consists in introducing wall - particle interaction laws to take into account real building textures. These wall laws are based on the results of the experimental study made on a scale model.

Perspectives on the development and on the validation of the global model and on the improvement of the particle dispersion numerical code are presented and discussed in the conclusion.

KEYWORDS : Particle, pollutant, deposition, wall texture, indoor pollution, scale model.

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	5
ABSTRACT	6
SOMMAIRE	8
NOMENCLATURE	14
INTRODUCTION	18
I. POLLUTION DE L’AIR	24
I.1. Pollution particulaire de l’air	24
I.1.1. Particules et aérosols	24
I.1.2. Emissions et formations des particules	24
I.1.3. Dimension des particules	26
I.1.4. Forme des particules	27
<i>I.1.4.1. Particules solides</i>	27
<i>I.1.4.2. Particules fluides</i>	28
<i>I.1.4.3. Facteurs de forme</i>	28
I.1.5. Conclusion	29
I.2. Pollution particulaire à l’intérieur des bâtiments	29
I.2.1. Particules biologiques	31
I.2.2. Particules minérales	32
<i>I.2.2.1. Minéraux provenant des systèmes d’humidification</i>	32
<i>I.2.2.2. Fibres d’amiante</i>	32
<i>I.2.2.3. Fibres minérales synthétiques</i>	33
<i>I.2.2.4. Poussière de plomb</i>	34
I.2.3. Produits de combustion	34
<i>I.2.3.1. Particules extérieures</i>	35
<i>I.2.3.2. Fumée de cigarette</i>	35
I.2.4. Particules radioactives	36
I.2.5. Conclusion	36
I.3. Mouvement des particules	36
I.3.1. Mouvement brownien et diffusion	36
<i>I.3.1.1. Coefficient de diffusion</i>	36
<i>I.3.1.2. Libre parcours moyen d’une particule</i>	40
<i>I.3.1.3. Dépôt par diffusion</i>	41
I.3.2. Force de Gravité	43

I.3.2.1. Région de Stokes : $Re < 1$	43
I.3.2.2. Région de transition et de Newton : $Re > 1$	45
I.3.2.3. Dépôt tranquille et dépôt agité	46
I.3.3. Coalescence	48
I.3.3.1. Coalescence monodispersée	48
I.3.3.2. Coalescence polydispersée	50
I.3.3.3. Coalescence cinématique	51
I.3.4. Forces Radiométriques	52
I.3.4.1. Thermophorèse	52
I.3.4.2. Photophorèse	54
I.3.4.3. Pression de radiation	54
I.3.4.4. Diffusiophorèse	55
I.3.4.5. Electrophorèse	55
I.3.5. Conclusion	56
I.4. Interaction particule – paroi	57
I.4.1. Force d’adhérence	57
I.4.1.1. Force de van der Waals	57
I.4.1.2. Force électrostatique	59
I.4.1.3. Tension superficielle	59
I.4.1.4. Expression empirique	60
I.4.2. Détachement des particules	60
I.4.3. Ricochet des particules	61
I.4.4. Conclusion	62
I.5. Conclusion	62
II. APPROCHE GLOBALE DU PHÉNOMÈNE DE DÉPÔT PARTICULAIRE – CARACTÉRISATION DES REVÊTEMENTS	66
II.1. Principe	66
II.1.1. Modélisation des échanges particulaires	66
II.1.2. Echanges avec l’extérieur	67
II.1.3. Dépôt de particules	68
II.1.4. Remise en suspension	69
II.1.5. Source interne de particules	70
II.1.6. Conclusion	70
II.2. Etude Bibliographique du dépôt particulaire	71
II.2.1. Principe fondamental	71
II.2.2. Etudes sur site	72
II.2.3. Etudes en modèles réduits	74
II.2.4. Conclusion	76

II.3. Expérimentation – Résultats	76
II.3.1. Dispositif expérimental	76
II.3.2. Protocole expérimental	78
II.3.3. Détermination de la constante globale de dépôt	78
II.3.4. Résultats des mesures expérimentales	79
II.3.4.1. Etude n°1	79
II.3.4.2. Etude n°2	80
II.3.4.3. Comparaison avec les études antérieures	81
II.3.5. Conclusion	82
II.4. Caractérisation des revêtements	82
II.4.1. Revêtements du bâtiment	82
II.4.1.1. Peintures	82
II.4.1.2. Sols plastiques	83
II.4.1.3. Sols textiles	83
II.4.1.4. Revêtements céramiques	84
II.4.1.5. Revêtements en pierre	84
II.4.1.6. Parquets	85
II.4.1.7. Papiers peints	85
II.4.1.5 Conclusion	85
II.4.2. Analyse de surface	85
II.4.2.1. Méthodes d'analyse de surfaces	85
II.4.2.2. Analyses des revêtements étudiés	86
II.4.2.3. Conclusion	88
II.4.3. Coefficient de captation	89
II.4.4. Conclusion	93
II.5. Décomposition des constantes globales de dépôt	94
II.5.1. Théorie de Crump et Seinfeld [CRU 83]	94
II.5.2. Application à une enceinte cubique	98
II.5.2.1. Dépôt sur le sol	98
II.5.2.2. Dépôt sur le plafond	99
II.5.2.3. Dépôt sur une paroi verticale	99
II.5.3. Coefficient de dépôt pour l'ensemble des parois	99
II.5.4. Application à l'enceinte d'étude	100
II.5.5. Constantes de dépôt pour les couples revêtement – particule étudiés	103
II.6. Etude de cas	106
II.6.1. Introduction	106
II.6.2. Cas d'étude	106
II.6.2.1. Caractéristiques du logement	106
II.6.2.2. Echanges aérauliques	108
II.6.2.3. Concentration extérieure	109

II.6.2.4. Sources intérieures	110
II.6.2.5. Indice de qualité de l'air	110
II.6.3. Simulations	111
II.6.3.1. Effet de la prise en compte du dépôt	111
II.6.3.2. Migration d'une source de pollution à partir de la chambre 1	113
II.6.3.2. Migration d'une source de pollution à partir de la cuisine	115
II.6.3.3. Migration d'une source de pollution à partir de l'escalier	118
II.6.4 Conclusion sur l'étude de cas	119
II.7. Conclusion	120
III. SIMULATION NUMÉRIQUE	124
III.1. Motivation – objectifs	124
III.2. Modélisation numérique de la dynamique particulaire	124
III.2.1. Méthodes existantes	124
III.2.1.1. Introduction	124
III.2.1.2. Principe	125
III.2.2. Forces extérieures	127
III.2.3. Modélisation de l'écoulement fluide	129
III.2.4. Génération des vitesses instantanées de l'écoulement fluide	130
III.2.4.1. Modèle de Gosman et Ioannides [GOS 81]	130
III.2.4.2. Modèle de Lu et al. [LU 92]	131
III.2.4.3. Conclusion	133
III.3. Etude de la dispersion particulaire dans un écoulement turbulent de grille	134
III.3.1. Motivations	134
III.3.2. Configuration géométrique	134
III.3.3. Détermination de l'écoulement fluide	136
III.3.3.1. Maillage du domaine fluide	136
III.3.3.2. Résolution des équations de Navier Stokes	137
III.3.3.3. Comparaison avec les mesures expérimentales	138
III.3.4. Dispersion particulaire au sein de l'écoulement	140
III.3.4.1. Choix du modèle de génération de fluctuation de vitesse	140
III.3.4.2. Modification du modèle de Gosman et Ioannides [GOS 81]	142
III.3.5. Conclusion	146
III.4. Etude numérique du dépôt sur les revêtements du bâtiment	147
III.4.1. Introduction	147
III.4.2. Détermination de l'écoulement fluide	147
III.4.2.1. Maillage du domaine	147
III.4.2.2. Résolution des équations de Navier Stokes	149
III.4.2.3. Comparaison avec les mesures expérimentales	151

III.4.3. Loi de paroi n°1 : probabilité de dépôt	151
<i>III.4.3.1. Principe</i>	151
<i>III.4.3.2. Simulations</i>	152
<i>III.4.3.3. Résultats</i>	153
<i>III.4.3.4. Dépôt à l'intérieur de l'enceinte</i>	156
III.4.4. Loi de paroi n°2 : vitesse critique de rebond	157
<i>III.4.4.1. Principe</i>	157
<i>III.4.3.2. Simulations</i>	159
<i>III.4.3.3. Résultats</i>	159
<i>III.4.3.4. Dépôt à l'intérieur de l'enceinte</i>	160
III.4.5. Conclusion sur les modèles de parois	161
III.5. Conclusion	162
ANNEXE 1 : NORMES SUR LA QUALITE DE L'AIR	170
ANNEXE 2 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL	172
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	186

NOMENCLATURE

Lettres latines

A	constante de Dahneke	-
B	mobilité d'une particule	$\text{cm dyn}^{-1} \text{s}^{-1}$
c	vitesse de la lumière	m s^{-1}
\bar{c}	vitesse moyenne thermique d'une particule	m s^{-1}
c_{rms}	moyenne quadratique des vitesses d'une particule	m s^{-1}
C	concentration en particules dans l'air	$\text{kg ou nombre} \cdot \text{m}^{-3}$
C_a	coefficient de masse ajoutée	-
C_C	coefficient de Cunningham	-
C_D	coefficient de traînée	-
C_{Di}	concentration en particules déposées	$\text{kg ou nombre} \cdot \text{m}^{-3}$
C_{ext}	concentration extérieure en particules dans l'air	$\text{kg ou nombre} \cdot \text{m}^{-3}$
C_h	coefficient de Basset	-
C_i	concentration intérieure en particules dans l'air	$\text{kg ou nombre} \cdot \text{m}^{-3}$
$C_{int/ouv}$	concentration intérieure en particules dans l'air au niveau de l'ouverture	$\text{kg ou nombre} \cdot \text{m}^{-3}$
d_a	diamètre aérodynamique d'une particule	μm
d_p	diamètre d'une particule	μm
d_{p0}	diamètre initiale d'une particule	μm
D	coefficient de diffusion	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
D_e	coefficient de diffusion turbulente	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
e	charge d'un électron	C
e_r	coefficient de restitution	-
E	intensité du champ électrique	V m^{-1}
$E_{adh.}$	énergie d'adhérence du couple particule - paroi	J
E_c	exposition au polluant	$\mu\text{g m}^{-3}$
E_c	énergie cinétique d'une particule	J
f	coefficient de pénétration	-
f_{ii}	fonction de corrélation temporelle	-
F_{adh}	force d'adhérence	N
F_D	force de traînée	N

F_{Diff}	force de diffusion moléculaire	N
F_e	force électrostatique	N
F_s	force de tension superficielle	N
F_{pr}	force de pression de radiation	N
F_{Th}	force de thermophorèse	N
F_x, F_y, F_z	Somme des forces extérieures suivant x, y et z	N kg ⁻¹
g	accélération gravitationnelle	m s ⁻²
g_{ii}	fonction de corrélation spatiale	-
I	intensité du rayonnement lumineux	Cd
IQA	indice de la qualité de l'air	-
J	densité de flux	kg ou nombre m ⁻² s ⁻¹
k	fonction de l'énergie cinétique turbulente	m ² s ²
k_B	constante de Boltzmann	-
\vec{k}	vecteur unitaire, vertical descendant	-
k_a	conductivité thermique de l'air	W m ⁻¹ K ⁻¹
k_e	mesure de l'intensité de l'écoulement turbulent	m ²⁻ⁿ s ⁻¹
k_{lam}	hauteur de rugosité en régime laminaire	µm
k_p	conductivité thermique d'une particule	W m ⁻¹ K ⁻¹
k_{turb}	hauteur de rugosité en régime turbulent	µm
K	coefficient de coalescence	-
K_c	coefficient de captation	-
K_{GI}	coefficient multiplicateur des fluctuations	-
K_n	nombre de Knudsen	-
L	largeur de l'enceinte	m
L_e	dimension caractéristique d'un tourbillon	m
n_{mod}	coefficient modérateur de l'effet transverse des tourbillons	-
n_0	concentration à l'infini ou à l'instant initial	kg ou nombre . m ⁻³
$\vec{n}(x)$	vecteur unitaire, normal à la paroi	-
N_c	nombre de collisions sur une particule	-
$N(t)$	nombre de particules qui se déposent à l'instant t	-
P	pression de fluide	Pa
P_d	probabilité de dépôt	
p_o	pression osmotique	Pa

Ra	coefficient de rugosité, écart moyen par rapport à la ligne moyenne du profil	μm
Rp	coefficient de rugosité, profondeur d'aplanissement de la surface	μm
s_g	coefficient d'orientation de parois (-1 pour le plafond, 0 pour les parois verticales et 1 pour le sol)	-
S	surface géométrique	m^2
S_p	surface potentielle de dépôt	m^2
S_i	source interne de particules	kg ou $\text{nb} \cdot \text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$
t	temps	s
t_e	durée de vie du tourbillon	s
t_r	temps de résidence de la particule dans le tourbillon	s
T	température absolue	K
u, v, w	composantes fluctuantes de la vitesse du fluide	m s^{-1}
\vec{u}	vecteur vitesse instantanée du fluide	m s^{-1}
\vec{u}_p	vecteur vitesse instantanée de la particule	m s^{-1}
u_p, v_p, w_p	composantes fluctuantes de la vitesse de la particule	m s^{-1}
U	vitesse totale du fluide	m s^{-1}
\bar{U}	vitesse moyenne du fluide suivant x	m s^{-1}
U_p	vitesse totale de la particule	m s^{-1}
U_{paroi}	composante de la vitesse parallèle à la paroi	m s^{-1}
U_r	vitesse relative de la particule par rapport au fluide	m s^{-1}
V	volume d'étude	m^3
VRI	valeur à risques importants	$\mu\text{g m}^{-3}$
VRL	valeur à risques limités	$\mu\text{g m}^{-3}$
V_C	vitesse critique de rebond d'une particule	m s^{-1}
V_D	vitesse due à l'agitation moléculaire	m s^{-1}
V_d	vitesse globale de dépôt	m s^{-1}
V_{dep}	vitesse de dépôt	m s^{-1}
V_g	vitesse de sédimentation gravitationnelle	m s^{-1}
V_{max}	vitesse maximale dans la couche limite	m s^{-1}
V_t	vitesse de thermophorèse	m s^{-1}
V_{TE}	vitesse d'électrophorèse	m s^{-1}

W_i	fluctuation de vitesse adimensionnée	-
x	distance à la paroi	m

Lettres grecques

$\Lambda_{1,2,3}$	échelles de longueurs eulériennes	-
α_i, β_i	variable aléatoire de distribution quelconque et de moyenne nulle	-
ε	taux de dissipation de l'énergie turbulente	-
γ_f	tension superficielle du fluide	N
γ_i	variable aléatoire gaussienne	-
κ	constante de Von Karman	-
λ_d	constante globale de dépôt	s ⁻¹
λ_{de}	paramètre de dépôt	s ⁻¹
λ_{di}	constante élémentaire de dépôt	s ⁻¹
λ_f	libre parcours moyen d'une molécule de fluide	m
λ_p	libre parcours moyen d'une particule	m
λ_r	coefficient de renouvellement d'air	s ⁻¹
λ_R	paramètre de remise en suspension	s ⁻¹
μ	viscosité dynamique du fluide	kg m ⁻¹ s ⁻¹
ν	viscosité cinématique	Pa s ⁻¹
ν_t	vitesse établie	m s ⁻¹
ρ	masse volumique du fluide	kg m ⁻³
ρ_p	masse volumique d'une particule	kg m ⁻³
$\tau_{1,2,3}$	échelles intégrales temporelles lagrangiennes	-
τ_p	temps de relaxation (constante de temps) d'une particule	s

INTRODUCTION

Ces trente dernières années ont vu apparaître de plus en plus de problèmes sanitaires à l'intérieur des bâtiments. Depuis la crise de l'énergie de 1973, afin de limiter les pertes thermiques et diminuer les consommations énergétiques, l'isolation des bâtiments a été fortement augmentée. Par conséquent, les échanges entre l'extérieur et l'intérieur des bâtiments ont été grandement diminués et la pollution de l'air intérieur s'est considérablement intensifiée.

La qualité de l'air des locaux, d'habitation ou tertiaires, est non seulement devenue un thème de recherche majeur au cours des années 90 mais a également interpellé les décideurs. Ainsi, le ministère de l'environnement, par la création à la fin de l'année 1999 d'un observatoire de la qualité de l'air intérieur, a montré la nécessité d'organiser les études sur la qualité de l'air intérieur. Cet observatoire, destiné à organiser et mettre en valeur à l'échelle nationale le suivi de la qualité de l'air dans les bâtiments, a pour objectifs *d'identifier les polluants* par la caractérisation de leurs *concentrations* et par le suivi de leurs *évolutions* dans le temps et l'espace.

Cet engouement pour la qualité de l'air intérieur a également conquis les constructeurs qui, par la création en 1995 de l'association Haute Qualité Environnementale (HQE), montrent l'intérêt porté à mieux maîtriser les impacts de la construction et de l'utilisation des bâtiments sur l'environnement extérieur mais également à créer un environnement intérieur satisfaisant c'est-à-dire à apporter des conditions de vie confortables et saines à l'intérieur du bâtiment.

Or il est remarquable de constater que, jusqu'à il y a peu de temps, si le terme de *pollution de l'air* faisait uniquement référence à la pollution d'origine gazeuse, les particules solides de l'air, en tant que quantités polluantes de l'air, ne peuvent plus être oubliées. Les récents évènements de pollution à l'amiante des locaux, ainsi que les problèmes de pollution atmosphérique liés aux particules rejetées par les véhicules à moteur thermiques, en sont une preuve. De plus, depuis le mois de mars 2000, la prise en compte des particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 10 μm (PM10) a enfin été intégrée dans le calcul de l'indice ATMO, indice qui caractérise la qualité de l'air atmosphérique. Son importance est

désormais considérée au même niveau que les composés gazeux comme le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre et l'ozone. Il faut noter également que, si les polluants cibles de l'observatoire de la qualité de l'air étaient principalement les polluants gazeux, les particules ont naturellement trouvé leurs places dans les campagnes de mesures à l'intérieur des écoles et autres bâtiments recevant du public.

La présente étude s'inscrit dans la thématique de la *pollution particulaire de l'air intérieur*, elle a pour but de développer et de mettre au point des outils d'évaluation de la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments.

L'étude bibliographique, qui est présentée en première partie, met en relief la difficulté de la prédiction des niveaux de concentration en particules à l'intérieur des bâtiments. En effet, cette prédiction passe par l'étude de l'interaction entre deux entités complexes : l'air chargé de particules et l'enveloppe du bâtiment.

La première de ces entités est très hétérogène puisque les particules rencontrées à l'intérieur des bâtiments sont d'origines diverses (biologiques, minérales, ou provenant de la combustion), de formes multiples (des particules de pollen parfaitement sphériques aux particules d'amiante en forme de bâtonnets), et de tailles variant de quelques dizaines à plusieurs centaines de micromètres. De plus, le mouvement de ces particules dépend de nombreuses forces de contact exercées par l'air (force de traînée, de poussée...) et de forces s'exerçant à distance comme la force de gravité et les forces radiométriques.

L'enveloppe intérieure d'un bâtiment présente également une grande quantité de revêtements de caractéristiques variées. La seconde partie de cette étude, par le recensement de ces revêtements, dresse l'étendu de cette diversité qui englobe à la fois les surfaces lisses et dures des marbres et céramiques et les surfaces rugueuses et souples des moquettes et tapis.

Dans un premier temps et devant une telle complexité, il nous a paru nécessaire de traiter le problème de manière globale. Le modèle utilisé considère l'air pollué comme une entité unique, et traite les échanges avec l'extérieur et les parois du bâtiment dans leurs globalités. Or il s'avère que le phénomène de dépôt de particules sur les parois est aussi important que les transferts de particules de l'extérieur vers l'intérieur. Une expérimentation sur maquette a donc été mise au point afin d'étudier le dépôt des particules sur les

revêtements habituellement rencontrés à l'intérieur du bâtiment. Cette étude a permis à la fois de quantifier ce dépôt et de mettre au point un principe de classification des revêtements vis-à-vis du dépôt particulaire. Une étude de cas termine ce chapitre, elle consiste à appliquer les résultats obtenus dans l'enceinte expérimentale à l'étude de la pollution particulaire d'un logement réel. L'importance du dépôt pariétal est montrée et un indice de qualité particulaire de l'air est décrit et calculé.

Dans un second temps, le développement d'un outil numérique capable de prédire les trajectoires des particules solides et de déterminer précisément les lieux de contact avec les parois s'est logiquement imposé pour une étude plus poussée de l'interaction entre une particule et un revêtement de paroi. La première partie de ce travail a consisté à l'extension à la troisième dimension de l'espace du code de calcul de la dispersion des particules développé par Sandu [SAN 99] au Laboratoire d'Etudes des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment (LEPTAB). Par sa confrontation à une étude expérimentale de référence, l'étude de la dispersion des particules au sein d'un écoulement turbulent de grille a permis la mise au point de ce code. En seconde partie, l'expérimentation sur maquette a été simulée, deux lois caractérisant l'interaction entre une particule et un revêtement ont pu être testées et comparées.

En conclusion, un rappel des différents points abordés au cours de cette étude est effectué et les perspectives quant au développement du modèle global et à l'amélioration du code numérique de calcul de la dispersion des particules sont discutées.

Chapitre I
-
Pollution de l'Air

I. POLLUTION DE L'AIR

I.1. POLLUTION PARTICULAIRE DE L'AIR

I.1.1. Particules et aérosols

Les particules sont des corps indépendants séparés de l'environnement par une interface bien définie. On distingue trois types de particules :

- les particules solides,
- les particules liquides, et
- les particules gazeuses.

Les particules rigides (la plupart des particules solides) sont les particules qui peuvent supporter des contraintes normales et tangentielles de valeurs élevées sans subir de déformations importantes.

On considère comme particules uniquement les corps qui sont inertes du point de vue biologique et qui ne sont pas autopropulsés.

Les particules forment avec le gaz qui les entoure un aérosol. Selon leur type, les aérosols sont stables pour des durées de quelques secondes jusqu'à une année, voire plus.

Le tableau I.1 présente différents domaines de suspension de particules dont les aérosols forment une petite partie:

	Type de particules en suspension		
Milieu	Gaz	Liquide	Solide
Gaz	-	le brouillard	la poussière
Liquide	La mousse	l'émulsion	les suspensions
Solide	l'éponge	le gel	les alliages

Tableau I.1 : Exemple de domaines de suspension de particules [HIN 82]

I.1.2. Emissions et formations des particules

Les émissions naturelles de particules proviennent de l'abrasion des sols (phénomènes d'érosion), des embruns marins, des éruptions volcaniques, des feux de forêt et de phénomènes biologiques. Au niveau mondial, elles sont de l'ordre de 2105 Mt/an.

Les émissions anthropiques de particules proviennent de la combustion, des procédés industriels, des transports, des incinérateurs de déchets... Ces émissions représentent au niveau mondial environ 408 Mt/an. Le tableau I.2 présente les émissions anthropiques globales en France de 1980 à 1994.

	1980	1985	1990	1991	1992	1993	1994
Production d'énergie	118	59	17	21	18	12	12
Industrie + autres	253	172	133	125	116	103	98
Résidentiels et tertiaires	25	19	11	12	10	9	8
Transport routier	40	46	73	77	81	85	88
Total	436	296	234	236	225	209	207

Tableau I.2 : Emissions anthropiques globales des particules en France (en kt) [DGR 96]

On distingue deux types de particules ayant des modes de formation différents :

- les grosses particules (diamètre > 10 μm) d'origine naturelle sont principalement émises par des processus mécaniques et des processus biologiques. Parmi les procédés mécaniques, citons la friction du vent sur des surfaces solides (érosion des sols), et les surfaces liquides (la formation d'embruns marins); parmi les biologiques il y a notamment la dispersion des spores et des pollens.

- les fines particules (diamètre < 10 μm) peuvent être émises en tant que telles par les procédés de combustion et des procédés industriels. Elles peuvent aussi résulter de la condensation de gaz à faible température de condensation ou encore de réactions chimiques entre gaz donnant lieu à la formation d'un solide (formation de sulfates, d'ions ammonium). La formation de fines particules s'opère en deux étapes (figure I.1). D'abord, par la formation de petits agrégats, soit par réaction chimique, soit par condensation de gaz. Ces agrégats, composés de quelques molécules, ont des dimensions très faibles. Ils peuvent servir de noyau pour la condensation d'autres molécules de gaz ou coaguler avec d'autres agrégats pour former des particules de taille plus importante, ce qui constitue la seconde étape.

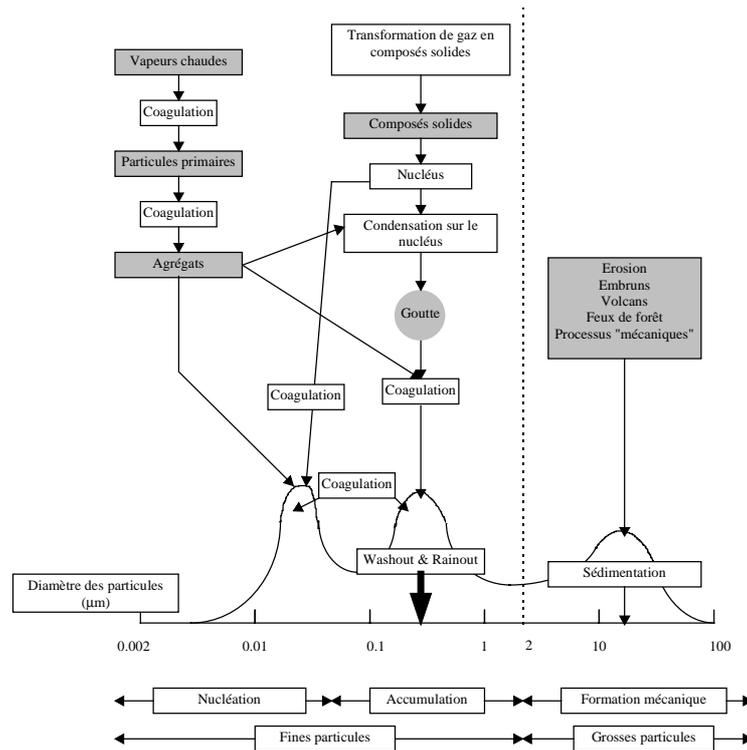


Figure I.1 : Formations naturelles des particules [WHI 75]

La composition de ces particules est très variable. En effet, les grosses particules contiennent des éléments abondants dans la couche terrestre et les sels marins tels que Al, Ca, Fe, K, Ti, Mn, Sr, Si, alors que les particules fines contiennent des sulfates, des nitrates, de l'ammonium résultant de la transformation dans l'air des oxydes de soufre et d'azote, de l'ammoniac ainsi que du carbone, des composés organiques et des métaux provenant entre autres des combustibles fossiles [CIT 96].

I.1.3. Dimension des particules

On considère comme dimension caractéristique pour une particule le diamètre d'une particule sphérique ayant une certaine caractéristique (masse, coefficient aérodynamique, libre parcours moyen...) de la même valeur que la particule réelle. Il est important de noter que presque toutes les propriétés d'un aérosol dépendent de la dimension des particules qui le composent. La figure I.2 présente la dimension des particules pour les aérosols que l'on trouve fréquemment dans l'atmosphère.

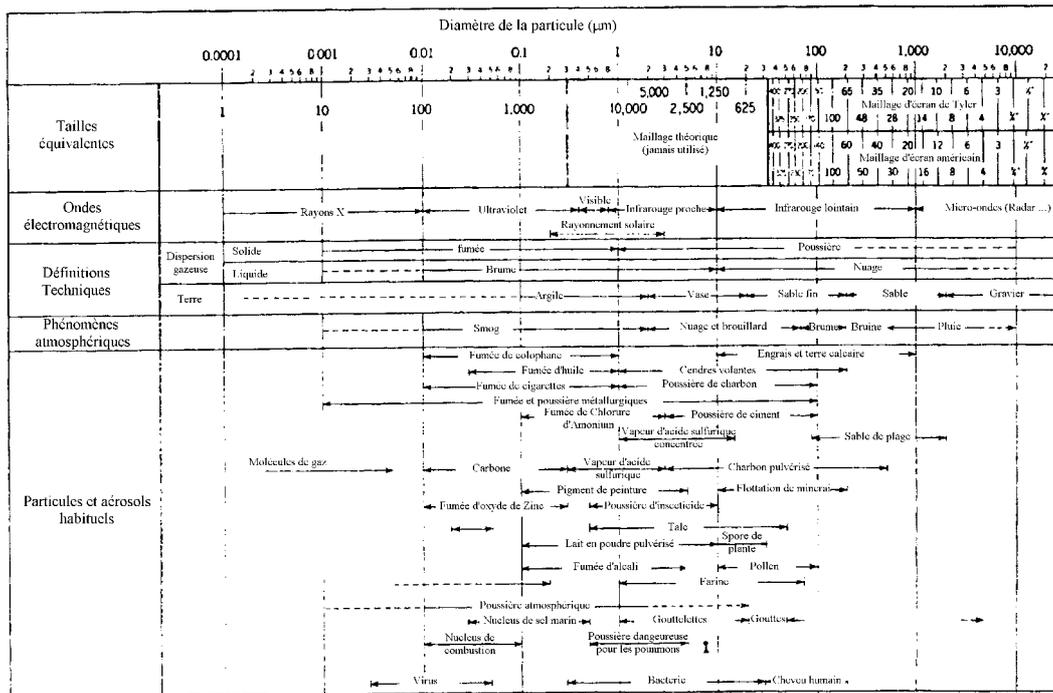


Figure I.2 : Tailles des particules pour les aérosols atmosphériques [HIN 82]

I.1.4. Forme des particules

Les particules solides sont d'une grande diversité de formes : de la forme sphérique des particules de pollen à la forme totalement irrégulière des particules minérales. Les particules fluides sont de formes moins variées, elles sont axisymétriques et dans certaines circonstances elles peuvent garder une forme sphérique.

I.1.4.1. Particules solides

Les particules axisymétriques sont les particules dont la forme peut être obtenue par la rotation d'une courbe fermée autour d'un axe. En fonction de l'axe choisi, deux formes peuvent être obtenues. Pour les distinguer, on utilise un coefficient d'aspect défini comme le rapport entre le diamètre maximal dans la direction parallèle à l'axe de rotation et le diamètre maximal dans la direction normale à l'axe de rotation. Les particules orthotropiques sont les particules qui sont symétriques par rapport à trois plans perpendiculaires. Les particules sphériques et isotropiques sont les particules qui ont la forme d'un polyèdre régulier ou une autre forme obtenue à partir d'un polyèdre régulier par des lissages ou des coupures symétriques.

Exemples : les cylindres, disques et sphéroïdes sont axisymétriques et orthotropiques ; les cônes sont axisymétriques mais ne sont pas orthotropiques ; aucun de ceux-ci ne sont

sphériques et isotropiques. Les parallélépipèdes sont orthotropiques mais le cube est le seul parallélépipède symétrique et isotropique.

1.1.4.2. Particules fluides

La caractéristique principale des particules fluides dans un milieu fluide est qu'elles se déforment jusqu'à l'équilibre des contraintes tangentielles et normales au niveau de l'interface qui délimite la particule du milieu fluide. Pour ces particules le domaine des formes qu'elles peuvent prendre est beaucoup plus restreint.

Pour les particules fluides au repos, il existe trois formes distinctes : les particules pendantes qui sont attachées à une surface d'où les forces de poussée tendent à les arracher, les particules sessiles qui sont comprimées par la force de poussée contre une plaque plane et les particules qui flottent à la surface d'un milieu fluide.

Pour les particules fluides en mouvement libre dans un milieu fluide, on distingue également trois formes distinctes : les particules sphériques, pour lesquelles si l'écart entre les différents diamètres n'excède pas 10%, les particules ellipsoïdales qui ne font pas parties de la première catégorie et qui ont une surface convexe, et les particules possédant la forme de coupes sphériques ou ellipsoïdales (les grosses particules fluides en mouvement ont tendance à s'aplatir et à adopter une forme proche des segments découpés d'une sphère).

1.1.4.3. Facteurs de forme

La plupart des particules qui ont un intérêt pratique ont une forme irrégulière et n'appartiennent donc à aucune des catégories énoncées. Pour l'élaboration de lois de comportement, on considère fréquemment que la particule est sphérique. Il est donc nécessaire d'apporter une correction par l'introduction d'un facteur de forme.

Une description empirique de la forme d'une particule est possible par la connaissance de deux des paramètres caractéristiques suivants : le volume de la particule, l'aire de la surface extérieure, l'aire de la projection de la particule et le périmètre de la projection de la particule. Les facteurs de forme sont définis par rapport à une sphère équivalente dont un des paramètres caractéristiques a la même valeur que celui de la sphère réelle.

De nombreux facteurs de formes ont été introduits. Pour mémoire, les plus utilisés sont : le facteur de forme volumétrique [HEY 62], le facteur de sphéricité, le facteur de circularité, les facteurs opérationnels de sphéricité et de circularité [WAD 33] et le facteur du périmètre équivalent [BOW 73].

I.1.5. Conclusion

Toutes ces particules, qui se différencient par leur taille, leur forme et leurs composants, sont toujours dans l'air en plus ou moins grande quantité. Si, dans l'air extérieur, les concentrations en particules sont habituellement suffisamment diluées (sauf dans certains cas où une quasi absence de vent alliée à d'autres facteurs comme la présence d'importantes sources rendent impossible une dilution convenable), il n'en est pas de même à l'intérieur des bâtiments où, par l'intermédiaire de la ventilation et des infiltrations, les particules tendent à s'accumuler. Ceci a pour effet de procurer des sensations de gêne et d'inconfort aux personnes présentes dans cet air pollué pouvant représenter un danger certain à plus ou moins long terme. Le chapitre suivant permettra de clarifier cette notion de pollution particulaire des ambiances intérieures et mettra en relief les différents polluants particuliers intérieurs ainsi que des dangers liés à leur présence.

I.2. POLLUTION PARTICULAIRE A L'INTERIEUR DES BATIMENTS

Depuis quelques années, un nombre croissant de scientifiques ([OWE 90], [STE 94], [ETK 94]...) ont montré que l'air à l'intérieur des maisons, des bâtiments pouvait être fortement pollué que ce soit dans un environnement industriel ou non. D'autres études indiquent que les gens passent 90 % de leurs temps à l'intérieur de bâtiments [CSH 96]. Donc, pour beaucoup de personnes, les risques pour leur santé seront plus grands à l'intérieur qu'à l'extérieur. De plus, les personnes exposées à la pollution intérieure pendant de longues périodes sont souvent les plus sensibles aux effets de cette pollution comme les enfants, les personnes âgées, les personnes souffrant de maladies respiratoires et cardio-vasculaires.

Les sources de pollution intérieure qui produisent des gaz ou des particules dans l'air sont les premières causes des problèmes de qualité de l'air intérieur. Une ventilation inadéquate peut augmenter ce niveau de pollution si elle n'est pas capable à la fois de diluer la pollution intérieure et de renouveler l'air intérieur. Des températures et/ou des humidités élevées peuvent également augmenter les concentrations de certains polluants particuliers.

Il y a plusieurs sources de pollution à l'intérieur des bâtiments [ALE 94] : la combustion par gaz, huile, kérosène, charbon, bois, de tabac ; les meubles et les matériaux plus ou moins détériorés, les isolations contenant de l'amiante, les moquettes et tapis plus ou moins humides ; les produits de nettoyage ; et, de pollution d'origine extérieure, le radon, les pesticides et la pollution de l'air extérieur. L'importance de ces différentes sources dépend de la façon dont les polluants particuliers sont émis ainsi que des dangers liés à ceux-ci. Dans

certain cas, des facteurs (comme l'âge de la source) sont importants. Des sources comme les matériaux de construction, les meubles... émettent de façon plus ou moins continue. D'autres sources, liées à l'activité humaine, émettent des polluants particuliers ponctuellement : le fait de fumer, l'utilisation de peintures... De fortes concentrations peuvent rester pendant de longues périodes dans l'ambiance après de telles activités.

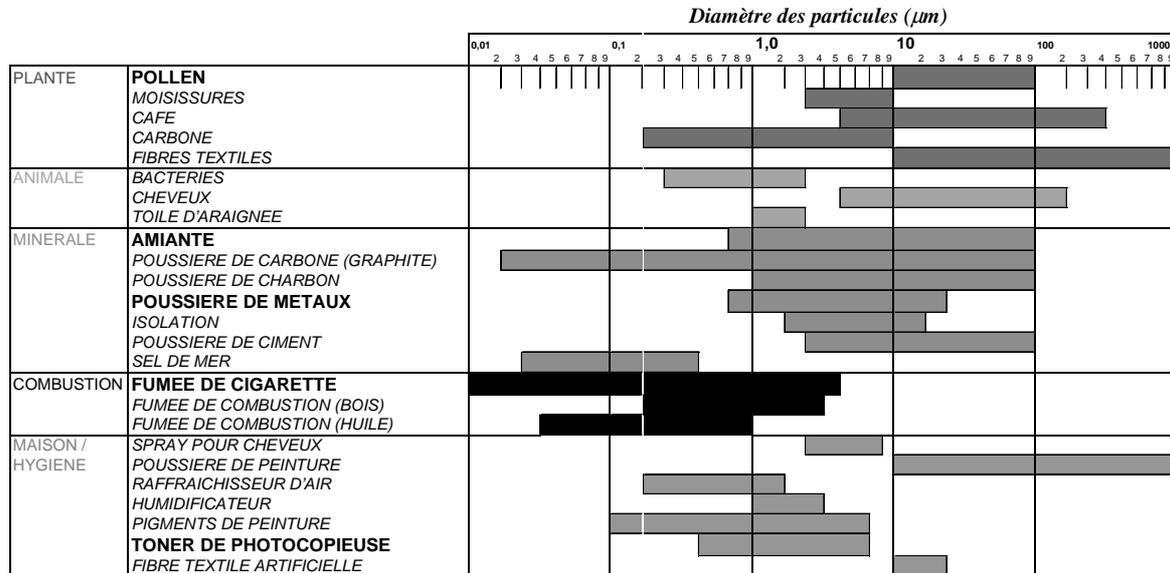


Figure 1.3 : Taille des particules intérieures [OWE 90]

	Diamètres (µm)	Masse inhalable (%)
Particules Inhalables (particules pouvant se déposer partout dans le système respiratoire)	0	100
	1	97
	2	94
	5	87
	10	77
Particules Thoraciques (particules pouvant se déposer partout dans les voies pulmonaires et la région d'échange gazeux)	0	100
	2	94
	4	89
	6	80.5
	8	67
	10	50
Particules Respirables (particules pouvant se déposer partout dans la région d'échange gazeux des poumons)	0	100
	2	97
	4	50
	6	17
	7	9

Tableau 1.3 : Respirabilité des particules en fonction de leur taille [ACG 91]

Les différents polluants particulaires trouvés à l'intérieur des bâtiments peuvent être classés comme suit [ETK 94] :

- Les particules biologiques : pollens, spores, moisissures, et autres produits comme les grains finement écrasés, le café...
- Les particules animales : bactéries, virus, parties d'insectes...
- Les particules minérales : amiantes, carbone, fibres synthétiques...
- Les particules provenant de la combustion : fumée de cigarette, cuisine, appareils de chauffage et industries, et
- Les particules radioactives : particules irradiées lors de la dégradation nucléaire du radon.

Toutes ces particules ont un diamètre qui varie essentiellement de 0.01 à 1000 micromètres (figure I.3). Il faut remarquer que ce sont surtout les particules dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres qui peuvent être dangereuses pour l'homme. En effet, les particules de cette taille pénètrent facilement dans le système respiratoire humain et peuvent ainsi se déposer dans des régions fragiles (tableau I.3).

I.2.1. Particules biologiques

La croissance ou la prolifération de colonies de micro-organismes et l'accumulation d'autres contaminants dans l'environnement intérieur sont souvent responsables d'effets sur l'homme comme les allergies, les maladies infectieuses, les problèmes respiratoires... [STE 94]. Les organismes microbiologiques qui vivent et se reproduisent à l'intérieur des bâtiments sont :

- Les virus (0.004 - 0.05 μm) : ce sont des organismes non cellulaires qui ont besoin d'acides nucléiques pour se reproduire.
- Les bactéries (0.06 - 0.7 μm) : ce sont des organismes unicellulaires de formes diverses qui sont capables de reproduction asexuée par division cellulaire.
- Les moisissures (3.0 - 200 μm) : ce sont des organismes assimilables aux plantes chlorophylliennes qui se reproduisent par production de spores.
- Les amibes (8.0 - 20 μm).

La prolifération microbologique nécessite une source de micro-organismes, de l'eau, des nutriments, une température appropriée... L'environnement intérieur des bâtiments apporte souvent ces besoins :

- Les sources de micro-organismes : air extérieur, système de ventilation, humidificateurs, matériaux et mobiliers du bâtiment, occupants, animaux, plantes...

- Les sources d'eau : fuites diverses, migration, condensation, humidificateurs, occupants, plantes, aquarium...
- Les sources de nutriments : poussière, boue, aliment, eau, plantes, détritiques, matériaux et mobiliers du bâtiment...
- La température : les températures ambiantes et surfaciques dans les bâtiments sont très favorables à la prolifération des micro-organismes.

I.2.2. Particules minérales

Les échantillons d'air intérieur contiennent toujours des particules composées de divers types de matières minérales inertes qui peuvent avoir différents effets sur la santé. Ces particules proviennent généralement de l'intérieur des bâtiments mais, comme l'ont montré Kim et al. [KIM 96], peuvent aussi être amenées de l'extérieur.

I.2.2.1. Minéraux provenant des systèmes d'humidification

Les humidificateurs peuvent contribuer à l'augmentation de la concentration de particules présentes dans l'air intérieur via la vaporisation des minéraux contenus dans l'eau utilisée pour l'humidification. Highsmith et al. [HIG 88] ont montré que la concentration de particules pouvait atteindre des niveaux plusieurs fois supérieurs au niveau préconisé par les normes sanitaires. Des expérimentations effectuées dans une salle unique ont montré que le niveau pouvait atteindre $7500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ soit un seuil cinquante fois supérieur aux recommandations (voir normes sur la qualité de l'air en Annexe 1), alors qu'en utilisant une eau déminéralisée, une concentration de $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a été obtenue. Les effets sur la santé de ces minéraux sont encore mal documentés.

I.2.2.2. Fibres d'amiante

Amiante est un terme générique pour désigner plusieurs variétés de fibres minérales que l'on trouve dans la nature. Les propriétés de l'amiante sont sa résistance thermique, sa friction, son acidité ainsi que sa flexibilité. Ces propriétés ont fait de l'amiante un matériau très utilisé pendant plusieurs siècles. Aujourd'hui, l'amiante se trouve essentiellement dans de nombreux bâtiments sous la forme d'isolation thermique (ciment mêlé à l'amiante) (tableau I.4).

La taille et la forme des fibres d'amiante permet leur cheminement jusqu'à la région d'échanges gazeux des poumons. L'asbestose est un dégât irréversible du tissu pulmonaire qui peut conduire à un cancer. Cette maladie a été observée pour des personnes exposées à de fortes concentrations et pendant longtemps, mais des cas d'asbestose ont été identifiés chez

des personnes dont un membre de leur entourage travaille en présence d'amiante (amiante rapportée à la maison sur les vêtements).

Produit	Localisation	Utilisation
Matériau friable		
Isolation projetée	Poutres, dalles, murs en béton	Isolation thermique et acoustique, caches
Isolation thermique préformée	Conduites	Isolation thermique, contrôle de condensation
Papier amiante	Conduites d'eau chaude et de vapeur	Isolation thermique
Matériau non friable		
Plaques acoustiques	Couloirs, cantines, bureau, auditorium, salle de projection	Isolation acoustique
Panneau d'amiantes (ciment)	Murs, Plafonds	Isolation acoustique, renforts
Plaques de faux – plafond	Plafond	Décoration et isolation
Tableaux d'isolation	Murs, Plafond, conduites	Barrière thermique et coupe feu
Autres	Mastic, Calfatage, Peintures, Plâtre...	Construction

Tableau I.4 : L'amiante dans le bâtiment [MDO 87]

1.2.2.3. Fibres minérales synthétiques

Les fibres minérales synthétiques, fabriquées par l'homme, sont utilisées pour l'isolation des murs. Elles peuvent, sous certaines conditions, émettre de petites fibres dans l'air. Elles se distinguent par leur mode de fabrication. Ces différentes fibres sont :

- La laine de verre : 3.0-10 μm ,
- La laine de roche et minérale : 3.0-8.0 μm ,
- La laine de céramique : 10-20 μm .

I.2.2.4. Poussière de plomb

Le plomb est souvent présent à l'intérieur des bâtiments, présence qui peut provenir aussi bien de l'extérieur que de l'intérieur. Le plomb peut être trouvé dans les vieilles peintures, et l'ingestion de telles peintures est la source majeure d'exposition au plomb pour les jeunes enfants. En provenance de l'extérieur, le plomb contenu dans les gaz d'échappement véhicules à moteur thermique peut se mêler à la poussière et ainsi être inhalé. Mais les dangers dus au plomb sont surtout associés à son ingestion, pas à son inhalation.

I.2.3. Produits de combustion

Les particules générées lors de la combustion ont une taille de l'ordre de 0.1 μm . Une forte concentration peut être détectée par la présence de fumée ou de suie mais souvent elle reste invisible à l'œil nu. L'air intérieur des bâtiments peut être contaminé à la fois par des sources intérieures mais aussi par l'air provenant de l'extérieur.

Les particules extérieures proviennent des :

- Emissions industrielles,
- Voitures (diesel et essence),
- Centrales thermiques (à huile, à charbon, à bois),
- Incendies de forêts,
- Incinérations.

Le fait que ces sources extérieures deviennent un problème dépend de la localisation géographique du bâtiment, de la proximité de la source, du système de ventilation employé, de la proportion d'air mélangé à l'intérieur du bâtiment et de la localisation des entrées d'air.

Les sources de particules intérieures sont :

- Appareils de chauffage,
- Photocopieuses,
- Appareils de cuisines,
- Fumée de cigarette.

Les particules provenant des appareils de chauffage et de cuisine, si elles ne sont pas prépondérantes dans les résidences, peuvent devenir très importantes dans les bâtiments à usages commerciaux. De même, les particules provenant de photocopieuses peuvent devenir un réel problème dans les lieux où leur usage est intensif, Lee et Tse [LEE 96] ont mesuré dans des salles comportant une photocopieuse des quantités de 46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les particules fines soit la limite haute des normes sanitaires.

1.2.3.1. Particules extérieures

La combustion d'essence ou de diesel génère plusieurs gaz comme les monoxyde et dioxyde de carbone et des composés particulaires comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAHs). Les bâtiments situés dans les zones urbaines, près des voies de circulation, ont habituellement les plus fortes concentrations de particules provenant des échappements de voitures.

Nitta et al. [NIT 93] ont mesuré les concentrations en particules fines ($d_a < 2.5 \mu\text{m}$) à Tokyo au Japon dans des résidences situées à proximité de voies à forte circulation. Ils ont montré que 30 % des particules fines intérieures provenaient de l'échappement des véhicules.

Il faut noter que la détection des particules provenant de l'extérieur a été peu abordée jusqu'à présent, toutefois quelques études tendent à montrer que les émissions des voitures et des industries sont des sources importantes de la pollution intérieure des bâtiments dans les zones urbaines.

1.2.3.2. Fumée de cigarette

La fumée de cigarette est le polluant particulaire intérieur prépondérant. La part attribuée à celle-ci peut représenter jusqu'à plus de 90 % de la concentration de particules intérieures. La fumée de cigarette est composée d'une grande quantité de composés. La taille de ces particules varie considérablement, elle dépend de différents facteurs comme la concentration de fumée. Mais on peut retenir que la taille ne dépasse guère $1.0 \mu\text{m}$ et que la majorité est inférieure à $0.1 \mu\text{m}$. Plusieurs de ces composés sont reconnus cancérigènes comme les PAHs. En 1992, l'Agence pour la Protection de l'Environnement des Etats Unis (EPA) a classé les ETS dans le groupe cancérigène A [EPA 92]. Cette décision a suivi une analyse de 30 études épidémiologiques de 8 pays qui ont conclu à une corrélation entre la présence d'une personne fumeuse et le cancer des poumons de la personne conjointe (non fumeuse). L'EPA estime que chaque année aux Etats Unis environ 3000 non fumeurs meurent d'un cancer des poumons causé par la fumée de cigarette [EPA 92], 150000 à 300000 enfants de moins de 18 ans souffrent de pneumonie et de bronchite à cause de celle-ci [EPA 94] et entre 200000 et 1000000 d'asthmatiques voient leurs conditions empirer à cause de la fumée de cigarette.

Repace et Lowery [REP 80] ont mesuré les concentrations de particules respirables dans l'air dans différents lieux:

- Bars : $334 \mu\text{g}/\text{m}^3$, prélèvement de 20 min.
- Bowling : $202 \mu\text{g}/\text{m}^3$, prélèvement de 26 min,
- Cocktail : $351 \mu\text{g}/\text{m}^3$, prélèvement de 15 min.

Spengler et al. [SPE 81] ont montré que les fumeurs fumant un paquet de cigarettes par jour contribuent à environ $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de particules en quantité quotidienne.

I.2.4. Particules radioactives

Les particules présentes dans l'air intérieur des bâtiments peuvent devenir radioactives lorsque du radon stagne dans ce bâtiment et se désintègre en éléments radioactifs qui se collent aux différentes particules. Ces particules peuvent alors être inhalées et pénétrer jusqu'aux poumons où elles peuvent causer des dégâts.

I.2.5. Conclusion

Le polluant particulaire prépondérant des ambiances intérieures est la fumée de cigarettes. D'une part, parce qu'elle est composée de particules très fines ($< 1.0 \mu\text{m}$) qui peuvent donc pénétrer à tous les niveaux de l'appareil respiratoire et y provoquer des dégâts, et d'autre part, parce que ces particules sont en quantité abondante, ce qui augmente d'autant plus les dégâts. Mais il est important de constater que l'usage de la cigarette est de plus en plus réglementé et, dans la plupart des pays, qu'il est interdit à l'intérieur des locaux recevant du public. Si bien que ce sont essentiellement les autres particules citées plus haut que l'on risque de trouver actuellement dans les ambiances intérieures. Il paraît donc préférable de s'intéresser aussi bien aux particules provenant de l'extérieur (on a vu dans le chapitre précédent que la taille de ces particules varie de 0.1 à $10 \mu\text{m}$) qu'à celles provenant des autres sources intérieures, comme les fibres minérales synthétiques ($3.0 - 8.0 \mu\text{m}$) et les produits de combustion (de bois et d'huile, $0.1 - 2.0 \mu\text{m}$).

I.3. MOUVEMENT DES PARTICULES

I.3.1 Mouvement brownien et diffusion

I.3.1.1. Coefficient de diffusion

Le mouvement Brownien est le mouvement irrégulier d'une particule d'aérosol dans l'air immobile ; il est dû aux actions incessantes des molécules de gaz contre la particule. La diffusion est le transport net de ces particules dans un gradient de concentration. Ce transport se fait toujours des régions à haute concentration vers celles à basse concentration. Ces deux processus sont caractérisés par le coefficient de diffusion de la particule D . Ce coefficient est le coefficient de proportionnalité entre le flux de particules \vec{J} (c'est-à-dire le nombre de

particules qui traversent une surface d'un cm^2 en une seconde) et le gradient de concentration. Cette relation est appelée « 1^{ère} Loi de Fick pour la diffusion ». En l'absence de forces extérieures, on a :

$$\vec{J} = -D \times \overrightarrow{\text{grad}C} \quad (\text{I.1})$$

Le coefficient de diffusion peut être exprimé en fonction des propriétés de la particule par la relation de Stokes-Einstein (en égalisant la force de diffusion à la force de traînée de Stokes) :

$$\vec{F}_{\text{Diff}} = \frac{3\pi\mu d_p}{C_C} \vec{U}_r \quad (\text{I.2})$$

Avec \vec{F}_{Diff} : force de diffusion (dynes),

μ : viscosité dynamique du fluide (Poise),

d_p : diamètre de la particule (cm),

\vec{U}_r : vitesse de la particule (cm s^{-1}),

C_C : coefficient de Cunningham.

Einstein [EIN 05] a montré que :

- le mouvement Brownien des particules d'aérosol est équivalent à celui d'une grosse molécule de gaz,

- l'énergie cinétique pour une particule d'aérosol en mouvement Brownien est la même que pour les molécules de gaz en suspension, $E_C = \frac{3}{2} k_B T$, et

- la force de diffusion qui agit sur la particule est la force de pression osmotique sur cette particule.

Description de la force de pression osmotique :

Considérons des molécules dissoutes dans un liquide. La partition de la figure I.4 est une membrane semi perméable qui laisse passer le liquide mais empêche la traversée des molécules. La membrane est libre de glisser de gauche à droite. Si on bouge la membrane vers la gauche, une force dirigée vers la gauche est nécessaire pour la garder en place. Cette force est égale à la force de pression osmotique qui agit vers la droite. Cette dernière peut être vue comme une pression créée par une forte concentration de molécules dissoutes à gauche de la membrane ou par la pression exercée par le liquide qui essaye d'aller de la région à faible concentration en liquide (à cause de la forte concentration en molécules dissoutes) vers la

région à faible concentration en molécules dissoutes. La force est directement proportionnelle à la différence de concentration des deux côtés de la membrane.

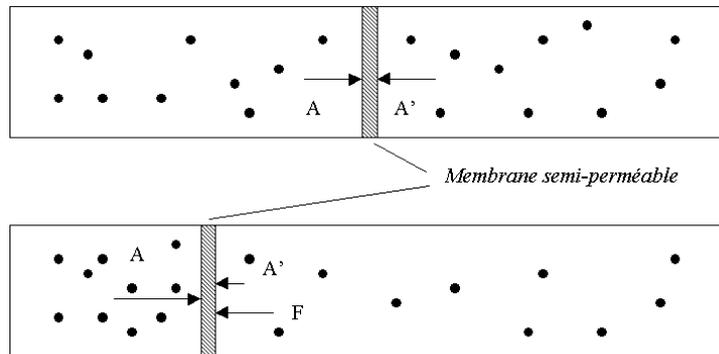


Figure I.4 : Force de pression osmotique

La pression osmotique p_o est donnée par la loi de Hoff pour C particules (ou molécules) par unité de volume :

$$p_o = k_B T \times C \tag{I.3}$$

Avec k_B : constante de Boltzmann, et
 T : température absolue (K).

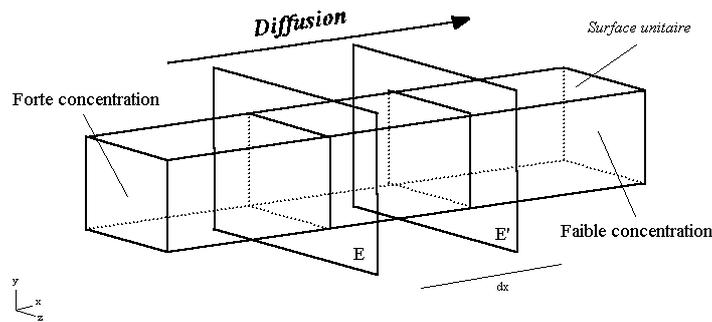


Figure I.5 : Diagramme pour la dérivation du coefficient de diffusion de la particule

La diffusion se produit de la gauche vers la droite à travers les surfaces E et E' (figure I.5). A cause de la différence de concentration, la pression osmotique en E et E' diffère légèrement d'après la loi de Hoff d'où :

$$\vec{F}_{Diff} = (k_B T \times C_E - k_B T \times C_{E'}) \vec{x} = -k_B T \times dC \vec{x} \tag{I.4}$$

Donc la force qui s'exerce sur chaque particule dans le volume dx est :

$$\vec{F}_{Diff} = -\frac{k_B T}{C} \frac{dC}{dx} \quad (I.5)$$

D'après l'équation I.2, on déduit :

$$C\vec{U}_r = -\frac{k_B T C_c}{3\pi\mu d_p} \frac{dC}{dx} \vec{x} \quad (I.6)$$

Or le produit de C , nombre de particules par unité de volume, et de \vec{U}_r , vitesse de déplacement de la membrane, représente la densité de flux \vec{J} . D'où l'expression du coefficient de diffusion D (cm^2/s) :

$$D = \frac{k_B T C_c}{3\pi\mu d_p} \quad (I.7)$$

Que l'on écrit habituellement :

$$D = k_B T B \quad (I.8)$$

Avec B : mobilité de la particule définie par $B = \frac{C_c}{3\pi\mu d_p}$

Le coefficient de diffusion croît avec la température. Pour les grosses particules, pour lesquelles le coefficient de Cunningham peut être négligé, D est inversement proportionnel au diamètre de la particule. Pour les petites particules, pour lesquelles le coefficient de Cunningham ne peut être négligé, D est inversement proportionnel au carré du diamètre de la particule. Pour caractériser la vitesse d'un ensemble de particules, on fait l'hypothèse que chacune des particules se déplacent à la même vitesse et on utilise soit la moyenne quadratique des vitesses, c_{rms} , soit la vitesse moyenne thermique, \bar{c} , (avec l'hypothèse de particules sphériques) :

$$c_{rms} = \left(\frac{3k_B T}{m} \right)^{0.5} = \left(\frac{18k_B T}{\pi\rho_p d_p^3} \right)^{0.5} \quad (I.9)$$

$$\text{ou } \bar{c} = \left(\frac{8k_B T}{\pi m} \right)^{0.5} = \left(\frac{48k_B T}{\pi^2 \rho_p d_p^3} \right)^{0.5} \quad (I.10)$$

I.3.1.2. Libre parcours moyen d'une particule

Comme pour les molécules d'un gaz, on peut définir un libre parcours moyen d'une particule. Le mouvement d'une particule est différent de celui d'une molécule. Alors que la trajectoire d'une molécule est une succession de segments de droite, celle du centre d'une particule est une courbe lisse (figure I.6):

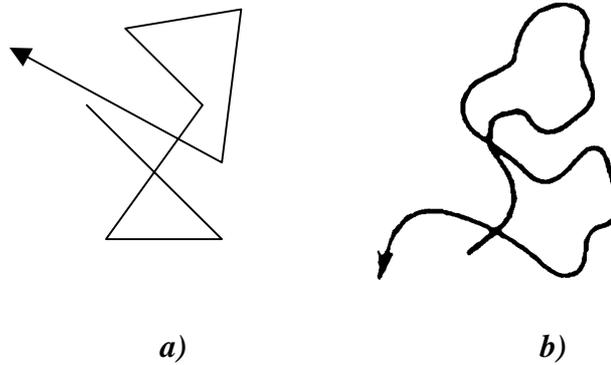


Figure I.6 : Projection sur un plan de la trajectoire d'une molécule a) et du centre d'une particule b)

Le libre parcours moyen d'une molécule est la distance moyenne parcourue par la molécule entre deux collisions, c'est donc la moyenne des segments de ligne droite.

Le libre parcours moyen d'une particule est la distance moyenne parcourue par la particule jusqu'à ce qu'elle change de direction (figure I.7). Autrement dit, c'est la distance moyenne de la ligne droite parcourue par la particule jusqu'à ce qu'elle perde toute sa vitesse dans cette direction.

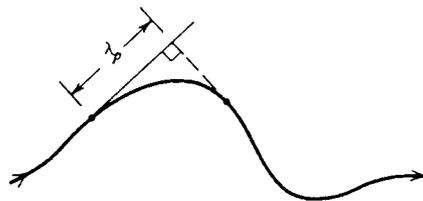


Figure I.7 : Libre parcours moyen d'une particule

En moyenne, la particule se déplace à la vitesse thermique moyenne \bar{c} (équation I.10) donc :

$$\lambda_p = \tau_p \bar{c}$$

Où τ_p est le temps de relaxation de la particule, défini comme le temps requis pour que la particule change de direction.

Remarque : quel que soit le diamètre de la particule, le libre parcours moyen de la particule est quasi constant. Ce qui fait de ce paramètre une caractéristique des aérosols.

1.3.1.3. Dépôt par diffusion

Hypothèse : les particules d'un aérosol collent aux surfaces qu'elles touchent c'est-à-dire que la concentration des particules dans l'air à proximité de la paroi est nulle et qu'il existe un fort gradient de concentration qui induit une forte diffusion des particules vers la surface.

Considérons une surface verticale infinie dans un milieu infini d'aérosol au repos de concentration C_0 (figure I.8).

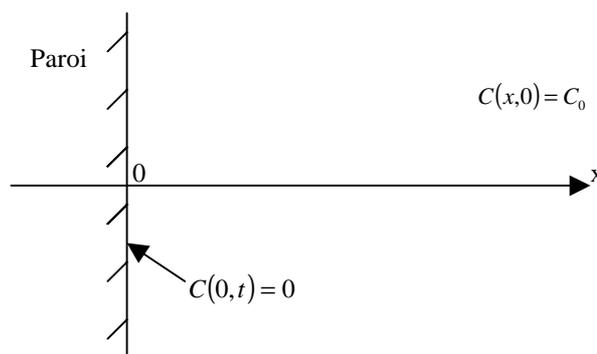


Figure I.8 : Dépôt par diffusion

La concentration $C(x,t)$ des particules à la distance x de la surface et au moment t satisfait à la 2^{ème} loi de Fick :

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = \text{div}(D \times \overrightarrow{\text{grad}} C(x,t)) \quad (\text{I.11})$$

Or le coefficient de diffusion est constant car il ne dépend que des caractéristiques de la particule et du fluide (l'équation I.7) qui restent inchangées au cours du temps, seule la concentration en particules dans l'air évolue. En projetant l'équation I.11 selon l'axe Ox , on a alors :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{avec} \quad C(0,t) = 0 \text{ pour } t > 0 \quad (\text{I.12})$$

$$C(x,0) = C_0 \text{ pour } x > 0$$

Dont la solution est :

$$C(x,t) = \frac{2C_0}{(4\pi Dt)^{0.5}} \int_0^x \exp\left(\frac{-p^2}{4Dt}\right) dp \quad (\text{I.13})$$

Avec x : distance à la surface (m),

t : temps (s),

D : coefficient de diffusion ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$),

C_0 : concentration à l'infini (kg ou nombre de particules m^{-3}),

p : paramètre d'intégration.

On peut déterminer le niveau de dépôt par unité de surface par l'évaluation du gradient de concentration et en utilisant la 1^{ère} loi de Fick. A la surface, on a :

$$\frac{dC}{dx} = \frac{C_0}{(\pi Dt)^{0.5}} \text{ pour } x = 0 \quad (\text{I.14})$$

La valeur du flux de particules $\|\vec{J}\|$ à la surface est déterminé à chaque instant en substituant cette dernière équation dans l'équation I.1 :

$$\|\vec{J}\| = C_0 \left(\frac{D}{\pi t}\right)^{0.5} \quad (\text{I.15})$$

En intégrant suivant le temps et pour un volume infini d'aérosol stagnant de concentration constante C_0 en dehors de la couche limite, on peut calculer le nombre de particules qui se déposent à la surface d'une paroi :

$$N(t) = 2C_0 \left(\frac{Dt}{\pi}\right)^{0.5} \quad (\text{I.16})$$

On peut définir le module de la vitesse de dépôt, vitesse à laquelle les particules migrent vers la surface :

$$V_{dep} = \frac{\|\vec{J}\|}{C_0} = \left(\frac{D}{\pi t}\right)^{1/2} \quad (\text{I.17})$$

I.3.2. Force de Gravité

Dans un système de forces constantes, une particule libre se déplace dans un milieu fluide au repos avec une vitesse constante, U_r . Cette vitesse est déterminée par le principe fondamental de la dynamique :

$$\vec{F}_D = m\vec{a} = m\vec{g} \quad (\text{I.18})$$

Avec \vec{F}_D : force de traînée (N),

m : masse de la particule (kg),

\vec{a} : accélération de la particule (m s^{-2}),

\vec{g} : accélération de la pesanteur (m s^{-2}).

L'expression de la force de traînée \vec{F}_D dépend du régime d'écoulement qui est défini par le calcul du nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho U_r d_p}{\mu} \quad (\text{I.19})$$

Avec ρ : masse volumique du fluide (kg cm^{-3}),

μ : viscosité dynamique du fluide ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$),

d_p : diamètre de la particule (m),

U_r : vitesse de la particule en (m s^{-1}).

I.3.2.1. Région de Stokes : $Re < 1$

Pour $Re < 1$, l'expression de la force de traînée a été déterminée par :

$$\vec{F}_D = 3\pi\mu d_p \vec{U}_r \quad (\text{I.20})$$

D'où l'expression de la vitesse de dépôt :

$$\text{- pour } d_p > 1.0\mu\text{m} \quad V_{dep} = \frac{\rho_p d_p^2 g}{18\mu} \quad (\text{I.21})$$

$$\text{- pour } d_p < 1.0\mu\text{m} \quad V_{dep} = C_c \frac{\rho_p d_p^2 g}{18\mu} \quad (\text{I.22})$$

Remarque : pour les particules dont le diamètre est inférieur à 1.0 μm , il est nécessaire d'introduire le coefficient de Cunningham [CUN 10], C_c , car pour cette taille de particules, voisines de la taille des molécules de fluide, le fluide ne peut plus être considéré comme un milieu continu. On retiendra l'expression semi-empirique valable pour des particules sphériques (voir tableau I.5) :

$$C_c = 1 + Kn \left(2.514 + 0.8 \exp \left(- \frac{0.55}{Kn} \right) \right) \quad (\text{I.23})$$

Avec Kn , le nombre de Knudsen défini à partir du calcul du libre parcours moyen d'une molécule de fluide, λ_f , qui dépend de la viscosité μ , de la température T , et de la pression p , du fluide :

$$Kn = \frac{\lambda_f}{d_p} \quad \text{et} \quad \lambda_f = 2.15 \times \frac{\mu T^{0.5}}{p} \quad (\text{I.24})$$

On remarque bien que le coefficient de Cunningham est unitaire pour les particules dont la taille est supérieure à 1.0 μm et très élevé pour les petites particules de taille inférieure à 0.1 μm .

Diamètre de la particule (μm)	Coefficient de Cunningham
0.01	22.45
0.05	5.01
0.1	2.89
0.5	1.33
1.0	1.17
1.5	1.11
2.0	1.08
3	1.05

* Calculé pour des particules de densité unitaire sous les conditions standard de température et de pression

Tableau I.5 : Coefficient de correction de Cunningham

I.3.2.2. Région de transition et de Newton : $Re > 1$

Pour $Re > 1$, l'expression de la force de traînée a été déterminée par :

$$F_D = C_D \frac{\pi}{8} \rho \times d_p^2 V_{dep} \cdot \vec{V}_{dep} \quad (I.25)$$

D'où l'expression du module de la vitesse de dépôt :

$$V_{dep} = \left(\frac{4\rho_p d_p g}{3\rho C_D} \right)^{0.5} \quad (I.26)$$

Avec C_D : le coefficient de traînée. Ce coefficient est constant pour les valeurs de Reynolds supérieures à 1000 sinon il varie avec ce nombre (figure I.9).

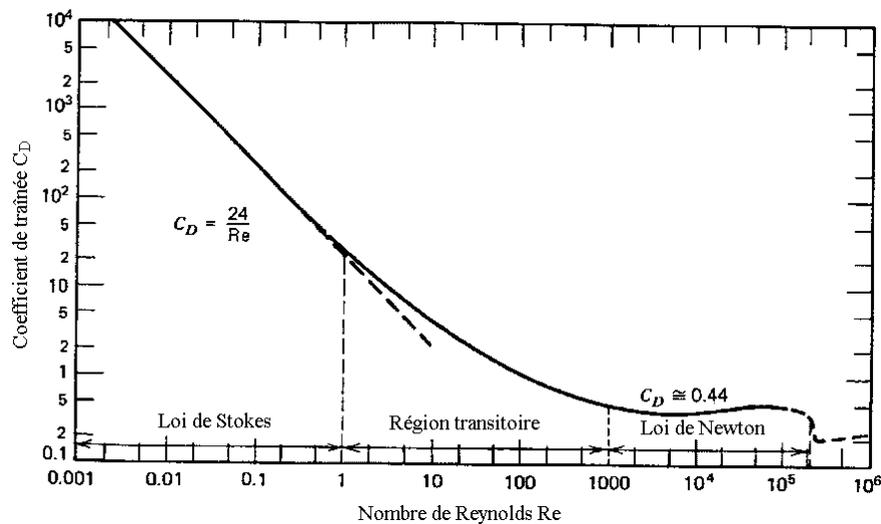


Figure I.9 : Coefficient de traînée pour les particules sphériques [HIN 82]

Comme le coefficient de traînée est fonction du nombre de Reynolds donc de la vitesse de la particule, l'équation I.26 est implicite. Il existe deux méthodes de résolution :

- par itération, on teste plusieurs valeurs de vitesse jusqu'à obtenir un résultat suffisamment précis.

- à partir de $C_D = \left(\frac{4\rho_P d_P g}{3\rho V_{Dep}^2} \right)$ (déduite de l'équation I.26), en multipliant par le carré du Reynolds de chaque côté, on élimine la vitesse de dépôt :

$$C_D Re^2 = \frac{4d_P^3 \rho_P \rho g}{3\mu^2} \quad (I.27)$$

La valeur de la vitesse de sédimentation est donnée par la relation empirique de Davies [DAV 45] :

$$V_{dep} = \frac{\mu}{\rho d_P} \left(\frac{C_D Re^2}{24} - 2.3363 \times 10^{-4} (C_D Re^2)^2 + 2.0154 \times 10^{-6} (C_D Re^2)^3 - 6.9105 \times 10^{-9} (C_D Re^2)^4 \right) \quad (I.28)$$

I.3.2.3. Dépôt tranquille et dépôt agité

Le dépôt réel d'un aérosol monodispersé se trouve entre deux cas idéaux : la dépôt tranquille et la dépôt agité.

- **Le dépôt tranquille** : le dépôt tranquille correspond au cas où l'air dans la cavité est au repos, les particules se déplacent seulement sous l'action de la force gravitationnelle (la diffusion étant négligée). La variation de la concentration en chaque point suit la courbe présentée sur la figure I.10 :

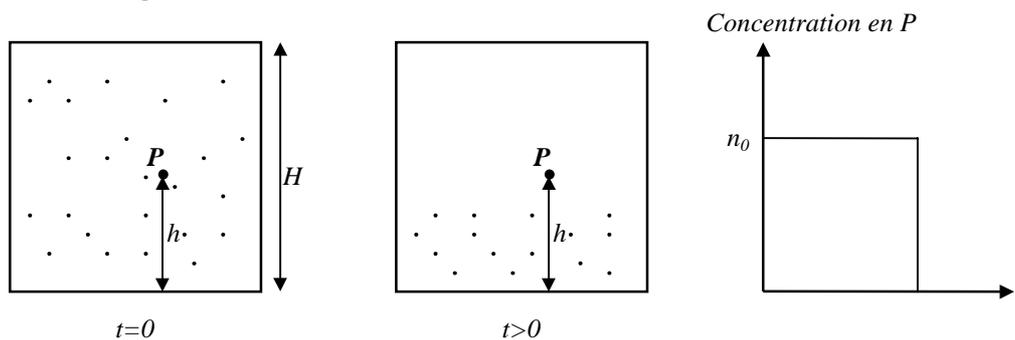


Figure I.10 : Dépôt tranquille

Le temps nécessaire pour que la concentration soit nulle en un certain point P placé dans la

cavité à une hauteur h est : $t = \frac{(H - h)}{V_{dep}}$ (I.29)

- **La dépôt agité** : le dépôt agité correspond au cas où il y a un mouvement important d'air dans la cavité et on suppose que la concentration est uniforme dans toute la cavité (figure I.11), la diffusion est toujours négligée :

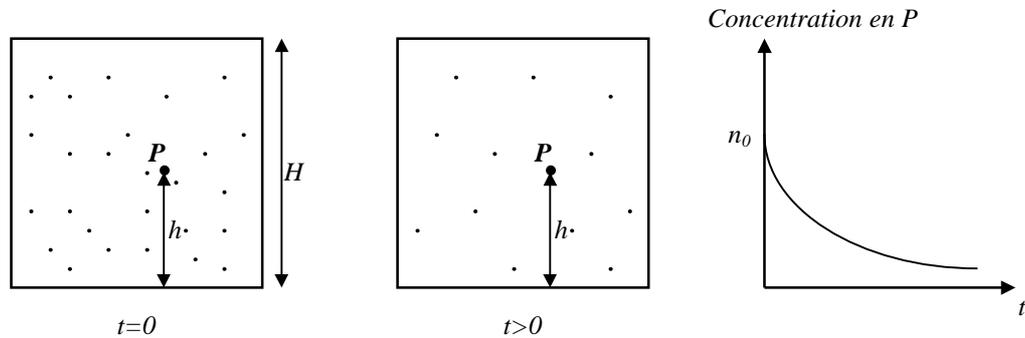


Figure I.11 : Dépôt agité

La concentration dans la cavité diminue avec le temps ainsi que le taux de dépôt puisqu'il dépend de la concentration. On peut exprimer la fraction de particules déposées pendant un temps dt , V_{dep} étant la vitesse moyenne de chaque particule sur une période assez grande, par :

$$\frac{dC}{C} = -\frac{V_{dep} dt}{H} \quad (I.30)$$

Dont la solution est :

$$\frac{C(t)}{C_0} = \exp\left(-\frac{V_{dep} t}{H}\right) \quad (I.31)$$

Avec C_0 : la concentration au temps $t = 0$ s.

La concentration dans la cavité diminue de façon exponentielle et elle atteint la valeur $1/e$ dans la même période que celle nécessaire pour que la concentration atteigne la valeur nulle dans le cas du dépôt tranquille. Le cas réel se rapproche du dépôt agité dans la plupart des cas.

Remarque : Dans le cas de cavité cubique ou rectangulaire, l'expression précédente peut s'écrire :

$$\frac{C(t)}{C_0} = \exp(-\lambda_d t) \quad (I.32)$$

Ainsi, on détermine la vitesse globale de dépôt de l'enceinte par :

$$V_{dep} = \lambda_d \times \frac{V}{S} \quad (I.33)$$

Avec V : volume de la cavité (m^3),

S : surface intérieure totale, surface de meubles comprise (m^2).

Cette vitesse globale de dépôt permet une comparaison directe du phénomène de dépôt entre différents lieux de mesures puisqu'elle tient compte des caractéristiques géométriques des enceintes (volume et surfaces).

I.3.3. Coalescence

La coalescence est le processus pendant lequel les particules d'un aérosol se percutent et adhèrent les unes aux autres pour former une particule plus grosse. Le résultat direct est la décroissance du nombre de particules et l'augmentation de la taille des particules au sein d'un même aérosol. Lorsque le mouvement de ces particules est du au mouvement Brownien, on l'appelle coalescence thermique, sinon, si ce mouvement est du à d'autres forces (gravité, champs électriques...), on parle de coalescence cinématique.

I.3.3.1. Coalescence monodispersée

On considère que toutes les particules ont la même dimension à l'instant 0 et on impose que les particules adhèrent les unes aux autres à chaque collision et que la dimension des particules varie lentement. On sélectionne une particule et on étudie le phénomène de diffusion des autres particules sur la surface de cette particule. Le flux de particules est donné par la 1^{ère} Loi de Fick :

$$\|\vec{j}\| = -D \frac{dC}{dx} \quad (I.34)$$

Avec D : coefficient de diffusion,

C : concentration (en nombre de particules par unité de volume),

$\frac{dC}{dx}$: gradient de concentration des particules selon la direction x .

La surface de collision est la surface imaginaire définie par les centres des particules au moment de la collision (une sphère de diamètre $2d_p$). Le nombre N_c de collisions sur la particule sélectionnée est :

$$\frac{dN_c}{dt} = J \cdot \pi (2d_p)^2 = -\pi (2d_p)^2 \cdot D \frac{dC}{dx} \quad \text{or} \quad \frac{dC}{dx} = -\frac{2C}{d_p} \quad (\text{I.35})$$

$$\text{d'où} \quad \frac{dN_c}{dt} = 8\pi \times d_p \times D \times C \quad (\text{I.36})$$

Puisque toutes les particules sont identiques, l'équation précédente représente le taux de collision de chaque particule (c'est-à-dire le nombre de particules qui entrent en collision avec la particule par seconde). Il y a n particules par unité de volume, donc le taux de collision par unité de volume, $\frac{dN_c}{dt}$, est C fois l'équation précédente (à un coefficient $\frac{1}{2}$ près introduit afin de ne pas compter deux fois une même collision), soit :

$$\frac{dN_c}{dt} = 4\pi \times d_p \times D \times C^2 \quad (\text{I.37})$$

On définit le coefficient de coalescence K par :

$$K = 4\pi d_p D = \frac{4k_B T C_c}{3\mu} \quad (\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}) \quad (\text{I.38})$$

Avec k_B : constante de Boltzmann,
 T : température absolue du gaz,
 C_c : coefficient de Cunningham, et
 μ : viscosité dynamique.

Pour les conditions standards, le coefficient de coalescence est :

$$K = 3 \times 10^{-10} \cdot C_c \quad (\text{I.39})$$

La variation de la concentration des particules par rapport au temps est :

$$C(t) = C_0 \frac{1}{1 + C_0 K t} \quad (\text{I.40})$$

Avec C_0 : concentration au temps $t = 0$.

Le diamètre des particules à l'instant t est déduit de la conservation de la masse :

$$d_p(t) = d_{p0} (1 + C_0 K t)^{1/3} \quad (\text{I.41})$$

Le tableau I.6 présente les temps nécessaires pour atteindre la moitié du nombre initial de particules par coalescence monodispersée pour trois tailles de particules.

Concentration (nb part. / cm ³)	1.0 μm	5.0 μm	6.0 μm
10 ¹⁴	20μs	32μs	33μs
10 ¹²	2.8ms	3.2ms	3.3ms
10 ¹⁰	0.28s	0.32s	0.33s
10 ⁸	28s	32s	33s
10 ⁶	47min	54min	55min
10 ⁴	80h	90h	91h
10 ²	331j	373j	380j

Tableau I.6 : Temps nécessaires pour atteindre 0.5 C_0 pour trois tailles de particules

En règle générale, la coalescence est négligée dans les expérimentations de laboratoire si la concentration en particules est inférieure à 10⁴ particules/cm³ soit 10¹⁰ particules/m³.

1.3.3.2. Coalescence polydispersée

Dans les aérosols réels sont présentes des particules dont la taille varie sur un domaine très large. Or la coalescence est un phénomène qui dépend de la dimension des particules, la théorie développée pour les aérosols polydispersés est donc plus complexe et il n'existe pas de solutions explicites. Toutefois des études d'ordre général ont été menées pour des aérosols comprenant des particules de deux tailles différentes (d_1 et d_2 , de coefficients de diffusion

respectifs D_1 et D_2). Les équations établies précédemment sont valables en modifiant le coefficient de coalescence par :

$$K = \pi(d_1 + d_2)(D_1 + D_2) \quad (\text{I.42})$$

Pour les aérosols polydispersés, il faut prendre en compte la coalescence entre une particule donnée et les particules de chaque dimension. En approchant la distribution continue des dimensions des particules par une distribution discrète sur k intervalles, on peut exprimer le coefficient de coalescence par :

$$\bar{K} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k K_{i,j} f_i f_j \quad (\text{I.43})$$

Avec f_i, f_j les fractions du nombre total de particules correspondant aux intervalles i et j .

1.3.3.3. Coalescence cinématique

Le phénomène de coalescence arrive comme le résultat du mouvement relatif entre les particules du à d'autres mécanismes que le mouvement d'agitation moléculaire.

Zebel [ZEB 66] a montré que pour un écoulement laminaire dans un tube, le rapport entre la coalescence par cisaillement (les particules n'appartenant pas à la même ligne de courant se heurtent) et la coalescence thermique en chaque point est :

$$\frac{d_p^2 \frac{du}{dy}}{6\pi D} \quad (\text{I.44})$$

Où le gradient de vitesse est évalué au point considéré.

Les écoulements turbulents produisent des tourbillons qui déterminent des mouvements relatifs entre les particules. Ces mouvements relatifs peuvent provenir de gradients de vitesse ou de projections inertielles des particules à travers les tourbillons. Ces dernières deviennent plus importantes lorsque l'échelle des fluctuations turbulentes s'approche de la valeur de la distance d'arrêt de la particule. Fuchs [FUC 64] donne le rapport entre la coalescence turbulente et la coalescence thermique :

$$\frac{bd_p^2}{64\pi D} \left(\frac{\rho\varepsilon}{\mu} \right)^{1/2} \quad (I.45)$$

Avec b : constante de l'ordre de 10,

ε : est le taux de dissipation de l'énergie turbulente.

D'une manière générale, la coalescence turbulente est négligeable pour les particules de 0.1 μm et très importante pour les particules de plus de 10 μm .

I.3.4. Forces Radiométriques

Les forces radiométriques (thermophorèse, photophorèse, pression de radiation, diffusiphorèse et électrophorèse) apparaissent à cause des interactions asymétriques des molécules de gaz avec la particule dans un gradient de température ou de concentration. Toutes ces forces sont très faibles et ne causent le mouvement des aérosols que grâce à la très haute mobilité des particules.

I.3.4.1. Thermophorèse

La force de thermophorèse apparaît lorsqu'un gradient de température existe dans le gaz. La valeur de cette force dépend du gaz et des propriétés de la particule.

- Petite particule ($d_p < \lambda_f$) :

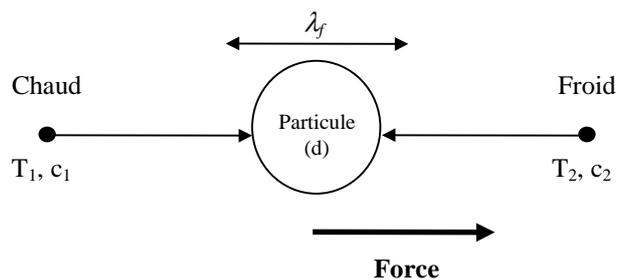


Figure I.12 : Force de thermophorèse ($d < \lambda$)

L'expression théorique du module de la force de thermophorèse est :

$$F_{th} = \frac{-p\lambda_f d_p^2 \Delta T}{T} \quad (I.46)$$

Avec p : pression du gaz,
 λ_f : libre parcours moyen des molécules de gaz,
 ΔT : gradient de température,
 T : température absolue de la particule.

Waldmann et Schmitt [WAL 66] ont donné l'expression de la vitesse de thermophorèse :

$$V_t = \frac{-0.55\mu\Delta T}{\rho T} \quad (\text{I.47})$$

Avec μ : viscosité dynamique du gaz,
 ρ : masse volumique du gaz.

- Grosse particule ($d_p > \lambda_f$) :

Dans ce cas, il se crée un gradient de température à l'intérieur de la particule et on obtient :

$$F_{th} = \frac{-9\pi\mu^2 d_p H \Delta T}{2\rho T} \quad (\text{I.48})$$

Où H prend en compte le gradient à l'intérieur de la particule (Brock [BRO 62]) :

$$H = \left(\frac{1}{1 + 6\lambda_f/d_p} \right) \left(\frac{k_a/k_p + 4.4\lambda_f/d_p}{1 + 2k_a/k_p + 8.8\lambda_f/d_p} \right) \quad (\text{I.49})$$

Avec k_a : conductivité thermique de l'air, et
 k_p : les conductivités thermiques de la particule.

La vitesse de thermophorèse devient :

$$V_t = \frac{-3\mu C_c H \Delta T}{2\rho_g T} \quad (\text{I.50})$$

La rotation aléatoire de la particule due à l'agitation thermique n'empêche pas l'établissement de la force de thermophorèse car le temps nécessaire à une rotation significative est plus grand que le temps nécessaire à la transmission de la chaleur dans la particule [FUC 64].

1.3.4.2. Photophorèse

La photophorèse est un cas particulier de la thermophorèse. Une particule éclairée dans un milieu gazeux subit une force radiométrique dans le sens opposé à la source d'éclairage. Ce flux lumineux induit un gradient de température de sorte que la face éclairée devient plus chaude que l'autre face. Par conduction, la température de la surface de la particule se transmet au gaz environnant d'où l'établissement d'un gradient de température autour de la particule. La force de photophorèse dépend de l'intensité et de la longueur d'onde du rayonnement incident ainsi que de la dimension, la forme, le matériau de la particule, et de la pression du gaz. Elle devient maximale pour les particules dont le diamètre est égal au libre parcours moyen des molécules de gaz. Elle dépend également de l'absorption de la particule, elle peut être alors soit positive (force s'exerçant dans la direction opposée à la source lumineuse) pour les particules très absorbantes et les grosses particules peu absorbantes et négative pour les petites particules peu absorbantes [PRE 66].

Remarque : la photophorèse est le résultat des interactions des molécules de gaz avec la particule par conséquent elle n'existe pas dans le vide.

1.3.4.3. Pression de radiation

Ce phénomène résulte directement de l'interaction entre la particule et la lumière incidente. Si l'on considère la lumière comme un courant de photons, les collisions des photons avec la particule se traduisent par un transfert de moment vers la particule. L'expression du module de cette force est donnée par :

$$F_{pr} = \frac{I\pi d_p^2 Q_{rp}}{4c} \quad (I.51)$$

Avec I : intensité du rayonnement,

c : vitesse de la lumière,

Q_{rp} : le facteur d'efficacité (complexe à déterminer, il dépend de la taille de la particule, de la longueur d'onde, de l'indice de réfraction et du coefficient d'absorption de la particule [KER 69]).

1.3.4.4. Diffusiophorèse

La diffusiophorèse existe pour des particules qui se trouvent dans un milieu gazeux où il règne un gradient de concentration. Ce gradient induit une diffusion des molécules de gaz, vers les régions de plus basse concentration, qui exercent donc une force sur les particules. La magnitude de cette force dépend de la masse des molécules, des coefficients de diffusion des molécules composant le gaz et du gradient de concentration (pratiquement indépendante de la taille des particules).

1.3.4.5. Electrophorèse

L'électrophorèse existe pour des particules chargées qui se trouvent dans un champ électrique. L'expression de la vitesse d'électrophorèse est donnée par Hinds [HIN 82] :

$$V_{TE} = \frac{neEC_C}{3\pi\mu d_p} \quad (I.52)$$

Avec n : nombre de charges élémentaires,

e : charge d'un électron ($=4.8 \cdot 10^{-10}$ stC $= 1.6 \cdot 10^{-19}$ C),

E : intensité du champ électrique (stV = 300 V/cm),

C_C : coefficient de Cunningham,

μ : viscosité dynamique du gaz,

d_p : diamètre de la particule.

Dans l'atmosphère, toutes les particules sont soumises au champ électrique de la terre (1.8 V/cm), pour une particule chargée d'une seule charge élémentaire, la vitesse d'électrophorèse voit son intensité décroître linéairement avec la taille de la particule, de 10^{-4} à 10^{-6} pour un diamètre variant de 0.1 à 10 μ m. Cette force est donc négligeable (par rapport à la gravité) lorsqu'on n'est pas en présence d'un champ électrique plus intense.

I.3.5. Conclusion

Toutes les forces qui agissent sur les particules et qui sont par conséquent les causes de leurs mouvements dans l'air ont été répertoriées dans ce chapitre. Il faut noter que chacune de ces forces n'a pas la même importance suivant les conditions dans lesquelles on se place. Dans le domaine de la qualité de l'air intérieur des bâtiments, on s'intéressera plus précisément aux particules dont la taille varie entre 1.0 et 10 μm (voir chapitre précédent). Certaines de ces forces peuvent alors être négligées. La coalescence thermique peut être négligée puisque, dans les ambiances intérieures, la concentration en particules ne dépasse que rarement 10^4 particules/cm³ soit 10^{10} particules/m³. La diffusiophorèse peut être négligée car les différences de pression ne sont pas assez importantes à l'intérieur des bâtiments. Comme le champ électrique terrestre est faible, l'électrophorèse sera elle aussi négligée. Par contre, toutes les autres forces devront être prises en compte.

Diamètre de la particule (μm)	Dépôt pendant 100 secondes (particule/cm ²)		
	Diffusion	Gravité	Thermophorèse*
0.01	0.26	$6.7 \cdot 10^{-6}$	0.028
0.1	0.029	$8.5 \cdot 10^{-3}$	0.020
1.0	0.0059	0.35	0.013
10	0.0017	31	0.0078

* calculée pour un gradient thermique unitaire

Tableau I.7 : Comparaison du dépôt induit par les trois forces prépondérantes agissant sur les particules [HIN 82]

Le tableau I.7 présente le dépôt tranquille induit par les trois forces prépondérantes (diffusion moléculaire, gravité et thermophorèse). D'après ces valeurs, on pourrait conclure que la gravitation est la seule force à considérer et donc que le dépôt se fait essentiellement sur le sol, cette surface devenant la seule paroi à prendre en compte pour l'étude de l'influence des parois sur la pollution particulaire. Mais il ne faut pas perdre de vue que dans les ambiances intérieures, il existe toujours des écoulements d'air induits par la ventilation (naturelle ou mécanique), par des gradients thermiques notamment par la présence de sources chaudes et de paroi froide, si bien que toutes les parois (plafond excepté) seront à prendre en considération. Récemment, l'influence des parois verticales a été montrée par Byrne [BYR 95], le tableau I.8 présente ses résultats. Ceux-ci montrent que le dépôt des particules sur les

parois verticales ne pourra pas être négligée même pour les particules les plus grosses dont le dépôt représente 18% ($4.6\% \times 4$ parois verticales) du dépôt total.

Diamètre de la particule (μm)	% de dépôt	
	Sur paroi verticale	sur le sol
0.7	10.1	57.2
2.5	7.7	68.9
4.5	6.4	74.1
5.4	4.6	77.7

Tableau I.8 : Distribution du dépôt sur les parois [BYR 95]

Toutes les forces décrites dans les paragraphes précédents gouvernent le déplacement des particules dans l'air mais il est primordial de comprendre l'interaction particule - paroi puisqu'elle est le paramètre prépondérant (avec le renouvellement d'air) de l'abaissement de la concentration en particules au sein des ambiances intérieures.

I.4. INTERACTION PARTICULE – PAROI

I.4.1. Force d'adhérence

L'adhérence d'une particule sur une surface est déterminée principalement par l'action de la force de van der Waals, et/ou la force électrostatique, et/ou la tension superficielle. L'intensité de ces forces dépend des caractéristiques de la particule (matériau, forme et dimension), de la surface (matériau, rugosité, taux de contamination), du milieu fluide (humidité relative et température) et de l'interaction particule - paroi (durée de contact et vitesse initiale de l'impact). Il est important de noter que l'adhérence des particules, malgré son importance, est un phénomène mal connu. Il n'existe pas de théorie complète prenant en compte tous les facteurs qui influencent l'adhérence.

I.4.1.1. Force de van der Waals

La force de van der Waals est une force d'attraction entre molécules de la particule et de la paroi. En effet, on remarque l'existence de forces d'attraction électrostatiques entre les dipôles de signes contraires qui apparaissent à la suite du mouvement aléatoire des électrons dans chaque matériau (figure I.13) :

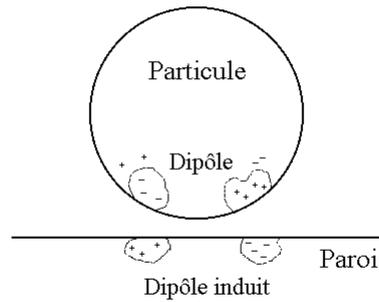


Figure I.13 : La force de van der Waals

On remarque qu'au niveau microscopique le contact entre les surfaces n'est pas parfait (figure I.14).

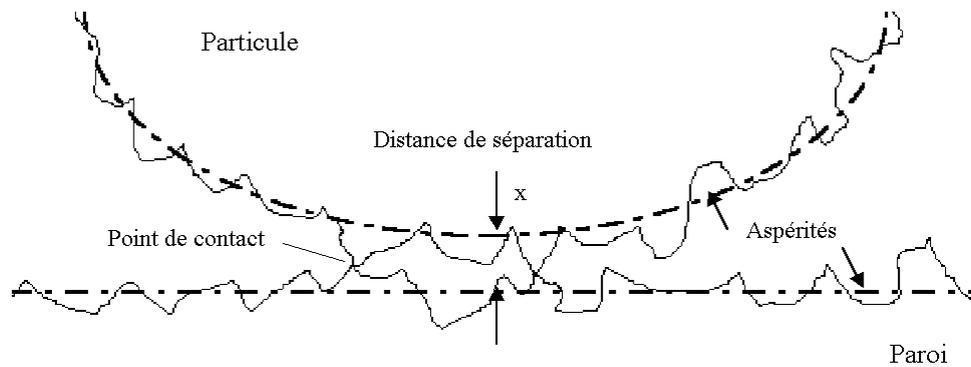


Figure I.14 : Surface de contact entre une particule et une paroi

La distance moyenne x dépend de l'échelle de la rugosité. Pour une surface dite lisse cette valeur est supposée égale à $0.0004 \mu\text{m}$.

La force d'adhérence est l'effet total de toutes les forces de van der Waals qui sont établies entre toutes les paires de dipôles de la particule sphérique de diamètre d_p et la surface, son intensité est :

$$F_{adh} \propto \frac{d_p}{x^2} \quad (\text{I.53})$$

1.4.1.2. Force électrostatique

La force électrostatique est une force d'attraction entre les particules qui sont chargées. La plupart des particules qui ont un diamètre supérieur à 0.1 μm portent des charges électrostatiques. L'intensité de la force électrostatique est proportionnelle au carré de la charge électrique de la particule et inversement proportionnelle au carré de la distance x_q entre les charges (distance qui peut être différente de la distance particule - paroi) :

$$F_e \propto \frac{q^2}{x_q^2} \quad (\text{I.54})$$

Remarque : il a été démontré que la charge électrostatique est proportionnelle à la racine carrée du diamètre de la particule donc la force électrostatique est proportionnelle au diamètre de la particule, cependant, Shaw [SHA 95] a montré l'influence de l'écoulement d'air autour de la particule qui induit une modification des charges de la particule donc de la force électrostatique. Ainsi, tous les paramètres ne sont pas clairement identifiés et des études complémentaires sont nécessaires.

1.4.1.3. Tension superficielle

La plupart des matériaux adsorbent des molécules de fluide à la surface. Au moment du contact entre une particule et la paroi, il existe une force d'attraction due à la présence de ce fluide (figure I.15).

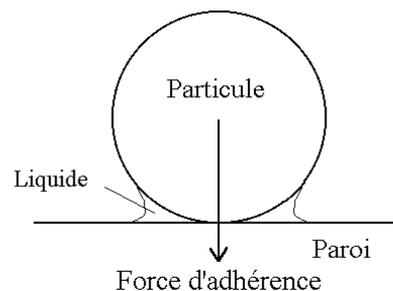


Figure I.15 : La force d'adhérence due à un film liquide

Pour des humidités relatives supérieures à 90%, cette force a pour module :

$$F_s = 2\pi\gamma_f d_p \quad (\text{I.55})$$

Avec γ_f : tension superficielle du fluide.

I.4.1.4. Expression empirique

La théorie du phénomène d'adhérence a été établie pour des surfaces lisses et ne prend pas en compte la rugosité des surfaces réelles. C'est pourquoi une expression empirique [HIN 82] a été établie pour le calcul de la norme de la force totale d'adhérence entre une particule et une surface dure et propre :

$$F_{adh} = 150 \times d_p \times [0.5 + 0.0045(\%RH)] \quad (I.56)$$

Avec F_{adh} : force d'adhérence (dynes),

d_p : diamètre de la particule (cm),

$\%RH$: humidité relative (%).

I.4.2. Détachement des particules

La force nécessaire pour détacher une particule déposée sur une surface peut être mesurée par expérimentation :

- détachement par centrifugation : on impose aux particules une force centrifuge normale à la surface dans une centrifugeuse. On détermine ainsi la vitesse de rotation nécessaire au détachement des particules. Les mesures ont montré que la force nécessaire pour détacher 98 % des particules déposées sur une surface est dix fois supérieure à celle requise pour en détacher 50%.

- détachement sous l'action d'un courant d'air : on détermine la vitesse d'écoulement d'air nécessaire au détachement des particules. Dans ces expérimentations, le calcul de la force de détachement est difficile à effectuer car il dépend à la fois de la géométrie de l'écoulement ainsi que des hypothèses retenues pour le profil de la couche limite [HIN 82] et [ZIM 82].

On remarque que généralement la force d'adhérence est proportionnelle au diamètre d_p de la particule, alors la force de détachement par centrifugation est proportionnelle au cube de ce diamètre et celle du détachement par courant d'air, au carré du diamètre de la particule. Le tableau I.9 montre la variation des forces d'adhérence et de détachement par courant d'air pour des particules, dans les conditions standards de température et de pression et pour une humidité de 50%.

Il est important de noter que la force induite par l'écoulement d'air est toujours très inférieure à la force d'adhérence ce qui fait que les particules ne peuvent pratiquement pas être

détachées par un courant d'air. Par contre les couches formées par l'agglomération de ces particules sur les surfaces peuvent être facilement disloquées en fines tranches.

Diamètre (μm)	Force d'adhérence (dynes = 10^{-5} N)	Force du courant d'air (à 10 m/s) (dynes = 10^{-5} N)
0.1	10^{-3}	2×10^{-5}
1.0	10^{-2}	2×10^{-4}
10.0	10^{-1}	3×10^{-3}
100.0	1	6×10^{-2}

Tableau I.9 : Comparaison entre la force d'adhérence et la force de détachement par courant d'air [HIN 82]

I.4.3. Ricochet des particules

Quand une particule rentre en contact avec une surface à faible vitesse, elle perd son énergie cinétique en se déformant et en déformant la surface. Plus la vitesse est élevée, plus la déformation est grande et meilleure est l'adhérence. A haute vitesse, une partie de l'énergie cinétique est transformée en énergie de déformation et une autre en énergie élastique. Si cette dernière est supérieure à l'énergie d'adhérence, la particule va ricocher sur la surface.

Il existe deux approches pour définir si il va y avoir ricochet. La première définit les limites d'adhérence ou d'énergie cinétique alors que l'autre définit une vitesse critique, V_c , au dessus de laquelle le ricochet a lieu, cette vitesse est déterminée par la relation :

$$V_c = \frac{\beta}{d_a} \quad (\text{I.57})$$

Avec d_a : diamètre aérodynamique (diamètre de la sphère de densité unitaire qui a la même vitesse de chute libre que la particule), et

β : constante qui dépend de la géométrie et de la nature des matériaux de la particule et de la paroi.

L'énergie cinétique nécessaire pour le ricochet d'une particule est donnée par Dahneke [DAN 71] :

$$E_c = \frac{d_p A (1 - e^2)}{2xe^2} \quad (I.58)$$

Avec x : distance de séparation,
 A : constante de Dahneke, et
 e : coefficient de restitution.

Par exemple, pour une sphère de densité unitaire et de diamètre 10 μm , il n'y a pas de rebond pour une vitesse de 3.0 cm s^{-1} et il y a une probabilité de 50 % pour qu'il y ait rebond pour une vitesse comprise entre 9.0 à 60 cm s^{-1} .

I.4.4. Conclusion

Toutes les expressions des différentes forces qui entrent en jeu dans l'interaction particule - paroi sont bien définies mais il faut bien constater qu'elles sont toutes opportunes pour des surfaces dures et propres. Il est donc nécessaire de déterminer d'autres corrélations afin de décrire et de quantifier l'action des parois réelles que l'on trouve dans le bâtiment.

I.5. CONCLUSION

Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, les particules polluantes de l'air intérieur des bâtiments sont variées par leurs tailles, leurs formes et leurs compositions. Transportées via les différents passages entre l'extérieur et l'intérieur (grandes ouvertures, bouches et systèmes de ventilation), créées directement à l'intérieur (combustions, détérioration des matériaux) ou remises en suspension par l'activité des personnes, leurs origines sont également multiples. Ces remarques mettent clairement en relief la complexité du problème de la pollution particulaire quant à la définition des agents polluants.

Lorsqu'on traite de la pollution particulaire intérieure des bâtiments, il est nécessaire de déterminer à la fois le mouvement des particules dans l'air et l'interaction des particules avec les parois. S'il n'est pas aisé de modéliser correctement le mouvement des particules dans l'air (un grand nombre de forces, plus ou moins bien connues, peut s'exercer sur celles-ci),

l'évaluation de l'interaction particule - paroi n'est pas plus évidente. De plus, les théories existantes sur cette interaction ne concernent que des surfaces lisses et dures.

Le choix d'un modèle global qui s'intéresse non pas à l'interaction entre la particule seule et une paroi mais à celle entre l'ensemble des particules avec les surfaces intérieures, semble être opportun, au regard de la complexité des revêtements de parois rencontrés dans le bâtiment. Le chapitre II traite de l'évaluation du dépôt sur les revêtements intérieurs et montre comment les niveaux de concentration en particules dans l'air à l'intérieur des bâtiment peuvent être évalués.

Chapitre II

-

***Approche Globale du Phénomène de Dépôt
Particulaire – Caractérisation des Revêtements***

II. APPROCHE GLOBALE DU PHENOMENE DE DEPOT PARTICULAIRE – CARACTERISATION DES REVETEMENTS

II.1. PRINCIPE

II.1.1. Modélisation des échanges particuliers

Pour la détermination de la qualité particulaire de l'air intérieur, l'évaluation de la concentration en particules dans l'air est primordiale. Pour cela, il faut considérer les différents échanges qui entrent en jeu. La vie d'une particule, en tant que quantité polluante de l'air intérieur, est constituée de deux étapes. La première est son transport dans l'air sous l'action locale des écoulements de l'air et des différentes forces qui peuvent s'exercer sur elle (diffusion moléculaire, gravité, forces radiométriques). La deuxième étape est son interaction avec une surface, soit la particule sera captée par la surface (et donc sera perdue pour l'air) soit elle ricochera, ce résultat dépendra de la nature et de la force de l'interaction qui s'opère entre la surface et la particule (figure II.16).

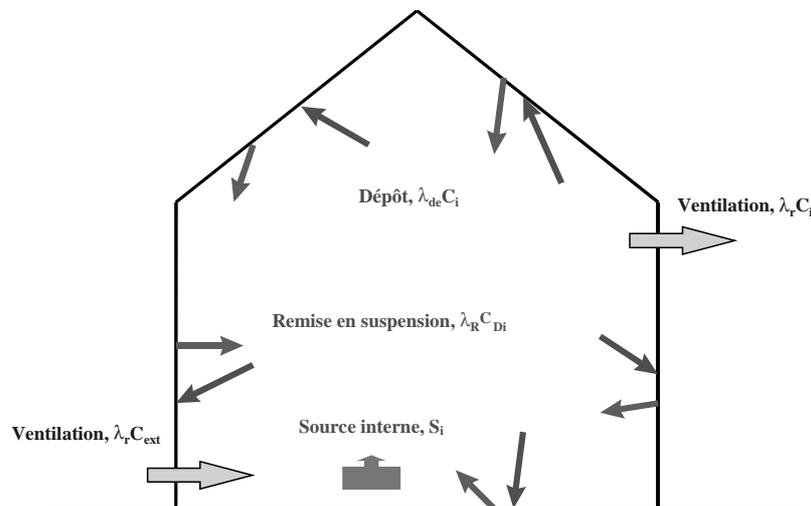


Figure II.16 : Mouvement des particules dans une enceinte

Le bilan de conservation massique du polluant particulaire dans une telle enceinte monozone peut être exprimé par la relation [NAZ 93] :

$$\frac{dC_i}{dt} = f \times \lambda_r C_{ext} - \lambda_r C_i - \lambda_{de} C_i - \lambda_R C_{Di} + S_i \quad (II.59)$$

Avec C_i : concentration intérieure en particules dans l'air (kg ou nombre $\cdot \text{m}^{-3}$),
 C_{ext} : concentration extérieure en particules dans l'air (kg ou nombre $\cdot \text{m}^{-3}$),
 C_{Di} : concentration en particules déposées (kg ou nombre $\cdot \text{m}^{-3}$)
 S_i : source interne de particules (kg ou nombre $\cdot \text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$)
 λ_r : coefficient de renouvellement d'air (s^{-1}),
 f : coefficient de pénétration,
 λ_{de} : paramètre de dépôt (s^{-1}),
 λ_R : paramètre de remise en suspension (s^{-1}).

Les deux premiers termes de cette équation correspondent aux échanges entre l'intérieur et l'extérieur, l'air pollué extérieur pénètre dans la zone par le système de ventilation ou par les différentes ouvertures, et une partie de l'air intérieur sort de cette zone par extraction. Les deux termes suivants modélisent l'interaction avec les parois (dépôt et remise en suspension). Le dernier terme correspond à la présence d'une source de particules à l'intérieur de la zone d'étude. Chacun des paramètres intervenant dans l'équation II.59 va être repris et développé dans les paragraphes suivants.

II.1.2. Echanges avec l'extérieur

L'air pollué extérieur pénètre à l'intérieur des bâtiments par infiltration, ventilation naturelle et/ou ventilation mécanique. Si pour la ventilation mécanique l'évaluation du débit de renouvellement d'air est évidente, il n'en est pas de même pour les deux premiers transferts car le taux de renouvellement d'air dépend principalement des conditions climatiques telles que la différence de température entre l'air intérieur et extérieur, la vitesse du vent... Plusieurs modèles existent pour son évaluation [ALL 98] mais le choix du modèle adéquat reste délicat. Habituellement, le taux de renouvellement d'air peut varier de 0.2 vol h^{-1} à 2 vol h^{-1} en moyenne, mais peut augmenter jusqu'à 10 vol h^{-1} et plus en ventilation naturelle par grande ouverture (par ventilation traversante ou à simple exposition) [ABA 98].

Le second paramètre à déterminer est le coefficient de pénétration. En effet, l'air extérieur est filtré par l'enveloppe du bâtiment, cette filtration dépend essentiellement du type de bâtiment étudié et du type de particules. Ainsi, les bâtiments des pays nordiques auront une filtration plus grande que ceux des pays sud - Européens. Pour prendre en compte ce transfert de particules de l'extérieur vers l'intérieur, on introduit le coefficient de pénétration, f , ou de filtration, $(1-f)$, défini par la relation suivante :

$$f = \frac{C_{ext}}{C_{int/ouv}} \quad (\text{II.60})$$

Avec C_{ext} : concentration extérieure en particules dans l'air (kg ou nombre . m⁻³),
 $C_{int/ouv}$: concentration intérieure en particules dans l'air au niveau de l'ouverture (kg ou nombre . m⁻³).

Ce coefficient traduit donc le pourcentage de particules extérieures que l'on retrouve effectivement à l'intérieur du volume d'étude. Loewenstein [LOE 90] évalue ce coefficient pour un hôpital de la région parisienne à 30% pour les particules inférieures à 10 µm. Pour la même taille de particules, Koutrakis [KOU 92] et Thatcher [THA 95] obtiennent un coefficient de 100%. Cette dernière valeur est communément admise pour les particules inférieures à 10 µm.

II.1.3. Dépôt de particules

Les pertes par dépôt, représentées par le paramètre λ_{de} , peuvent être calculées par le produit de la vitesse globale de dépôt et de la surface intérieure de paroi, divisé par le volume total de la zone.

$$\lambda_{de} = \frac{S}{V} \times V_d \quad (\text{II.61})$$

Avec S : surface intérieure (m²),
 V : volume total (m³),
 V_d : vitesse globale de dépôt (m s⁻¹).

La vitesse globale de dépôt, V_d , est définie comme le rapport entre la densité de flux net, J , d'une espèce vers une surface, et la concentration, C_i , de l'espèce dans l'air :

$$V_d = \frac{J}{C_i} \quad (\text{II.62})$$

Avec J : densité de flux (kg ou nombre de particules . m² s⁻¹),
 C_i : concentration intérieure en particules dans l'air (kg ou nombre de particules . m⁻³).

La concentration est prise en un point suffisamment éloigné de toute paroi. Si la densité de flux est mesurée en nombre de particules par unité de surface et de temps et que la concentration est exprimée en nombre de particules par unité de volume alors la vitesse de dépôt a bien la dimension d'une vitesse (longueur par unité de temps). Cette vitesse représente donc globalement la vitesse à laquelle migre une particule vers une paroi, paroi à laquelle elle va adhérer. Nous reviendrons sur ce concept de vitesse de dépôt ainsi que sur la relation la liant à la constante de dépôt dans le chapitre II.4.

II.1.4. Remise en suspension

Comme le souligne Lange [LAN 95], le phénomène de remise en suspension est méconnu. Cependant on peut distinguer deux types de remise en suspension : celle induite par l'écoulement d'air existant dans le volume d'étude, et celle engendrée par l'activité des personnes présentes dans la zone.

La première a constitué le sujet d'étude de Shaw [SHA 94]. L'auteur a étudié l'influence de divers paramètres comme la vitesse d'écoulement d'air, l'intensité de la turbulence, l'humidité relative et la température sur la remise en suspension de particules de taille inférieure à 10 μm , à l'intérieur d'une chambre de convection. Les résultats de cette étude expérimentale montrent que, pour les vitesses et intensités turbulentes d'écoulements rencontrés couramment dans les résidences ou les bureaux, la remise en suspension des particules peut être négligée. En effet, il est montré que les forces induites par l'écoulement d'air qui agissent sur les particules déposées sont inférieures au seuil de décollement de ces particules. Plus récemment, Lengweiler et al. [LEN 99] ont montré que le fait de ne pas prendre en compte la remise en suspension, pour des particules de talc (de diamètre compris entre 1 et 30 μm), implique une surévaluation du dépôt donc une sous estimation de la concentration en particules dans l'air de l'ordre de 40% après une période de 5h dans une salle de dimensions classiques. Il faut toutefois relativiser ce résultat car le coefficient de remise en suspension est déterminé à partir de mesures effectuées dans un tunnel dans lequel est créé un écoulement d'air de vitesse moyenne égale à 0.1 m s^{-1} et d'intensité turbulente de l'ordre de 60%. Cette dernière valeur paraît élevée compte tenu du fait que les valeurs rencontrées dans le bâtiment se situent entre 20% et 60% [BYR 95].

La seconde cause de remise en suspension est l'activité des personnes à l'intérieur de la zone d'étude. Dans leur étude des niveaux de concentration en particules dans l'air à l'intérieur de

deux résidences (situées en agglomération et en quartier résidentiel), Monn et al. [MON 99] montrent que l'activité humaine conduit à une augmentation de la concentration pour les particules fines ($< 0.4 \mu\text{m}$) et grosses ($> 12.5 \mu\text{m}$) mais aucun changement n'est observé pour les particules de taille intermédiaire. Une étude systématique effectuée dans 11 écoles et 16 crèches au Danemark [KIL 99] conclut qu'il est très difficile, voir impossible, de prédire la remise en suspension en fonction de la quantité de particules déposées et de l'activité. Cependant, il est indéniable que l'activité des personnes influe sur la concentration en particules dans l'air. Ainsi, Jansson [JAN 99] montre que la quantité de particules dans l'air de taille supérieure à $1.0 \mu\text{m}$ est multipliée par dix lorsque les expérimentateurs sont présents pendant les mesures.

A l'heure actuelle, il n'existe pas de modèle permettant de calculer le paramètre de remise en suspension, or l'influence de l'activité humaine n'est plus à démontrer. C'est pourquoi, un regain d'intérêt pour sa détermination a émergé ces dernières années et de nombreuses campagnes de mesures sont effectuées essentiellement dans les écoles et les crèches [PRI 99].

II.1.5. Source interne de particules

Les principales sources de pollution particulaire à l'intérieur des bâtiments d'habitation sont la fumée de cigarettes et la cuisine. Wallace [WAL 96], en compilant les résultats des trois plus grandes campagnes de mesures particulières effectuées aux Etats-Unis, montre que la concentration additionnelle induite par un fumeur est comprise entre 25 et $45 \mu\text{g m}^{-3}$, c'est-à-dire que la contribution d'une unique cigarette est estimée de 1.0 à $2.0 \mu\text{g m}^{-3}$ en moyenne sur une période de 24 heures (dont 2/3 des particules émises sont inférieures à $2.5 \mu\text{m}$). La cuisine représente quant à elle, 10 à $20 \mu\text{g m}^{-3}$, soit un débit de 4 mg min^{-1} de particules comprises entre 2.5 et $10 \mu\text{m}$. Cependant, il est important de noter que 25% des particules intérieures sur l'ensemble de ces études étaient d'origine inconnue, l'hypothèse la plus vraisemblable est qu'elles provenaient de la remise en suspension générée par l'activité humaine.

II.1.6. Conclusion

Les phénomènes de dépôt et de remise en suspension étant, pour le moment, impossible à évaluer indépendamment l'un de l'autre, il est habituel de considérer un coefficient λ_d , qui prend en compte leur effet global, soit :

$$\lambda_{de} C_i + \lambda_R C_{Di} \approx \lambda_d C_i \quad (\text{II.63})$$

L'équation II.59 devient alors:

$$\frac{dC_i}{dt} = f \times \lambda_r C_{ext} - \lambda_r C_i - \lambda_d C_i + S_i \quad (\text{II.64})$$

Si tous les paramètres de l'équation II.64 sont constants (exceptée la concentration intérieure), la solution est donnée par :

$$C_i(t) = C_{ext} \frac{\lambda_r}{\lambda_r + \lambda_d} (1 - \exp(-(\lambda_r + \lambda_d) \times t)) + C_i(0) \times \exp(-(\lambda_r + \lambda_d) \times t) + S_i(t) \quad (\text{II.65})$$

L'évolution de la concentration intérieure en particules dans l'air se déduit donc de l'équation II.65. Les niveaux de concentration extérieure doivent être mesurés en fonction de l'implantation géographique du bâtiment (site urbain, proximité d'une voie de circulation...) et les taux de renouvellement d'air dépendent des caractéristiques de l'enveloppe à étudier (système de ventilation, perméabilité...). L'évaluation du dépôt est beaucoup plus délicate car elle est fonction à la fois, des caractéristiques des particules, de l'écoulement d'air qui règne à l'intérieur de la zone, des revêtements de parois et de l'orientation des parois. Le chapitre suivant, par une analyse de l'état de l'art, dégage les principaux résultats des études sur le dépôt particulaire.

II.2. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DU DEPOT PARTICULAIRE

II.2.1. Principe fondamental

L'utilisation de ce modèle repose essentiellement sur la connaissance de la vitesse de dépôt V_d (ou de la constante de dépôt, λ_d). La vitesse de dépôt est un concept très utile pour comparer les résultats expérimentaux et théoriques du taux de dépôt.

Comme mentionnée précédemment, cette vitesse, V_d , est définie comme la densité de flux de polluant rapportée à une surface divisée par la concentration en polluant loin de la surface traitée. En fait cette distance à la paroi est relative au problème traité. Dans le bâtiment, la

concentration dans une pièce peut être généralement considérée comme étant homogène et c'est seulement à quelques centimètres de la paroi qu'existe la couche limite. Des exceptions sont à noter, comme l'émission ponctuelle de polluant (comme allumer une allumette), ou lorsque que l'air est stratifié. Dans ce dernier cas, les vitesses de dépôt, à l'exception de la sédimentation pour les grosses particules, sont très faibles.

En 1989, Nazaroff et Cass [NAZ 89] font la synthèse des modèles théoriques de calcul des vitesses de dépôt pour des parois lisses. Ainsi, les auteurs prennent en compte la diffusion moléculaire, la gravité et la force de thermophorèse :

$$V_d = V_D + V_t + s_g V_g \quad (\text{II.66})$$

Avec V_D : vitesse due à l'agitation moléculaire (m s^{-1}),

V_t : vitesse de thermophorèse (m s^{-1}),

V_g : vitesse de sédimentation gravitationnelle (m s^{-1}),

s_g : coefficient d'orientation de parois (-1 pour le plafond, 0 pour les parois verticales et 1 pour le sol).

L'équation II.66 est valable en l'absence d'écoulement d'air, cas que l'on ne trouve jamais à l'intérieur des bâtiments. En effet, l'écoulement d'air dans une salle est souvent la résultante d'écoulements multiples de convection naturelle et forcée. Cette relation représente donc la vitesse minimale de dépôt car les mouvements de l'air ont tendance à accélérer le dépôt en véhiculant les particules vers les surfaces plus rapidement que si elles l'avaient été par les seules forces citées précédemment.

II.2.2. Etudes sur site

Afin de déterminer cette vitesse de dépôt, des mesures in situ ont été effectuées, elles sont résumées dans le tableau II.10. Différents types de bâtiments (tertiaires et résidentiels) ont été étudiés. La ventilation était assurée naturellement ou contrôlée. La taille des particules mesurées variait essentiellement de quelques centièmes de micromètres à quelques micromètres.

	Type de bâtiment	Type de particules	Ventilation	Vitesse de dépôt (10^{-4} m s^{-1})
Offermann et al. [OFF 85]	Résidence	Fumée de tabac (0.09 à 1.25 μm)	Naturelle (0,1 vol h ⁻¹)	0.014 à 0.42
Raunemaa Et al. [RAU 89]	Résidence et Commerce (30)	Fe, CL, S, K, Ca (<0.2 et >1.5 μm)	Naturelle et mécanique	20 et 20 à 50
Nazaroff Et al. [NAZ 89]	Institution (5)	Suie, Na, S, Pb, terre, métaux (0.05 à 0.21 μm)	Mécanique	0.001 à 0.2
Roed et Cannell [ROE 88]	Résidence	Aérosol dit de Chernobyl (0.4 à 1.4 μm)	Surpression	0.64 à 1.9
Roed et al. [ROE 91]	Résidence	Silicium marqué (2.5 et 4.5 μm)	Naturelle (0.007 à 0.01 vol h ⁻¹)	1.93 et 4.01
Sinclair et al. [SIN 90]	Commerce (4)	S04++, Cl-, Na+ (<2.5 et 2.5 à 15 μm)	Mécanique	0.4 à 0.5 et 70 à 220
Adam et Riffat [ADA 93]	Institution	Fumée d'huile (0.1 à 2.0 μm)	Naturelle (0.14 à 8.5 vol h ⁻¹)	0.025 à 0.26
Xu et al. [XU 94]	Résidence	Aérosol dit de Chernobyl (0.4 à 1.4 μm)	Naturelle (0.017 à 0.02 vol h ⁻¹)	0.017 à 0.29
Byrne [BYR 95]	Résidence (3)	Silicium marqué (0.7 ; 2.5 ; 4.5 et 5.4 μm)	Naturelle (0.02 à 0.98 vol h ⁻¹)	0.9 , 1.8 , 2.2 et 3.15

Tableau II.10 : Vitesse de dépôt - Mesures sur site

L'inconvénient majeur de ces mesures sur site est qu'elles sont difficilement exploitables pour des configurations géométriques et aérauliques différentes de celles où ont été effectuées les mesures. Par exemple, pour les particules de diamètre $2.0 \mu\text{m}$, on observe un facteur 10 entre les résultats de vitesse de dépôt obtenus par Roed et al. [ROE 91] et Byrne [BYR 95] ($2 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$) et ceux obtenus par Adam et Riffat [ADA 93] ($2 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$). La vitesse de dépôt prenant en compte les différences de volumes et de surfaces intérieures, l'hétérogénéité des résultats peut s'expliquer soit par des écoulements d'air fortement différents entre les salles étudiées, soit par une mauvaise estimation de la surface intérieure. Cette dernière dépend en effet du revêtement utilisé, mais aucune de ces études ne fournit de données sur les revêtements de surface présents et cette dernière hypothèse ne peut donc être vérifiée.

II.2.3. Etudes en modèles réduits

Afin de mieux maîtriser ces écoulements d'air (et d'autres facteurs comme la température...), des expérimentations sur maquettes ont été effectuées. Le tableau II.11 fait la synthèse des principales expérimentations sur maquette destinées à la détermination de la vitesse de dépôt de particules de différentes tailles et pour différentes configurations géométriques. Jusqu'aux années 80, les chercheurs ont étudié le dépôt de particules de plus en plus fines et pour différentes formes d'enceintes mais les surfaces restaient lisses (aluminium). Puis, des études ont porté sur le dépôt sur les matériaux non lisses (rugueux). Ainsi, Shimada et al. [SHI 88] développent un modèle de dépôt prenant en compte la rugosité de surface des parois. Une étude expérimentale valide leur approche pour les petites particules ($< 0.2 \mu\text{m}$) mais cette approche ne reste valable que pour les faibles rugosités et les surfaces dures (acier inoxydable, résine, papier de verre). A partir de 1996, Thatcher et al. [THA 96] et [THA 97] étudient le dépôt en convection naturelle sur des revêtements se rapprochant un peu plus de ceux rencontrés à l'intérieur des bâtiments. Les auteurs précisent mieux les revêtements étudiés (lisse, rayé, texturé) mais cette description reste vague et ne permet qu'une classification qualitative de ces revêtements. Byrne [BYR 95] s'intéresse au dépôt sur des revêtements non lisses en écoulement turbulent et construit une classification des revêtements à partir de l'étude de la couche limite en soufflerie. C'est la vitesse de friction qui permet de paramétrer les différents revêtements : aluminium, papier peint, moquette et astroturf (par ordre croissant de la vitesse de friction).

	Type d'enceinte	Type de particules	Type d'écoulement	Vitesse de dépôt (10^{-4} m s^{-1})
Langstroth et Gillespie [LAN 47]	Parallélépipède (1.12 m^3)	Chlorure d'ammonium (0.6 à $4.0 \mu\text{m}$)	Turbulent	0.1 à 0.4
Van de Vate [VAN 72]	Sphère (1 m^3)	Polyst. Latex (0.1 à $1.3 \mu\text{m}$)	Convection naturelle	0.004 à 0.04
Harrison [HAR 79]	Cube (0.195 m^3)	Polyst. Latex (0.11 à $1.0 \mu\text{m}$)	Convection naturelle	0.01 à 0.25
Crump et al. [CRU 83]	Sphère (0.118 m^3)	Chlorure de sodium et Polyst. Latex (0.024 à $0.312 \mu\text{m}$)	Convection	0.15 à 1.8
Okuyama et al. [OKU 86]	Sphère (2.606 m^3)	Chlorure de sodium ($6 \cdot 10^{-3}$ à $2 \mu\text{m}$)	Turbulent	0.21 à 168
Shimada et al. [SHI 88]	Sphère (2.606 m^3)	Chlorure de sodium (0.01 à $0.18 \mu\text{m}$)	Turbulent	0.1 à 4
Holub [HOL 88]	Cylindre (4 m^3)	'Progéniture' de radon ($3 \cdot 10^{-4}$ à $3 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$)	Convection naturelle Turbulent	0.29 à 57
Byrne [BYR 95]	Cube (8 m^3)	Silicium marqué (0.7 ; 2.5 ; 4.5 et $5.4 \mu\text{m}$)	Turbulent	0.41 ; 0.62 ; 1.1 et 2.0
Thatcher et al. [THA 97]	Cube (1.8 m^3)	Ammonium fluorescent (0.1, 0.5 et $1.0 \mu\text{m}$)	Convection naturelle	0.02, 0.1 et 1.0

Tableau II.11 : Vitesse de dépôt - Expérimentations sur maquette

II.2.4. Conclusion

L'exploitation des mesures de vitesses de dépôt in situ est difficile car peu de paramètres sont maîtrisés (températures surfaciques, écoulement de l'air...). De plus, si les caractéristiques des particules sont d'habitude bien déterminées, la description des revêtements de parois est souvent omise ou trop succincte. Les études sur modèles réduits apportent des réponses exploitables aux géométries réelles du bâtiment tout en assurant le contrôle des conditions limites. Il faut noter que les derniers travaux en la matière ([BYR 95] et [THA 97]) sont les plus aboutis et ils constitueront une référence à la fois pour la mise en œuvre d'une étude expérimentale. Le but de cette expérimentation, présentée dans le paragraphe suivant, est la mise au point d'un dispositif expérimental de mesure de la vitesse de dépôt pour différents couples revêtement – particule, ainsi qu'à la création d'une classification des revêtements basée directement sur leurs rôles vis à vis du dépôt particulaire.

II.3. EXPERIMENTATION – RESULTATS

II.3.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental consiste en une enceinte confinée de dimensions 0.6×0.6×0.6m dont les parois peuvent être recouvertes par différents revêtements (papiers peints, moquettes...). La figure II.17 présente la géométrie du caisson (voir Annexe 2 pour une description détaillée du dispositif expérimental).

L'enceinte est équipée d'un agitateur à hélices placé en partie centrale haute et dirigé vers le bas afin d'assurer les cycles de brassage de l'air intérieur, un tube d'injection placé à 15 cm de l'axe de l'agitateur et un tube de prélèvement positionné au centre du volume, relié à un compteur de particule.

Trois tailles de particules ont été injectées (0.7, 1.0 et 5.0 μm), celles-ci sont représentatives des particules habituellement rencontrées à l'intérieur des bâtiments et qui sont susceptibles de présenter un danger pour la santé. Deux modes d'injection ont été nécessaires. Les particules de 5.0 μm se présentent sous la forme de poudre sèche ce qui permet de les introduire dans le volume d'étude au moyen d'une seringue. Cette méthode est simple à mettre en œuvre et reste suffisante pour notre étude puisque le paramètre à mesurer est indépendant de la concentration initiale de particules dans l'air. Néanmoins, nous avons veillé à injecter sensiblement la même quantité de particules pour chacune des mesures.

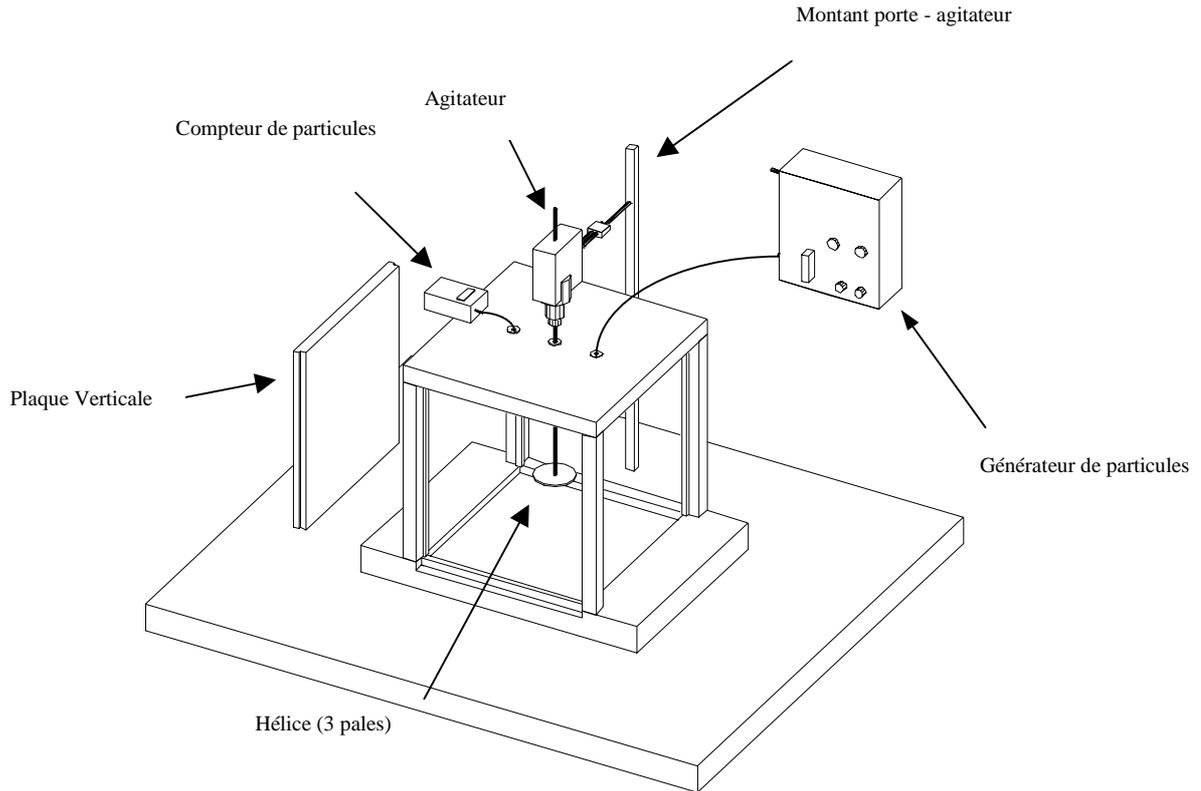


Figure II.17 : Schéma de l'enceinte

L'évolution de la quantité de particules à l'intérieur de l'enceinte en fonction du temps est présentée par la figure II.18 (a). Les particules de 0.7 et 1.0 μm sont des microsphères de polystyrène latex en solution. Leur génération s'effectue au moyen d'un générateur de particules de type HIAC/ROYCO modèle 256. L'injection est effectuée en continu jusqu'à l'obtention de la concentration initiale désirée. La figure II.18 (b) montre l'évolution de la quantité de particules à l'intérieur de l'enceinte.

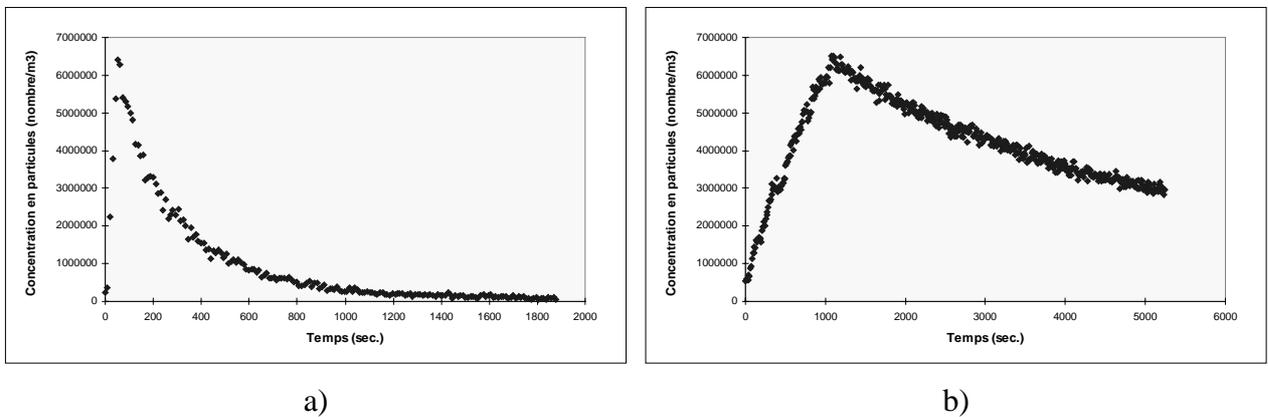


Figure II.18 : Evolution de la quantité de particules à l'intérieur de l'enceinte

a) particules de 5.0 μm - b) particules de 0.7 et 1.0 μm

II.3.2. Protocole expérimental

Le revêtement à étudier est ajusté sur les faces intérieures des parois. Les deux sondes, pour l'injection et pour le comptage, et la tige d'agitation sont mises en place. Toutes les parois, exceptée une, sont positionnées, puis l'intérieur de l'enceinte est nettoyé par soufflage d'air comprimé et par aspiration puis la dernière paroi est ensuite posée.

L'agitateur et le compteur de particules sont mis en marche. Lorsque la concentration résiduelle à l'intérieur de l'enceinte devient inférieure à 5% de la concentration de particules à injecter, les particules sont introduites dans l'enceinte. La quantité initiale désirée est approchée en surveillant le nombre de particules affiché par le compteur. La mesure est terminée lorsque la concentration en particules est faible devant celle injectée initialement.

II.3.3. Détermination de la constante globale de dépôt

L'équation II.65, pour un taux de renouvellement d'air nul (cas de notre enceinte d'étude), devient :

$$C_i(t) = C_i(0) \times \exp(-\lambda_d \times t) \quad (\text{II.67})$$

La figure II.19 présente l'évolution de la quantité de particule par unité de volume.

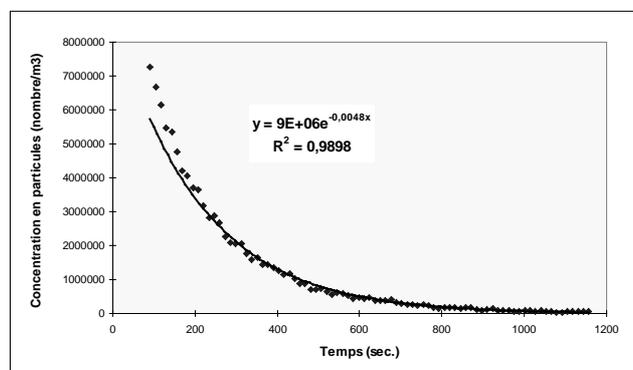


Figure II.19 : Evolution de la quantité de particules de 5.0 µm à l'intérieur de l'enceinte

La valeur de la constante de dépôt est déterminée par régression linéaire (seules les valeurs obtenues avec un coefficient de corrélation, R^2 , supérieur à 95% ont été retenues). Pour chacun des couples particule – revêtement, trois mesures au moins réalisées sous les mêmes conditions expérimentales ont été menées. La moyenne des constantes de dépôt obtenues ainsi que l'écart – type de ces mesures apparaîtront dans les tableaux de résultats.

Ces constantes de dépôt mesurées en modèle réduit, par le calcul des vitesses de dépôt supposées constantes pour un couple particule – revêtement et pour un écoulement donnés, permettront la détermination des constantes de dépôt pour toute autre enceinte. Comme le souligne Nazaroff [NAZ 93], trop peu d'études présentent les conditions d'écoulement d'air dans le modèle réduit ce qui a pour conséquence directe l'impossibilité d'utiliser les résultats des mesures. L'écoulement d'air généré à l'intérieur de notre enceinte est présenté dans le chapitre III. Les vitesses variant de 0.5 à 2.9 m s⁻¹ et l'intensité turbulente oscillant entre 30 et 57%, ces conditions d'écoulement d'air correspondent en terme de taux de turbulence à celles des salles des bâtiments [BYR 95] ; les vitesses, quant à elles, sont un peu élevées mais les fortes vitesses restent uniquement localisées au centre de l'enceinte, au niveau des pales de l'agitateur.

II.3.4. Résultats des mesures expérimentales

II.3.4.1. Etude n°1

Remarque préliminaire : c'est l'unité h⁻¹ qui a été choisie pour les constantes de dépôt, cette unité permettant en effet de comparer les valeurs obtenues pour le dépôt à celles d'un niveau de ventilation équivalente. Ainsi, dans notre enceinte, une constante de dépôt de X vol h⁻¹ est équivalente à un taux de ventilation en air propre de X vol h⁻¹ si on néglige le dépôt sur les parois dans l'équation II.65.

Cette première étude a consisté en la mise au point du protocole expérimental et en la validation de la détermination des constantes de dépôt pour différentes orientations de parois (voir chapitre II.5.4.). Les mesures ont porté sur une taille de particules sphériques (5.0 µm). Le dépôt de ces particules a été étudié pour quatre revêtements. Ces revêtements ont été choisis à la fois pour leur présence au sein des bâtiments et pour leurs apparentes différences de comportement vis à vis du dépôt particulaire : bois (surface brute d'aggloméré), papier peint lisse, crépis et moquette à velours coupé. Les trois premières expérimentations (tableau II.12) sont destinées à l'étude d'un seul type de revêtement. Les résultats obtenus pour le papier peint lisse sont similaires à ceux du bois. Ces mesures permettent d'établir une classification des revêtements vis-à-vis de leur potentiel de captation, par ordre croissant : bois (et papier peint lisse), crépis et moquette. Il est intéressant de remarquer les niveaux de ces constantes de dépôt, compris entre 10 et 20 volumes par heure. Ils montrent l'importance du dépôt des particules sur les surfaces intérieures par rapport au potentiel nettoyant de la

ventilation (qui est de l'ordre de quelques volumes par heure). Le dépôt pariétal des particules à l'intérieur des zones est le paramètre prépondérant des échanges particulaires à l'intérieur du bâtiment.

n°	Revêtements			λ_d (h ⁻¹) 5.0 μm
	Sol	Parois Verticales	Plafond	
1	Bois	Bois	Bois	11.40 ± 0.74
2	Moquette	Moquette	Moquette	20.88 ± 2.74
3	Crépis	Crépis	Crépis	18.00 ± 0.59
4	Moquette	Crépis	Bois	20.16 ± 1.53
5	Bois	3 Moquette + 1 Bois	Bois	18.54 ± 0.69
6	Bois	Bois	Moquette	13.68 ± 0.64

Tableau II.12 : Constantes de dépôt mesurées pour les différentes configurations de revêtements

II.3.4.2. Etude n°2

Cette seconde série d'expérimentations est l'extension du principe de l'étude n°1 à deux autres tailles de particules sphériques (0.7 et 1.0 μm). Les revêtements étudiés sont : papier peint lisse (équivalent au bois), papier peint présentant un relief (2mm), moquette à velours coupé, linoléum et verre. Le tableau II.13 présente les valeurs des constantes globales de dépôt mesurées. Le dépôt est une fonction croissante de la taille des particules. La classification des revêtements pour les particules les plus fines (0.7 et 1.0 μm) est : papier peint lisse, papier peint avec relief, linoléum, verre et moquette (par ordre croissant de potentiel adhérent). Pour les particules plus grosses, on obtient : linoléum, papier peint lisse, papier peint avec relief, verre et moquette.

Revêtements	λ_d (h ⁻¹)		
	0.7 μm	1.0 μm	5.0 μm
Papier peint lisse	0.58 ©	0.58 ± 0.15	12.30 ± 1.20
Papier peint avec relief	0.75 ± 0.12	0.86 ± 0.08	12.61 ± 0.70
Moquette	3.41 ©	3.57 ©	20.88 ± 2.74
Linoléum	1.22 ©	1.30 ©	11.98 ©
Verre	1.26 ©	2.05 ©	18.85 ©

© une unique mesure disponible

Tableau II.13 : Constantes de dépôt mesurées pour cinq revêtements

II.3.4.3. Comparaison avec les études antérieures

Le passage par le calcul de la vitesse de dépôt est inévitable pour la comparaison, ou l'utilisation, des résultats de mesures effectuées selon des géométries particulières. Le tableau II.14 résume les vitesses globales de dépôt obtenues à partir des mesures dans l'enceinte expérimentale. L'étude de Byrne [BYR 95] est la plus complète des études effectuées dans les conditions semblables à la nôtre, et a d'ailleurs servi de modèle pour sa mise au point. Le tableau II.15 présente ses résultats. Les valeurs obtenues pour le revêtement moquette semblent suspectes car du même ordre que celles obtenues pour le revêtement aluminium, ces données ne seront donc pas prises en compte pour la comparaison des résultats.

Les résultats entre ces deux études sont proches, les valeurs de vitesses de dépôt restent dans les mêmes proportions mais les vitesses de dépôt obtenues dans notre étude sont plus faibles pour les petites particules et plus fortes pour les grosses.

Revêtements	$V_d (10^{-4} \text{ m s}^{-1})$		
	0.7 μm	1.0 μm	5.0 μm
Papier peint lisse	0.16 ©	0.16 ± 0.04	3.42 ± 0.33
Papier peint avec relief	0.21 ± 0.03	0.24 ± 0.02	3.5 ± 0.19
Moquette	0.95 ©	0.99 ©	5.80 ± 0.76
Linoléum	0.34 ©	0.36 ©	3.33 ©
Verre	0.35 ©	0.57 ©	5.24 ©

© une unique mesure disponible

Tableau II.14 : Vitesses de dépôt déduites pour trois revêtements

Revêtements	$V_d (10^{-4} \text{ m s}^{-1})$			
	0,7 μm	2,5 μm	4,5 μm	5,4 μm
Aluminium	0,41	0,62	1,98	2,00
Papier peint	nc	1,10 d	2,78 d	nc
Moquette	nc	0,67 d	1,81 d	nc
Astroturf	nc	1,43 d	4,74 d	nc

nc : valeur non communiquée par l'auteur

d : valeur déduite à partir des courbes de décroissance de l'annexe

Tableau II.15 : Vitesses de dépôt (d'après [BYR 95])

II.3.5. Conclusion

Le but des deux études précédentes était de quantifier le dépôt de particules de différentes tailles sur des revêtements habituellement rencontrés dans les ambiances intérieures du bâtiment. La comparaison avec l'étude expérimentale de Byrne [BYR 95] montre une cohérence des résultats vis-à-vis du dépôt global. Cependant, pour être extensible à d'autres géométries, il est nécessaire de passer par le calcul des vitesses de dépôt, donc de connaître précisément le volume d'étude et surtout les surfaces réelles des revêtements. Comme le souligne justement Nazaroff [NAZ 93], « Si la surface de revêtements pour le linoléum et le verre n'est pas ambiguë, il n'en est pas de même pour les revêtements rugueux comme les moquettes ». Le chapitre suivant, après une pré-classification des revêtements du bâtiment, traite des possibilités actuelles de caractérisation des surfaces et met en relief les difficultés d'utilisation de la notion de vitesse de dépôt.

II.4. CARACTERISATION DES REVETEMENTS

II.4.1. Revêtements du bâtiment

Les revêtements des ambiances intérieures des bâtiments sont de nature et de forme multiples. Néanmoins, on peut classer ces différents revêtements en six grandes familles [DUT 94] : les peintures, les sols plastiques, les sols textiles, les revêtements céramiques, les revêtements en pierre et les parquets auxquelles il faut ajouter les revêtements de type papier peint. Ces familles sont détaillées dans les chapitres suivants. On se focalisera sur la couche extérieure des revêtements, celle en contact direct avec l'air ambiant, site du dépôt particulaire.

II.4.1.1. Peintures

L'état de surface d'un tel revêtement dépend essentiellement du support (paroi en plâtre, en ciment, en bois ou en métal, destinée à recevoir la peinture ou le vernis) et de l'état de finition désiré.

Les supports intérieurs peuvent être classés comme suit :

- parement ciment : enduit lissé, enduit taloché, béton brut de décoffrage, amiante-ciment.
- parement plâtre : plâtre coupé, lissé, projeté et lissé, parement de plâtre.

- bois : massif, contreplaqué, panneau de fibres.
- acier ferrifère.

Trois principaux degrés de finition sont retenus :

- finition élémentaire : le film de peinture/vernis couvre le support mais l'état de finition reflète celui du support.
- finition courante : la planéité initiale n'est pas modifiée, seules les altérations accidentelles sont corrigées.
- finition soignée : la planéité est rendue satisfaisante, l'aspect d'ensemble est uniforme.

II.4.1.2. Sols plastiques

Les revêtements plastiques constituent la partie la plus importante des revêtements de sols minces. Leur épaisseur varie de 1.5 à 3.5 mm. On distingue les revêtements caoutchouc, résine, plastique, vinylique et linoléum. Il existe des Avis techniques qui sont assortis d'un classement UPEC (qualité du revêtement à garder ses caractéristiques vis-à-vis de l'Usure, du Poinçonnement, de l'Eau et des agents Chimiques) mais aucun de ces indices ne permet la détermination de la surface d'interaction revêtement - particule.

II.4.1.3. Sols textiles

La production des sols textiles représente la majeure partie des revêtements de sols (tableau II.16).

Types de revêtements	En milliers de m ²	En %
Sols textiles	114800	54
Revêtements vinyliques	47600	22
Carrelages	41000	19
Parquets	9400	5

Tableau II.16 : Production des revêtements de sols en 1992 d'après [DUT 94]

Outre le classement UPEC, les revêtements textiles peuvent être classés suivant plusieurs critères : type de fabrication, type d'envers (pour la pose) et nature de la couche d'usage. Ce dernier critère peut permettre une première classification vis-à-vis du dépôt puisqu'il donne une caractéristique physique de la surface du revêtement. Les fibres les plus courantes sur le

marché français sont les fibres naturelles animales (laine) et végétales (coton, jute et sisal), et les fibres synthétiques (polyamides, polypropylène, acryliques et polyester). La surface d'usage du tapis (ou velours dans le cas de la moquette) est réalisée à partir de ces fibres. Les différentes formes de velours sont résumées dans la figure II.20. Ainsi, on distingue les velours coupés (aspect velours a. et saxony b.), bouclés (uniforme c. et rasé d.) et bouclé coupé.

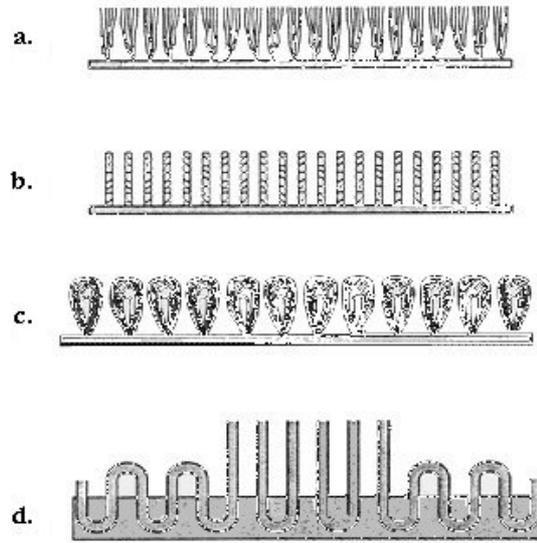


Figure II.20 : Types de surfaces d'usage (ou velours) d'après [DUT 94]

A partir des caractéristiques données par les fabricants (hauteur de velours, type de velours, nombre de fibres par unité de surface), on peut donc déterminer la surface d'interaction revêtement – particule.

II.4.1.4. Revêtements céramiques

L'appellation « céramique » regroupe les grès cérame fin vitrifié, les grès rustiques, les terres cuites et les carreaux de faïence. Leurs surfaces sont quasiment planes (quasi absence de relief). On distingue deux classes : bon choix, premier choix ou choix commercial qui traduit l'excellente présentation du produit et, choix industriel, deuxième choix ou standard pour les produits présentant quelques petits défauts. Pour l'étude du dépôt, il faut prendre en compte les joints qui représentent le plus grand relief (creux) pour ce type de revêtement.

II.4.1.5. Revêtements en pierre

Ce sont les revêtements à base de marbre. Comme les revêtements céramiques, ils présentent une surface lisse. Seuls les joints sont à considérer en tant que relief. Ils peuvent varier entre 1.5 mm (joints pratiquement invisibles) et 3.5 mm (joints reflués).

II.4.1.6. Parquets

Les parquets se classent suivant quatre familles : les parquets en bois massifs, les parquets à coller, les parquets contrecollés à pose flottante et les parquets de recouvrement. Comme pour les peintures, c'est l'état de finition qui définira le caractère plus ou moins lisse de la surface. Ici encore, l'écartement entre les lames devra être prise en considération.

II.4.1.7. Papiers peints

Les papiers peints constituent une part importante des revêtements intérieurs des résidences. Comme pour les sols plastiques, il existe une grande variété de surfaces : lisse, gaufrée, avec relief. Aucune classification à partir de l'état de surface n'existe, seule la classification UPEC est disponible.

II.4.1.5 Conclusion

Une multitude de revêtements existe à l'intérieur des bâtiments. Cette hétérogénéité présente une réelle difficulté pour l'évaluation du dépôt particulaire. De plus, les caractéristiques données habituellement par les fabricants ne sont pas suffisantes pour l'étude du dépôt. En effet, il est nécessaire de déterminer correctement la surface réelle de dépôt pour l'évaluation de la vitesse de dépôt. C'est le but du chapitre suivant.

II.4.2. Analyse de surface

II.4.2.1. Méthodes d'analyse de surfaces

Remarque : la surface d'un corps est définie comme le lieu des points qui délimitent une portion de l'espace. Sa détermination n'est pas aisée car elle dépend de la précision que l'on désire obtenir, donc de l'échelle à laquelle on se place pour l'évaluer. Par exemple, le point sur ce « i » paraît de forme circulaire à notre échelle or si on le place sous microscope, on observera une forme qui s'éloigne de plus en plus de la forme parfaite du disque au fur et à mesure que l'on augmente le grossissement. Il en est de même pour les revêtements étudiés, ainsi, une surface qui nous paraît lisse, apparaîtra comme une zone montagneuse pour les particules traitées de quelques micromètres de diamètre. On ne peut donc jamais mesurer la

surface réelle d'une surface mais l'approcher par une surface mesurée qui dépend de la méthode d'analyse utilisée.

On distingue plusieurs méthodes d'analyses plus ou moins précises et plus ou moins adaptées au type de revêtement à étudier. Pour ces analyses, on utilise différents types de capteurs :

- les capteurs mécaniques composés d'un stylet pivotant muni à une extrémité d'une pointe diamant reposant sur la surface à analyser et d'un système de mesure de déplacement du bras. La mesure du déplacement utilise le plus souvent un principe inductif. Un noyau ferrite solidaire du stylet se déplace dans une bobine à deux enroulements, le conditionneur du capteur effectuant l'excitation de la première bobine et la détection synchrone du signal induit sur la deuxième bobine. On représente ainsi les différences de bosses et de creux le long d'une ligne.

- les capteurs optiques laser de rugosité utilisant le principe d'asservissement des têtes de compact disque. Ils sont constitués d'un bloc optique assurant la focalisation fixe d'un faisceau laser sur la surface et projetant le faisceau réfléchi sur des photodiodes, et d'un système de déplacement vertical permettant l'asservissement du point de focalisation.

- les capteurs optiques lumière blanche de rugosité utilisant l'aberration chromatique d'une lentille. Une source blanche est focalisée sur la surface par un ensemble optique présentant une forte aberration chromatique. L'altitude de la surface est déterminée par une analyse spectrale de la lumière rétro - diffusée par cette surface.

- les capteurs optiques à triangulation. Leur principe est fondé sur la mesure de l'angle d'observation d'un faisceau laser projeté sur la surface.

Le choix de la méthode d'analyse est fonction du type de revêtement ainsi que de la précision des informations à obtenir.

II.4.2.2. Analyses des revêtements étudiés

Pour la caractérisation géométrique des revêtements de cette étude, deux analyses complémentaires ont été effectuées : détermination de la rugosité par capteur mécanique pour

les surfaces lisses et dures, analyse tridimensionnelle par capteur optique à triangulation pour tous les revêtements.

La figure II.21 présente les résultats de l'étude menée au Lycée Marcel Dassault de Rochefort à l'aide d'un rugosimètre. Sur les sept revêtements étudiés, quatre ont pu être analysés, les autres n'ayant pas une surface suffisamment lisse. Pour chaque revêtement, le profil de la surface a été tracé et les deux coefficients classiques de rugosité (Ra et Rp) ont été calculés. Le coefficient Ra représente l'écart moyen par rapport à la ligne moyenne du profil ; il correspond à la définition de la rugosité des conduites en mécanique des fluides par exemple. Le second, Rp , est la profondeur d'aplanissement de la surface ; autrement dit, il donne une mesure de l'irrégularité de la surface.

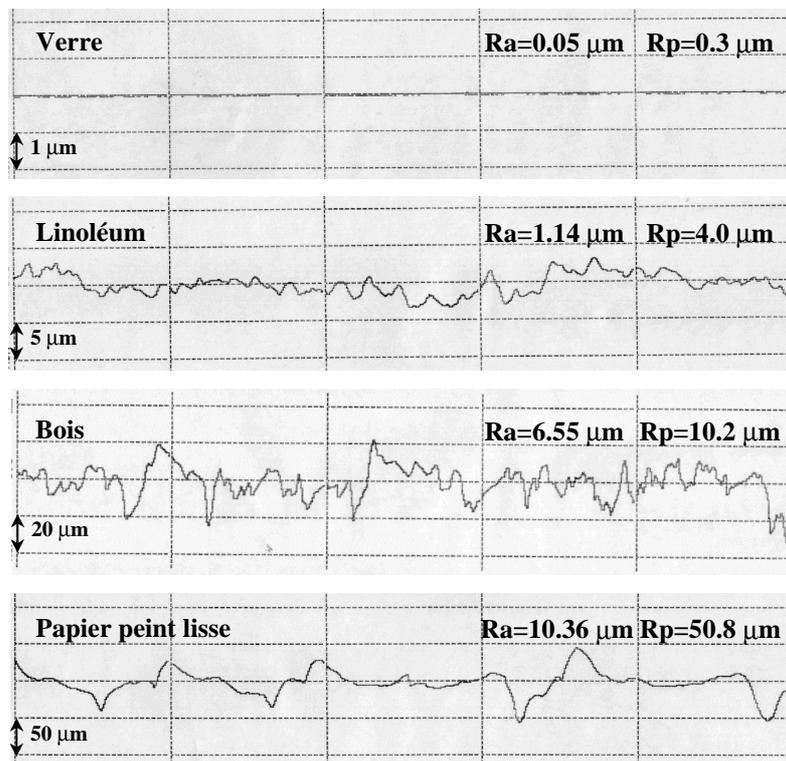
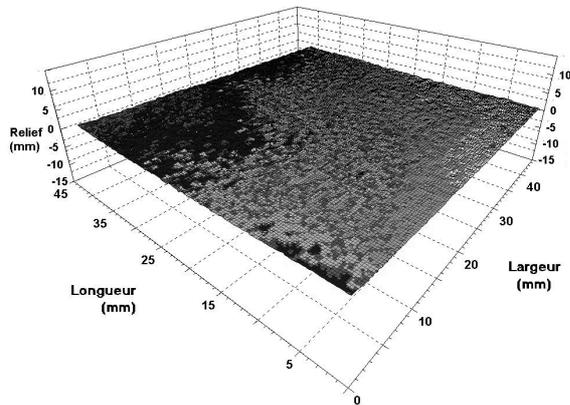


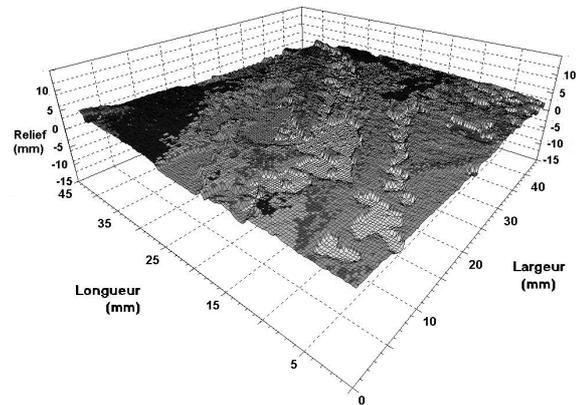
Figure II.21 : Rugosité des surfaces étudiées

Le verre se révèle être la surface la plus lisse avec des coefficients de rugosité quasiment nuls. L'étude au rugosimètre permet la classification de ces revêtements lisses : verre, linoléum, bois et papier peint lisse.

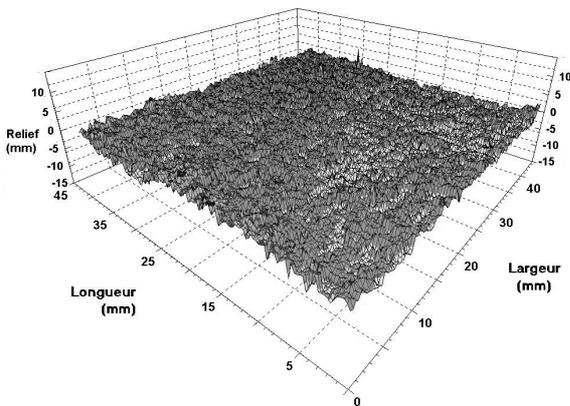
Les résultats de l'analyse optique sont donnés par la figure II.22. Cette étude a été effectuée à l'IUT de Génie Civil de La Rochelle. Les profils obtenus permettent d'apprécier qualitativement les différences entre les surfaces étudiées. De même que précédemment, on peut donner une ébauche de classification des revêtements : surfaces lisses, papier peint avec relief, moquette et crépis.



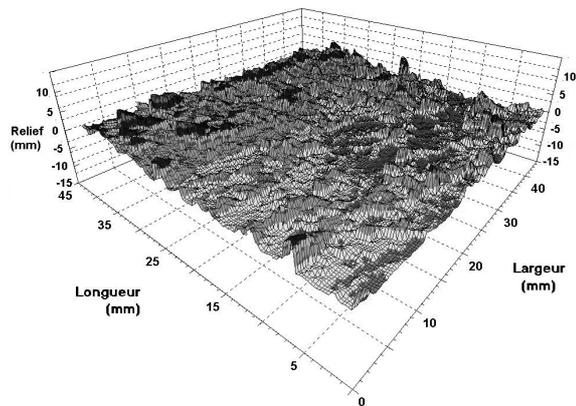
Papier peint lisse (idem Linoléum, Bois et Verre)



Papier peint avec relief



Moquette



Crépis

Figure II.22 : Surfaces tridimensionnelles des revêtements

II.4.2.3. Conclusion

De ces deux analyses de surface, on peut effectuer une première classification des revêtements étudiés du plus lisse à celui comportant la plus grande irrégularité de surface (figure II.23). Dans l'ensemble, la classification suivant la géométrie surfacique des revêtements correspond à celle du dépôt : plus un revêtement est rugueux, plus la constante (ou vitesse) de dépôt est élevée. Cependant, cette tendance s'inverse pour les revêtements les plus rugueux (moquette et crépis) et surtout, le verre, qui est une des surfaces les plus lisses, a

une constante de dépôt élevée. Par conséquent, prendre uniquement en compte le caractère géométrique de l'état de surface n'est pas une solution suffisante. Le chapitre suivant traite de la solution adoptée dans cette étude, elle passe par une mesure systématique des constantes de dépôt à l'intérieur de l'enceinte pour chaque couple particule – revêtement.

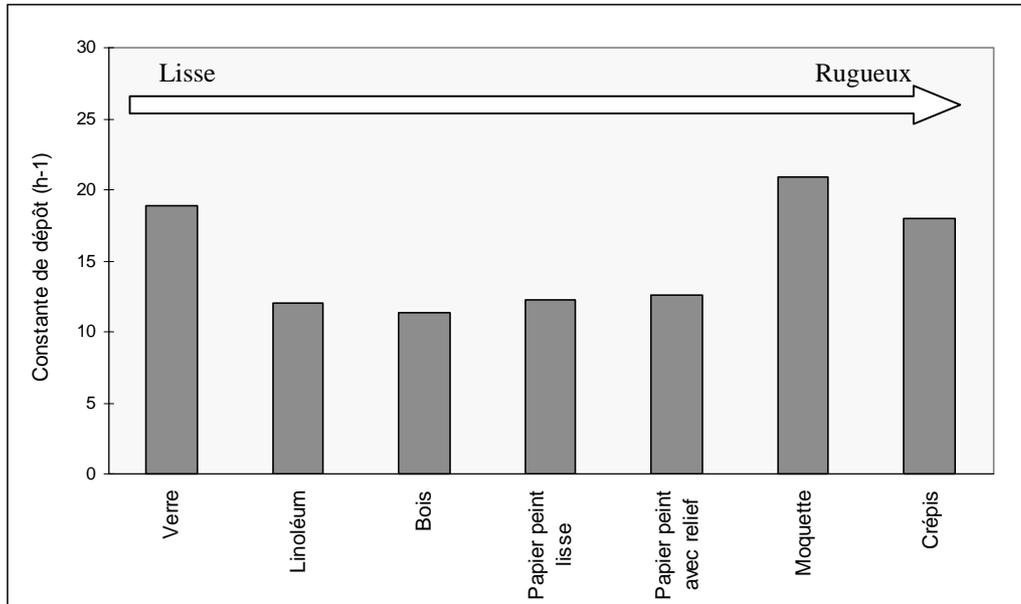


Figure II.23 : Classification des revêtements en fonction de leur géométrie de surface

II.4.3. Coefficient de captation

Il existe donc un réel problème lié à l'utilisation du concept de vitesse de dépôt pour permettre l'extension des résultats obtenus sur modèle réduit aux cas réels du bâtiment. La détermination de ce paramètre dépend de la caractérisation de la surface de revêtement qui, on l'a vu dans le chapitre précédent, dépend de l'échelle à laquelle on se place. De plus, la vitesse de dépôt doit être déduite de la valeur de la constante de dépôt mesurée expérimentalement qui tient compte du dépôt et de la remise en suspension de manière globale (équation II.63). Il est donc impératif de déterminer un nouveau paramètre qui prendra en compte la surface de revêtement mais également les forces d'interaction existant entre la particule et le matériau constituant la paroi. Ces forces d'interaction, si elles sont qualitativement connues, sont très difficiles à évaluer (voir chapitre I).

Dans ce but, on reconsidèrera la définition première de la vitesse de dépôt. La vitesse de dépôt est la vitesse moyenne à laquelle se déplace une particule du centre du volume d'étude jusqu'à

la paroi à laquelle elle va adhérer. Ce « voyage » de la particule est alors essentiellement gouverné par l'écoulement d'air généré par l'agitateur à hélice dans notre expérimentation. Or il est concevable de penser que l'écoulement d'air ne sera pas grandement modifié si tel ou tel revêtement est placé sur les parois. En effet, seule la région proche de la paroi, la couche limite, verra son épaisseur diminuer ou augmenter. D'après Carlier [CAR 86], une surface est considérée lisse vis-à-vis de l'écoulement si la rugosité moyenne de surface ne dépasse pas la valeur limite k_{lam} en régime laminaire ou k_{turb} en régime turbulent, données par les équations II.68 et II.69.

$$k_{lam} = 100 \frac{\nu}{V_{max}} \quad (II.68)$$

$$k_{turb} = 560 \frac{\nu}{V_{max}} \quad (II.69)$$

Avec V_{max} : vitesse maximale dans la couche limite ($m s^{-1}$),

ν : viscosité dynamique du fluide ($Pa s^{-1}$).

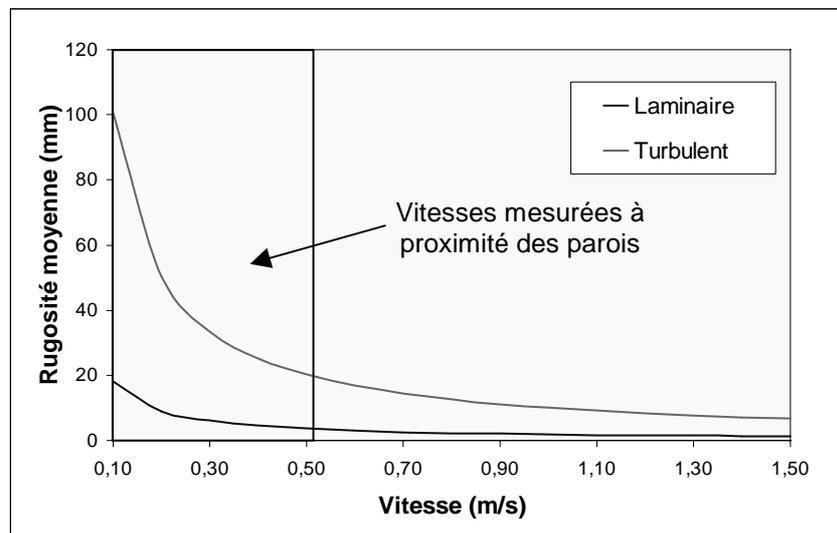


Figure II.24 : Evolution de la hauteur de rugosité en fonction de la vitesse de l'écoulement fluide dans la couche limite (air à 20°C)

La figure II.24 présente l'évolution de la hauteur limite de rugosité en fonction de la vitesse maximale de l'écoulement fluide dans la couche limite. Dans notre enceinte d'étude, les mesures de vitesse ont montré que les vitesses d'écoulement d'air à proximité des parois (à

une distance d'une dizaine de centimètres) n'excèdent pas 0.5 m s^{-1} , par conséquent la vitesse maximale dans la couche limite est inférieure à cette dernière valeur, ce qui correspond à une hauteur moyenne de rugosité de 3.6 mm. Pour notre étude on peut donc considérer nos revêtements comme lisses vis-à-vis de l'écoulement d'air, donc supposer que l'épaisseur de la couche limite est à peu près constante. Par conséquent, il est raisonnable de considérer que pour une taille de particule donnée, la vitesse de dépôt reste constante quel que soit le revêtement de paroi étudié. La relation liant la constante de dépôt à la vitesse de dépôt est rappelée par l'équation II.70.

$$V_d = \frac{V}{S_{pi}} \times \lambda_{di} \quad (\text{II.70})$$

Avec V_d : vitesse de dépôt des particules de la taille considérée (m s^{-1}),

V : volume d'étude (m^3),

S_{pi} : surface potentielle de dépôt des particules de la taille considérée (m^2),

λ_{di} : constante de dépôt (s^{-1}),

i : type de revêtement.

Or, les résultats expérimentaux montrent bien une différence non négligeable entre les valeurs de constantes de dépôt mesurées pour chacun des revêtements. Cette différence ne peut s'expliquer par la modification du volume intérieur car si on considère une paroi parfaitement lisse et une paroi recouverte d'un revêtement de rugosité moyenne de 10 mm (ce qui est énorme), la différence reste inférieure à 9% par rapport au volume initial. L'évaluation de la surface de dépôt est donc primordiale. De plus, il ne faut pas oublier que la vitesse de dépôt caractérise le dépôt dans sa globalité, il est donc nécessaire de prendre en compte les forces d'interaction entre la particule et la surface. Pour cela, un coefficient, que nous nommerons « coefficient de captation », K_c , est introduit (équation II.71).

$$K_c = \frac{V \times \lambda_d}{S} \times \frac{1}{V_d} \quad (\text{II.71})$$

Avec S : surface géométrique (m^2), et

K_c : coefficient de captation.

La figure II.25 montre l'évolution du coefficient de captation en fonction de la vitesse de dépôt pour des particules de 5.0 µm de diamètre. Le rapport V/S étant constant, pour une vitesse de dépôt donnée, le classement des revêtements vis-à-vis de la pollution particulaire suit les valeurs des constantes de dépôt mesurés dans l'enceinte expérimentale.

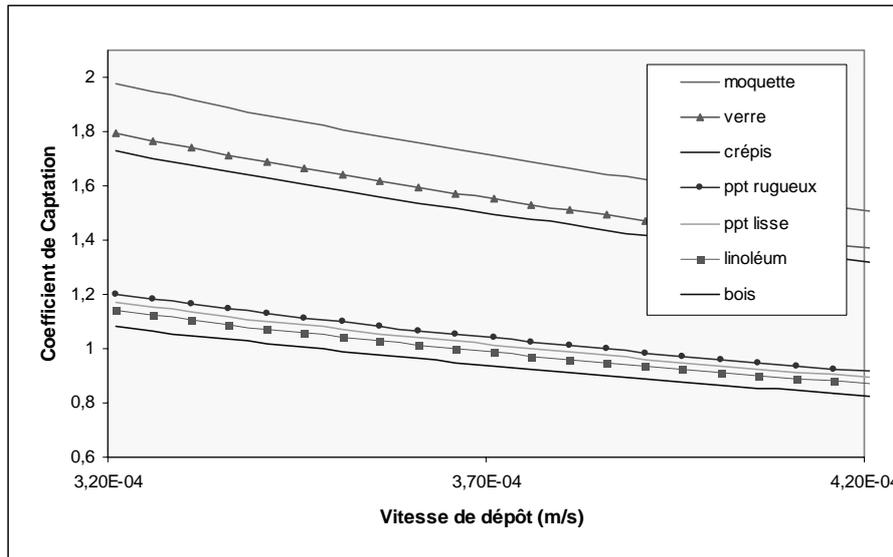


Figure II.25 : Evolution du coefficient de captation

Pour déterminer la vitesse de dépôt pour une certaine taille de particule, il est nécessaire de prendre une référence, pour laquelle le dépôt est le plus lent. A cette référence est associé le coefficient de captation unitaire. Ce coefficient de captation traduit donc l'effet couplé de la surface réelle de contact et de l'interaction entre la particule et la paroi. Par exemple, la surface qui « capte » le moins rapidement les particules est modélisée comme lisse ($K_c = 1$) alors qu'une surface très « captante » sera considérée comme rugueuse ($K_c > 1$). Par conséquent, une surface géométriquement lisse pourra avoir un coefficient de captation élevé si les forces d'interaction sont grandes (forces électrostatiques par exemple), à l'inverse le coefficient de captation d'une surface rugueuse pourra être proche de l'unité. Chaque revêtement doit alors être testé suivant les mêmes conditions.

Le tableau II.17 présente les coefficients de captation pour les trois tailles de particules et les sept revêtements testés. Quatre mesures n'ont pu être effectuées, notées x, par manque de quantité de particules de polystyrène – latex ; elles concernent les revêtements bois et crépis pour les deux plus petites tailles de particules. On remarque que pour les particules les plus grosses, le coefficient de captation ne varie que du simple au double, ce qui traduit que le

dépôt de ces particules sur les différents revêtements reste du même ordre de grandeur. Par contre, pour les petites particules, on observe un facteur 6 entre les coefficients de captation extrêmes, le dépôt des petites particules est beaucoup plus sensible au type de revêtement de paroi. Les valeurs des vitesses de dépôt pour chacune des tailles de particules sont résumées dans le tableau II.18. Les vitesses de dépôt des petites particules, de 0.7 et 1.0 μm de diamètre, peuvent être considérées égales.

	0.7 μm	1.0 μm	5.0 μm
Bois	X	x	1.0
Moquette	5.8	6.1	1.8
Crépis	x	x	1.6
Papier peint lisse	1.0	1.0	1.1
Papier peint avec relief	1.3	1.5	1.1
Linoléum	2.1	2.2	1.0
Verre	2.1	3.5	1.6

Tableau II.17 : Coefficients de captation

	0.7 μm	1.0 μm	5.0 μm
Vitesse de dépôt (10^{-4} m s^{-1})	0.176 ©	0.177 ± 0.04	3.47 ± 0.2

© une unique mesure disponible

Tableau II.18 : Vitesses de dépôt

Par application de l'équation II.71 et en prenant en compte les valeurs données dans les tableaux II.17 et II.18, on peut donc calculer la valeur de la constante de dépôt pour une taille de particule et un revêtement donnés.

II.4.4. Conclusion

Cette étude sur la caractérisation des revêtements du bâtiment a conduit à l'élaboration d'un nouveau coefficient, le coefficient de captation. En effet, devant l'hétérogénéité des revêtements de paroi, la détermination d'une caractéristique de surface commune à tous ces revêtements paraît impossible. C'est pourquoi, le choix d'évaluer dans sa globalité l'interaction entre les particules et les revêtements nous a semblé judicieux. Ce coefficient de captation peut être déterminé pour tout type de revêtement par simple mesure à l'intérieur de

l'enceinte, et permet d'apprécier le rôle réel des revêtements sur les niveaux de pollution particulaire à l'intérieur des bâtiments.

II.5. DECOMPOSITION DES CONSTANTES GLOBALES DE DEPOT

II.5.1. Théorie de Crump et Seinfeld [CRU 83]

Crump et Seinfeld [CRU 83] considèrent le problème de la prédiction du dépôt pariétal d'un aérosol dans une enceinte fermée, de géométrie quelconque, à l'intérieur de laquelle l'écoulement est turbulent. Pour cela, ils traitent en premier lieu le cas de la sphère. Les hypothèses sont les suivantes (figure II.26) :

- Mélange parfait des particules dans l'air,
- Epaisseur de la couche limite turbulente faible devant le rayon de la sphère ($\delta \ll R$),
- Dans la couche limite, on supposera trois modes de transport des particules :
 - . la diffusion moléculaire : $-D \times \text{grad}C$
 - . la diffusion turbulente : $-D_e \times \text{grad}C$
 - . la sédimentation (transport dû à la gravité) : $v_t \times \text{grad}C$

Avec D : coefficient de diffusion,
 C : concentration en particules,
 D_e : coefficient de diffusion turbulente, et
 v_t : vitesse établie.

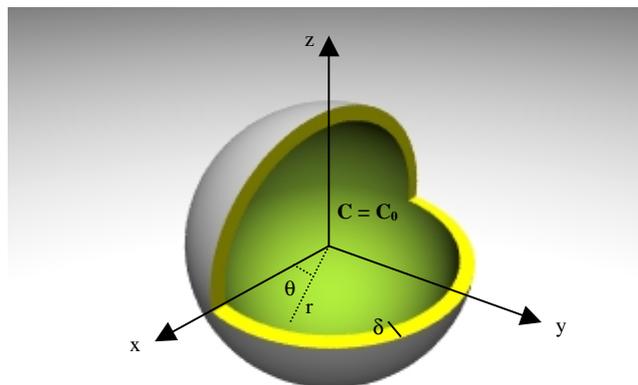


Figure II.26 : Représentation du domaine d'étude

A partir de ces hypothèses, la concentration à l'intérieur de la couche limite est donnée par l'équation II.72:

$$\text{div}[(D + D_e) \times \text{grad}C] - v_t \times \text{grad}C = 0 \quad (\text{II.72})$$

Avec les conditions limites suivantes :

- $C = 0$ pour $r = R$
- $C = C_0$ pour $r = R - \delta$

Le coefficient de diffusion turbulente, D_e , a été généralisé par Crump et Seinfeld [CRU 83] :

$$D_e = k_e \times x^{n_{mod}} \quad (\text{II.73})$$

Avec x : distance à la paroi (m),

k_e : mesure de l'intensité de l'écoulement turbulent ($\text{m}^{2-n_{mod}} \text{s}^{-1}$), et

n_{mod} : coefficient modérateur de l'effet transverse (suivant x) des tourbillons.

L'intensité de l'écoulement turbulent est donnée par l'expression suivante :

$$k_e = \kappa^2 \frac{dU_{paroi}}{dx} \quad (\text{II.74})$$

Avec κ : constante de Von Karman, et

U_{paroi} : composante de la vitesse parallèle à la paroi (m s^{-1}).

Différentes valeurs du coefficient n_{mod} ont été utilisées dans la littérature. Corner et Pendlebury [COR 51], en posant les bases de la présente théorie, préconisent une valeur de 2. Okuyama et al. [OKU 77] et Shimada et al. [SHI 88] l'évaluent entre 2.7 et 3 à partir de résultats expérimentaux. Comme le soulignent Lai et Nazaroff [LAI 00], le coefficient k_e a pour dimension $\text{L}^{2-n_{mod}} \text{T}^{-1}$. Ainsi, pour $n_{mod} = 2$, la dimension de ce coefficient est tout simplement l'inverse du temps ; pour tout autre valeur, il doit intégrer une échelle de longueur. De plus les valeurs non entières posent de réels problèmes conceptuels et pratiques lorsque k_e est déterminé à partir des niveaux du taux de dissipation de l'énergie turbulente. Pour pallier ce problème, Benes et Holub [BEN 96] incluent l'épaisseur de la couche limite dans l'expression II.73. L'inconvénient majeur de cette dernière formulation est qu'elle porte

à trois le nombre de paramètres. On utilisera donc pour la suite de l'étude l'expression donnée par Corner et Pendlebury [COR 51] ($n_{mod} = 1$) dans laquelle seul le coefficient k_e est à déterminer.

En prenant en compte l'hypothèse $D \ll k_e \delta^2$, et en utilisant les coordonnées polaires, l'équation II.72 devient :

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 (D + D_e) \frac{dC}{dr} \right) + \frac{(D + D_e)}{r^2 \sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{dC}{d\theta} \right) + v_t \cos \theta \frac{dC}{dr} - \frac{v_t \sin \theta}{r} \frac{dC}{d\theta} = 0 \quad (\text{II.75})$$

En effectuant un premier changement de variable, $x = R - r$, l'équation II.75 s'écrit :

$$\frac{1}{(R-x)^2} \frac{d}{dx} \left((R-x)^2 (D + D_e) \frac{dC}{dx} \right) + \frac{(D + D_e)}{(R-x)^2 \sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{dC}{d\theta} \right) - v_t \cos \theta \frac{dC}{dx} - \frac{v_t \sin \theta}{(R-x)} \frac{dC}{d\theta} = 0 \quad (\text{II.76})$$

En posant $z = x \sqrt{\frac{k_e}{D}}$ et $u = \frac{C}{C_0}$, on obtient alors :

$$\frac{1}{\left(1 - z \sqrt{\frac{D}{k_e R^2}}\right)^2} \frac{d}{dz} \left(\left(1 - z \sqrt{\frac{D}{k_e R^2}}\right)^2 (1 + z^2) \frac{du}{dz} \right) + \frac{D}{k_e R^2} \frac{(1 + z^2)}{\left(1 - z \sqrt{\frac{D}{k_e R^2}}\right)^2 \sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{du}{d\theta} \right) - \frac{v_t}{\sqrt{k_e D}} \cos \theta \frac{du}{dz} - \frac{v_t}{k_e R} \frac{\sin \theta}{\left(1 - z \sqrt{\frac{D}{k_e R^2}}\right)} \frac{du}{d\theta} = 0 \quad (\text{II.77})$$

A l'intérieur de la couche limite, $x \leq \delta$ donc $z \leq \delta \sqrt{k_e/D}$, par conséquent

$z \sqrt{\frac{D}{k_e R^2}} \leq \frac{\delta}{R} \ll 1$, l'équation précédente se simplifie en :

$$\frac{d}{dz} \left((1 + z^2) \frac{du}{dz} \right) + \frac{D}{k_e R^2} \frac{(1 + z^2)}{\sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{du}{d\theta} \right) - \frac{v_t \cos \theta}{\sqrt{k_e D}} \frac{du}{dz} - \frac{v_t \sin \theta}{R k_e} \frac{du}{d\theta} = 0 \quad (\text{II.78})$$

Le second terme de cette équation est de l'ordre de $D/k_e R^2 = (D/k_e \delta^2)(\delta/R)^2 \ll 1$, il est donc négligeable. De même, le quatrième terme est de l'ordre de $(v_t/\sqrt{k_e D})\left(\frac{1}{\delta}\sqrt{D/k_e}\right) = v_t/\delta k_e$ alors que l'ordre du troisième est v_t/Rk_e , donc ce dernier terme peut être négligé. Après simplifications, on obtient :

$$\frac{d}{dz}\left[(1+z^2)\frac{du}{dz}\right] - \frac{v_t \cos\theta}{\sqrt{k_e D}} \frac{du}{dz} = 0 \quad (\text{II.79})$$

Avec $u(0, \theta) = 0$ et $u(\delta\sqrt{k_e D}, \theta) = 1$ pour les conditions aux limites.

La solution de l'équation II.79 est :

$$u(z, \theta) = \frac{\exp\left[\frac{v_t \cos\theta}{\sqrt{k_e D}} \tan^{-1} z\right] - 1}{\exp\left[\frac{v_t \cos\theta}{\sqrt{k_e D}} \frac{\pi}{2}\right] - 1} \quad (\text{II.80})$$

Le flux de dépôt sur une surface est alors :

$$D \frac{dC}{dx}\Big|_{x=0} = C_0 D \frac{du}{dx}\Big|_{x=0} = \frac{C_0 v_t \cos\theta}{\exp\left[\frac{\pi v_t \cos\theta}{2\sqrt{k_e D}}\right] - 1} \quad (\text{II.81})$$

Donc le flux total est :

$$\Phi = 2\pi R^2 \int_0^\pi \frac{c_0 v_t \cos\theta \sin\theta d\theta}{\exp\left[\frac{\pi v_t \cos\theta}{2\sqrt{k_e D}}\right] - 1} \quad (\text{II.82})$$

Le coefficient de dépôt par unité de volume pour une sphère est :

$$\lambda_d = \frac{3}{2R} \int_0^\pi \frac{v_t \cos\theta \sin\theta d\theta}{\exp\left[\frac{\pi v_t \cos\theta}{2\sqrt{k_e D}}\right] - 1} \quad (\text{II.83})$$

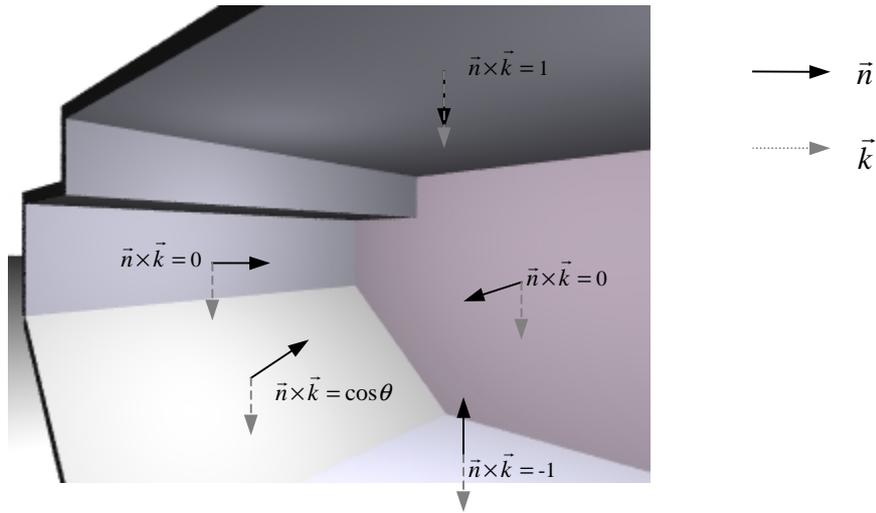


Figure II.27 : Généralisation à une enceinte de forme quelconque

L'équation II.83 peut être étendue à une enceinte de forme quelconque (figure II.27) :

$$\lambda_d = \frac{1}{V} \int_{\Sigma} \frac{v_t \times \vec{n}(x) \cdot \vec{k}}{\exp\left[\frac{\pi v_t \times \vec{n}(x) \cdot \vec{k}}{2\sqrt{k_e D}}\right] - 1} dA(x) \quad (\text{II.84})$$

Avec V : volume de l'enceinte (cm^3),

v_t : vitesse établie (Terminal Settling Velocity) (cm s^{-1}),

$\vec{n}(x)$: vecteur unitaire, normal à la paroi,

\vec{k} : vecteur unitaire, vertical descendant,

k_e : paramètre de turbulence (s^{-1}), et

D : coefficient de diffusion moléculaire ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$).

II.5.2. Application à une enceinte cubique

Soit une enceinte cubique de côté L ; calculons le coefficient de dépôt vers chacune des surfaces :

II.5.2.1. Dépôt sur le sol

$$\vec{n}(x) \cdot \vec{k} = -1$$

$$\lambda_{sol} = \frac{1}{V} \int_0^L \int_0^L \frac{-v_t}{\exp\left[\frac{-\pi v_t}{2\sqrt{k_e D}}\right] - 1} dx dy = \frac{1}{V} \frac{-v_t \times L^2}{\exp\left[\frac{-\pi v_t}{2\sqrt{k_e D}}\right] - 1}$$

$$\Rightarrow \lambda_{sol} = \frac{1}{L} \frac{-v_t}{\exp\left[\frac{-\pi v_t}{2\sqrt{k_e D}}\right] - 1} \quad (\text{II.85})$$

II.5.2.2. Dépôt sur le plafond

$$\vec{n}(x) \cdot \vec{k} = 1$$

$$\lambda_{plafond} = \frac{1}{V} \int_0^L \int_0^L \frac{v_t}{\exp\left[\frac{\pi v_t}{2\sqrt{k_e D}}\right] - 1} dx dy = \frac{1}{V} \frac{v_t \times L^2}{\exp\left[\frac{\pi v_t}{2\sqrt{k_e D}}\right] - 1}$$

$$\Rightarrow \lambda_{plafond} = \frac{1}{L} \frac{v_t}{\exp\left[\frac{\pi v_t}{2\sqrt{k_e D}}\right] - 1} \quad (\text{II.86})$$

II.5.2.3. Dépôt sur une paroi verticale

$$\vec{n}(x) \cdot \vec{k} \rightarrow 0$$

$$\text{Or } \frac{\varepsilon}{\exp[\varepsilon] - 1} \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} 1$$

$$\text{Donc } \frac{v_t \times \vec{n}(x) \cdot \vec{k}}{\exp\left[\frac{\pi v_t \times \vec{n}(x) \cdot \vec{k}}{2\sqrt{k_e D}}\right] - 1} \xrightarrow{\vec{n}(x) \cdot \vec{k} \rightarrow 0} \frac{2\sqrt{k_e D}}{\pi}$$

Pour les quatre parois verticales, on obtient :

$$\Rightarrow \lambda_{paroisverticales} = \frac{1}{L} \frac{8\sqrt{k_e D}}{\pi} \quad (\text{II.87})$$

II.5.3. Coefficient de dépôt pour l'ensemble des parois

Le coefficient global de dépôt de l'enceinte est la somme des coefficients de dépôt précédemment déterminés :

$$\lambda_d = \frac{1}{L} \left[\frac{8\sqrt{k_e D}}{\pi} + v_t \times \coth\left(\frac{\pi v_t}{4\sqrt{k_e D}}\right) \right] \quad (\text{II.88})$$

Avec L : côté de l'enceinte (cm³),

v_t : vitesse établie (Terminal Settling Velocity) (cm s^{-1}),

k_e : paramètre de turbulence (s^{-1}),

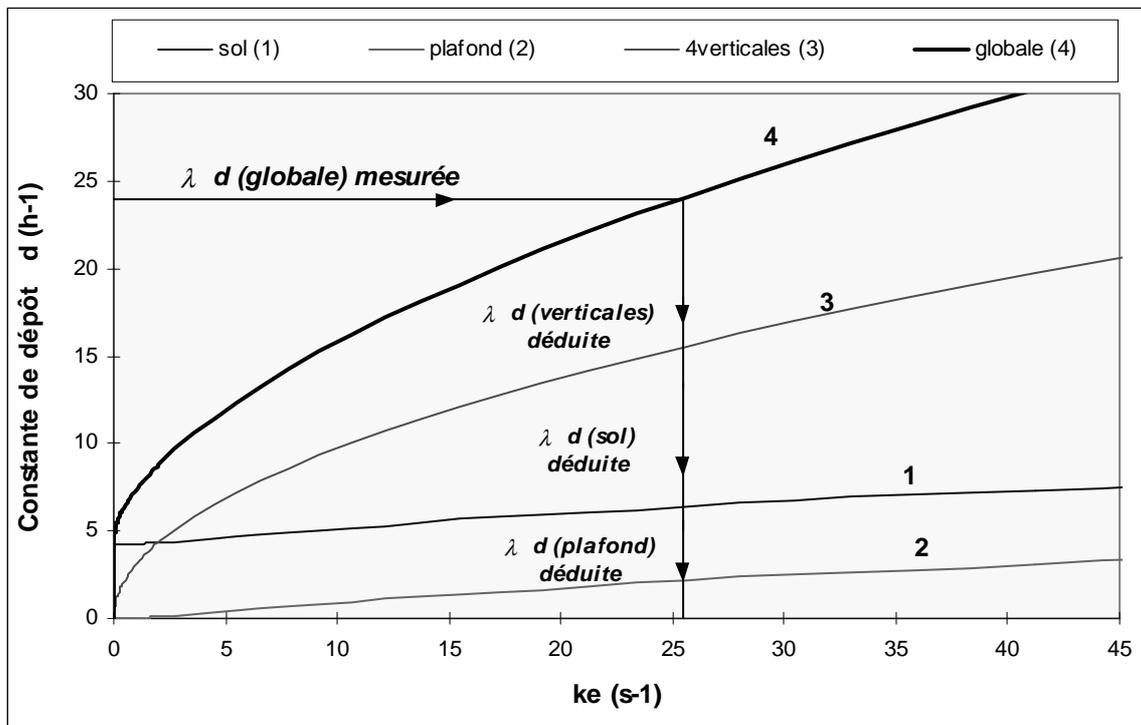
D : coefficient de diffusion moléculaire ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$).

II.5.4. Application à l'enceinte d'étude

L'utilisation de l'équation II.88 va permettre la détermination des constantes de dépôt pour trois types de revêtements (bois, moquette et crépis), pour les trois orientations de surfaces (verticales et horizontales haut et basse). Ces constantes seront déterminées pour les particules de diamètre $5.0 \mu\text{m}$ et pour une vitesse de rotation de l'hélice fixe (vitesse d'écoulement d'air au niveau de l'hélice proche de 3 m s^{-1}).

L'équation II.88 est valable pour des surfaces intérieures de même nature c'est-à-dire ayant le même revêtement. On peut donc utiliser les trois expérimentations (n° 1, 2 et 3 du tableau II.12 de l'étude n°1) pour déterminer l'effet de chacune des parois de l'enceinte.

La figure II.28 présente les courbes obtenues à partir des équations II.85, II.86, II.87 et II.88 pour une particule de diamètre $5.0 \mu\text{m}$. Pour chaque expérimentation, la valeur de la constante globale de dépôt a été mesurée et comme, pour un revêtement donné, la turbulence (paramétrée par k_e) reste inchangée, l'apport de chacune des surfaces (sol, verticales et plafond) a pu être déduit.



($D = 4.89 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ et $v_t = 7.76 \cdot 10^{-2} \text{ cm s}^{-1}$ pour les particules de diamètre $5.0 \mu\text{m}$)

Figure II.28 : Détermination des constantes de dépôt pour les parois verticales et horizontales

Le tableau II.19 présente les résultats obtenus pour les expérimentations précitées.

n°	Revêtements	λ_d (h ⁻¹)		
		Sol	Verticale	Plafond
1	Bois	4.57 ± 0.08	1.63 ± 0.14	0.32 ± 0.08
2	Moquette	5.90 ± 0.42	3.33 ± 0.48	1.66 ± 0.42
3	Crépis	5.47 ± 0.09	2.84 ± 0.10	1.22 ± 0.09

Tableau II.19 : Constantes de dépôt pour trois revêtements et trois orientations

Par exemple, si le sol, le plafond et une paroi verticale sont recouverts de bois et les trois autres verticales de moquette (expérimentation n°5), la constante globale de dépôt pour l'enceinte sera :

$$\lambda_d = \lambda_{d(sol)}^{bois} + \lambda_{d(verticale)}^{bois} + 3 \times \lambda_{d(verticale)}^{moquette} + \lambda_{d(plafond)}^{bois} = 4.57 + 1.63 + 3 \times 3.33 + 0.32 = 16.52 h^{-1} \quad (II.89)$$

De plus, on peut vérifier la pertinence de la méthode en utilisant les résultats des expérimentations n° 4, 5 et 6 (du tableau II.12 de l'étude n°1).

n°	λ_d calculée (h ⁻¹)	λ_d mesurée (h ⁻¹)	Erreur relative
4	17.57 ± 0.92	20.16 ± 1.53	15 %
5	16.52 ± 1.74	18.36 ± 0.69	11 %
6	12.74 ± 1.07	13.68 ± 0.64	7 %

(Erreur relative = $|\Delta\lambda_d| / \lambda_d(\text{mesurée})$)

Tableau II.20 : Comparaison entre les résultats obtenus par la mesure et par le calcul

On remarque une erreur relative moyenne de 11% entre les valeurs des constantes globales de dépôt mesurées et calculées. Cela montre une cohérence de la méthode lorsque l'on reconstitue les constantes globales.

De plus, à partir des résultats obtenus par Byrne [BYR 95] (tableau II.21), on peut également vérifier les valeurs de certaines constantes élémentaires. Le passage par le calcul de la vitesse de dépôt est nécessaire pour tenir compte de la différence de surfaces intérieures et de volume entre notre enceinte expérimentale et celle de Byrne [BYR 95].

Le tableau II.22 présente les valeurs des vitesses élémentaires de dépôt calculées à partir des constantes de dépôt (équation II.70), le coefficient de captation défini précédemment n'a pas été pris en compte afin de garder la même relation de passage de la constante à la vitesse de dépôt (conservation de la même surface de dépôt).

Revêtements	V_d Verticale (10^{-4} m s^{-1})	
	4.5 μm	5.4 μm
Aluminium	0.67	0.67
Papier peint	1.01	1.45
Moquette	1.47	2.1
Astroturf	3.28	4.68

Tableau II.21 : Vitesses verticales de dépôt [BYR 95]

n°	Revêtements	V_d (10^{-4} m s^{-1})			
		Sol	Verticale	Plafond	Globale
1	Bois	7.62 ± 0.13	2.72 ± 0.23	0.53 ± 0.13	3.16 ± 0.20
2	Moquette	$9,83 \pm 0,70$	$5,55 \pm 0,80$	$2,77 \pm 0,70$	$5,80 \pm 0,77$
3	Crépis	$9,12 \pm 0,15$	$4,73 \pm 0,17$	$2,03 \pm 0,15$	$5,01 \pm 0,16$

Tableau II.22 : Vitesses de dépôt pour trois revêtements et trois orientations

La comparaison des résultats de ces deux expérimentations montre l'existence d'un facteur 2 entre les valeurs des vitesses de dépôt. Ce fait s'explique essentiellement par une différence de l'écoulement généré. En effet, l'écoulement d'air dans les expérimentations de Byrne [BYR 95] était généré verticalement par une hélice positionnée en partie haute et l'écoulement était donc descendant. Dans notre expérimentation, l'écoulement ascendant a été choisi afin de favoriser le mélange initial de particules dans l'air (par opposition au jet d'injection de particules et de l'écoulement d'air). La probabilité de dépôt d'une particule sur une surface dirigée vers le bas étant largement inférieure à celle dirigée vers le haut, la quantité de particules déposées sur le sol dans l'expérimentation de Byrne [BYR 95] est donc supérieure à la nôtre.

Cette remarque met en relief la difficulté de générer un écoulement turbulent applicable à n'importe quelle géométrie. En effet, lorsque l'on compare les vitesses globales de dépôt, on

observe des résultats semblables entre les deux études. Dans leurs globalités, les écoulements sont donc similaires. Mais quand on s'intéresse aux vitesses élémentaires, des différences apparaissent. L'obtention d'un écoulement représentatif du bâtiment est la limite principale de ce type de modélisation globale.

II.5.5. Constantes de dépôt pour les couples revêtement – particule étudiés

Les constantes élémentaires pour chaque orientation de parois et chaque couple revêtement – particule sont déduites à partir des mesures effectuées lors de l'étude n°2 et par application du principe de décomposition des constantes globales de dépôt (tableau II.23).

Les valeurs des constantes élémentaires de dépôt pour le bois et le crépis n'étant pas disponibles pour les petites particules, on supposera que ces valeurs sont proches de celles du revêtement pour lequel le coefficient de captation est voisin pour les particules de 5.0 μm , c'est-à-dire que les constantes élémentaires de dépôt pour le bois seront prises égales à celles du papier peint lisse, et celles du crépis seront données par celles du verre.

Revêtements	0.7 μm			1.0 μm			5.0 μm		
	S	V	P	S	V	P	S	V	P
Papier peint lisse	0.13 ± 0.00	0.06 ± 0.00	0.03 ± 0.00	0.21 ± 0.02	0.08 ± 0.03	0.02 ± 0.02	4.68 ± 0.15	1.80 ± 0.23	0.45 ± 0.15
Papier peint avec relief	0.18 ± 0.02	0.13 ± 0.02	0.08 ± 0.02	0.25 ± 0.01	0.13 ± 0.01	0.06 ± 0.01	4.71 ± 0.09	1.85 ± 0.13	0.48 ± 0.09
Moquette	0.62 ± 0.00	0.57 ± 0.00	0.52 ± 0.00	0.69 ± 0.00	0.60 ± 0.00	0.50 ± 0.00	5.90 ± 0.42	3.33 ± 0.48	1.66 ± 0.42
Linoléum	0,26 $\pm 0,00$	0,20 $\pm 0,00$	0,16 $\pm 0,00$	0,32 $\pm 0,00$	0,21 $\pm 0,00$	0,13 $\pm 0,00$	4,64 $\pm 0,03$	1,73 $\pm 0,05$	0,40 $\pm 0,03$
Verre	0,26 $\pm 0,00$	0,21 $\pm 0,00$	0,16 $\pm 0,00$	0,44 $\pm 0,00$	0,34 $\pm 0,00$	0,25 $\pm 0,00$	5,58 $\pm 0,29$	2,98 $\pm 0,34$	1,35 $\pm 0,29$

Tableau II.23 : Constantes élémentaires de dépôt (h^{-1})

Les figures II.29, II.30 et II.31 présentent la contribution de chacune de ces orientations pour les trois tailles de particules. Ces contributions ont été calculées par rapport à la valeur de la constante globale de dépôt en prenant la même surface de revêtement pour chaque orientation.

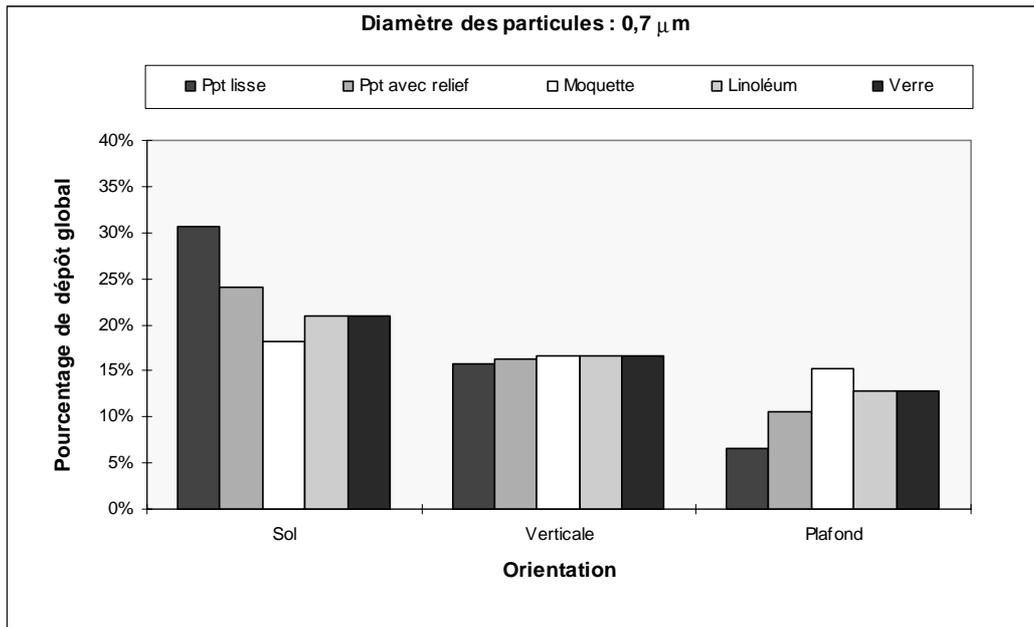


Figure II.29 : Incidence de l'orientation des parois – diamètre : 0.7 µm

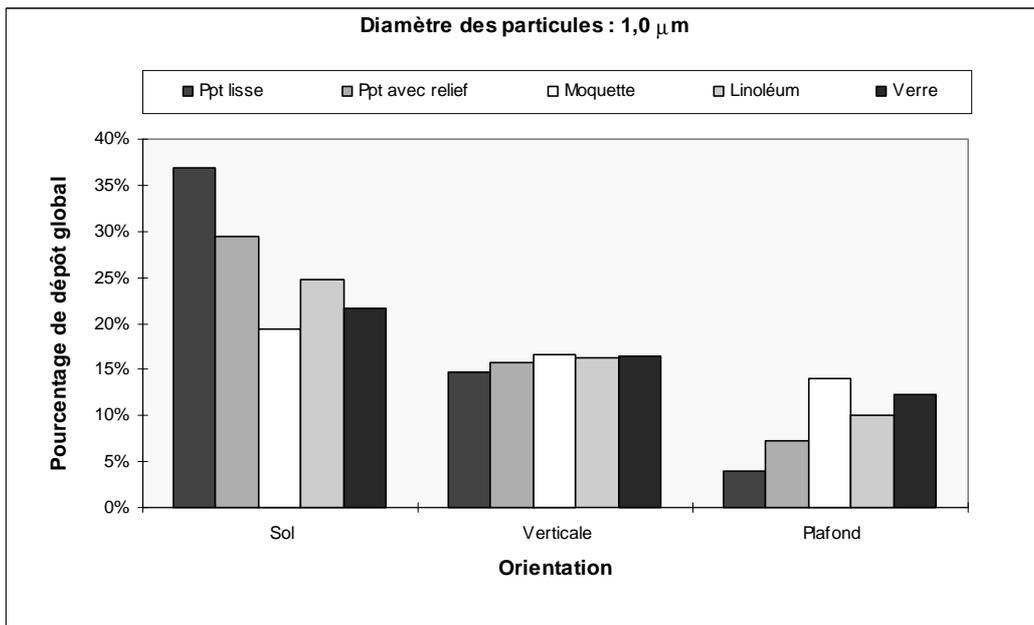


Figure II.30 : Incidence de l'orientation des parois– diamètre : 1.0 µm

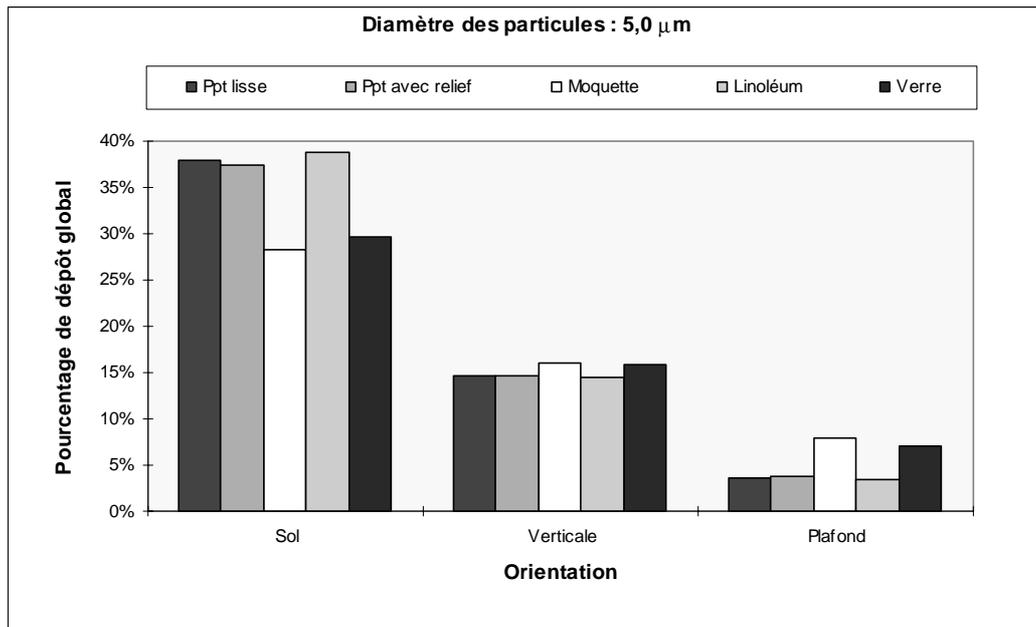


Figure II.31 : Incidence de l'orientation des parois – diamètre : 5.0 µm

On remarque que, quelle que soit la taille des particules et quel que soit le revêtement de surface, la contribution de la paroi verticale reste sensiblement la même (16 %). La différence va s'exercer entre le sol et le plafond. Ainsi, plus la particule sera grosse, plus le dépôt sera important sur le sol. Mais il faut remarquer que plus le revêtement est rugueux (terme pris dans le sens de plus forte constante globale de dépôt) plus la différence entre les parois de différente orientation est tenue. Par exemple, pour le revêtement moquette (revêtement qui a la plus grande constante de dépôt) la contribution des parois est quasiment identique. A contrario, pour le revêtement le moins captant (papier peint lisse), le dépôt sur le sol est double de celui sur une paroi verticale et quadruple de celui du plafond.

II.6. ETUDE DE CAS

II.6.1. Introduction

Dans le but de mettre en relief le rôle du dépôt sur les revêtements, il nous a paru opportun de simuler les échanges particuliers au sein d'un bâtiment de taille réelle. Il est bien entendu que cette étude de cas reste fictive car il n'existe pas à l'heure actuelle d'études sur les concentrations intérieures suffisamment renseignées pour permettre une comparaison avec la simulation. Ce chapitre permet donc de mettre en relief les applications désormais possibles découlant de ce modèle global.

II.6.2. Cas d'étude

II.6.2.1. Caractéristiques du logement

Le logement étudié est de type collectif construit après 1974 [COH 96]. Il est constitué de trois pièces principales (figure II.32). La surface habitable est de 75 m² pour une hauteur sous plafond de 2.5 m.

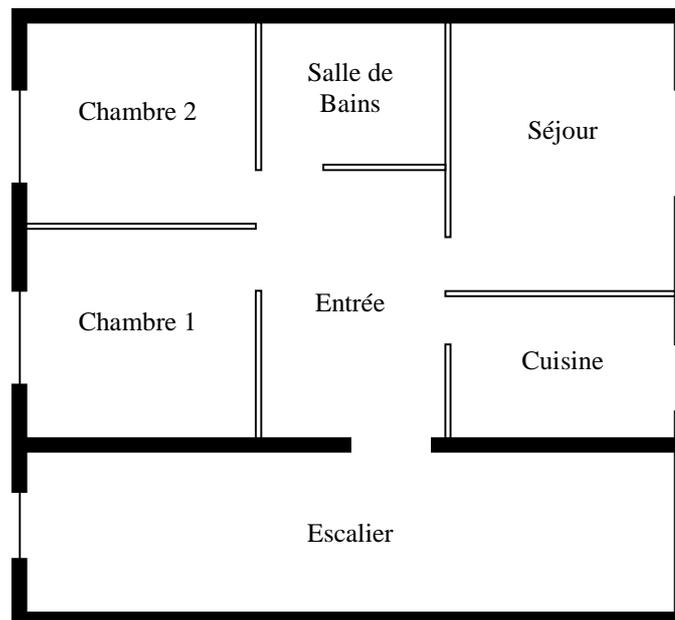


Figure II.32 : Plan du logement

Les caractéristiques des différentes pièces sont recensées dans le tableau II.23.

Pièce	Volume (m ³)	Orientation	Surface (m ²)	Revêtement
Escalier	75	Sol	30	Linoléum
		Plafond	30	Crépis
		Mur	68	Crépis
		Porte	2	Bois
		Vitre	4.5	Verre
Chambre 1	37.5	Sol	15	Moquette
		Plafond	15	Papier peint avec relief
		Mur	36.5	Papier peint lisse
		Porte	2	Bois
		Vitre	1.5	Verre
Chambre 2	37.5	Sol	15	Linoléum
		Plafond	15	Papier peint avec relief
		Mur	36.5	Papier peint lisse
		Porte	2	Bois
		Vitre	1.5	Verre
Séjour	45	Sol	18	Moquette
		Plafond	18	Papier peint avec relief
		Mur	37.5	Papier peint lisse
		Porte	2	Bois
		Vitre	3	Verre
Cuisine	22.5	Sol	9	Linoléum
		Plafond	9	Papier peint avec relief
		Mur	29	Papier peint lisse
		Porte	2	Bois
		Vitre	1.5	Verre
Salle de Bains	4.5	Sol	5.4	Linoléum
		Plafond	5.4	Papier peint avec relief
		Mur	22	Papier peint lisse
		Porte	2	Bois
Entrée	31.5	Sol	12.6	Linoléum
		Plafond	12.6	Papier peint avec relief
		Mur	24	Papier peint avec relief
		Porte	12	Bois

Tableau II.24 : Caractéristiques des pièces du logement collectif

A partir de l'expérimentation sur maquette, on déduit les constantes globales de dépôt pour chaque pièce et chaque taille de particules. Le tableau II.25 présente les valeurs obtenues.

	0.7 μm	1.0 μm	5.0 μm
Escalier	0.24	0.37	3.51
Chambre 1	0.23	0.27	2.98
Chambre 2	0.14	0.17	2.65
Entrée	0.17	0.19	2.73
Séjour	0.23	0.26	2.85
Cuisine	0.21	0.24	3.16
Salle de Bains	1.00	1.07	10.12

Tableau II.25 : Constantes de dépôt (h^{-1})

II.6.2.2. Echanges aérauliques

Les échanges aérauliques ont été obtenus par Cohas [COH 96] à l'aide du code numérique BILGA développé depuis 1980 par le Centre Expérimental de recherches et d'études du Bâtiment et des Travaux Publics et la Fédération Nationale du Bâtiment. Le schéma aéraulique présenté par la figure II.33 est obtenu en prenant en compte les conditions extérieures qui commandent la ventilation naturelle du logement, ainsi que l'utilisation d'une ventilation mécanique (débit d'extraction en cuisine, salle de bains).

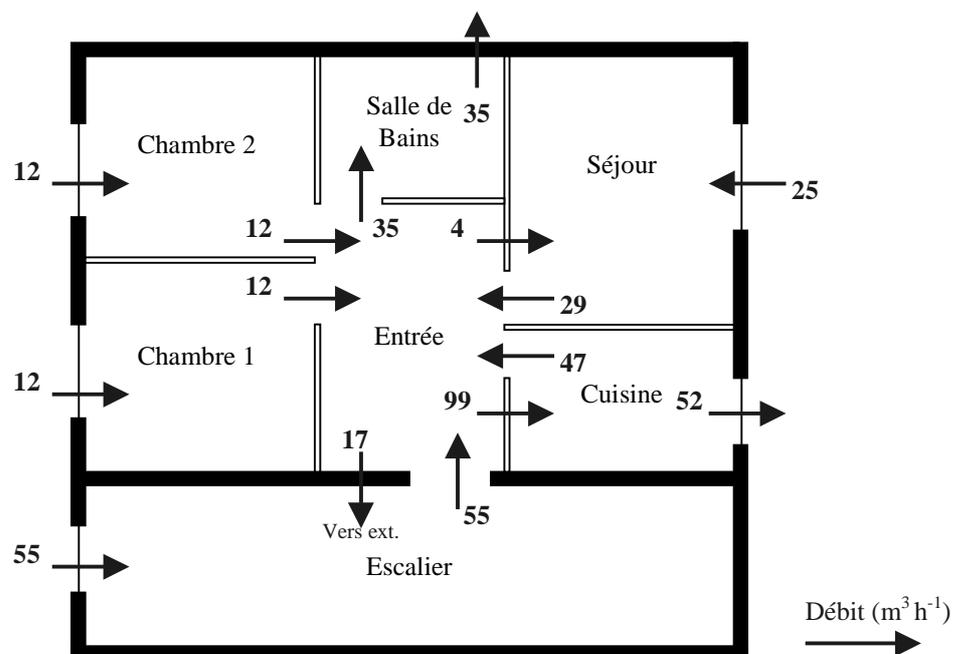


Figure II.33 : Transferts aérauliques au sein du logement

Les concentrations intérieures en particules sont déterminées pour les deux chambres et l'escalier, pièces dont le niveau en particules ne dépend que de la concentration extérieure. Puis, celles de l'entrée, de la cuisine et du séjour sont calculées par itération afin de prendre en compte les échanges entre ces pièces. Enfin, la concentration en particules est déduite pour la salle de bains.

II.6.2.3. Concentration extérieure

La concentration extérieure en particules est générée à partir d'un relevé de particules PM10 (particules de diamètre inférieur à 10 μm) établi pendant le mois d'août 1999 dans une station de mesure parisienne. Les niveaux présentés par la figure II.34 sont représentatifs d'une journée sans pollution trop importante. On retrouve les pics caractéristiques d'augmentation de la concentration extérieure essentiellement induite par le trafic routier (de 7h00 à 9h00, de 12h00 à 15h00 et en fin de journée). D'après Schneider [SCH 99], le diamètre représentatif de la pollution extérieure est 1.5 μm , la quantité de particules véhiculée de l'extérieur vers l'intérieur sera considérée comme entièrement constituée de particules de 1.0 μm . De plus, on posera un coefficient de filtration de l'enveloppe négligeable.

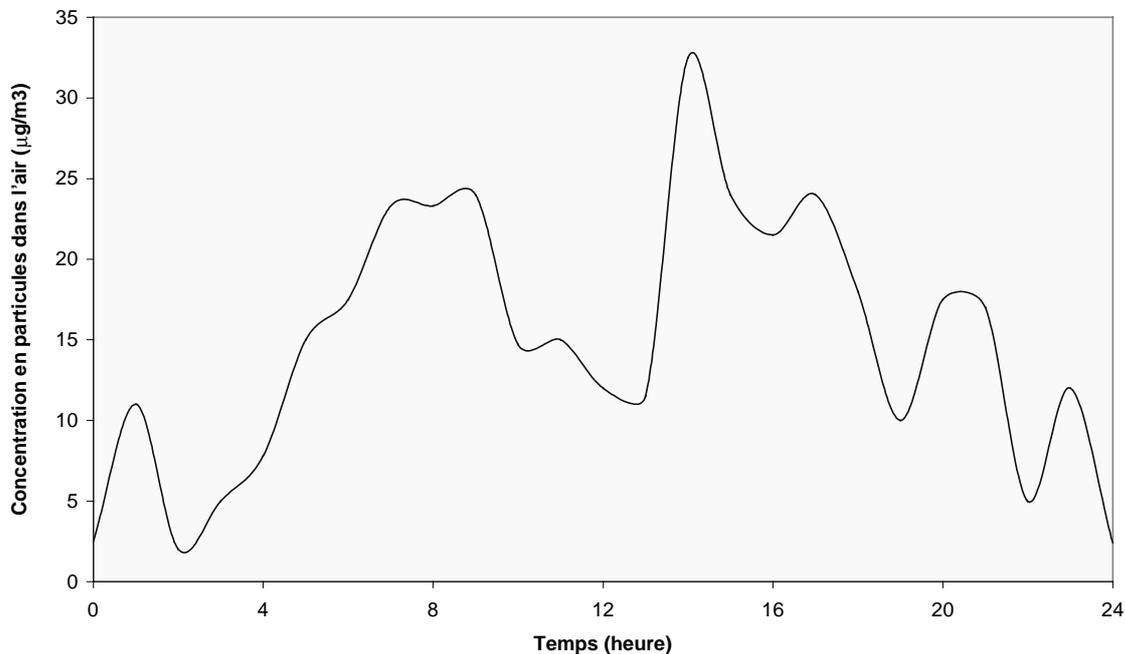


Figure II.34 : Concentration en particules de l'air extérieur

II.6.2.4. Sources intérieures

Deux sources intérieures seront considérées dans les simulations : la fumée de cigarettes et les particules générées par la cuisine. Schneider [SCH 99], à partir de l'étude bibliographique de Wallace [WAL 96], détermine le niveau de $3.0 \mu\text{g s}^{-1}$ pour les particules des sources intérieures, l'auteur considère ainsi l'effet cumulé des deux sources or Wallace montre que le diamètre moyen de la fumée de cigarettes est de $1.0 \mu\text{m}$ alors que celui des particules de cuisson est estimé à $4.6 \mu\text{m}$. Compte tenu de l'importance de la taille des particules vis à vis du dépôt, il nous semble plus raisonnable de considérer ces deux sources séparément avec un débit de 30 mg par cigarette et 4 mg min^{-1} pour les produits de cuisson.

II.6.2.5. Indice de qualité de l'air

L'élaboration d'indices de la qualité de l'air est indispensable pour la détermination de l'interaction entre le local et la santé. On peut classer les différentes approches en deux groupes : les critères sanitaires et les notions de confort. Pour notre étude, l'indice de qualité de l'air utilisé est basé sur celui proposé par Cohas [COH 96] pour l'application aux composés organiques volatils. Son expression est donnée par l'équation II.90 :

$$IQA = \frac{VRL - Ec}{VRI - VRL} \quad (\text{II.90})$$

Avec IQA : indice de la qualité de l'air,

Ec : exposition au polluant ($\mu\text{g m}^{-3}$),

VRL : Valeur à Risques Limités ($\mu\text{g m}^{-3}$), et

VRI : Valeur à Risques Importants ($\mu\text{g m}^{-3}$).

L'exposition au polluant est calculée en intégrant la concentration intérieure sur une période déterminée :

$$Ec = \frac{1}{T} \int_0^T C_i(t) dt \quad (\text{II.91})$$

Avec C_i : concentration en particules de l'air intérieur ($\mu\text{g m}^{-3}$).

Pour des expositions inférieures à la Valeur à Risques Limités, *VRL*, les risques sanitaires sont limités, voir nuls ou inconnus. Pour des valeurs supérieures à la Valeur à Risques Importants, *VRI*, les risques sanitaires sont prouvés, et se traduisent généralement par des lésions irréversibles, des maladies chroniques...

L'auteur ne donne pas les valeurs à risques pour les particules solides. Il nous semble raisonnable de les fixer en fonction des normes sur la qualité de l'air vis-à-vis des particules inférieures à 10 μm . On fixera donc les valeurs $VRL = 50 \mu\text{g m}^{-3}$ et $VRI = 150 \mu\text{g m}^{-3}$.

L'utilisation de cet indice de la qualité de l'air a un double intérêt puisqu'il prend en compte les deux approches relatives au confort et à la santé. Ainsi, lorsque l'*IQA* est positif, il traduit la notion de confort et permet de comparer les niveaux de confort (1 : confort optimal), lorsqu'il est compris entre -1 et 0, le risque sanitaire existe mais est limité, enfin lorsqu'il est inférieur à -1, le risque sanitaire est bien réel.

II.6.3. Simulations

II.6.3.1. Effet de la prise en compte du dépôt

En première simulation, nous avons déterminé l'influence de la concentration extérieure sur la qualité de l'air intérieur en calculant la concentration en particules dans les deux chambres. La figure II.35 présente les niveaux de concentrations calculés pour les deux chambres, ainsi que pour une chambre dans laquelle le dépôt n'est pas pris en compte. On remarque un amortissement de l'amplitude de la concentration intérieure par rapport à la concentration extérieure. Ainsi, entre 8h00 et 18h00, la concentration intérieure varie de $5 \mu\text{g/m}^3$ alors que la concentration extérieure oscille pour la même période sur une plage de $25 \mu\text{g/m}^3$. Il est intéressant d'observer l'importance de la prise en compte du dépôt sur les revêtements intérieurs. En effet, si elle n'est pas incluse dans les calculs, le niveau intérieur de pollution est surévalué d'un facteur 3/2.

Cette simulation met également en relief l'influence du revêtement utilisé pour le sol : en effet, la concentration intérieure pour la chambre 1 (moquette) reste toujours inférieure à celle de la chambre 2 (linoléum), ce qui se traduit directement par un indice de qualité de l'air supérieur pour la chambre 1 (figure II.36). Enfin, il faut remarquer que le niveau intérieur de pollution peut devenir supérieur au niveau de pollution extérieur, même s'il reste la plupart du

temps inférieur à ce dernier (le rapport moyen entre la concentration intérieure et extérieure est de 0.6 pour la chambre 1 et 0.7 pour la chambre 2).

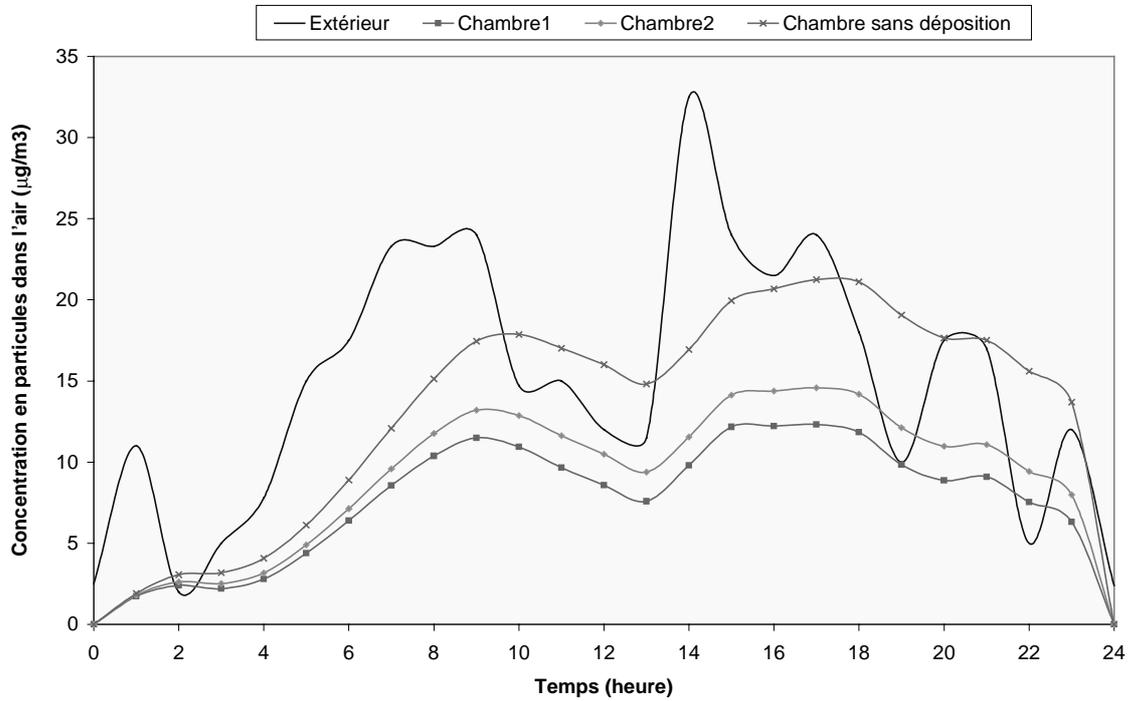


Figure II.35 : Concentration en particules dans les chambres

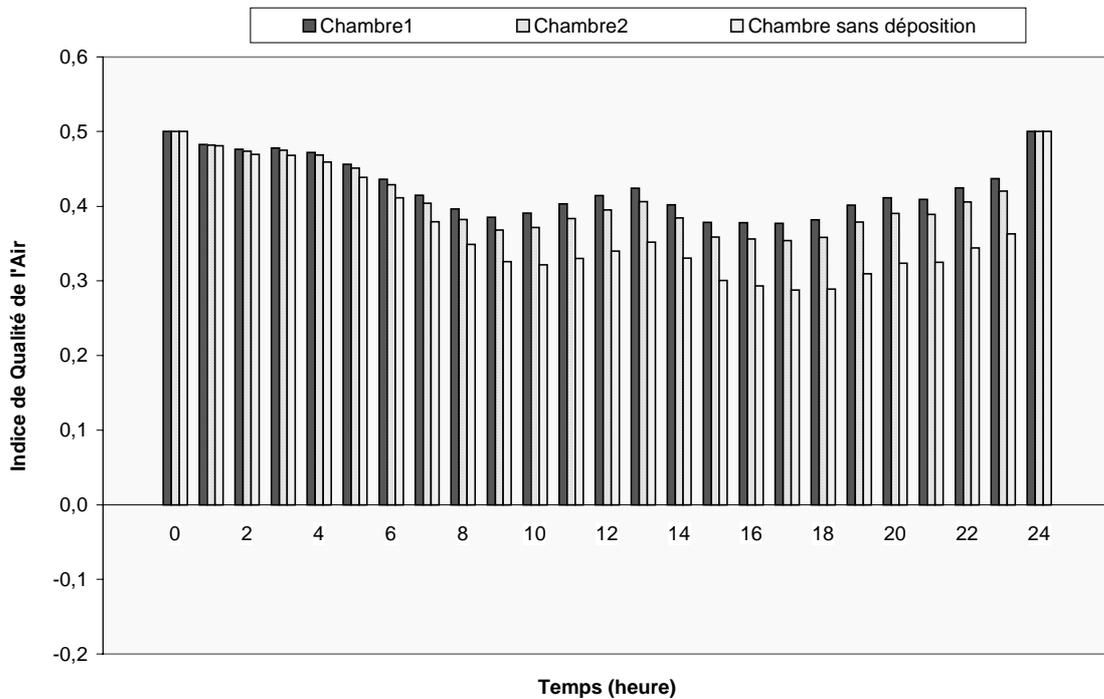


Figure II.36 : Indice de qualité de l'air pour les chambres

II.6.3.2. Migration d'une source de pollution à partir de la chambre 1

La première source, située dans la chambre 1, est caractérisée par de la fumée de cigarettes émise pendant une durée de trente minutes. La figure II.37 montre l'évolution de la concentration avec et sans source interne.

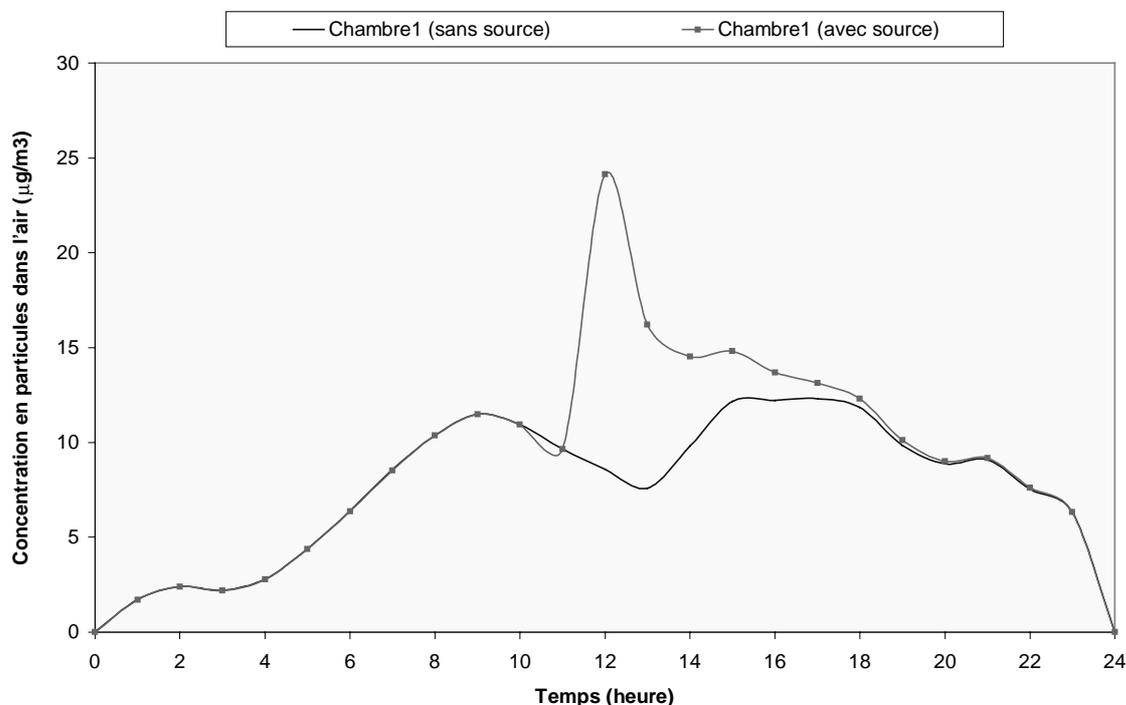


Figure II.37 : Concentration en particules dans la chambre 1 avec et sans source

La présence de la fumée induit un pic de concentration supérieur au double de la normale. De plus, l'effet de cette source persiste pendant près de 5 heures. Ceci s'explique par le faible dépôt de cette fumée qui est constituée de particules de 1.0 µm de diamètre. Cette augmentation de la concentration intérieure implique une diminution de la qualité de l'air de près de 2/3 au moment de la génération de la fumée (figure II.38).

Les concentrations dans les pièces avoisinantes (entrée et salle de bains) ont été calculées (figure II.39). La présence de la source de la chambre 1 a une influence faible mais décelable sur les niveaux de concentrations de ces pièces. Cette influence s'exerce également sur une période de 5 heures. L'indice de la qualité de l'air est quant à lui peu modifié (figure II.40). Remarque : les concentrations dans le séjour et dans la cuisine n'ont pas été représentées car l'effet de la source reste du même ordre que dans les deux pièces présentées.

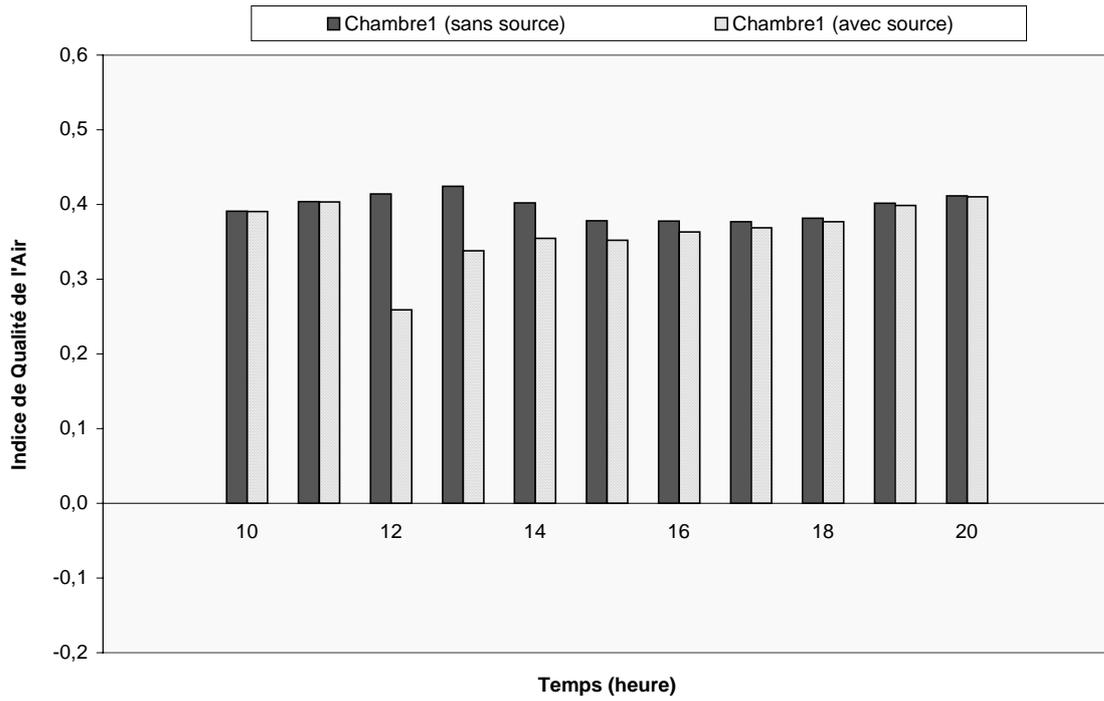


Figure II.38 : Indice de qualité de l'air pour la chambre 1 avec et sans source

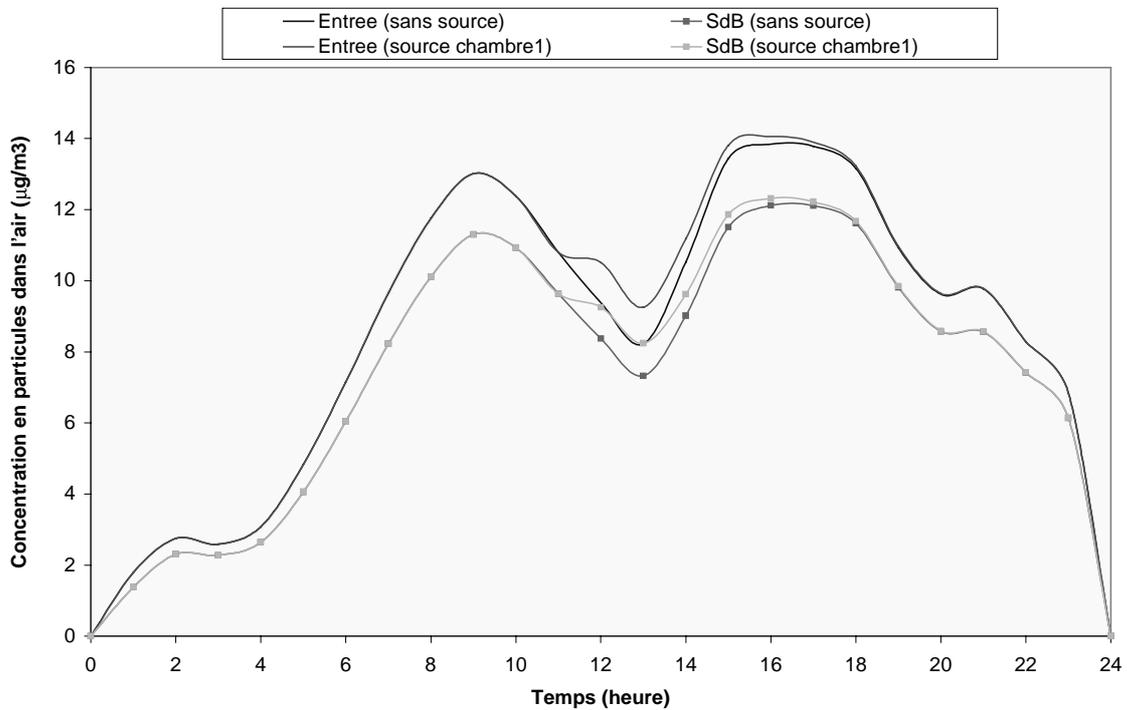


Figure II.39 : Concentration en particules dans l'entrée et la salle de bains

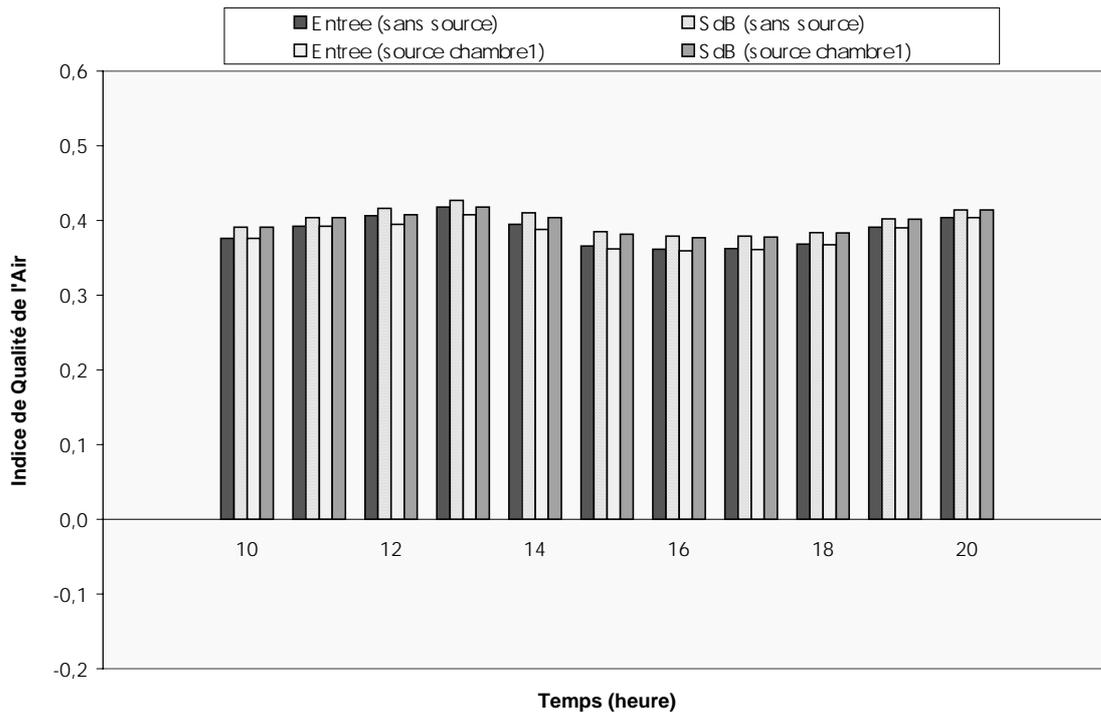


Figure II.40 : Indice de qualité de l'air pour l'entrée et la salle de bains

II.6.3.2. Migration d'une source de pollution à partir de la cuisine

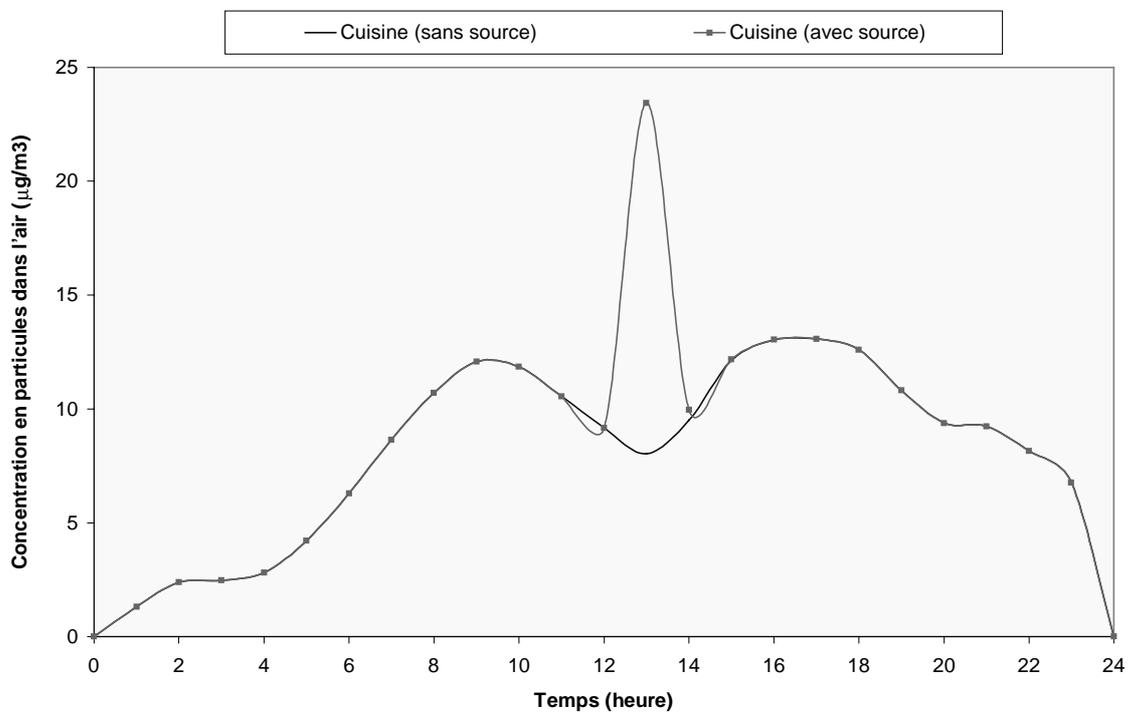


Figure II.41 : Concentration en particules dans la cuisine avec et sans source

La seconde source interne étudiée est celle équivalente aux particules générées lors de la cuisson des aliments. Les particules sont produites de 12h00 à 13h00. Le niveau de concentration intérieure est semblable à celui de la source précédente : on observe un pic de concentration égal à $25 \mu\text{m}/\text{m}^3$ (figure II.41). La différence majeure entre ces deux sources est la durée d'effet de la source. En effet, alors que pour la fumée de cigarettes, l'influence restait perceptible pendant plusieurs heures, celle de la seconde source est rapidement stoppée. Cela s'explique à la fois par la taille des particules composant la fumée de cuisine qui est de l'ordre de $5.0 \mu\text{m}$ (le dépôt est alors très supérieur à la fumée de cigarettes) et par le fort taux de renouvellement d'air (2.4 vol h^{-1} pour la cuisine et 0.3 vol h^{-1} pour la chambre 1). La diminution de la qualité de l'air dans la cuisine est alors de très courte durée (figure II.42).

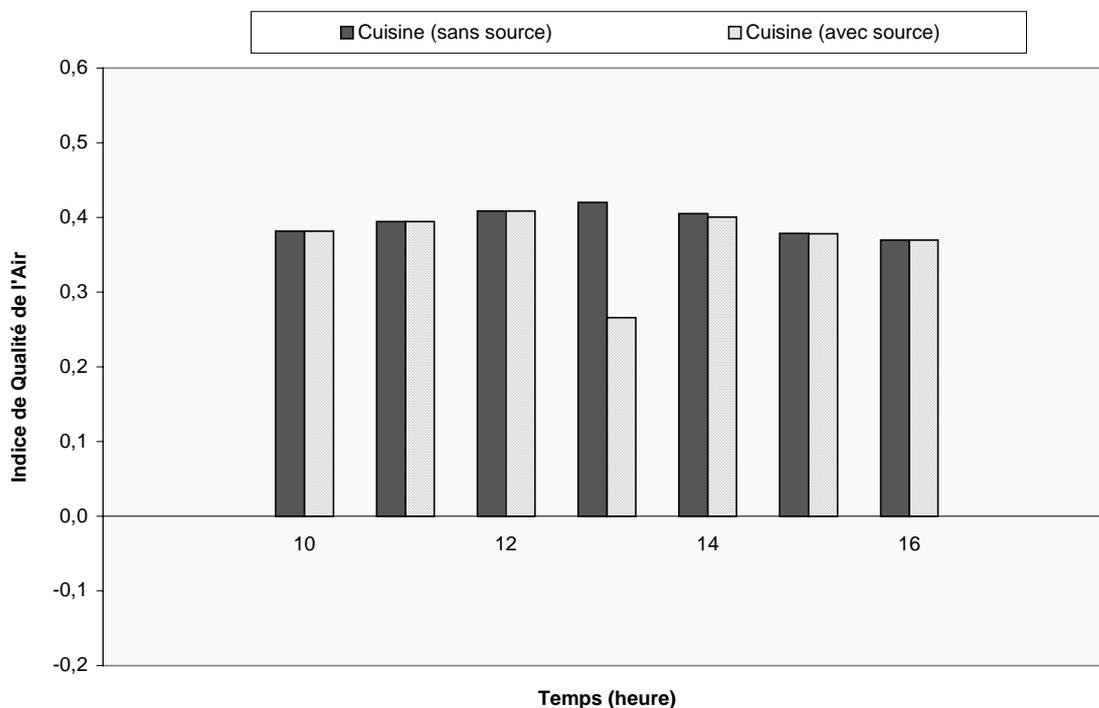


Figure II.42 : Indice de qualité de l'air pour la cuisine avec et sans source

Comme précédemment, les concentrations dans les pièces avoisinantes (entrée et salle de bains) ont été calculées (figure II.43). L'influence de cette source est un peu plus importante que celle de la première source car le transport de particules de la cuisine à l'entrée est supérieur à celui de la chambre 1 à l'entrée, mais cette influence reste faible et de courte durée car l'effet du dépôt pour les particules de $5.0 \mu\text{m}$ est grand (figure II.44).

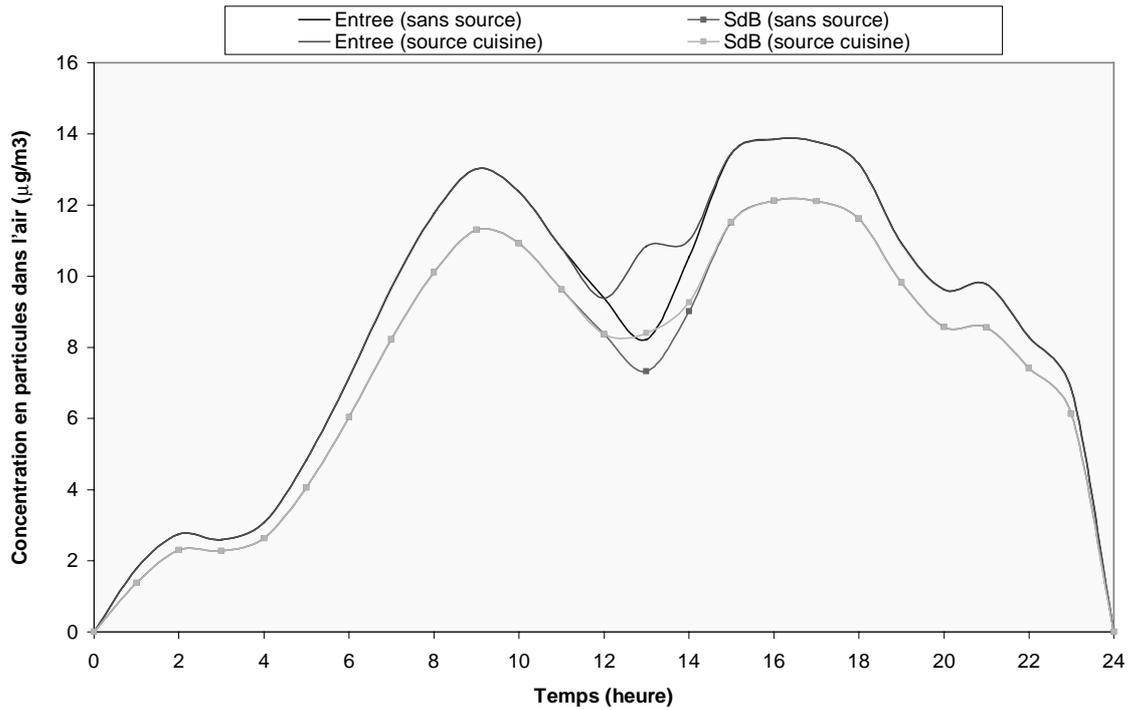


Figure II.43 : Concentration en particules dans l'entrée et la salle de bains

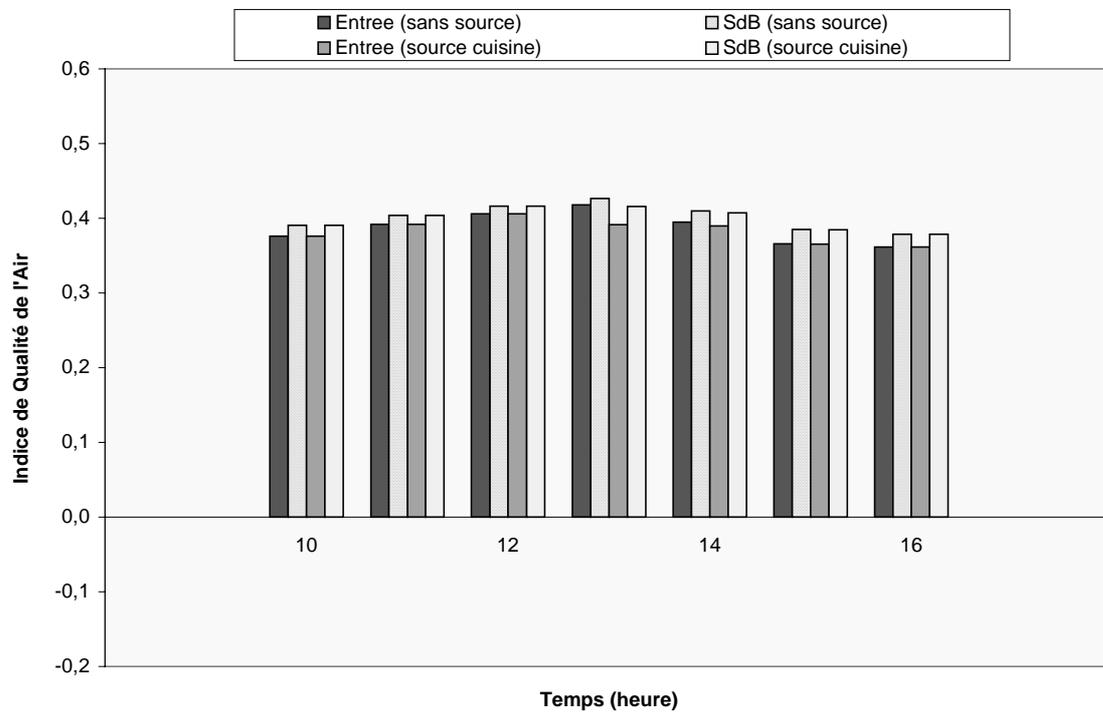


Figure II.44 : Indice de qualité de l'air pour l'entrée et la salle de bains

II.6.3.3. Migration d'une source de pollution à partir de l'escalier

La dernière source interne étudiée est la combustion d'un feu équivalente à celui de bois de cheminée. La taille des particules générées est de l'ordre de $1.0 \mu\text{m}$, l'intensité de la source est équivalente à 20 g h^{-1} [OWE 90]. Pour l'étude, la période de combustion est prise égale à une demi-heure à partir de 11h00.

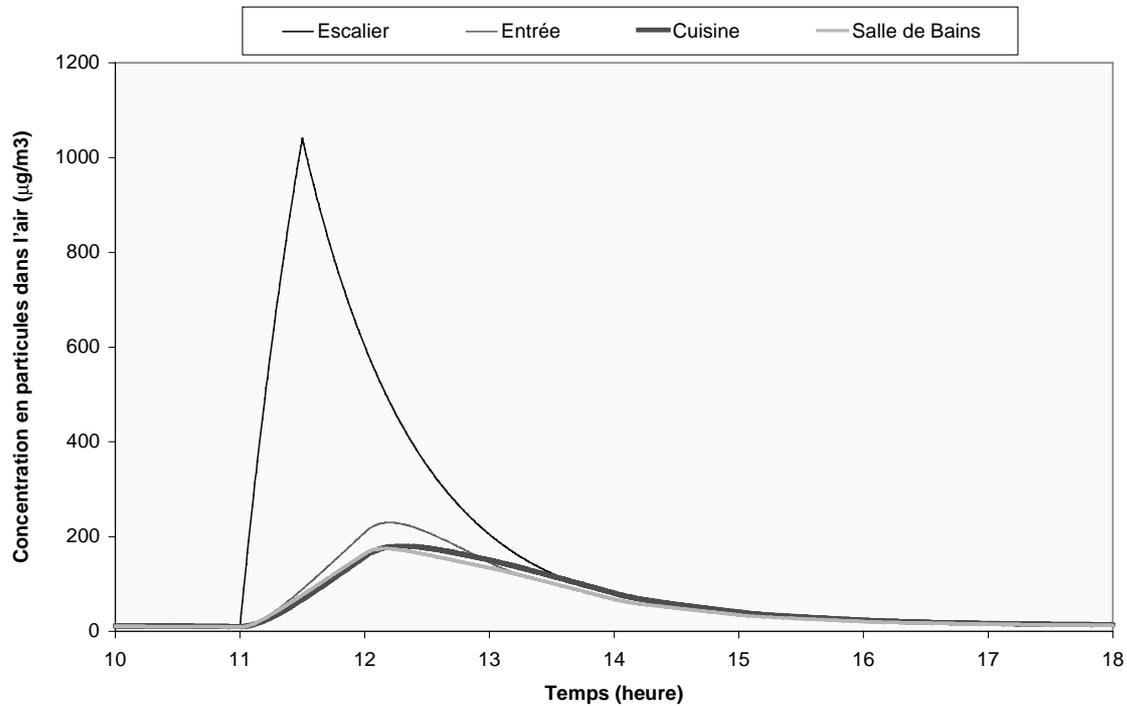


Figure II.45 : Concentration en particules dans l'air

La figure II.45 montre l'évolution de la concentration en particules dans l'escalier (lieu de la source interne) et des trois pièces les plus interconnectées (entrée, cuisine et salle de bains). On observe une forte croissance dans l'escalier jusqu'à une valeur maximale de $1050 \mu\text{g m}^{-3}$. A un tel niveau, il faut environ 7 heures pour que la concentration en particules redevienne normale. De plus, on visualise bien le déphasage temporel entre le pic de concentration atteint dans l'escalier et ceux atteints dans les autres pièces. En effet, la concentration continue à augmenter dans les autres pièces pendant près de 45 minutes après l'arrêt de la source.

On constate la répercussion de l'émission de la source sur l'indice de qualité de l'air (figure II.46). On peut considérer que trois heures après l'arrêt de la source, le risque sanitaire est bien réel.

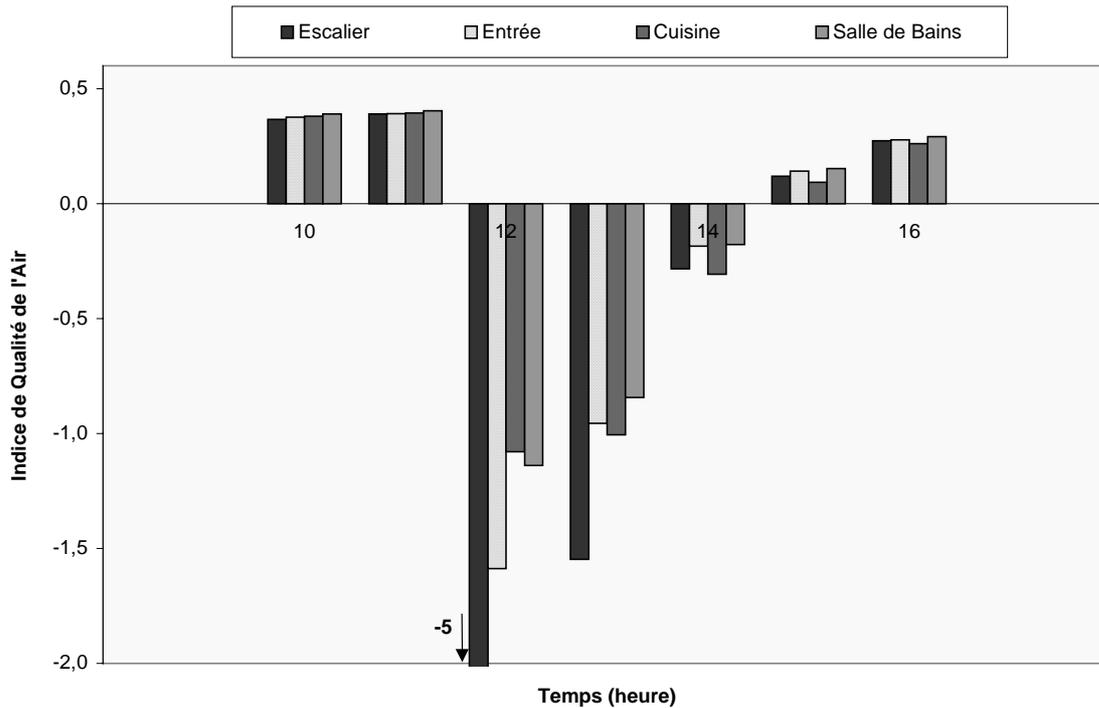


Figure II.46 : Indice de qualité de l'air

II.6.4 Conclusion sur l'étude de cas

Cette étude de cas a permis de mettre en application les résultats obtenus sur maquette et à les transposer pour le calcul des niveaux de pollution particulaire à l'intérieur des bâtiments. Elle a également montré l'importance de la prise en compte du phénomène de dépôt sur les revêtements intérieurs des bâtiments. Cependant, cette étude reste un exemple et il serait nécessaire d'effectuer des mesures in situ en prenant garde de bien caractériser tous les paramètres qui entrent dans la composition du modèle. Les études actuelles décrites dans la littérature restent souvent trop succinctes et incomplètes quant à la caractérisation de ces paramètres. De plus, il faut ajouter que le phénomène de remise en suspension n'a pas été pris en considération dans cette étude. Ainsi, par exemple, recouvrir le sol de moquette paraît être une bonne solution pour garantir une meilleure qualité de l'air, mais il est probable que la remise en suspension par l'activité humaine soit plus importante dans le cas de la moquette que dans le cas de revêtements lisses.

II.7. CONCLUSION

En développant le principe de la modélisation globale des échanges entre l'air pollué et les surfaces intérieures du bâtiment, plusieurs points ont été abordés et précisés dans ce chapitre.

Tout d'abord, compte tenu de l'hétérogénéité des revêtements de paroi existants à l'intérieur du bâtiment, la détermination d'une caractéristique commune aux revêtements s'est avérée essentielle afin de quantifier le dépôt des particules sur ceux-ci. Il a été montré dans ce chapitre que la seule comparaison de la forme géométrique de la surface d'interaction était insuffisante à l'établissement d'une classification des revêtements. En effet l'impossibilité de définir une caractéristique géométrique commune (entre les parois lisses et les moquettes par exemple), et la présence de forces de contact inhérentes aux matériaux constituant ces parois, mettent en relief la nécessité de déterminer une autre voie de caractérisation. L'introduction d'une nouvelle caractéristique, le coefficient de captation, permet d'aboutir à une telle classification. La quantification de ce coefficient, qui passe par une simple mesure de la décroissance de la concentration en particules dans l'air à l'intérieur d'une chambre expérimentale, paraît donc adéquate.

Ensuite, par l'application d'une théorie existante sur le dépôt des particules dans une enceinte à l'intérieur de laquelle un écoulement turbulent est créé, nous avons montré qu'il était possible de décomposer la constante globale de dépôt, donnée qui permet de calculer la vitesse de dépôt des particules sur les parois intérieures, afin de déterminer le dépôt sur chacune des surfaces constituant l'enceinte. A partir de ces résultats, l'évolution de la concentration en particules à l'intérieur d'une salle réelle, présentant divers revêtements de paroi, peut être prédite, et l'évaluation de la qualité particulaire de l'air est alors accessible.

Néanmoins, si ce type de modélisation est suffisant pour une approche de la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments, il est souvent intéressant d'obtenir des renseignements plus précis quant aux trajectoires, aux chemins privilégiés, empruntés par les particules à l'intérieur d'un volume d'étude, ainsi que les lieux précis de dépôt responsables des salissures visibles des parois. C'est dans ce but qu'un code numérique de dispersion des particules au sein d'un

écoulement turbulent a été développé ; sa mise au point et son application à une configuration similaire à celle de l'étude expérimentale sont traitées dans le chapitre suivant.

Chapitre III
-
Simulation Numérique

III. SIMULATION NUMERIQUE

III.1. MOTIVATION – OBJECTIFS

Ce dernier chapitre présente le développement de la modélisation fine de la diffusion particulaire par l'introduction de l'action des différents revêtements de parois sur les niveaux de concentration en particules dans l'air.

Pour cela, il a tout d'abord été nécessaire d'adapter le code de diffusion particulaire tout juste mis au point par Sandu [SAN 99] au LEPTAB.

Ce code repose sur l'approche lagrangienne qui consiste à intégrer les équations de mouvement de chaque particule à chaque pas de temps afin de déterminer les positions successives des particules. Cependant ce code numérique ne traite que des configurations bidimensionnelles. Afin d'approcher les conditions propres au bâtiment, la première phase de développement a consisté en la prise en compte de la troisième dimension d'espace.

La seconde phase de l'étude numérique a été destinée à la validation du modèle par la confrontation aux résultats expérimentaux de Snyder et Lumley [SNY 71] de résultats obtenus par la simulation numérique.

Enfin, l'introduction et la comparaison de deux modèles de paroi vis-à-vis des particules ont été réalisées. Cette dernière partie est basée sur les expérimentations décrites dans le chapitre précédent.

III.2. MODELISATION NUMERIQUE DE LA DYNAMIQUE PARTICULAIRE

III.2.1. Méthodes existantes

III.2.1.1. Introduction

Deux grandes familles de modèles permettent la prédiction de la diffusion particulaire [SAN 99] : les modèles eulériens et les modèles lagrangiens.

Les modèles eulériens à une phase considèrent le système particules/air comme un milieu hétérogène dans lequel les particules suivent fidèlement l'écoulement fluide. Pour la résolution, ils nécessitent une équation supplémentaire en plus des équations relatives à l'écoulement. Ces modèles sont faciles à mettre en œuvre et ils peuvent prendre en compte des aérosols concentrés ainsi que les effets des particules sur l'écoulement fluide. Par contre, ils

nécessitent une bonne connaissance des coefficients de diffusion, et ils ont une application limitée aux petites particules (sans inertie).

Les modèles eulériens à deux phases considèrent quant à eux les particules et le fluide comme deux milieux continus mélangés. La résolution de ces modèles est plus complexe car elle consiste à obtenir l'écoulement de chaque milieu. En plus d'une bonne connaissance des coefficients de diffusion, ils nécessitent la définition de conditions limites pour les deux milieux.

Les modèles qui requièrent le moins d'hypothèses sont les modèles lagrangiens. Les interactions des particules avec le fluide (ou avec les parois) sont décrites explicitement prises en compte. Par rapport aux modèles eulériens, où, après la résolution, l'accès aux champs de concentration et de vitesse particulières est direct, il faut faire appel à des calculs statistiques qui permettent de générer les champs de concentration et de vitesse des particules à partir des trajectoires calculées pour chaque particule. Ceci induit le tirage d'un nombre assez élevé de particules pour que les résultats statistiques soient représentatifs. Malgré ce dernier point, c'est le modèle qui a été choisi par Sandu [SAN 99] pour déterminer les trajectoires des particules dans un écoulement d'air. Le chapitre suivant traite de la méthode de résolution de ce type de modèle.

III.2.1.2. Principe

Les méthodes lagrangiennes traitent les particules de manière individuelle : celles - ci sont suivies le long de leur trajectoire grâce à la résolution de l'équation de la dynamique du mouvement qui s'écrit, d'après Hinze [HIN 87] :

$$\begin{aligned}
 \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \frac{dU_p}{dt} = & C_D \frac{\pi}{8} \rho d_p^2 |U - U_p| (U - U_p) + \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho \frac{dU}{dt} + \\
 & I \qquad \qquad \qquad II \qquad \qquad \qquad III \\
 & + C_a \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho \left(\frac{dU}{dt} - \frac{dU_p}{dt} \right) + C_h d_p^2 \sqrt{\pi \rho \mu} \int_0^t \frac{\frac{dU}{dt'} - \frac{dU_p}{dt'}}{\sqrt{t-t'}} dt' + F_e \qquad (III.92) \\
 & \qquad \qquad \qquad IV \qquad \qquad \qquad V \qquad \qquad \qquad VI
 \end{aligned}$$

Avec *I* : force d'accélération de la particule,

II : force de traînée (de résistance visqueuse) de la particule,

III : terme dû au gradient de pression autour de la particule induit par son mouvement,

IV : force de "masse ajoutée" de la particule,

V : terme historique de Basset,

VI : forces extérieures,

d_p : diamètre de la particule (m),

ρ, ρ_p : masses volumiques du fluide et de la particule (kg m^3),

μ : viscosité dynamique du fluide ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$),

U, U_p : vitesses totales du fluide et de la particule (m s^{-1}),

C_D : coefficient de traînée,

C_a : coefficient de masse ajoutée, et

C_h : coefficient de Basset.

On montre que les termes III et V peuvent être négligés lorsque les gradients de vitesse entre la particule et le fluide sont faibles [HJE 67]. L'équation à résoudre devient donc :

$$\frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \frac{dU_p}{dt} = C_d \frac{\pi}{8} \rho d_p^2 |U - U_p| (U - U_p) + C_a \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho \left(\frac{dU}{dt} - \frac{dU_p}{dt} \right) + F_e \quad (\text{III.93})$$

Pour la résolution, l'équation III.93 est décomposée pour chaque direction de l'espace selon des équations différentielles ordinaires, en faisant apparaître pour chaque direction concernée la vitesse et la position de la particule. Le système à résoudre devient alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du_p}{dt} = \sum F_x \\ \frac{dv_p}{dt} = \sum F_y \\ \frac{dw_p}{dt} = \sum F_z \\ \frac{dx_p}{dt} = u_p \\ \frac{dy_p}{dt} = v_p \\ \frac{dz_p}{dt} = w_p \end{array} \right. \quad (\text{III.94})$$

Avec F_x, F_y et F_z : forces extérieures suivant x, y et z (N kg^{-1}).

La détermination de la vitesse de la particule nécessite donc la connaissance des forces extérieures qui s'exercent sur la particule (chapitre III.2.2.), de la vitesse *totale* du fluide, U , c'est-à-dire la somme de la vitesse *moyenne* (chapitre III.2.3.) et de la vitesse *fluctuante* (chapitre III.2.4.) de l'écoulement fluide.

III.2.2. Forces extérieures

Les forces extérieures pouvant être prises en compte dans le code numérique sont : la force de traînée, la force de masse ajoutée, la force de gravité, la force de poussée et la force de thermophorèse (figure III.47).

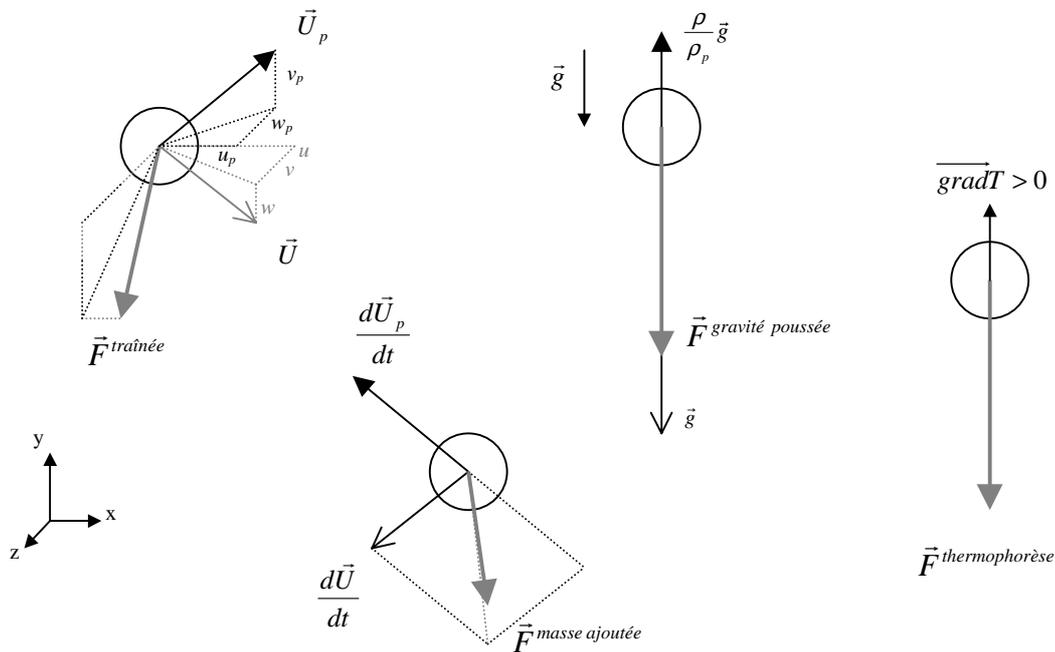


Figure III.47 : Forces extérieures s'exerçant sur une particule

- La force de traînée est la force principale qui traduit l'interaction entre la particule et le milieu fluide en mouvement, son expression suivant les trois directions de l'espace est :

$$\begin{cases} F_x^{trainée} = 0.75 \times C_C \times C_D \times \frac{\rho}{\rho_p d_p} |U - U_p| (u - u_p) \\ F_y^{trainée} = 0.75 \times C_C \times C_D \times \frac{\rho}{\rho_p d_p} |U - U_p| (v - v_p) \\ F_z^{trainée} = 0.75 \times C_C \times C_D \times \frac{\rho}{\rho_p d_p} |U - U_p| (w - w_p) \end{cases} \quad (III.95)$$

Avec U , U_p : vitesses totales du fluide et de la particule ($m s^{-1}$),

u , v , w : composantes fluctuantes de la vitesse du fluide ($m s^{-1}$),

u_p , v_p , w_p : composantes fluctuantes de la vitesse de la particule ($m s^{-1}$),

ρ, ρ_p : masses volumiques du fluide et de la particule (kg m^3),

C_C : coefficient de Cunningham, et

C_D : coefficient de traînée.

- La force de masse ajoutée représente la force nécessaire pour déplacer latéralement la masse de fluide qui se trouve sur le trajet de la particule, soit :

$$\begin{cases} F_x^{\text{masse ajoutée}} = C_a \times \frac{\rho}{\rho_p} \left(\frac{du}{dt} - \frac{du_p}{dt} \right) \\ F_y^{\text{masse ajoutée}} = C_a \times \frac{\rho}{\rho_p} \left(\frac{dv}{dt} - \frac{dv_p}{dt} \right) \\ F_z^{\text{masse ajoutée}} = C_a \times \frac{\rho}{\rho_p} \left(\frac{dw}{dt} - \frac{dw_p}{dt} \right) \end{cases} \quad (\text{III.96})$$

Le coefficient de masse ajoutée est calculé à partir de l'expression de Odar et al. [ODAR 64] :

$$C_a = 1.05 - \frac{0.066}{A_c^2 + 0.12} \quad \text{et} \quad A_c = \frac{|U - U_p|^2}{d_p \left| \frac{dU_p}{dt} - \frac{dU}{dt} \right|} \quad (\text{III.97})$$

- Les forces de gravité et de poussée sont fonctions de la direction des axes x, y et z par rapport à la verticale terrestre. C'est pourquoi la force qui en résulte a été exprimée en termes généraux en décomposant l'accélération gravitationnelle selon les trois directions :

$$\begin{cases} F_x^{\text{gravité poussée}} = g_x \times \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) \\ F_y^{\text{gravité poussée}} = g_y \times \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) \\ F_z^{\text{gravité poussée}} = g_z \times \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) \end{cases} \quad (\text{III.98})$$

Avec g_x, g_y et g_z : composantes de la gravité (m s^{-2}).

- La force de thermophorèse n'existe qu'en présence de gradient de température dans le fluide. Dans cette étude, les écoulements traités étant isothermes, il n'est pas nécessaire de prendre cette force en compte, néanmoins, elle peut être aisément introduite dans le code et son expression est donnée par Sandu [SAN 99].

III.2.3. Modélisation de l'écoulement fluide

L'étude de la dispersion des particules dans l'air concerne la résolution à la fois de l'écoulement fluide (air) et de l'écoulement des particules qui est induit. Il est donc nécessaire de résoudre dans un premier temps l'écoulement de l'air dans le domaine. On fera l'hypothèse que l'aérosol particule - air est suffisamment dilué pour que l'effet de la présence des particules ne perturbe pas l'écoulement d'air. Ainsi l'écoulement d'air sera caractérisé une seule fois et ne changera pas au cours du traitement des particules. On dispose de plusieurs possibilités pour la prédiction d'écoulement d'air ; trois grandes familles se distinguent :

- La Simulation Numérique Directe (DNS) présente l'avantage de résoudre directement les équations de Navier Stokes mais demande un maillage très resserré (de maille inférieure à l'échelle de Kolmogorov) pour la convergence des calculs, ce qui a pour conséquence immédiate d'augmenter considérablement les temps de calcul. A l'heure actuelle et malgré le développement des machines, les maillages ne peuvent guère dépasser plus de deux millions de points, les géométries traitées restent donc "simples" et les durées de calcul longues en temps processeurs.

- La Simulation des Grandes Echelles (LES) est actuellement en plein développement. Son principe est de résoudre les équations de conservation gouvernant l'écoulement sur un maillage moins resserré que la DNS. Les tourbillons de tailles supérieures à ce maillage (dits "grosses structures") sont alors déterminés par le calcul et le transfert d'énergie des petits aux gros tourbillons (et réciproquement) est alors modélisé de manière à prendre en compte l'effet de ces petits tourbillons sur l'écoulement. La difficulté réside en l'application de cette méthode à des écoulements complexes ou anisothermes [SER 00].

- Les Modèles Statistiques (par analogie de Reynolds) consistent à introduire les moyennes temporelles des différentes variables (vitesses, pression...) dans les équations de Navier Stokes, et à faire des hypothèses de fermeture pour résoudre les équations supplémentaires (contraintes de Reynolds) qui apparaissent dans ces équations. Les modèles utilisés classiquement sont les modèles dit $k - \varepsilon$. Le modèle standard est un modèle semi - empirique basé sur les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente k et de son taux de dissipation ε . L'hypothèse principale du modèle standard est que l'écoulement est supposé parfaitement turbulent et que les effets de viscosité moléculaire sont négligeables. Des raffinements successifs ont été élaborés permettant par exemple de rendre le modèle plus réceptif aux effets des contraintes fortes et à la courbure des lignes de courant (modèle $k - \varepsilon$ RNG).

Notre choix s'est donc porté sur la dernière famille de modèles à la fois pour les résultats corrects qu'ils peuvent donner et pour les compétences disponibles au sein du laboratoire (Béghein, Sandu et Joubert [BSJ 95], [BSJ 97], [BSJ 98] et [BSJ 99]). Le logiciel utilisé est un logiciel commercial répandu : FLUENT 5.0. Il est accompagné d'un mailleur GAMBIT qui permet de tracer la géométrie à étudier, de mailler cette géométrie et de renseigner les conditions aux limites du problème. Il ne reste plus qu'à renseigner les divers paramètres de résolutions dans Fluent, notamment les coefficients de sous relaxation, le type de schéma de discrétisation, les lois de parois utilisées, et à lancer les calculs. L'avancée des calculs est accessible en temps réel par l'affichage des résidus après chaque itération des variables du système. Lorsque ces résidus deviennent acceptables (habituellement à partir de 10^{-6}) et après vérification de certains critères de convergence, on considère que le système a convergé. On obtient donc ainsi l'écoulement dans la géométrie étudiée c'est-à-dire les valeurs moyennes temporelles des variables de vitesses (\bar{u} , \bar{v} et \bar{w}), de la pression (\bar{p}), de l'énergie cinétique turbulente (k) et du taux de dissipation d'énergie cinétique turbulente (ε) en chacun des points du maillage.

III.2.4. Génération des vitesses instantanées de l'écoulement fluide

La simulation numérique de l'écoulement du fluide à l'aide d'un modèle $k - \varepsilon$ ne permet d'obtenir que les champs *moyens* des vitesses. Il faut donc reconstituer artificiellement les composantes instantanées de ces vitesses pour pouvoir résoudre l'équation de mouvement de la particule (système d'équations III.94). Pour cela, plusieurs voies existent. Les modèles les plus simples prennent en compte la turbulence de manière très simplifiée par l'introduction d'une fluctuation de vitesse constante dont on change le signe aléatoirement [ALL 82]. D'autres, plus complexes, déterminent ces fluctuations de vitesse par la prise en compte des caractéristiques turbulentes locales de l'écoulement (Gosman et Ioannides [GOS 81], Ormancey et Martinon [ORM 84], Berlemont et al [BER 90], Lu et al [LU 92]). Deux de ces modèles ont été testés pour la mise au point du modèle numérique de dispersion de particules.

III.2.4.1. Modèle de Gosman et Ioannides [GOS 81]

Ce modèle détermine les composantes fluctuantes de la vitesse du fluide par tirage d'une variable aléatoire de distribution gaussienne de moyenne nulle et d'écart type proportionnel à l'énergie cinétique turbulente. Pour une turbulence isotrope, les fluctuations de vitesses sont identiques dans toutes les directions, on obtient donc la relation suivante pour l'expression de l'écart type :

$$\sigma_{ii} = \sqrt{\frac{2}{3}k} \quad (\text{III.99})$$

L'équation du mouvement de la particule est intégrée jusqu'à ce que la particule n'interagisse plus avec le tourbillon. Le temps d'intégration est déterminé comme le minimum entre la durée de vie du tourbillon, t_e , et le temps de résidence de la particule dans le tourbillon, t_r .

La durée de vie d'un tourbillon est fonction de l'énergie cinétique turbulente, k , et de la dissipation de l'énergie turbulente, ε :

$$t_e = \frac{L_e}{(2k/3)^{1/2}} \text{ et } L_e = C \frac{k^{2/3}}{\varepsilon} \quad (\text{III.100})$$

Avec C : constante évaluée à 0.46 par Chen et Crow [CHE 83], et

L_e : dimension caractéristique d'un tourbillon (m).

Le temps de résidence, durée mise par la particule pour traverser le tourbillon, est :

$$t_r = -\tau_p \times \ln \left(1 - \frac{L_e}{\tau_p |\vec{u} - \vec{u}_p|} \right) \text{ et } \tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (\text{III.101})$$

Avec τ_p : temps de relaxation de la particule (s),

\vec{u} , \vec{u}_p : vitesses instantanées du fluide et de la particule (m s^{-1}).

L'inconvénient majeur de ce modèle est que le champ de vitesse est supposé implicitement identique afin que le coefficient de corrélation des fluctuations de vitesses entre deux points du domaine soit unitaire. Le fait que, dans une turbulence stationnaire, homogène, isotrope et incompressible, l'échelle eulérienne transversale de longueur est la moitié de l'échelle longitudinale, n'est alors pas pris en compte. Malgré cela, ce modèle constitue la base de beaucoup d'autres modèles développés plus tard comme ceux de Durst et al. [DUR 84], Mostafa et Mongia [MOS 87].

III.2.4.2. Modèle de Lu et al. [LU 92]

Afin de résoudre le problème du modèle précédent, les auteurs construisent un processus aléatoire de calcul de la fluctuation de la vitesse en tenant compte des fonctions exponentielles d'autocorrélation et de corrélation spatiale proposées par Frenkiel [FRE 48].

Pour chaque pas de temps, la particule solide et un élément fluide sont suivis. La particule et l'élément fluide se trouvent au point S au moment t . Après la durée Δt , la particule arrive au point P et l'élément fluide en F (Figure III.48).

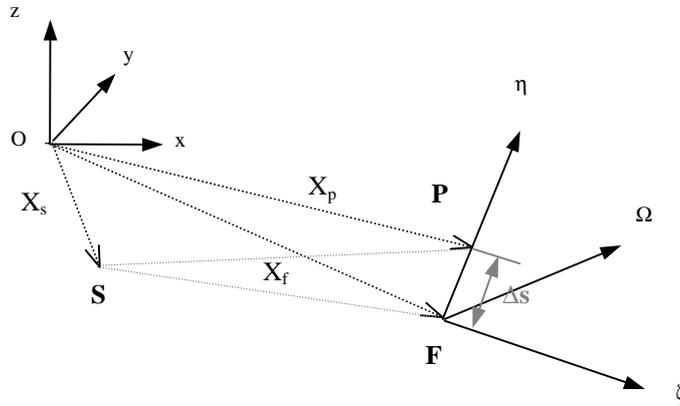


Figure III.48 : Positions de la particule solide et de l'élément fluide

L'expression de la vitesse fluctuante normalisée est :

$$W_i = \frac{u'_i}{\sqrt{u_i^2}} \quad (i=1,2,3) \quad (\text{III.102})$$

Les corrélations pour les vitesses fluctuantes normalisées aux points S , F et P peuvent s'exprimer par :

$$\overline{W_i(F)W_i(S)} = \overline{W_i(S)W_i(S)} \times f_{ii}(\Delta t) \quad (i=1,2,3) \quad (\text{III.103})$$

$$\overline{W_i(P)W_i(F)} = \overline{W_i(F)W_i(F)} \times g_{ii}(\Delta s) \quad (i=1,2,3) \quad (\text{III.104})$$

La combinaison linéaire liant la valeur d'une variable aléatoire à sa valeur précédente est inspirée de la théorie de Box et al. [BOX 76] :

$$W_i(F) = a_i \times W_i(S) + \alpha_i \quad (\text{III.105})$$

En l'appliquant à la corrélation spatiale :

$$W_i(P) = b_i \times W_i(F) + \beta_i \quad (\text{III.106})$$

Où α_i et β_i sont des variables aléatoires de distribution quelconque et de moyenne nulle, et a_i et b_i sont obtenues par :

$$a_i = f_{ii}(\Delta t) \quad (\text{III.107})$$

$$b_i = g_{ii}(\Delta s) \quad (\text{III.108})$$

En regroupant, les relations III.105 et III.106, on a :

$$W_i(P) = a_i b_i \times W_i(S) + \gamma_i \quad (\text{III.109})$$

Où $\gamma_i = b_i \alpha_i + \beta_i$ est une variable aléatoire gaussienne de moyenne nulle, ayant pour écart type : $(\sigma_\gamma)_i = \sqrt{1 - a_i^2 b_i^2}$.

Les fonctions de corrélations sont données par Frenkiel [FRE 48] :

$$f_{ii}(\Delta t) = \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_i}\right) \quad (\text{III.110})$$

$$g_{ii}(\Delta s) = \exp\left(-\frac{\Delta s}{2\Lambda_i}\right) \times \cos\left(\frac{\Delta s}{2\Lambda_i}\right) \quad (\text{III.111})$$

Avec - les valeurs des échelles intégrales temporelles lagrangiennes :

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0.235 \frac{\overline{u^2}}{\varepsilon} \quad \text{avec} \quad \overline{u^2} = \frac{2}{3} k \quad (\text{III.112})$$

- les valeurs des échelles de longueurs eulériennes :

$$\Lambda_1 = 2.5 \times \tau_1 \times \sqrt{\overline{u^2}} \quad \text{et} \quad \Lambda_2 = \Lambda_3 = 0.5 \times \Lambda_1 \quad (\text{III.113})$$

Les expressions de ces fonctions de corrélations sont uniquement valables dans le repère (F - $\zeta\eta\Omega$).

III.2.4.3. Conclusion

Les deux modèles précédents ont été introduits dans le code de calcul de dispersion particulaire en prenant en compte la troisième dimension de l'espace. Le code a été testé par la simulation numérique d'une expérimentation sur la dispersion des particules au sein d'un écoulement turbulent de grille.

III.3. ETUDE DE LA DISPERSION PARTICULAIRE DANS UN ECOULEMENT TURBULENT DE GRILLE

III.3.1. Motivations

Suite au passage du code particulaire de deux à trois dimensions, la validation de ce code s'est avérée nécessaire. Pour cela, l'étude d'un cas - type, celui de la dispersion des particules dans un écoulement turbulent isotherme homogène, a été effectuée. C'est le type d'écoulement que l'on obtient en aval d'une grille, il a été particulièrement étudié et des données expérimentales sont à disposition (Snyder et Lumley [SNY 72], Wells et Stock [WEL 83]). De plus, cette configuration a été simulée par Sandu [SAN 99] en configuration bidimensionnelle, une comparaison des résultats obtenus sera donc également effectuée.

III.3.2. Configuration géométrique

L'écoulement turbulent est généré à l'intérieur d'une gaine de section rectangulaire de dimensions $0.4064 \times 0.4064 \times 5.0$ m. La grille est formée de 16 barres à section carrée de 4.7×4.7 mm écartées de 25.4 mm entre leurs axes (Figure III.49). Ceci donne taux de vide (rapport de l'aire solide à l'aire totale) pour la grille de 0.34. La grille se situe à 0.2 m de l'entrée de la gaine. Les études expérimentales ont montré que l'utilisation de barres de section carrée produit un niveau de turbulence plus élevé que l'utilisation de barres circulaires [WEL 83]. A l'entrée de la gaine, l'air est injecté à une vitesse de 6.55 m/s perpendiculairement à l'ouverture.

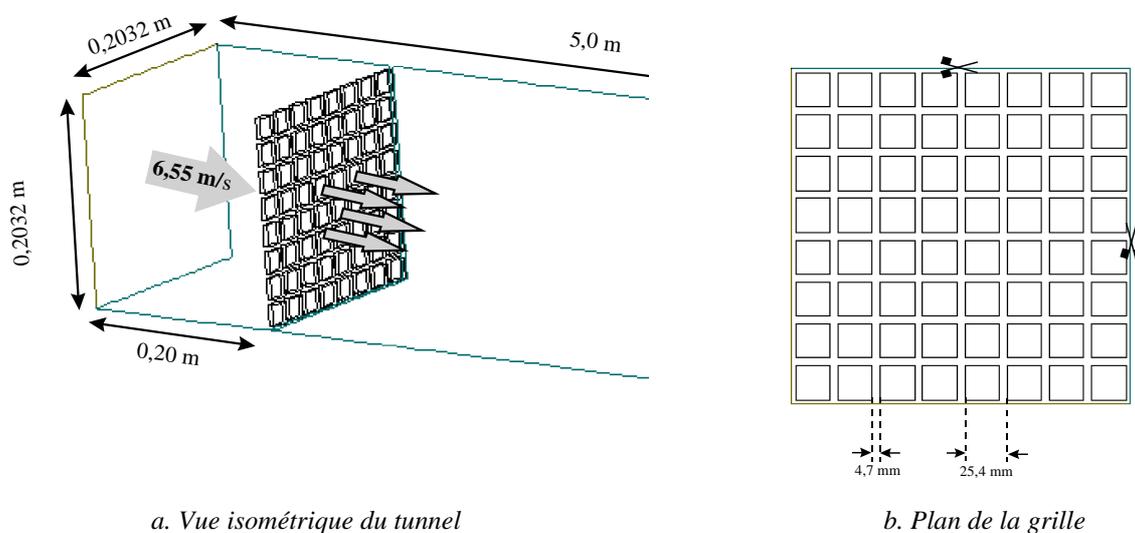


Figure III.49 : Configuration géométrique du cas test et dimensions de la grille

Les particules sont injectées au niveau de la ligne médiane de la gaine à une distance de 0.5 m en aval de la grille, avec une vitesse proche de la vitesse moyenne locale du fluide. Les caractéristiques des particules sont résumées dans le Tableau III.48.

	Verre Creux	Verre	Pollen de maïs	Cuivre
Diamètre (μm)	46.5	87.0	87.0	46.5
Densité (kg/m^3)	260	2500	1000	8900
Masse (μg)	0.01368	0.8620	0.3448	0.4685

Tableau III.26 : Caractéristiques des particules injectées

Pour la confrontation avec les résultats numériques, on s'intéressera à la dispersion latérale (suivant y et z) des particules, la figure III.50 présente les résultats obtenus par Snyder et Lumley [SNY 72] pour la dispersion suivant y.

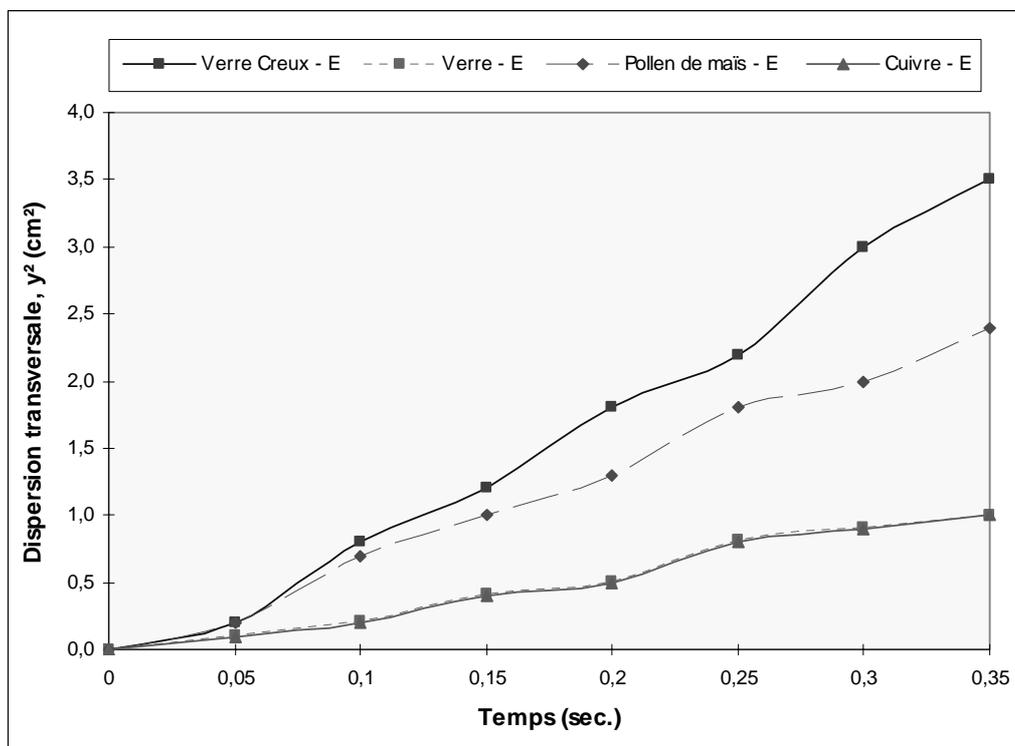
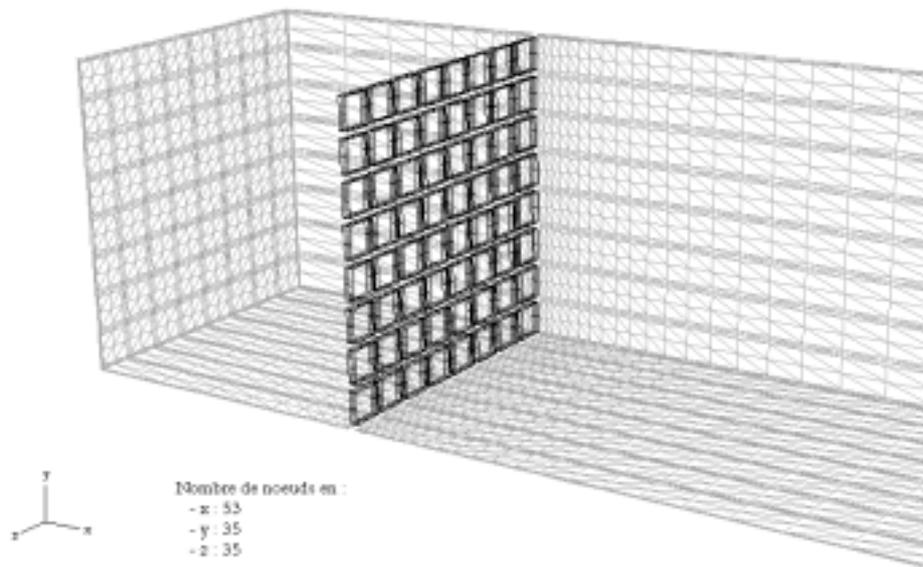


Figure III.50 : Dispersion des particules suivant y [SNY 72]

III.3.3. Détermination de l'écoulement fluide

III.3.3.1. Maillage du domaine fluide

La géométrie de l'écoulement fluide a été construite à l'aide du logiciel GAMBIT. Afin d'obtenir un maillage structuré consistant, la longueur de la gaine a été réduite à 3.0 m et uniquement un quart de la gaine a été représentée. Ceci est rendu possible grâce à l'utilisation de plans de symétrie. Le maillage se compose donc de 53 nœuds en x avec resserrement au niveau de la grille (10 en amont, 40 en aval, 3 dans la grille), 35 nœuds en y et en z (Figure III.51). Ce qui porte le nombre total de nœuds à 64925.



a. Vue isométrique

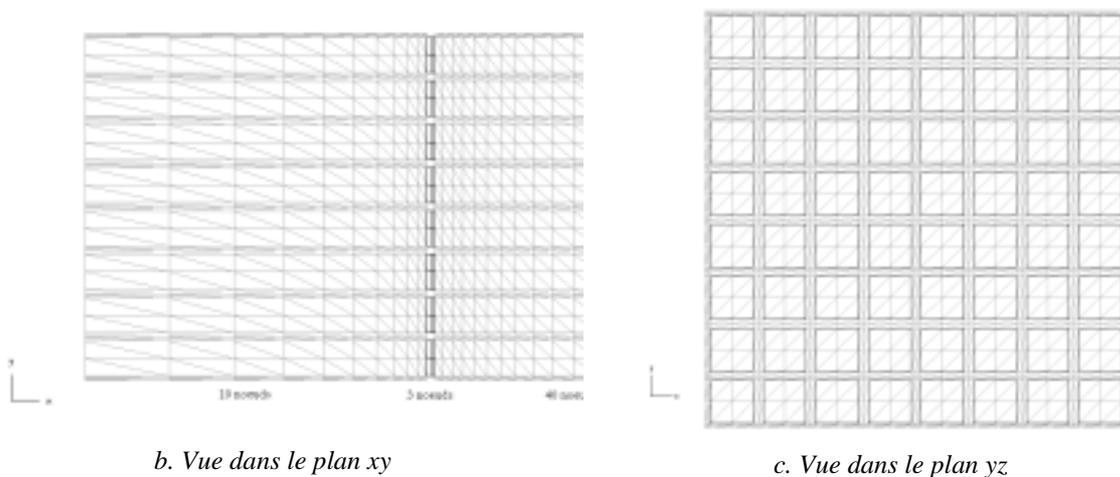


Figure III.51 : Maillage du cas test

III.3.3.2. Résolution des équations de Navier Stokes

La résolution de l'écoulement fluide a été obtenue à l'aide du code Fluent. Plusieurs modèles ont été utilisés pour la convergence du système. Le critère de convergence choisi implique que la somme des résidus normalisés dans chaque volume de contrôle et pour chaque variable (vitesses, pression et quantités turbulentes) doit être inférieure à 10^{-6} . Pour les conditions limites, la loi de paroi par défaut (logarithmique) a été utilisée. Afin d'obtenir la convergence la plus rapide possible, nous avons procédé selon les étapes suivantes :

- Nous obtenons la convergence de l'écoulement avec le modèle $k - \varepsilon$ standard.

- Nous remplaçons le modèle standard par le modèle RNG $k - \varepsilon$, la différence majeure entre ces deux modèles est l'universalité des constantes employées. Alors que dans le modèle $k - \varepsilon$ standard, les constantes ont été déterminées pour des cas types simples (écoulement le long d'une plaque plane...), les constantes du second modèle ont été évaluées à partir de considérations mathématiques. Le principal problème de ce dernier modèle est sa convergence qui nécessite souvent une sous relaxation du schéma numérique et un temps de calcul beaucoup plus long, c'est pourquoi nous sommes passés par une première étape de convergence avec le modèle standard.

- Après la convergence, nous passons du schéma numérique du premier ordre en espace (Upwind) à un schéma du second ordre en espace (Quick) et nous obtenons ainsi l'écoulement convergé final. Avec cette méthode de résolution et compte tenu du nombre de nœuds et de la précision désirée, les calculs ont duré environ une semaine de temps processeur.

La figure III.52 présente le champ moyen de vitesses d'air dans le plan xy au niveau d'une maille suivant z . On remarque la formation des cônes de vitesses classiques à une turbulence de grille, et la vitesse maximale atteinte entre deux barres est proche de 10 m s^{-1} . Le fait d'obtenir des *dards* identiques pour les différentes mailles, et même pour la maille supérieure qui est en contact direct avec le plan de symétrie, confirme la bonne convergence du système. De plus, on remarque également l'effet de couche limite au niveau de la paroi inférieure de la conduite.

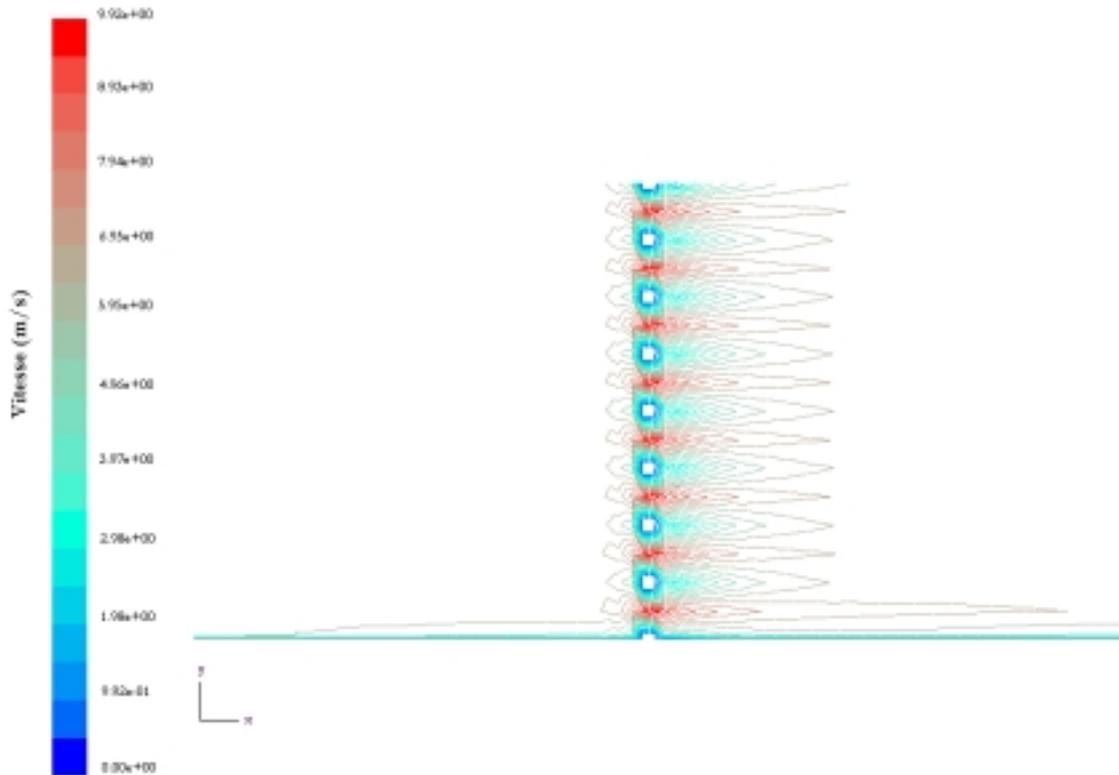


Figure III.52 : Ecoulement de l'air dans le plan xy en milieu de maille suivant z
(lignes d'isovaleurs du module de la vitesse)

III.3.3.3. Comparaison avec les mesures expérimentales

Plusieurs auteurs ont étudié l'écoulement d'air dans des configurations similaires à celle de l'expérimentation. Les relations obtenues par Wells et Stock [WEL 83] sont celles qui se rapprochent le plus des mesures de vitesses instantanées effectuées au moyen d'anémomètres à fil chaud à température constante.

Pour la présentation des résultats expérimentaux les auteurs représentent la distance le long de la gaine en termes de nombre de mailles de grille. Ils utilisent ainsi le rapport x/M où $M = 0.0254$ m est la dimension d'une maille de la grille et x est la distance mesurée à partir de l'origine virtuelle x_0 où l'on suppose le début de la décroissance de la turbulence avec une énergie infinie. La décroissance de la turbulence derrière la grille détermine l'existence de deux régions distinctes. La première est localisée pour une distance de 10 à 150 mailles derrière la grille, soit de 0.254 m à 3.81 m derrière la grille. La décroissance de la turbulence dans cette région est proportionnelle à $(x - x_0)^{-1}$. Ici x est la distance comptée à partir de la grille et x_0 est l'origine virtuelle de la turbulence. Une deuxième région, dénommée région finale est localisée pour une distance inférieure à 500 mailles derrière la grille. Pour cette région, la décroissance de la turbulence est proportionnelle à $(x - x_0)^{-5/4}$.

Pour notre étude, nous nous sommes intéressés à la première région de turbulence. Les résultats de Wells et Stock [WEL 83] peuvent être écrits sous la forme suivante, en prenant en compte l'isotropie de la turbulence :

$$k = \frac{3}{2} \times \frac{\bar{U}^2}{54.88 \times \left(\frac{x}{M} - 7.987 \right)} \quad (\text{III.114})$$

Avec \bar{U} : vitesse moyenne du fluide dans la direction x (m s^{-1}).

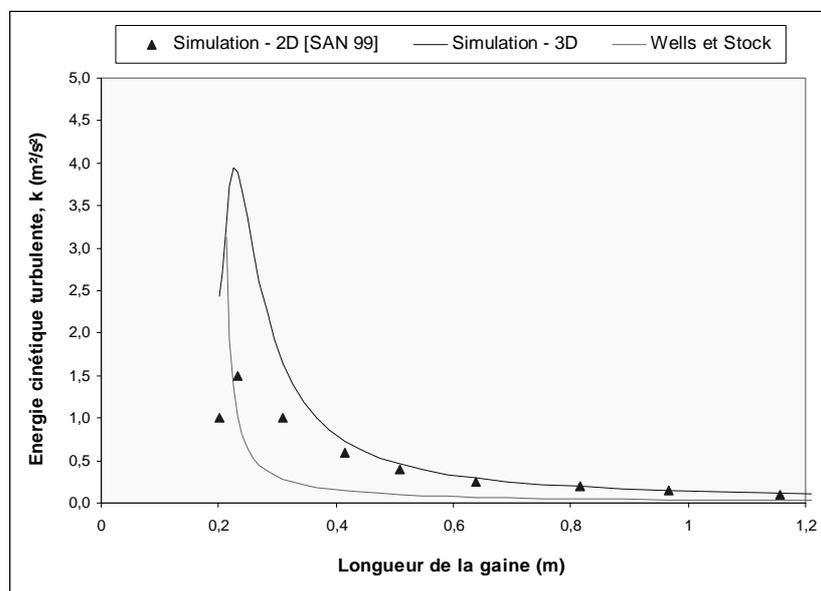


Figure III.53 : Comparaison des valeurs de l'énergie cinétique turbulente en milieu de maille suivant z

La figure III.53 présente les valeurs de l'énergie cinétique turbulente obtenues expérimentalement (équation III.114), et par calcul numérique en deux dimensions [SAN 99] et en trois dimensions. Sandu [SAN 99] constatait une surévaluation de l'énergie cinétique turbulente dans ses simulations en 2D par rapport aux données expérimentales, cette surévaluation se confirme et est amplifiée dans la région proche de la grille. Cependant, à partir de 20 cm après la grille, les deux simulations numériques donnent des niveaux semblables, toujours un peu supérieurs aux niveaux de l'expérimentation. Il est important de noter que les particules sont injectées à 50 cm en aval de la grille, on peut donc considérer que la simulation numérique donne des résultats acceptables pour la région d'étude de la diffusion particulaire.

III.3.4. Dispersion particulaire au sein de l'écoulement

III.3.4.1. Choix du modèle de génération de fluctuation de vitesse

Sandu [SAN 99], dans son étude des modèles de génération de fluctuations de vitesse, conclut que le modèle le plus adapté pour la simulation de la dispersion des particules est celui de Lu et al. [LU 92] car il est à la fois simple et il prend en compte les corrélations des fluctuations de vitesse. Au vu des résultats encourageants obtenus en 2D, nous avons donc développé le modèle en 3D. L'algorithme de calcul est le suivant (voir Figure III.48) :

- La position S et la vitesse initiale de la particule sont connues. La vitesse fluctuante du fluide à la position de la particule est obtenue par tirage en respectant une distribution gaussienne.
- La position F de la particule fluide à l'instant Δt est déterminée. Parallèlement, la position P de la particule solide à l'instant Δt est calculée par résolution de l'équation de mouvement. La distance Δs est alors déduite.
- Par application des fonctions de corrélations (dans le repère $F-\zeta\eta\Omega$), les valeurs des coefficients a_i et b_i sont déduits.
- Par un tirage aléatoire de la valeur de γ en respectant une distribution gaussienne de moyenne nulle et d'écart type unitaire, la vitesse fluctuante du fluide en P est calculée. En considérant le point P comme le point de départ S pour le pas suivant, on répète la procédure de calcul jusqu'à la fin.

La mise en pratique de cet algorithme est en fait beaucoup plus délicate qu'elle ne le paraît. En effet, le passage par un second repère est nécessaire pour calculer les fluctuations de vitesse car c'est dans ce repère que les corrélations existent. Reprenons le cas bidimensionnel : le changement de repère se fait de manière naturelle par une rotation du repère fixe d'un angle α déterminé par la position des points F et P (Figure III.54).

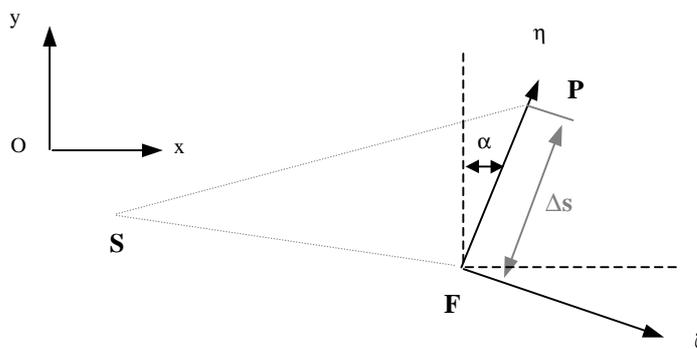


Figure III.54 : Positions de la particule solide et de l'élément fluide en 2D

Par contre, dans le cas tri-dimensionnel (Figure III.55), le changement de repère implique une rotation dans l'espace, soit trois angles à définir (angles d'Euler par exemple). Lu [LU 92] précise que l'axe principal (dans la direction de l'écoulement moyen) Ox est transformé en $F\eta$ et les deux autres axes ($F\zeta$ et $F\Omega$) sont *arbitraires*.

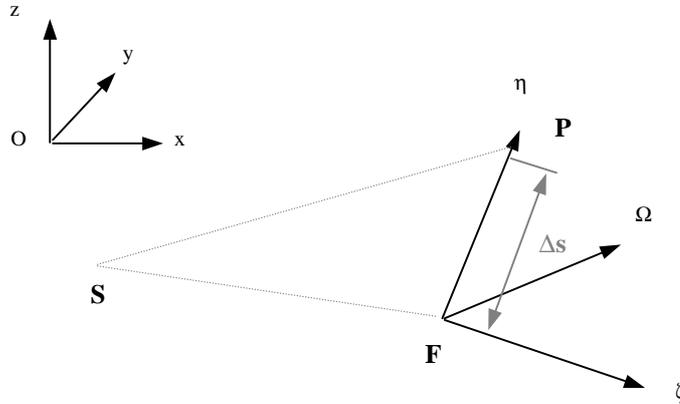


Figure III.55 : Positions de la particule solide et de l'élément fluide en 3D

Une fois ce modèle intégré au code numérique, la dispersion des particules a été calculée. Pour vérifier le bon fonctionnement du code, nous n'avons pas pris en compte la gravité, ainsi, les dispersions suivant y et z doivent être les mêmes puisque le champ d'écoulement fluide est parfaitement symétrique. Or, il s'est avéré que les dispersions transversales n'étaient pas égales (exemple en Figure III.56).

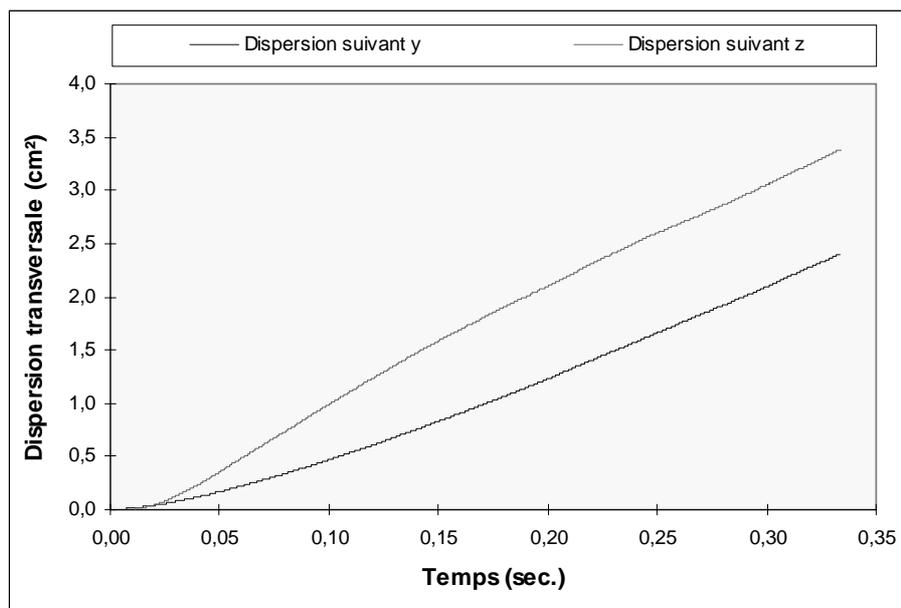


Figure III.56 : Dispersion transversales pour une particule de verre creux (5000 particules tirées)

Plusieurs modifications et forçages comme l'égalisation des fluctuations latérales dans le second repère, le changement du générateur de nombres aléatoires, l'augmentation du nombre de particules tirées..., ont été effectués, mais aucune de ces études n'a permis de mettre en évidence le problème de l'utilisation de ce modèle dans notre code. Pour le moment, nous ne pouvons que donner des pistes à développer : le fait d'utiliser par exemple les mêmes échelles de longueur pour les deux directions latérales dans le second repère (équation III.113) pourrait engendrer des fluctuations non symétriques. De plus, il existe peu d'études comparatives entre ces résultats expérimentaux et ceux obtenus par ce modèle. Lu [LU 92] ne compare en fait que les dispersions obtenues suivant y , il suppose en effet que celles suivant z sont identiques mais aucune vérification sur ce point n'apparaît dans son étude.

Devant l'impossibilité de faire fonctionner ce modèle de génération de fluctuations de vitesse et compte tenu du but fixé à notre étude (intégration d'une loi de paroi caractérisant l'interaction revêtement du bâtiment – particule), nous l'avons abandonné pour un modèle plus basique, celui de Gosman et Ioannides [GOS 81].

III.3.4.2. Modification du modèle de Gosman et Ioannides [GOS 81]

Le calcul des fluctuations s'effectue suivant la procédure suivante :

- Détermination de l'écart type en fonction de l'énergie cinétique turbulente (équation III.99).
- Tirage d'un nombre aléatoire de distribution gaussienne de moyenne nulle et d'écart type unitaire.
- Calcul de la fluctuation comme le produit des deux valeurs précédentes.

Les fluctuations ainsi générées sont statistiquement identiques pour un grand nombre de particules tirées (5000) selon les trois directions de l'espace, ainsi la dispersion des particules est la même suivant y et z (exemple en Figure III.57), à l'exception de la zone finale (temps supérieur à 0.2 sec.) où on note une petite différence. Cette différence est due essentiellement au maillage utilisé lors du calcul numérique de l'écoulement fluide (voir fin de ce chapitre).

Cependant les valeurs des dispersions se sont avérées inférieures à celles mesurées expérimentalement pour chacune des particules mais pas dans les mêmes proportions. Afin de répondre à ce problème, nous avons multiplié la fluctuation précédemment calculée par un coefficient, K_{GI} , à déterminer pour chaque type de particule.

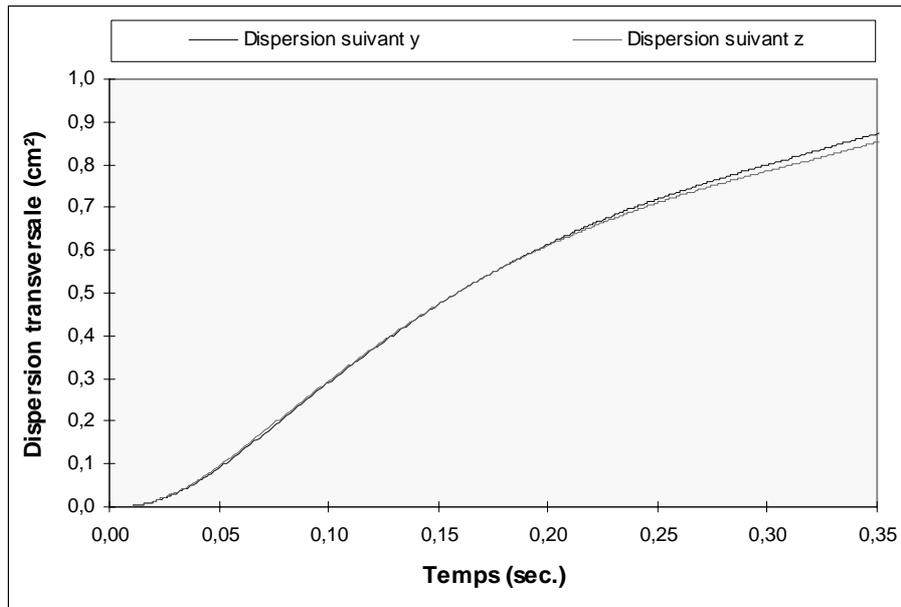


Figure III.57 : Dispersions transversales pour une particule de verre creux (5000 particules tirées)

La détermination du coefficient multiplicateur est simple mais longue à effectuer car elle requiert plusieurs simulations de 5000 particules (pour avoir une bonne source statistique), pour chaque type de particule. Le tableau III.27 montre les résultats pour la particule de verre. Pour chaque donnée expérimentale, le coefficient optimal est calculé puis la moyenne de ces coefficients est effectuée, le tableau III.28 présente les valeurs des coefficients multiplicateurs pour chaque particule.

Une remarque importante découle de ces résultats, comme le faisait remarquer Sandu [SAN 99] : la dispersion des particules est fortement liée à la constante de temps de la particule. Ainsi, les particules ayant une constante de temps plus faible dispersent plus, celles ayant la même constante de temps dispersent de manière identique. Ce fait découle directement de la structure du code et non de la génération de fluctuations de vitesse de Gosman et Ioannides [GOS 81] car les fluctuations sont identiques quelles que soient les particules, et, de plus, Sandu [SAN 99] utilisait un autre modèle de génération. Par contre, en ajoutant un coefficient multiplicateur, on prend en compte, d'une certaine manière, l'effet de la particule sur l'écoulement fluide. Plus la particule a une constante de temps faible (verre creux), plus l'effet de la turbulence du fluide sera importante pour la particule, ce qui peut se traduire par une augmentation de la fluctuation (d'un coefficient 3.9).

Temps (sec.)	Expérimentation	$K_{GI} = 1.0$	$K_{GI} = 2.0$	$K_{GI} = 2.5$	$K_{GI} = 3.0$
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.05	0.11	0.01	0.05	0.08	0.12
0.10	0.21	0.04	0.17	0.26	0.39
0.15	0.41	0.07	0.27	0.40	0.63
0.20	0.51	0.09	0.34	0.51	0.84
0.25	0.82	0.11	0.40	0.61	1.01
0.30	0.91	0.12	0.48	0.91	0.91

Tableau III.27 : Dispersion latérale d’une particule de verre en fonction du coefficient multiplicateur K_{GI}

Type de particule	Constante de temps (ms)	K_{GI}
Verre Creux	1.7	3.9
Verre	58.1	2.6
Pollen de maïs	23.2	3.4
Cuivre	59.1	2.6

Tableau III.28 : Valeurs du coefficient multiplicateur K_{GI} pour chaque particule

Afin d’étendre ce principe à toute autre particule, il serait nécessaire de posséder des valeurs de dispersions pour un nombre plus important de particules donc d’autres données expérimentales. Néanmoins, en utilisant les valeurs calculées, on peut déterminer une loi d’évolution du coefficient en fonction de la constante de temps de la particule par une étude de régression linéaire (coefficient de corrélation de 0.98):

$$K_{GI}(\tau) = 4 \times (1 - 4 \times \tau) \quad (\text{III.115})$$

Avec τ : constante de temps de la particule (sec.).

Cette expression a été incluse dans le code numérique, et les simulations pour chaque particule ont été reconduites. La figure III.58 présente les dispersions transversales numériques obtenues en 2D et 3D. On remarque que les dispersions sont assez proches, les

mêmes tendances ressortent : plus la constante de temps des particules est petite, plus la dispersion de ces particules est forte. Cependant, il faut noter une différence non négligeable dans la dernière partie des courbes (après 0.2 sec.).

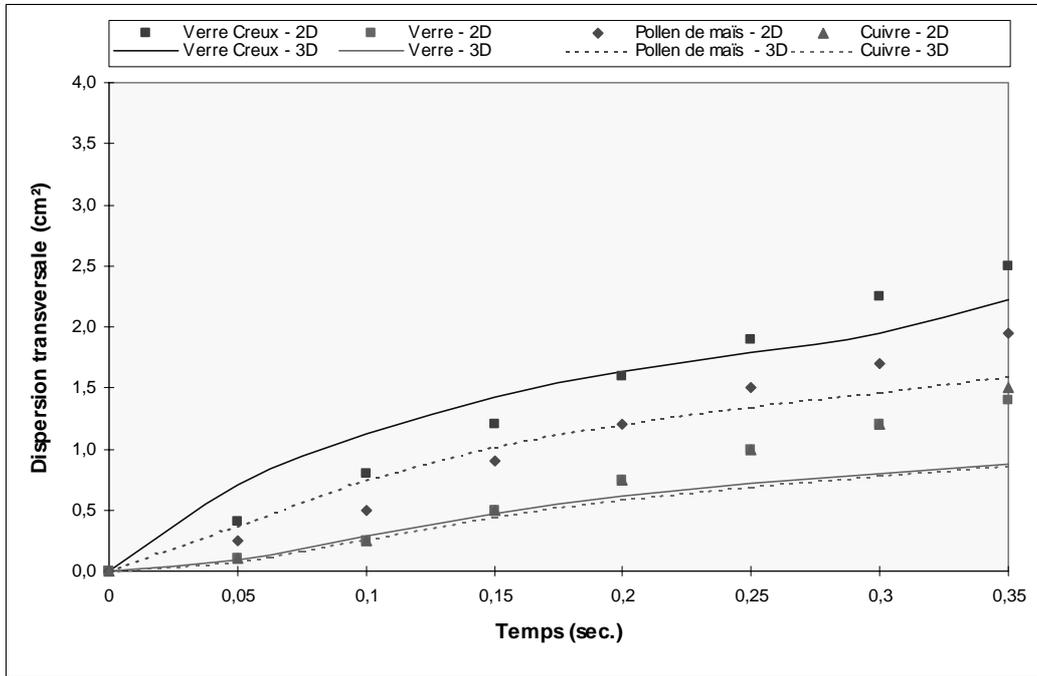


Figure III.58 : Dispersions transversales numériques (2D et 3D)
(5000 particules tirées)

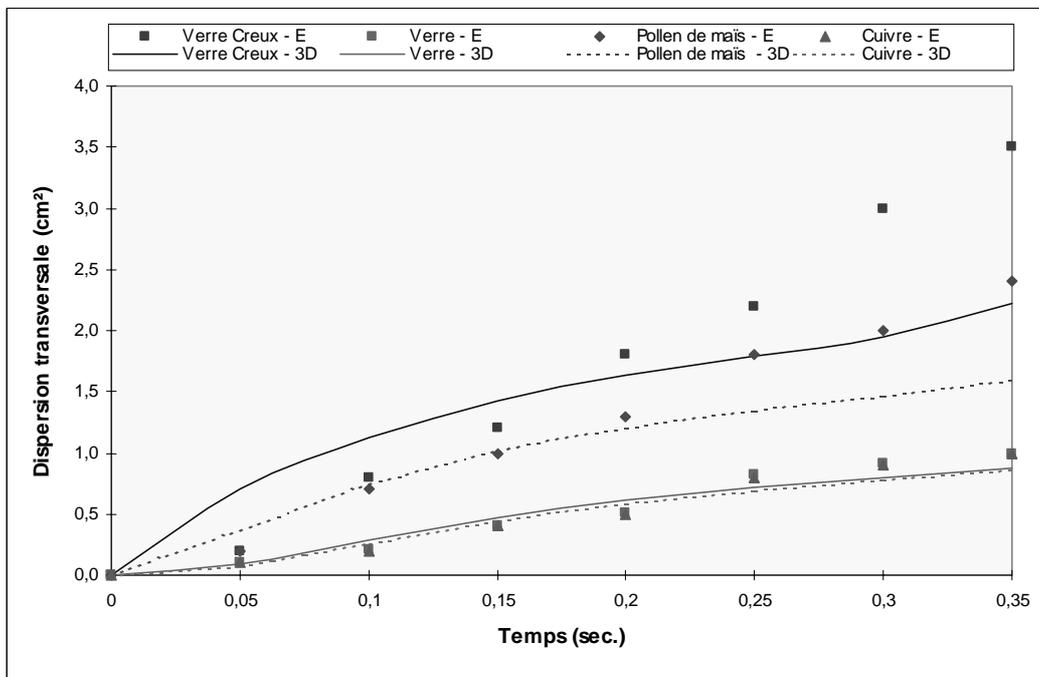


Figure III.59 : Dispersions transversales expérimentales et numériques 3D
(5000 particules tirées)

La figure III.59 confronte les résultats expérimentaux aux résultats numériques 3D. Ici encore, les tendances sont bonnes, la simulation sur les particules de verre et de cuivre (grande constante de temps) donne même de très bons résultats. Par contre, pour les deux autres types de particule, les résultats sont moins précis, encore une fois essentiellement dans la seconde partie des courbes. Ce problème provient probablement de l'écoulement fluide. En effet, cette zone (temps compris entre 0.2 et 0.35 sec.) correspond en moyenne à la portion finale de la gaine, c'est-à-dire pour x variant de 2.0 à 3.0 m. Or, dans cette zone, seuls cinq points ont été utilisés pour la modélisation (le maximum de points de maillage se situant dans la zone de la grille de 0 à 1.5 m.). Ce qui induit une mauvaise évaluation et surtout une atténuation du caractère turbulent de la zone, donc une dispersion moins forte pour les particules.

Une autre hypothèse vraisemblable est la propagation de l'erreur initiale de l'écoulement fluide. En effet, lorsqu'on compare l'écoulement fluide numérique à l'écoulement fluide expérimental, on s'aperçoit qu'il existe une différence notable. Cette erreur est inhérente au modèle de résolution et Sandu [SAN 99] a montré qu'on ne pouvait pas l'annuler (même par l'utilisation de maillage non structuré). Cette différence entre l'écoulement fluide numérique et l'écoulement fluide expérimentale se traduit au niveau de l'écoulement particulaire par de petites erreurs qui, s'accumulant au fur et à mesure que la particule se déplace, peuvent faire apparaître des écarts importants entre les résultats numériques et expérimentaux.

III.3.5. Conclusion

Le chapitre III.3. résume le passage du code de dispersion particulaire mis au point par Sandu [SAN 99] de deux à trois dimensions. Si, pour la majeure partie du code, ce passage n'a pas posé de problèmes réels, il n'en a pas été de même pour la partie concernant la génération des fluctuations de vitesse. Après avoir tenté vainement d'appliquer le modèle de Lu [LU 92], nous avons développé le modèle de Gosman et Ioannides [GOS 81] en ajoutant un coefficient multiplicateur de ces fluctuations afin de mieux simuler les dispersions de particules au sein d'un écoulement de turbulence de grille. Dans leur globalité, les résultats paraissent encourageants. Le chapitre suivant est consacré à la prise en compte de l'interaction revêtement – particule.

III.4. ETUDE NUMERIQUE DU DEPOT SUR LES REVETEMENTS DU BATIMENT

III.4.1. Introduction

Sandu [SAN 99], en mettant au point son code 2D, pris tout d'abord comme hypothèse qu'une particule heurtant une paroi restait obligatoirement collée. Les simulations effectuées en reproduisant l'expérimentation décrite dans le chapitre II montrèrent rapidement la fausseté de cette hypothèse. En effet, le temps de résidence des particules dans l'air calculé apparaissait très inférieur aux différentes mesures. Ainsi il fallait une trentaine de secondes pour que toutes les particules soient collées aux parois alors que les expérimentations montrent que plus d'une dizaine de minutes sont nécessaires. De plus, les lieux de dépôt numériques étaient localisés essentiellement sur la paroi supérieure et très faiblement sur la paroi inférieure ce qui, compte tenu des tailles de particules étudiées (5.0 et 10 μm), paraît suspect. C'est pourquoi il est nécessaire de prendre en compte le rebond des particules sur les parois. L'auteur avait initié une étude du dépôt en prenant en compte ce rebond mais, faute de données expérimentales, la quantification de l'interaction paroi – particule n'a pu être menée jusqu'à son terme. Le but de ce chapitre est de reproduire, grâce au code numérique 3D décrit précédemment, l'expérimentation sur maquette du second chapitre afin d'étudier plus avant le dépôt sur les revêtements des bâtiments.

III.4.2. Détermination de l'écoulement fluide

III.4.2.1. Maillage du domaine

Comme pour le cas précédent, la géométrie de l'écoulement fluide a été construite à l'aide du logiciel GAMBIT. L'enceinte est quasiment cubique ($0.6 \times 0.6 \times 0.63$ m.) avec l'hélice de l'agitateur dans l'axe central z (Figure III.60). Le maillage utilisé étant un maillage structuré (le seul exploitable pour le moment par le code de dispersion particulaire), les pales de l'hélice ont été modélisées à partir de carrés de 0.5 cm de côté afin d'obtenir un disque de 14 cm de diamètre z (Figure III.61) et 2.0 cm de hauteur.

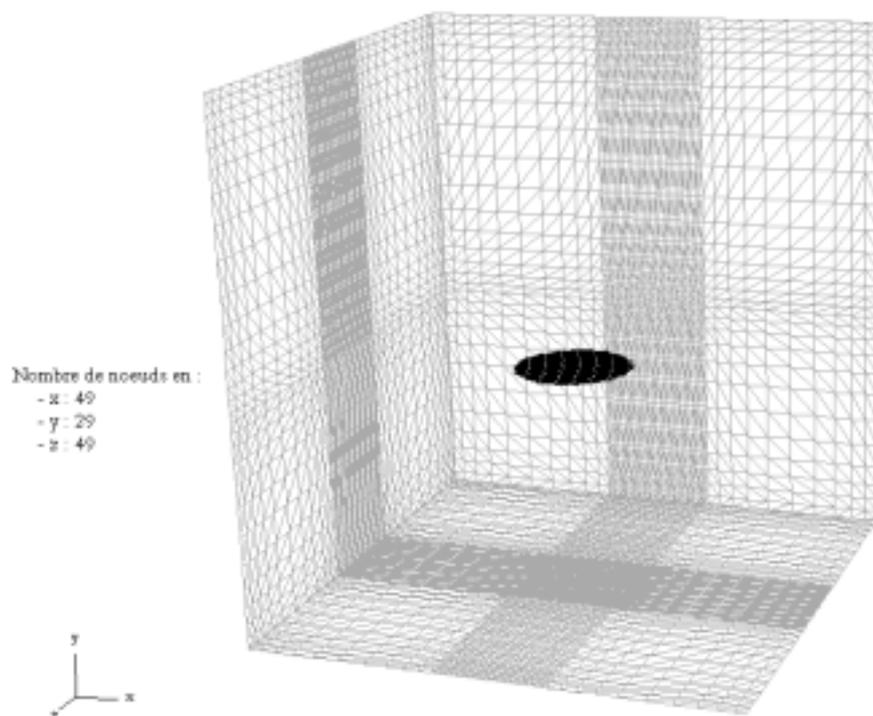


Figure III.60 : Vue isométrique du maillage de l'enceinte d'étude

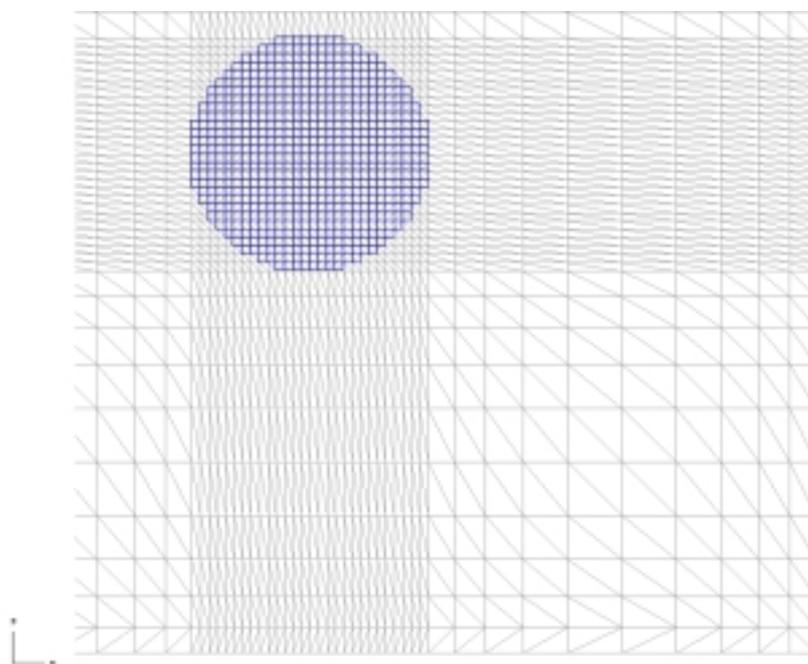


Figure III.61 : Vue dans le plan xz du maillage structuré

Le maillage au centre du volume est donc très dense, 784 nœuds pour 196 cm^2 , et la répartition des nœuds dans les régions extérieures au centre est choisie de telle sorte que la densité de points dans le plan xz augmente à proximité des parois. Le même type de répartition est utilisé suivant y . Le nombre total de nœuds pour l'enceinte d'étude est porté à 69629.

III.4.2.2. Résolution des équations de Navier Stokes

La résolution numérique s'effectue de la même manière que pour la turbulence de grille (paragraphe

III.3.3.2). La difficulté majeure dans ce cas est la détermination du modèle à appliquer pour la modélisation de l'hélice. Nous avons utilisé la condition limite *ventilateur* qui permet de déterminer la quantité d'air qui passe à travers la région désignée comme telle, sans pour autant prédire l'écoulement à l'intérieur de cette zone. Deux paramètres sont à fournir : le gradient de pression à imposer entre les faces d'entrée et de sortie qui détermine le débit, donc les vitesses aux abords de la zone, et la vitesse tangentielle qui contrôle l'effet de tourbillons (tornado) qui existe en trois dimensions.

Dans le but de déterminer ces deux paramètres, des mesures de vitesses ont été effectuées à l'aide d'anémomètres à fil chaud en 13 points dans le plan médian de l'enceinte (Figure III.62). Plusieurs simulations ont été effectuées en faisant d'abord varier le gradient de pression pour obtenir un champ de vitesses moyennes globalement proche des mesures expérimentales puis en imposant différentes vitesses tangentielles afin d'ajuster au mieux l'intensité de ces vitesses en chacun des points de contrôle. La figure III.62 présente l'écoulement numérique dans le plan médian (à $z = 0.3 \text{ m}$.) et les 13 points de mesures anémométriques. On remarque que, si les vitesses sont élevées au centre de l'enceinte (proches de 4.0 m s^{-1}), les vitesses aux abords des parois restent faibles et sont inférieures à 0.8 m s^{-1} à 5.0 cm des parois. Ce fait conforte le raisonnement entrepris dans le second chapitre pour la détermination du coefficient de captation, raisonnement selon lequel les vitesses à proximité des parois sont si faibles que, d'un point de vue aérodynamique, ces parois peuvent être considérées lisses. La totalité de l'écoulement d'air à l'intérieur de l'enceinte est représentée par la figure III.63. Outre la région centrale de fortes vitesses, il est important de constater la présence d'une zone de très faibles vitesses (visible également sur la première figure) en dessous de l'hélice.

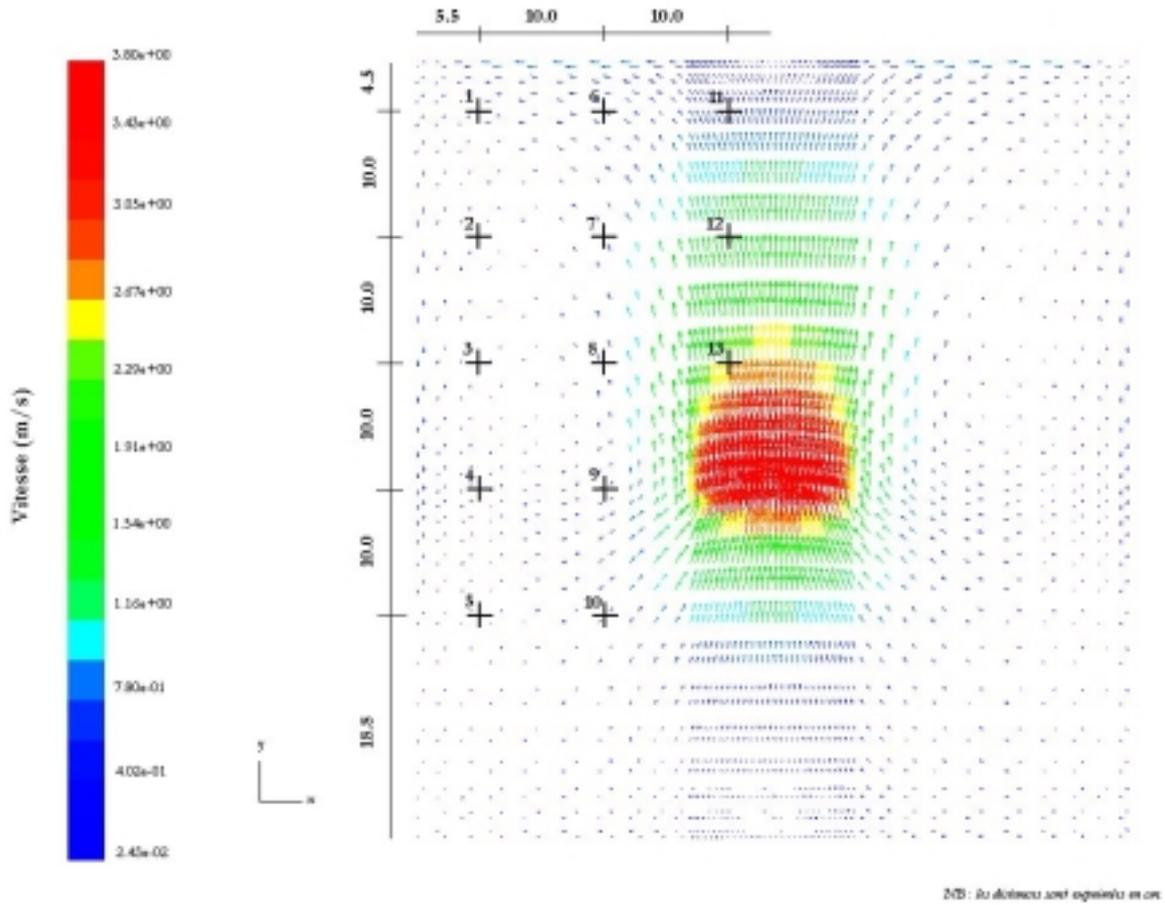


Figure III.62 : Ecoulement de l'air dans le plan médian et points de mesure expérimentaux

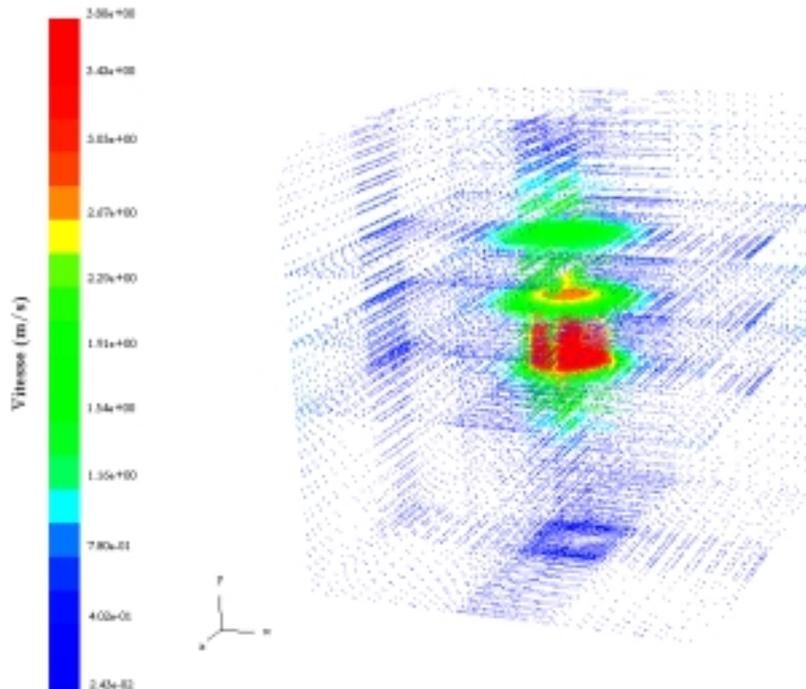


Figure III.63 : Vue isométrique de l'écoulement à l'intérieur de l'enceinte

III.4.2.3. Comparaison avec les mesures expérimentales

Ces mesures ont permis de quantifier deux quantités à comparer avec les résultats numériques : la vitesse moyenne et l'intensité turbulente (rapport de la racine carrée de la fluctuation de vitesse et de la vitesse moyenne de l'écoulement). La figure III.64 présente ces résultats. Comme précisé dans le chapitre précédent, les valeurs de la vitesse moyenne en chacun des 13 points ont servi pour le calage des caractéristiques des conditions limites au niveau des pales de l'agitateur, ainsi, les valeurs numériques sont très proches des valeurs mesurées. Pour les intensités turbulentes, on remarque une surestimation des quantités calculées par rapport aux mesures. Cette surévaluation des valeurs turbulentes est due aux modèles $k - \varepsilon$ (RNG et standard). Chen [CHE 95], dans sa comparaison des différents modèles $k - \varepsilon$, montre que dans le cas d'un jet libre rencontrant perpendiculairement une surface (impinging jet), les intensités turbulentes obtenues sont très supérieures (jusqu'à un facteur 2.5) aux données expérimentales. Le modèle donnant les meilleurs résultats étant le modèle RNG, utilisé dans notre étude. Cette surévaluation de l'intensité turbulente implique une surestimation de l'énergie cinétique turbulente, k , puisqu'elle est proportionnelle à la fluctuation de vitesse. On se retrouve donc dans un cas similaire à l'étude en turbulence de grille, de ce fait, les modifications apportées au modèle de génération de fluctuations de vitesse vont dans le même sens. On peut donc supposer que les résultats obtenus seront cohérents.

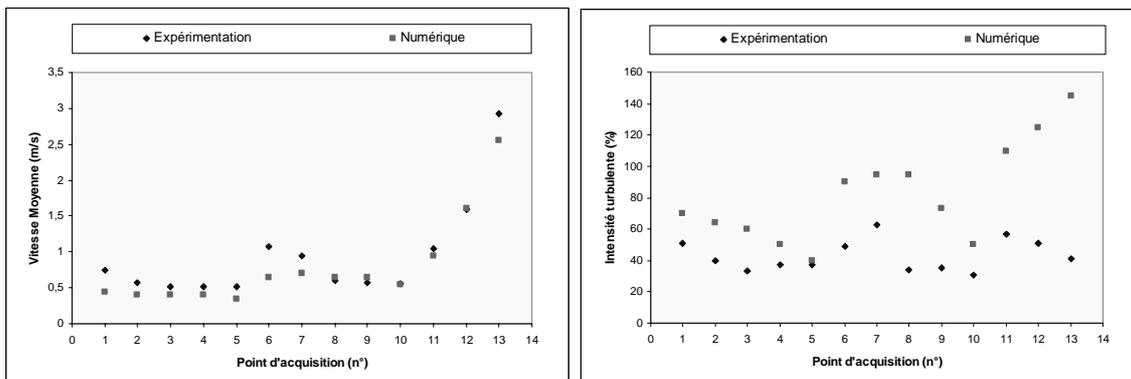


Figure III.64 : Vitesses moyennes et intensités turbulentes aux points de mesure

III.4.3. Loi de paroi n°1 : probabilité de dépôt

III.4.3.1. Principe

L'interaction entre une particule et une paroi est complexe car elle dépend de nombreux paramètres. Ainsi, lorsqu'une particule s'approche d'une paroi, soit elle va se déposer, soit elle va ricocher. Ceci dépend de la force d'adhérence qui agit entre la particule et la paroi.

Cette force d'adhérence est la résultante des forces élémentaires (force Van der Waals, force électrostatique, force de tension superficielle) qui tient compte des caractéristiques des matériaux et de la forme géométrique de la particule et de la paroi, de l'humidité du milieu, etc.

Il est donc délicat de modéliser correctement cette interaction car il est très difficile de caractériser l'ensemble de ces paramètres. C'est face à ce constat que Sandu [SAN 99] a caractérisé le phénomène de dépôt d'une manière globale, en introduisant un pourcentage de dépôt ; c'est à dire en considérant que sur N particules qui touchent la paroi, seulement $P_d \times N$ restent collées et les autres reviennent dans l'écoulement. Pour cela, une variable aléatoire uniforme sur $[0,1]$ est tirée pour chaque collision d'une particule avec la paroi. En fonction de la valeur prise par cette variable, la particule est considérée comme collée à la paroi ou ricochée. Si la particule ricoche, on considère un rebond élastique parfait, sans perte d'énergie lors du contact avec la paroi, et la particule est réinjectée symétriquement avec la même vitesse.

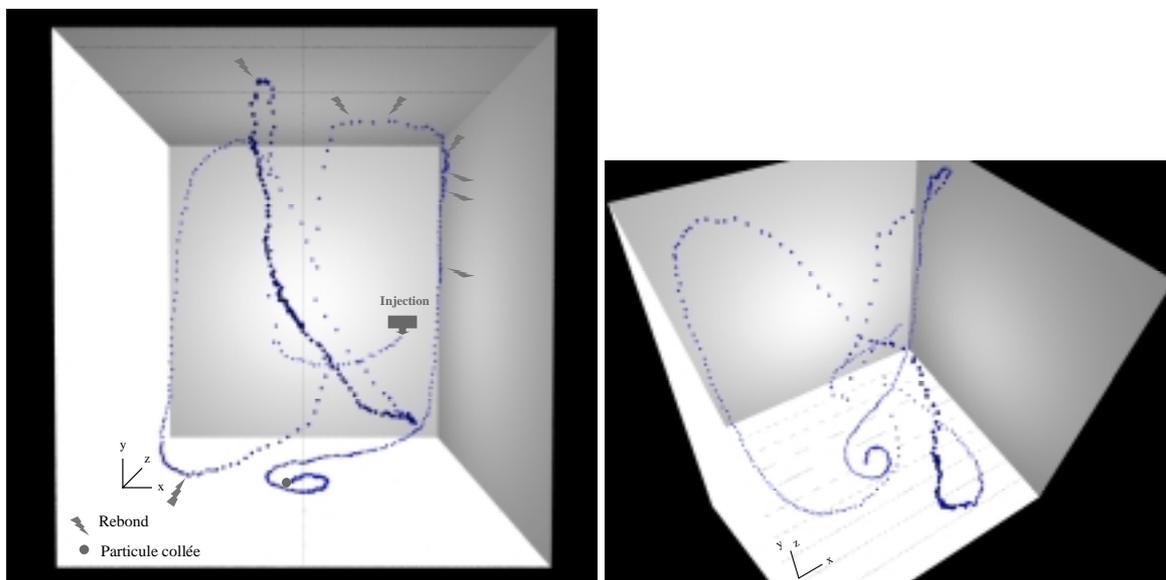
Cette probabilité est une manière de caractériser l'interaction entre un type de particule et un revêtement. L'objet des simulations est de déterminer la valeur de cette probabilité pour un type de particule et différents revêtements de parois. Pour cela, la dispersion des particules au sein de l'enceinte va être étudiée pour différentes valeurs de probabilité. La comparaison des valeurs des constantes globales de dépôt mesurées lors de l'expérimentation sur maquette et des valeurs de ces constantes de dépôt calculées numériquement permettront de quantifier cette probabilité pour un couple revêtement – particule donné.

III.4.3.2. Simulations

Les simulations présentées dans ce chapitre visent à reproduire au mieux les conditions de l'expérimentation sur maquette. Pour cela, nous avons calculé les trajectoires des particules de $5.0 \mu\text{m}$ de diamètre, de densité 2000 kg/m^3 (soit une constante de temps proche de 0.2 ms). Ces particules correspondent à celles utilisées lors de la première étude expérimentale (poudre d'Orgasol). Le point d'injection de chaque particule est déterminé aléatoirement dans toute la zone d'étude afin de reproduire les conditions expérimentales. En effet, l'hypothèse de base des mesures est que la concentration en particules à l'intérieur du volume est homogène, par conséquent, il est préférable de considérer plusieurs points d'injection dans le volume, plutôt que de ne prendre en compte qu'un seul point d'injection initial des particules. La vitesse imposée aux particules est alors considérée comme égale à celle du fluide. Toutes les forces citées précédemment sont prises en compte.

III.4.3.3. Résultats

La figure III.65 présente la trajectoire d'une particule à l'intérieur de l'enceinte (pour une probabilité de dépôt fixée à 0.001). Les points correspondent aux positions successives de la particule, le pas de temps de représentation a été choisi pour obtenir 1000 points, ce qui correspond pour cette particule à 1 point toutes les 0.2 secondes. La particule est injectée à mi-hauteur de l'enceinte, elle tombe sous l'effet de la gravité et de l'écoulement, puis elle est « aspirée » par le fort gradient de pression exercé par la présence de l'hélice, ce qui la propulse jusqu'à la paroi supérieure où elle rebondit plusieurs fois avant de retomber et ricocher sur la paroi latérale de devant. Elle recommence ce cycle jusqu'à ce qu'elle soit piégée dans la zone de faible vitesse située en partie inférieure de l'hélice où, essentiellement sous l'effet de la gravité, elle va se déposer sur le sol.



a. Perspective dans le plan xy

b. Vue isométrique

Figure III.65 : Trajectoire d'une particule à l'intérieur de l'enceinte

Les temps de calcul pour les simulations sont élevés. Plus la probabilité de dépôt est faible, plus la particule reste dans l'écoulement donc plus le temps de calcul est grand. Ainsi, pour une probabilité unitaire (la particule reste collée à la première paroi rencontrée), le temps de calcul sur un PC Pentium II 400 MgH est proche d'une seconde par particule. Mais pour la probabilité de 0.0001, ce temps est égal à une demi-heure par particule. Sandu [SAN 99] montre qu'à partir de 1000 particules les courbes de dispersion (pour la dispersion en turbulence de grille) sont identiques, Snyder et Lumley [SNY 71], quand à eux, estiment qu'un nombre de 700 particules est suffisant. Compte tenu de ces remarques, toutes les simulations

ont été effectuées pour un nombre minimal de 1000 particules, excepté pour la probabilité la plus faible où 500 particules ont été lancées.

Probabilité de dépôt	1.0	0.1	0.01	0.001	0.0001
Constante de dépôt (h^{-1})	251	225	167	51	10
Temps de résidence moyen (sec)	14	15	26	86	278
Temps de résidence max. (sec)	95	107	231	300	600
Nombre de particules tirées	5000	2500	1500	1000	500

Tableau III.29 : Résultats des simulations numériques

Le tableau III.29 présente l'évolution de la constante de dépôt en fonction de la probabilité de dépôt. Les constantes de dépôt obtenues pour les premières valeurs de probabilité sont énormes et montrent l'importance de la prise en compte du rebond lors des simulations numériques. Ainsi, pour obtenir des valeurs réalistes, il est nécessaire de diminuer la probabilité jusqu'à la valeur de 0.0001. Par conséquent, une particule ricochera en moyenne 10 000 fois avant de se coller à une paroi. Les valeurs des temps de résidence des particules à l'intérieur de l'enceinte renforce le fait qu'il est nécessaire de prendre en compte le rebond afin d'obtenir des temps de résidence du même ordre que ceux obtenus expérimentaux, qui se situent autour de 300 secondes pour le papier peint et 180 secondes pour la moquette.

Une analyse de régression linéaire à partir de ces résultats a permis de déterminer une loi d'évolution de la constante de dépôt en fonction de la probabilité de dépôt, de la forme (coefficient de corrélation de 0.98) :

$$\lambda_d(P_d) = \frac{a + b \times P_d}{1 + c \times P_d + d \times P_d^2} \quad (\text{III.116})$$

Avec λ_d : constante de dépôt (h^{-1}),

P_d : probabilité de dépôt,

a, b, c et d : constantes ($a = 2, b = 60361, c = 260$ et $d = -7$).

La courbe de régression est présentée par la figure III.66 pour les valeurs de probabilité de dépôt qui correspondent aux niveaux de constantes de dépôt obtenues expérimentalement. On

remarque que les valeurs expérimentales obtenues sur maquette pour les cinq types de revêtements sont correctement modélisées par cette loi. On en déduit les valeurs de probabilité de dépôt pour les revêtements testés (tableau III.30).

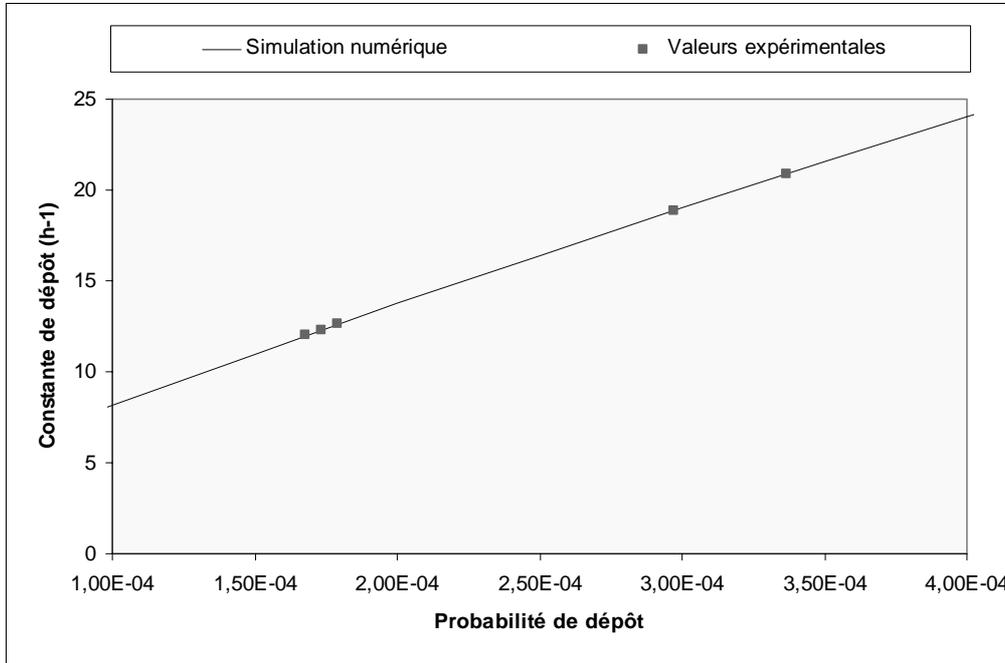


Figure III.66 : Courbe de régression obtenue par simulation numérique

Revêtement	Linoléum	Papier peint lisse	Papier peint avec relief	Verre	Moquette
Probabilité (10^{-4})	1.68	1.74	1.79	2.97	3.37

Tableau III.30 : Probabilité de dépôt caractérisant l’interaction revêtement – particule de 5.0 μm

Pour la caractérisation de nos revêtements, on remarque que la probabilité varie sur une plage de 1.5 à 4.0 10^{-4} . Sur cette plage, on peut linéariser la loi précédente :

$$\lambda_d(P_d) = a + b \times P_d \quad (\text{III.117})$$

Avec λ_d : constante de dépôt (h^{-1}),

P_d : probabilité de dépôt,

a et b : constantes ($a = 3$ et $b = 52729$).

A partir de cette loi, valable pour ce type de particule, on peut déterminer la valeur de la probabilité de dépôt à appliquer à un revêtement par la simple mesure expérimentale de la constante de dépôt dans l'enceinte (toutes les parois étant recouvertes du revêtement étudié).

III.4.3.4. Dépôt à l'intérieur de l'enceinte

L'avantage de la simulation numérique par rapport au modèle global réside dans le fait que chaque particule peut être suivie lors de son déplacement. On peut donc avoir accès aux lieux de dépôt des particules sur les parois. Le tableau III.31 présente les niveaux de dépôt sur les différentes parois de l'enceinte obtenus pour les différentes valeurs de probabilité de dépôt. On remarque que, quelle que soit la probabilité, les niveaux de dépôt sur les parois verticales sont équivalents. Comme l'écoulement fluide est parfaitement symétrique et que les particules sont injectées aléatoirement dans le volume, ceci implique que le nombre de particules lancées au cours de ces simulations est suffisant pour assurer des résultats statistiques cohérents. Ces résultats montrent également l'importance de la prise en compte du rebond de la particule. En effet, si l'on considère que la particule reste collée à la première paroi avec laquelle elle entre en contact, le maximum de dépôt a lieu sur la paroi supérieure et le minimum sur la paroi inférieure. Ce qui est contraire à tous les résultats obtenus au chapitre II. Il faut diminuer la probabilité en dessous de 0.01 pour que la tendance s'inverse et reflète correctement les conclusions expérimentales.

Probabilité	Pourcentage de dépôt global (%)					
	Sol	Verticale 1	Verticale 2	Verticale 3	Verticale 4	Plafond
1.0	5	16	17	17	18	27
0.1	7	17	18	17	17	24
0.01	21	16	15	17	17	14
0.001	61	10	7	8	8	6
0.0001	91	2	2	2	2	1

Tableau III.31 : Localisation du dépôt (simulation numérique)

Compte tenu des valeurs des probabilités de dépôt extrapolées pour les revêtements testés expérimentalement, on peut déterminer la répartition du dépôt sur les différentes parois pour ces revêtements (figure III.67). Les tendances obtenues au chapitre II sont retrouvées numériquement, le dépôt s'effectuant de manière prépondérante sur le sol pour tous les

revêtements. De plus, plus un revêtement est captant, c'est-à-dire plus la constante de dépôt est élevée (cas de la moquette et du verre), plus le dépôt se répartit sur les autres surfaces (verticales et plafond). Cependant, les niveaux de dépôt sont différents. En effet, l'utilisation des modèles globaux conduisait à des pourcentages de dépôt de l'ordre de 35% sur le sol, 15% sur une verticale et 5% sur le plafond. Or les simulations numériques montrent un très forte dépôt sur le sol (90%), ainsi le dépôt sur les parois verticales est sous-estimé.

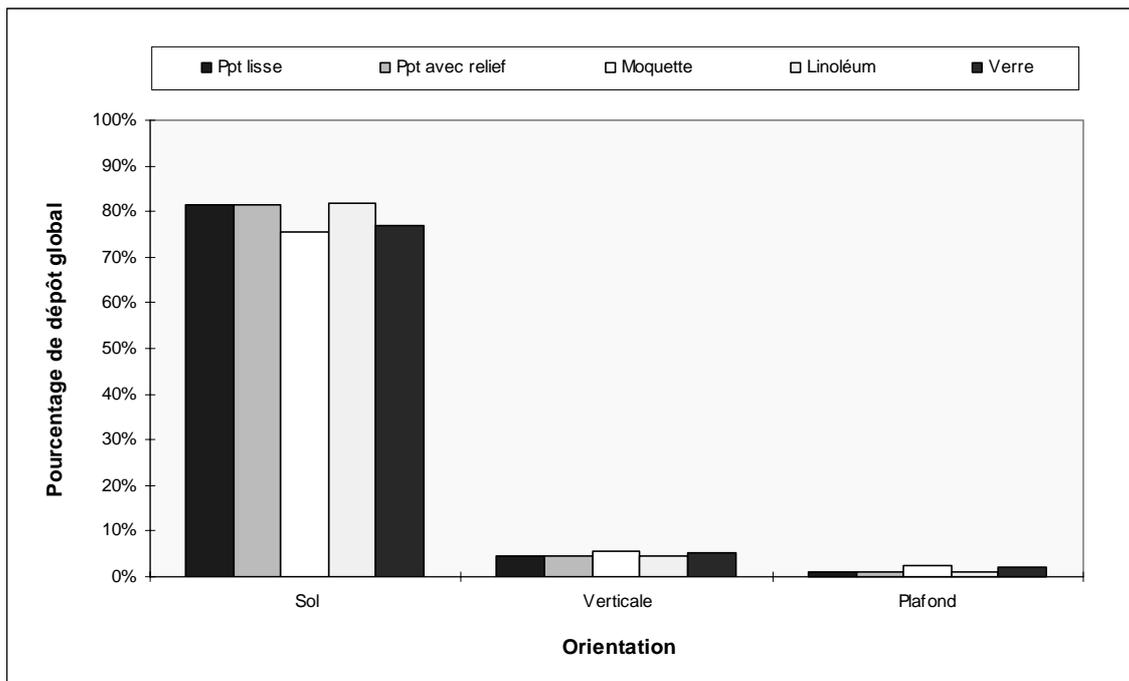


Figure III.67 : Localisation du dépôt par revêtement

C'est face à ce constat qu'il nous est apparu nécessaire d'envisager une autre méthode de prise en compte de l'interaction particule – paroi, ce qui fait l'objet du paragraphe suivant.

III.4.4. Loi de paroi n°2 : vitesse critique de rebond

III.4.4.1. Principe

Dans cette seconde manière de prendre en compte l'interaction entre une particule et une paroi, nous allons nous intéresser plus précisément au phénomène physique et non plus seulement à des calculs statistiques. Comme précisé dans le chapitre I, au moment de la collision entre une particule et une paroi (figure III.68), l'énergie cinétique de la particule est convertie en énergie de déformation et en énergie cinétique de rebond. L'énergie de déformation est dissipée dans le processus de déformation de la particule et de la paroi. Si l'énergie cinétique de rebond est supérieure à l'énergie d'adhérence de la particule à la paroi,

la particule va rebondir. L'énergie cinétique après rebond, donc la vitesse de la particule après rebond, va être inférieure à l'énergie cinétique avant rebond et la rotation de la particule va être inversée.

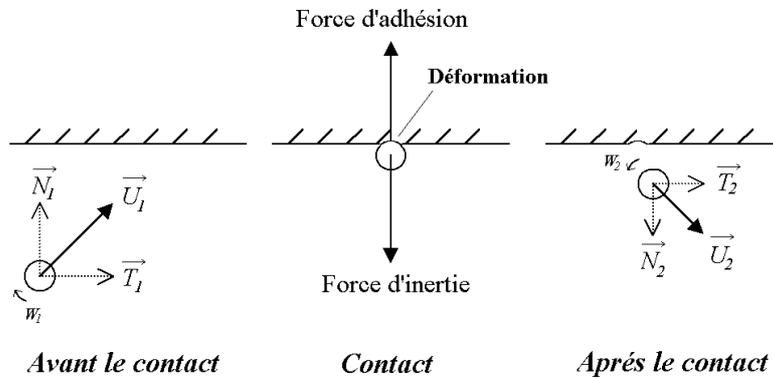


Figure III.68 : Principe général du rebond d'une particule

On considérera, comme pour la loi de probabilité de dépôt, que le rebond est parfait c'est-à-dire qu'il n'y a pas de perte d'énergie lors du contact avec la paroi et que la particule est réinjectée symétriquement avec la même vitesse (figure III.69).

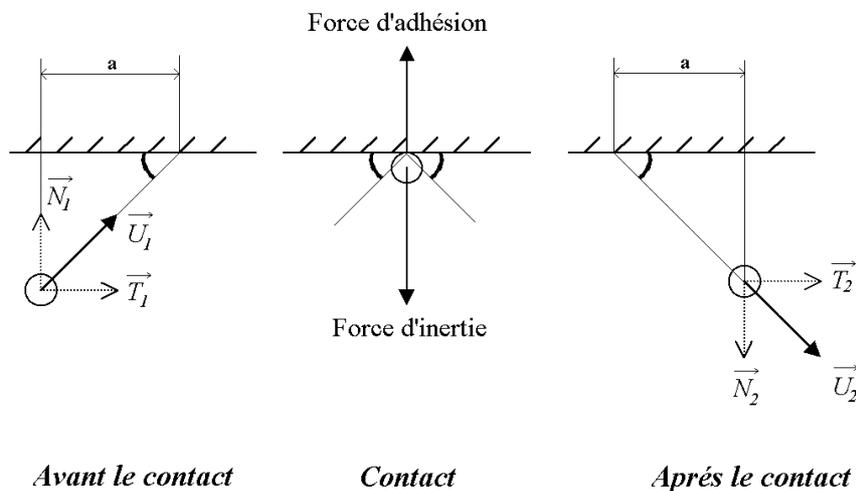


Figure III.69 : Principe simplifié du rebond d'une particule

Sous ces hypothèses, la condition qui détermine l'existence du rebond est basée sur la comparaison entre l'énergie de la particule au moment du rebond et l'énergie d'adhérence qui s'exerce entre la particule et la paroi. Si la vitesse normale à la paroi est supérieure à une valeur donnée, appelée vitesse critique, la particule rebondit, sinon elle reste collée à la paroi.

La valeur de la vitesse critique pour un couple particule – paroi peut alors être déterminée par une analyse paramétrique de la vitesse normale à la paroi au moment du rebond. Les simulations numériques décrites dans le paragraphe suivant visent à appliquer ce principe.

III.4.3.2. Simulations

Les conditions de calculs numériques sont identiques à celles exposées au chapitre III.4.3.2.. Une simulation préliminaire a été mise en œuvre afin de déterminer l'intervalle des valeurs de vitesses normales à la paroi prises par la particule au moment du contact. Pour cela, en imposant une vitesse critique nulle, le dépôt de la particule sur une paroi a été rendu impossible. Sur un échantillon de 16000 contacts avec une paroi, il est apparu que la vitesse normale à la paroi varie de 0 à 4.4 m s⁻¹, pour une moyenne de 1.0 m s⁻¹ et un écart type de 0.7 m s⁻¹. Compte tenu des faibles probabilités de dépôt nécessaires à la caractérisation de l'interaction particule – revêtement, les simulations ont été effectuées pour des valeurs de vitesses critiques inférieures à 0.1 m s⁻¹ afin de réduire au mieux les temps de calcul (1000 particules ont été lancées pour chaque simulation).

III.4.3.3. Résultats

Le tableau III.32 présente les niveaux de dépôt sur les différentes parois de l'enceinte obtenus pour les différentes valeurs de vitesse critique de dépôt. Une vitesse de l'ordre d'un millimètre par seconde est nécessaire pour obtenir une constante de dépôt correspondant aux revêtements étudiés.

Vitesse critique de dépôt (m s ⁻¹)	0.1	0.05	0.03	0.01	0.005	0.001
Constante de dépôt (h ⁻¹)	420	184	137	96	52	33
Temps de résidence moyen (sec)	9	21	25	38	71	138
Temps de résidence max. (sec)	58	138	225	273	443	595

Tableau III.32 : Résultats des simulations numériques

Ces résultats permettent la détermination de la loi liant la constante de dépôt mesurée en enceinte expérimentale à la valeur de la vitesse critique de dépôt. Une loi polynomiale, du même type que pour la probabilité de dépôt, modélise correctement l'évolution de la constante de dépôt. Comme dans le chapitre précédent, une loi linéaire simplifie cette loi pour l'étroite plage de valeurs prises par la vitesse critique (de 4.0 10⁻⁴ m s⁻¹ à 8.0 10⁻⁴ m s⁻¹) :

$$\lambda_d(V_C) = a + b \times V_C \quad (\text{III.118})$$

Avec λ_d : constante de dépôt (h^{-1}),
 V_C : vitesse critique de dépôt (m s^{-1}), et
 a et b : constantes ($a = 3$ et $b = 22332$).

Revêtement	Linoléum	Papier peint lisse	Papier peint avec relief	Verre	Moquette
Vitesse critique (10^{-4} m s^{-1})	4.02	4.16	4.30	7.01	8.01

Tableau III.33 : Vitesse critique de dépôt caractérisant l'interaction revêtement – particule de $5.0 \mu\text{m}$

III.4.3.4. Dépôt à l'intérieur de l'enceinte

Comme précédemment, le dépôt sur les six parois a été calculé. Ici encore, si la vitesse critique est trop élevée, le dépôt sur la paroi supérieure est prépondérant. Plus on approche de la vitesse critique correspondant aux constantes de dépôt mesurées, plus le dépôt augmente sur le sol et diminue sur les autres parois.

Vitesse critique (m s^{-1})	Pourcentage de dépôt global (%)					
	Sol	Verticale 1	Verticale 2	Verticale 3	Verticale 4	Plafond
0.1	13	16	15	15	16	26
0.05	13	17	19	17	20	15
0.03	17	18	16	18	17	13
0.01	25	16	17	13	16	14
0.005	28	16	13	15	15	13
0.001	74	7	5	5	6	3

Tableau III.34 : Localisation du dépôt (simulation numérique)

La figure III.70 présente les niveaux de dépôt obtenus par simulation numérique avec le modèle de vitesse critique de dépôt.

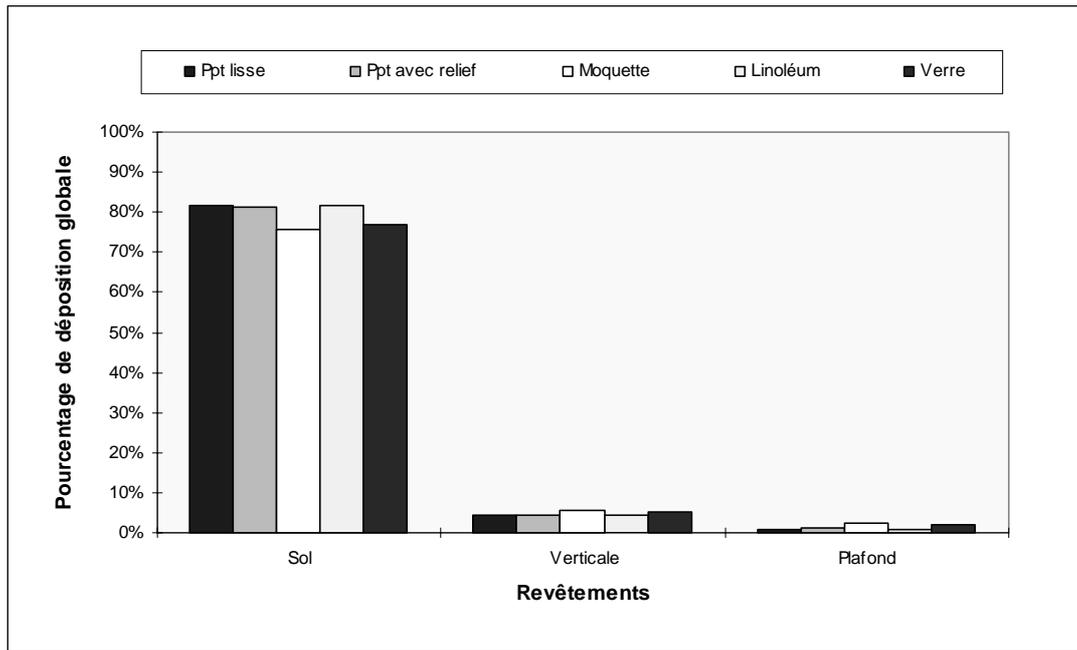


Figure III.70 : Localisation du dépôt par revêtement

Comme pour le modèle de paroi n°1, les tendances obtenues au chapitre II sont retrouvées numériquement. Le dépôt s’effectue de manière prépondérante sur le sol pour tous les revêtements avec un niveau moyen moins élevé que pour la probabilité de dépôt. Ainsi 75% du dépôt a lieu sur le sol, ce qui reste quand même très supérieur à la valeur déduite par le modèle global (35%). On observe également une meilleure différenciation du dépôt entre les parois verticales et le plafond, et l’obtention d’un facteur 3 entre les deux valeurs montre une bonne concordance avec le modèle global. Cependant les niveaux restent inférieurs à ceux déterminés par le modèle global.

Goddard [GOD 96] a simulé l’écoulement de l’expérimentation de Byrne [BYR 95] avec une approche similaire à celle présentée dans cette étude. L’auteur obtient également une surévaluation du dépôt au niveau du sol de près de 95% (pour une mesure de 75%) pour des particules de 5.4 μm . Mais aucun renseignement sur les valeurs de vitesse critique, ainsi que sur les intensités turbulentes obtenues numériquement n’est mentionné par l’auteur, une analyse comparative plus poussée ne peut donc pas être entreprise.

III.4.5. Conclusion sur les modèles de parois

Deux modèles simples de parois ont été étudiés. Le premier, basé sur un paramètre statistique sans réalité physique, la probabilité de dépôt, fournit de bons résultats malgré une forte surévaluation du dépôt sur le sol, comparativement à celle obtenue avec le modèle global décrit dans le chapitre II. En réponse à ce problème, un autre modèle prenant en compte la vitesse d'incidence de la particule au moment du contact avec la paroi, a été étudié. Il montre une meilleure corrélation avec les résultats du précédent chapitre mais il surestime également le dépôt sur le sol. Néanmoins, ce second modèle semble prometteur et la méthode réalisée pour obtenir une évaluation de l'interaction du couple paroi – particule, et surtout de la différenciation des différents couples revêtements – particules semble opportune.

III.5. CONCLUSION

Le but premier de la partie numérique de cette étude sur la pollution particulaire était de mettre au point un code numérique pour la prédiction de la dispersion des particules par la prise en compte des trois directions de l'espace. Ce travail a été initié par Sandu [SAN 99] pour le traitement du cas bidimensionnel et l'auteur remarquait la complexité des points suivants : la détermination des caractéristiques de l'écoulement fluide et la génération des fluctuations de vitesses.

En effet, le mouvement des particules fines traitées ici sont de faibles inerties et dépendent donc fortement de l'écoulement porteur. Ainsi, si l'écoulement d'air est mal simulé, la détermination du mouvement d'une particule ne peut être correcte. Or, dans le bâtiment, les écoulements d'air sont si complexes que l'obtention des caractéristiques de la phase porteuse ne paraît pas accessible actuellement.

La génération des fluctuations de vitesses de l'écoulement fluide est rendue nécessaire à cause de l'utilisation du modèle $k - \varepsilon$ qui ne permet que l'évaluation des quantités moyennes des variables du fluide. Dans cette étude, l'utilisation d'un modèle simple, celui de Gosman et Ioannides [GOS 81], a permis d'aboutir à de bons résultats grâce à la modification de l'intensité de la fluctuation générée en fonction de la constante de temps de la particule. La présence de la particule dans le fluide est de cette manière prise en compte. Lors de l'étude du cas test, il a été montré que la dispersion des particules était correcte en début de gaine et moins bonne dans la dernière partie de l'écoulement, une étude de l'influence du maillage par un raffinement de celui existant ou par l'utilisation d'un maillage non structuré permettrait

probablement de déterminer la cause de cette divergence de la dispersion (effet de maillage ou propagation de l'erreur du modèle de génération de fluctuation de vitesse).

Enfin, la simulation numérique de l'expérimentation a permis de mettre au point une méthode de caractérisation de l'interaction particule – paroi. Celle-ci a été menée par l'étude de deux modèles de paroi, l'un s'appuyant sur une probabilité de dépôt et l'autre basé sur la notion de vitesse critique de rebond. Le second modèle donne de meilleurs résultats quant à la localisation du dépôt et apparaît donc comme le plus encourageant. La prise en compte d'un coefficient de restitution de la vitesse normale de la particule comme première modification de ce dernier modèle permettrait certainement d'affiner les résultats.

CONCLUSION

La présente étude a montré la complexité de la prédiction de la qualité particulaire de l'air des ambiances intérieures. En effet, l'évaluation des niveaux de pollution particulaire à l'intérieur des bâtiments nécessite la connaissance de deux entités en interaction : l'air chargé de particules solides et l'ambiance intérieure du bâtiment.

Nous avons vu, au cours du premier chapitre, que la constitution des aérosols est pour le moins hétérogène, les particules polluantes de l'air sont effectivement de dimension, de forme, de densité et de composition multiples. Les forces, qui s'exercent sur celles-ci et qui gouvernent leurs déplacements dans l'air, sont également nombreuses mais elles sont bien définies. Par contre, nous avons montré que les forces intervenant dans l'interaction entre les particules et les revêtements du bâtiment étaient difficiles à quantifier, c'est pourquoi nous avons orienté la suite de l'étude dans la recherche d'une meilleure détermination de cette interaction.

Dans le second chapitre, nous avons exposé le principe d'évaluation du potentiel captant des revêtements. Par l'introduction de la notion de coefficient de captation, la classification des revêtements du bâtiment vis-à-vis des particules est désormais possible. La détermination de cette nouvelle caractéristique d'un revêtement passe par des mesures systématiques en chambre expérimentale.

Pour que cette démarche aboutisse, plusieurs points nécessitent des travaux complémentaires : tout d'abord, il serait nécessaire de coupler les campagnes de mesures effectuées à l'intérieur des locaux aux études épidémiologiques afin de clarifier les caractéristiques des particules à prendre en compte pour l'évaluation de la qualité de l'air et donc pour la caractérisation des revêtements. Ensuite, une amélioration de l'enceinte expérimentale au niveau du confinement, de la transmission des vibrations, de l'automatisation du système d'injection de particules ainsi que du couplage avec un compteur de particules multivoies (pour la mesure simultanée de la quantité de particules de tailles différentes), serait nécessaire afin d'obtenir une précision optimale pour les mesures de

décroissance de concentration en particules dans l'air et diminuer ainsi l'erreur sur les valeurs des coefficients de captation. Enfin, la détermination d'un protocole expérimental pour la prise en compte de la remise en suspension des particules générée par l'activité humaine permettrait de définir une caractéristique complémentaire du rôle des revêtements du bâtiment vis-à-vis de la pollution particulaire.

Nous avons présenté une étude de cas basée sur les mesures de décroissances de la concentration en particules dans l'air. La détermination de la concentration dans l'air dans une zone d'échelle différente à l'enceinte d'étude repose sur deux étapes : la décomposition de la constante globale de dépôt pour la détermination des vitesses de dépôt vers chaque parois et le calcul des constantes de dépôt à appliquer dans le volume à étudier. Le principe de décomposition, qui permet de quantifier le dépôt sur les parois de différentes orientations uniquement par la connaissance de la constante globale, ne peut être validé que par une mesure directe de la masse de particules déposées sur les parois. Une étude expérimentale visant à mesurer le dépôt pariétal réel à l'intérieur de l'enceinte devra donc être mise au point. La validation de la seconde étape nécessite également des mesures expérimentales. En effet, seule une confrontation de l'évolution de la concentration en particules dans l'air mesurée sur site permettra de vérifier les prédictions obtenues par le modèle global. Il sera nécessaire de déterminer correctement les échanges entre l'extérieur et l'intérieur mais surtout il faudra apporter une attention particulière à la détermination des surfaces intérieures, donnée toujours incomplète des études passées.

La deuxième partie de cette étude à consister en la mise au point du code de calcul de prédiction de la dispersion de particules solides au sein d'un écoulement turbulent. Nous avons montré que le problème majeur de ce modèle de calcul résidait en la modélisation des composantes fluctuantes de l'écoulement porteur. Nous avons testé deux modèles de génération de fluctuations de vitesses et pris le parti de modifier le plus simple pour qu'il donne des résultats acceptables dans un écoulement turbulent de grille. Il serait intéressant de tester d'autres modèles ([BUR 90], [BER 90]) mais nous pensons qu'il serait préférable d'obtenir les vitesses instantanées de l'écoulement d'air en amont de notre code. Pour cela, remplacer la méthode de résolution de l'écoulement d'air est inévitable. La solution idéale, en terme de précision, se trouve dans l'utilisation de la Simulation Numérique Directe (DNS) mais les temps de calcul pour des configurations aussi complexes que celles du bâtiment sont

beaucoup trop long. La Simulation des Grandes Echelles (LES), au vu des résultats obtenus pour des configurations simples, pourrait apporter une solution alternative.

Deux lois de caractérisation de l'interaction entre une particule et une paroi ont été testées dans cette étude. Une extension directe de ces modèles serait de prendre en compte la perte d'énergie de la particule en intégrant le coefficient de restitution de la paroi. Une étude paramétrique couplée de ce coefficient et de la vitesse critique permettrait probablement une amélioration de la localisation du dépôt.

Enfin, l'extension de la méthode décrite dans cette étude à des particules plus fines nécessite d'une part, une amélioration de la structure algorithmique du code et d'autre part, une parallélisation des calculs sur plusieurs processeurs. Il faut noter que la diminution de la taille des particules impose une réduction du pas d'intégration des équations de transport de celles-ci et une augmentation de leurs temps de résidence à l'intérieur du volume d'étude.

Les perspectives immédiates d'avancement de nos travaux sont donc à la fois expérimentales et numériques.

ANNEXES

ANNEXE 1 : NORMES SUR LA QUALITE DE L'AIR

Cette annexe résume les normes et recommandations de la Communauté Européenne sur la qualité de l'air pour les polluants les plus rencontrés. Elles ont été établies à partir du décret du 25 octobre 1991 et reprennent les directives CEE de 1980 et 1989 pour le SO₂ et les PES (Particules En Suspension), de 1985 pour les oxydes d'azote (Nox). En ce qui concerne l'Ozone, il s'agit des valeurs de la directive CEE de 1992, non retranscrite en droit français.

Ozone: directive CEE 1992	Valeur limite (µg/m ³)	Durée (heure)
Protection de la santé en cas d'exposition prolongée	110	8
Protection végétale	200	1
Information de la population : effet limité et transitoire chez les personnes sensibles lors d'une exposition de courte durée	180	1
Alerte : risque pour la santé humaine lors d'exposition de courte durée	360	1

NO₂ : décret 25.10.91	Valeur limite (µg/m ³)	Valeur guide (µg/m ³)
98 ^{ème} percentile des teneurs horaires sur l'année	200	135
Médiane des teneurs horaires sur l'année	-	50

Plomb : décret 25.10.91	Valeur limite (µg/m ³)	Valeur guide (µg/m ³)
Moyennes des teneurs journalières sur l'année	2	-

PES : décret 25.10.91	Valeur limite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valeur guide ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
98 ^{ème} percentile des teneurs journalières sur l'année	250	-
Médiane des teneurs journalières sur l'année	80	-
Médiane des teneurs journalières sur l'hiver	130	-
Moyenne des teneurs journalières sur l'année	-	40-60
Teneur maximale journalière sur l'année	-	100-150

SO₂ : décret 25.10.91	Valeur limite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valeur guide ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
98 ^{ème} percentile des teneurs journalières sur l'année	250 (si PES > 150) 350 (si PES < 150)	-
Médiane des teneurs journalières sur l'année	80 (si méd. PES > 40) 120 (si méd. PES < 40)	-
Médiane des teneurs journalières sur l'hiver	130 (si méd. PES > 60) 180 (si méd. PES < 60)	-
Moyenne des teneurs journalières sur l'année	-	40-60
Teneur maximale journalière sur l'année	-	100-150

Remarque :

Le concept de percentile peut être expliqué comme suit : si l'objectif est à atteindre avec 99,9^{ème} percentile alors 99,9% des mesures en un point de mesure et dans la période considérée doivent être égales ou inférieures au niveau spécifié.

Exemple: prenons un intervalle de mesures de 15 minutes, alors on doit effectuer $365 \times 24 \times 4 = 35040$ mesures sur l'année (en supposant le parfait fonctionnement des appareils de mesures). Seules 35 des plus hautes valeurs de mesures effectuées ($100\% - 99,9\% = 0,1\%$ de l'ensemble de ces mesures), peuvent être égales ou inférieures à la valeur spécifiée.

ANNEXE 2 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL

A2.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est présenté par la figure A2.1. Il est composé de l'enceinte expérimentale (1) munie de son agitateur à hélice (2), d'un compteur de particule (3) piloté par un ordinateur (4), et d'un générateur d'aérosol (5). Ces différents éléments sont décrits plus en détail dans les chapitres suivants.



Figure A2.1 : Dispositif expérimental

A2.2. Enceinte expérimentale

L'enceinte est entièrement fabriquée en bois (plans détaillés en figure A2.2). Elle est composée d'un bâti, sur lequel est fixée une ossature composée de quatre montants. L'ensemble est rigidifié par une épaisse plaque fixée sur les quatre montants (paroi - plafond). Les parois verticales viennent alors s'encaster sur l'ossature. Ce principe de fabrication

permet de démonter entièrement l'ensemble des parois afin de procéder au changement de revêtement à étudier. Afin de ne pas transmettre les vibrations de l'agitateur à l'enceinte, celui-ci et l'axe de l'hélice sont entièrement désolidarisés des parois. Des feutres stabilisateurs ont pour fonction de maintenir en place l'axe dans la position optimale, et un joint caoutchouc permet de fermer le volume d'étude au niveau du passage de la tige qui est lubrifiée à cet endroit. L'étanchéité de l'enceinte est déjà bien obtenue grâce au système d'encastrement des parois verticales sur les montants, mais elle est tout de même améliorée par l'ajout de joints au niveau des jonctions lorsque toutes les parois sont mises en position.

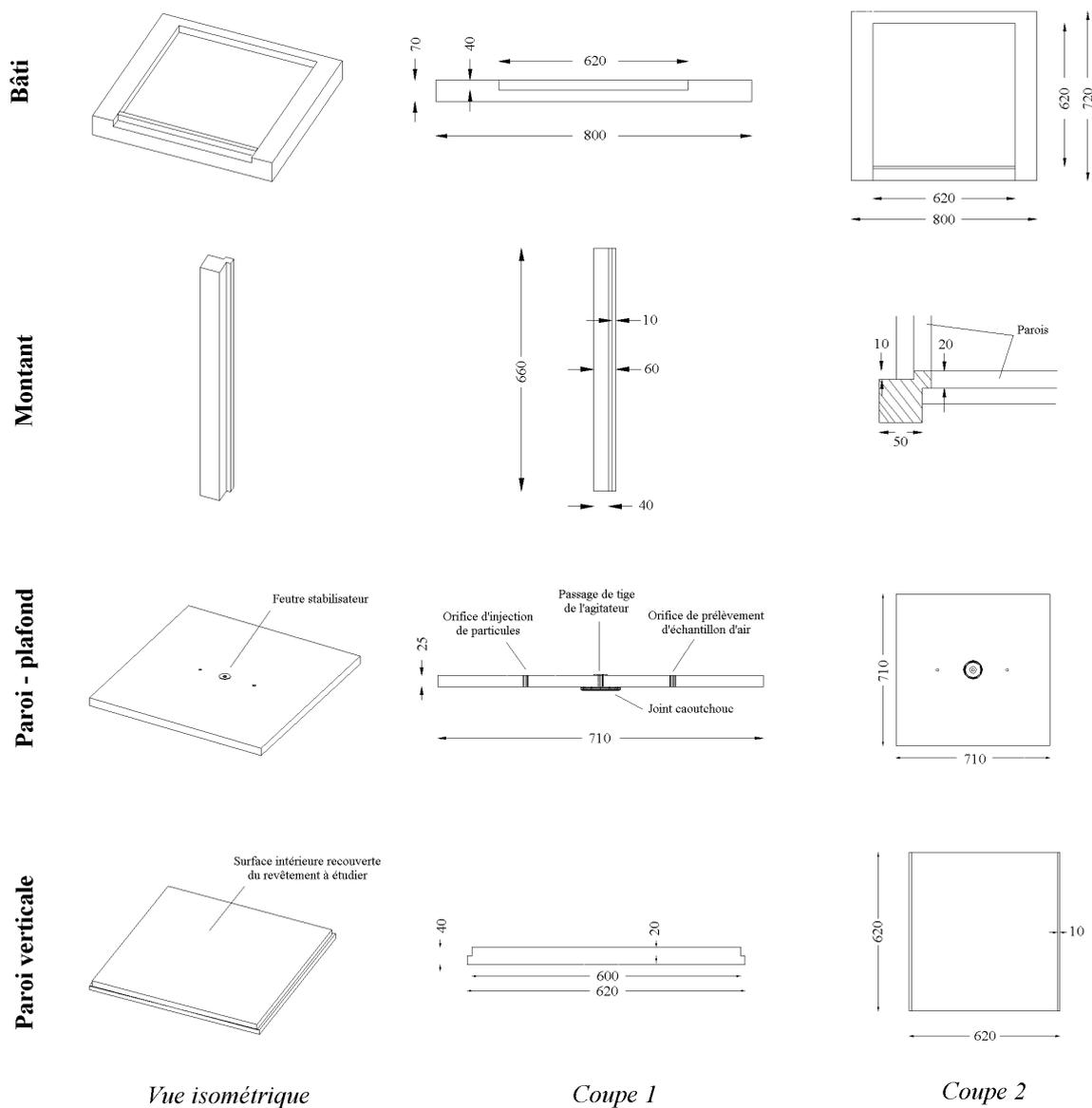


Figure A2.2 : Dispositif expérimental

A2.3. Compteur de particules

Le choix d'un appareil de mesure de concentration en particules se fait essentiellement selon le type et le nombre de particules (figure A2.3).

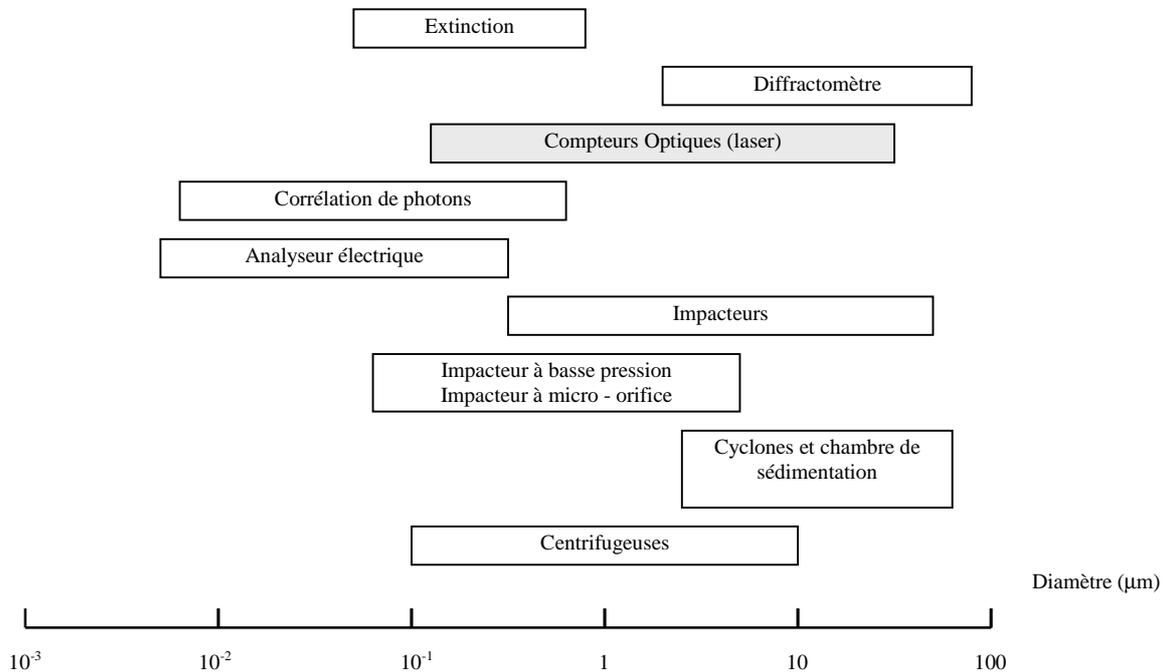


Figure A2.3 : Comparaison des différentes méthodes de mesure et techniques instrumentales en fonction du domaine de dimensions couvert [REN 98]

Compte tenu des particules utilisées, dont les diamètres sont compris entre 0,7 et 5,0 μm et les densités de 1,0 à 2,0 g/cm^3 , c'est un compteur de particules à comptage optique qui a été utilisé. C'est le modèle Met One 227A qui a été choisi à la fois pour les différents canaux de comptage dont il dispose (0,7, 1,0, 3,0 et 5,0 μm) mais aussi pour la possibilité de stockage de données, exploitables par un logiciel adapté.

A2.3.1. Principe

Tous les appareils optiques sont basés sur le principe de diffusion isotrope de la lumière par les fines particules placées dans un faisceau de lumière. Un compteur de particules se compose des éléments suivants (figure A2.4) :

- Un capteur optique composé d'une source de lumière, d'une optique collectrice et d'un détecteur.
- Un système pneumatique volumétrique ayant pour but de délivrer un jet d'air focalisé dans le volume sensible du capteur par l'intermédiaire d'un bec de canard.
- Une électronique de traitement du signal et de comptage.

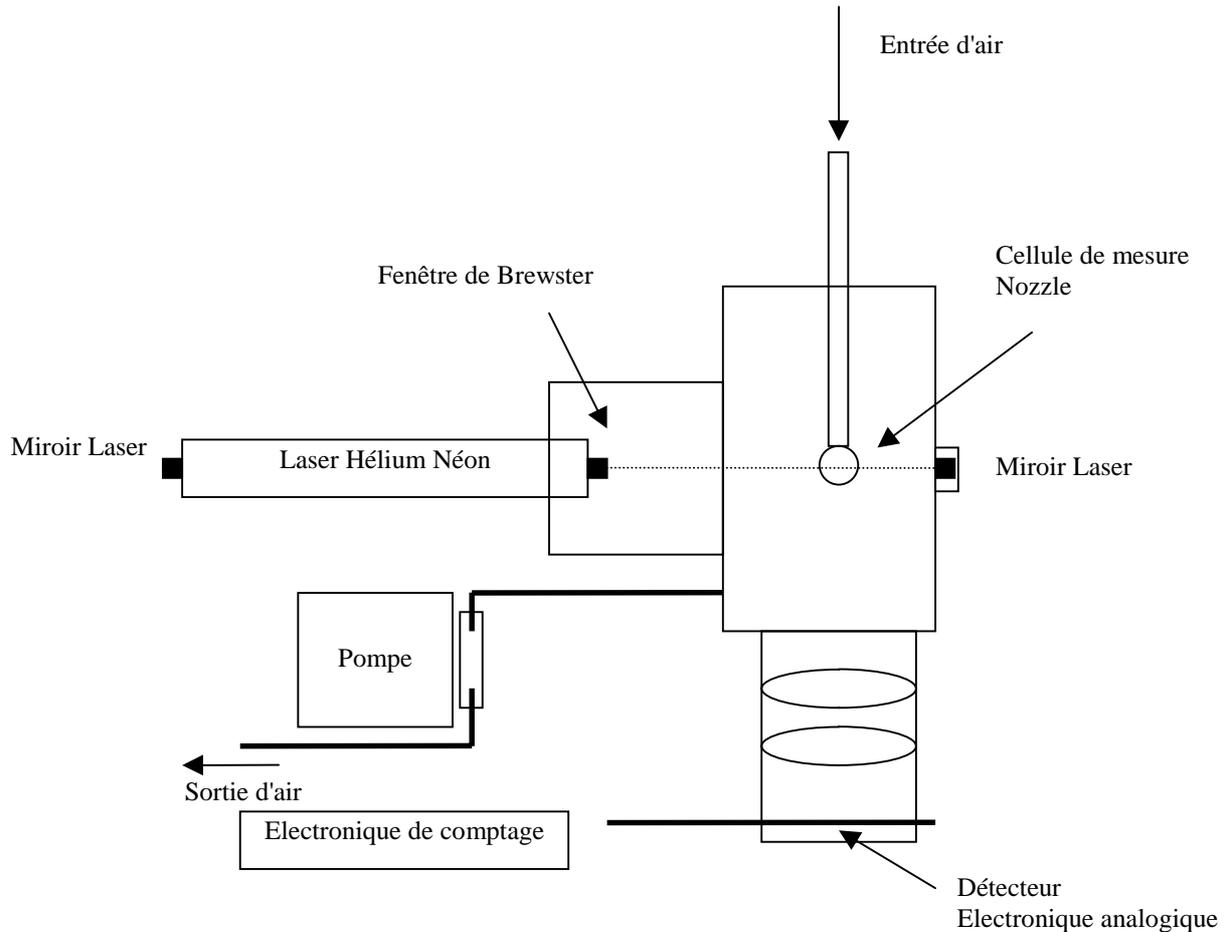


Figure A2.4: Schéma de principe d'un compteur de particules [PSH 95]

A2.3.1.1. Capteur optique

Chronologiquement, ont été utilisées comme sources lumineuses : les lampes à filament de tungstène, les lampes à iode, les tubes laser à plasma et les diodes laser. La tendance actuelle est à l'utilisation de la diode laser. Les détecteurs utilisés ont été successivement : les photomultiplicateurs, les photodiodes avalanches et maintenant les pin – photodiodes (figure A2.5).

A2.3.1.2. Système pneumatique

Deux types de pompes sont utilisées: les pompes à membranes ou à palettes. L'unité de débit habituelle est le pied cube à la minute (CFM) soit 28.3 l min^{-1} ainsi que ses sous multiples: 0.2 CFM, 0.1 CFM et 0.01 CFM pour la mesure de forte concentration d'aérosol ou lorsque la miniaturisation de l'appareil est recherchée. L'air est filtré par une capsule filtrante avant d'être rejeté vers l'extérieur.

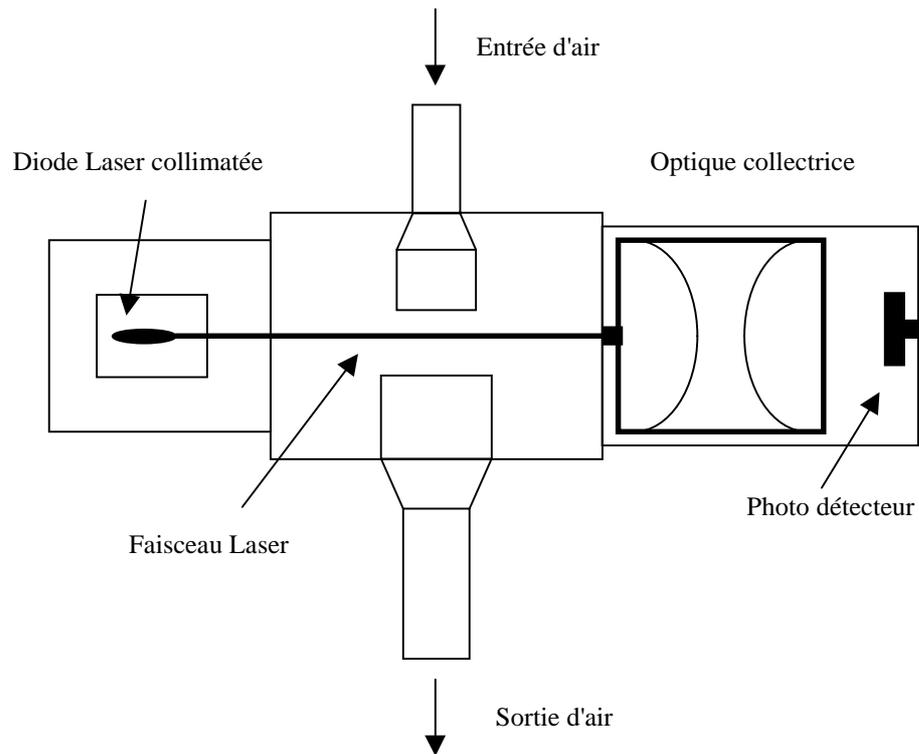


Figure A2.5 : Optique à 180° [PSH 95]

A2.3.1.3. Electronique de traitement du signal

L'hypothèse de base est qu'il ne passe qu'une seule particule à la fois devant le faisceau. Chaque particule produit un signal qui sera utilisé pour le comptage, l'intensité de ce signal étant proportionnelle à la dimension de la particule (figure A2.6).

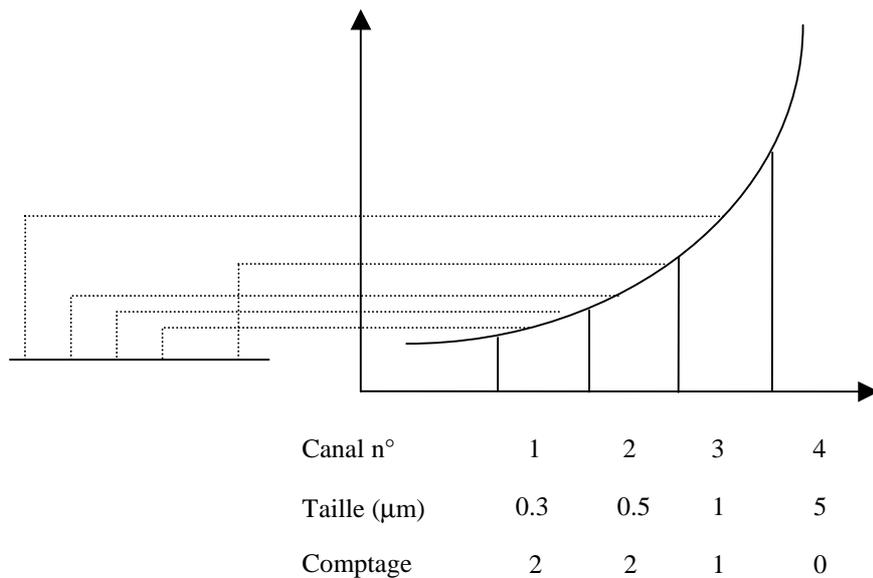


Figure A2.6 : Comptage des particules [PSH 95]

Les résultats bruts, obtenus par le compteur, sont habituellement mis en forme par un logiciel qui permet l'expression des résultats en valeur cumulée ou différentielle, et le calcul de moyennes, et qui fournit une comparaison des résultats à des normes (US209, British Standard...). Les appareils disposent également de seuils d'alarme et leur cycle de fonctionnement est programmable par l'utilisateur.

A2.3.2. Facteurs affectant les performances

A2.3.2.1. Résolution

La résolution d'un compteur de particules définit la possibilité de différencier deux particules ayant des dimensions très voisines. Le capteur idéal, ayant par définition une résolution parfaite, serait capable de dimensionner de manière identique toutes les particules d'un aérosol monodispersé. En réalité, un capteur ayant une résolution définie représentera cet aérosol comme ayant une certaine distribution. La mesure de la résolution d'un capteur détermine le largeur de cette distribution (figure A2.7).

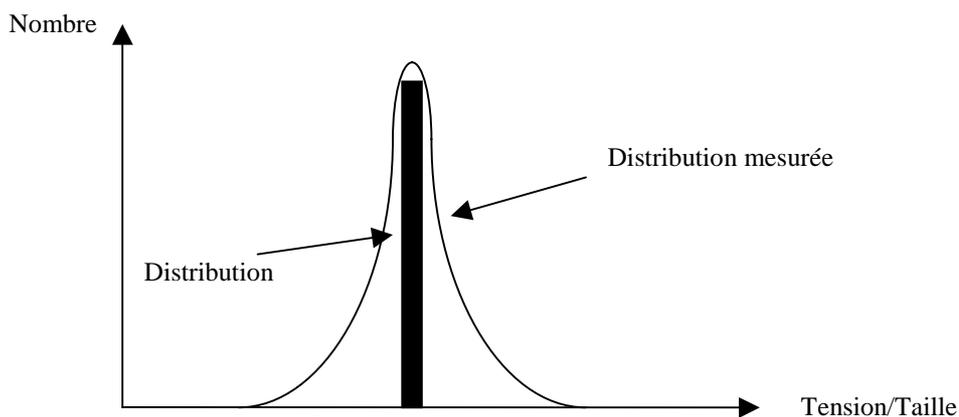


Figure A2.7 : Résolution d'un compteur [PSH 95]

Une mauvaise illumination du volume sensible dégradera la résolution car selon la zone où la particule passera dans le faisceau lumineux, le niveau de lumière sera différent. La forme du bec de canard dirigeant le jet d'air sur le faisceau lumineux est aussi un facteur important, ainsi que la qualité de la focalisation de la lumière diffusée.

A2.3.2.2. Efficacité

L'efficacité de comptage définit la fraction de particules d'une taille donnée qu'un capteur peut détecter. Cette efficacité est exprimée en pourcentage :

$$\% \text{ efficacité} = 100 \times \frac{\text{nombre de particules détectées}}{\text{nombre réel de particules}}$$

L'efficacité de comptage (figure A2.8) décroît avec la taille de particules et cette décroissance dépend de trois facteurs : du niveau de bruit de fond, de l'intensité du signal généré par la particule, et de la résolution.

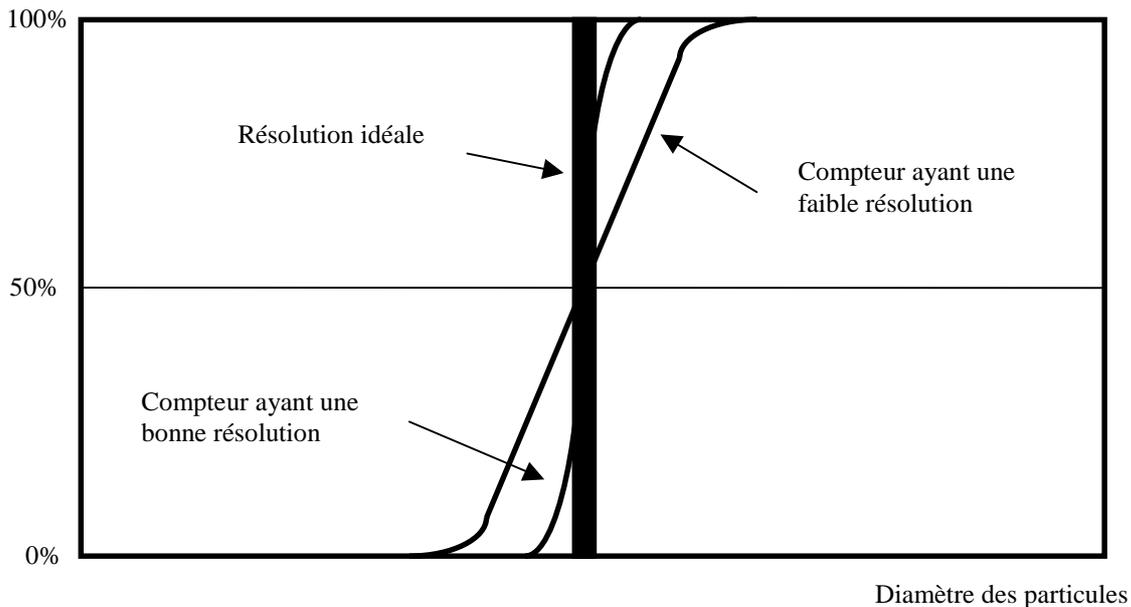


Figure A2.8 : Efficacité de comptage [PSH 95]

A2.3.2.3. Sensibilité

La sensibilité définit la dimension de la plus petite particule qu'un compteur de particules est capable de détecter avec une erreur 'raisonnable'. Le terme raisonnable résulte des différentes définitions possibles de la sensibilité. La sensibilité d'un appareil est limitée par sa capacité à différencier des impulsions provenant du bruit de fond de celles provenant du signal. Pour éviter de confondre signal et bruit de fond on fixera une limite basse du signal. Le choix d'une valeur appropriée pour cette limite doit prendre en considération la résolution de l'appareil. Si cela est fait, l'appareil comptera tout signal supérieur à cette limite comme étant une particule et l'efficacité de comptage pourra être proche de 100%.

A2.3.2.4. Erreur de coïncidence / limite de concentration

C'est le nombre maximal de particules pouvant être mesuré par un capteur sans introduire une erreur causée par la présence de plusieurs particules simultanément dans le volume de mesure.

Une erreur de coïncidence de 10% indique que la concentration maximale est atteinte, la mesure est entachée d'une erreur de 10% par rapport à la valeur réelle. Si on dépasse la valeur de concentration maximale, le nombre de particules comptées sera plus faible que le nombre réel et leur diamètre sera surévalué.

A2.3.3. Précautions d'utilisation

A2.3.3.1. Etalonnage

Cette opération consiste à mettre l'appareil aux normes de fabricant par l'utilisation de standards de références traçables (sphères de latex calibrées) permettant l'établissement d'une courbe de réponse de l'appareil à différentes tailles de sphères de latex. Cette opération consiste aussi à contrôler le débit de mesure et à réaliser différentes opérations de contrôle de l'électronique et de l'optique.

A2.3.3.2. Prélèvement de l'échantillon

Le but recherché est de prélever un échantillon d'air représentatif sans en modifier ni sa concentration ni sa distribution. Selon que l'air sera au repos, soumis à un régime turbulent ou laminaire, le mode de prélèvement devra respecter quelques règles de base.

- Air au repos : les particules les plus petites vont avoir tendance à rester en suspension dans l'air alors que les plus grosses vont sédimenter. La position recommandée pour l'échantillonnage sera la position verticale, et il ne sera alors pas nécessaire d'utiliser de sonde de prélèvement, les entrées de capteurs étant généralement en position verticale.
- Air en régime turbulent : à défaut de connaître la trajectoire de l'air, la meilleure des positions sera la position verticale.
- Air en régime laminaire : le prélèvement devra être effectué face à la source et devra respecter les conditions d'isocinétisme, c'est-à-dire que la vitesse de l'air aspiré au niveau de la sonde devra être égale à la vitesse de l'air soufflé par le filtre. Les compteurs sont généralement livrés avec une sonde isocinétique.

A2.3.3.3. Transport des échantillons

Tout transport d'aérosol dans un tube ou un tuyau se solde par une perte (figure A2.9). Plus la longueur du tuyau est importante et plus cette perte est significative. Cette perte est due à des mécanismes tels que : la sédimentation, l'effet électrostatique, le mouvement Brownien.

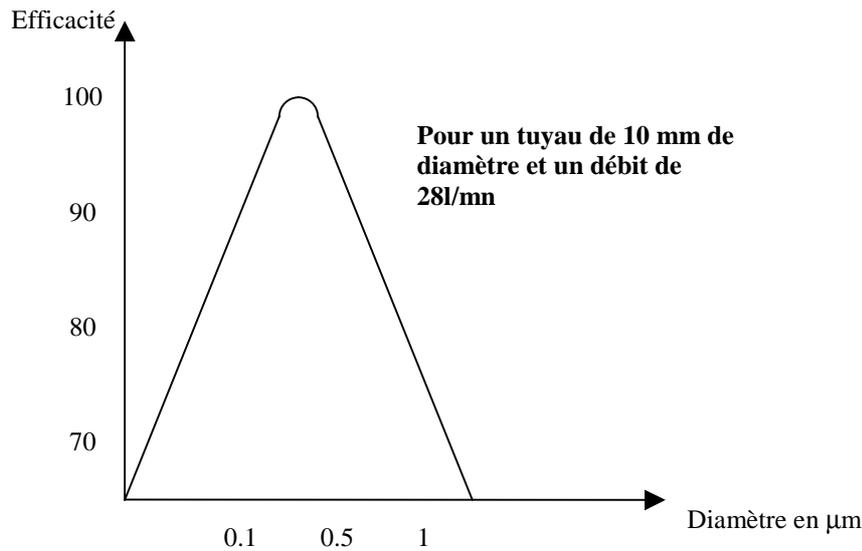


Figure A2.9 : Efficacité de transport d'un aérosol [PSH 95]

Lorsque l'utilisation d'un tuyau est incontournable, il faut veiller aux points suivants : limiter la longueur du tuyau, sélectionner la matière utilisée pour le tuyau, limiter les courbes et leur donner le plus grand diamètre de courbure, et sélectionner le diamètre de tuyau approprié.

A2.4. Générateur d'aérosol

Le schéma de principe du générateur d'aérosol est montré par la figure A2.10.

L'air comprimé est utilisé comme source à la fois pour le déshumidificateur et pour l'atomiseur. Le contrôle des débits d'air passant par ces deux éléments est effectué au moyen de valves de régulation associées à des manomètres.

Le déshumidificateur est un cylindre en aluminium rempli de billes de sulfate de calcium anhydre (dessicatif). L'air qui en ressort est sec et passe alors à travers un filtre à $0.45 \mu\text{m}$ pour éliminer les particules trop grosses. Cet air propre et sec est alors injecté dans le mélangeur.

L'atomiseur est une petite pompe à jet. L'écoulement d'air entrant dans la sphère de verre crée une réduction partielle de la pression au niveau du petit tube dont l'extrémité est immergée dans la solution diluée de particules de latex et d'eau distillée. Cette dépression implique la montée de la solution dans le tube qui est ainsi éjectée sous la forme d'un jet. Les gouttes d'eau et de particules mêlées arrivent alors dans le mélangeur.

Le fait que l'air provenant du déshumidificateur est injecté en deux points (symétriquement en haut du mélange) implique un mouvement hélicoïdal de cet écoulement provenant de l'atomiseur. Le mélangeur comprend plusieurs resserrlements ce qui fait que l'air de

l'atomiseur et l'air sec se mélangent tout le long du parcours. A l'extrémité du mélangeur, l'air chargé en particules s'évacue par la sortie située dans l'axe longitudinal, et le supplément d'air, non pollué, est injecté par la sortie latérale.

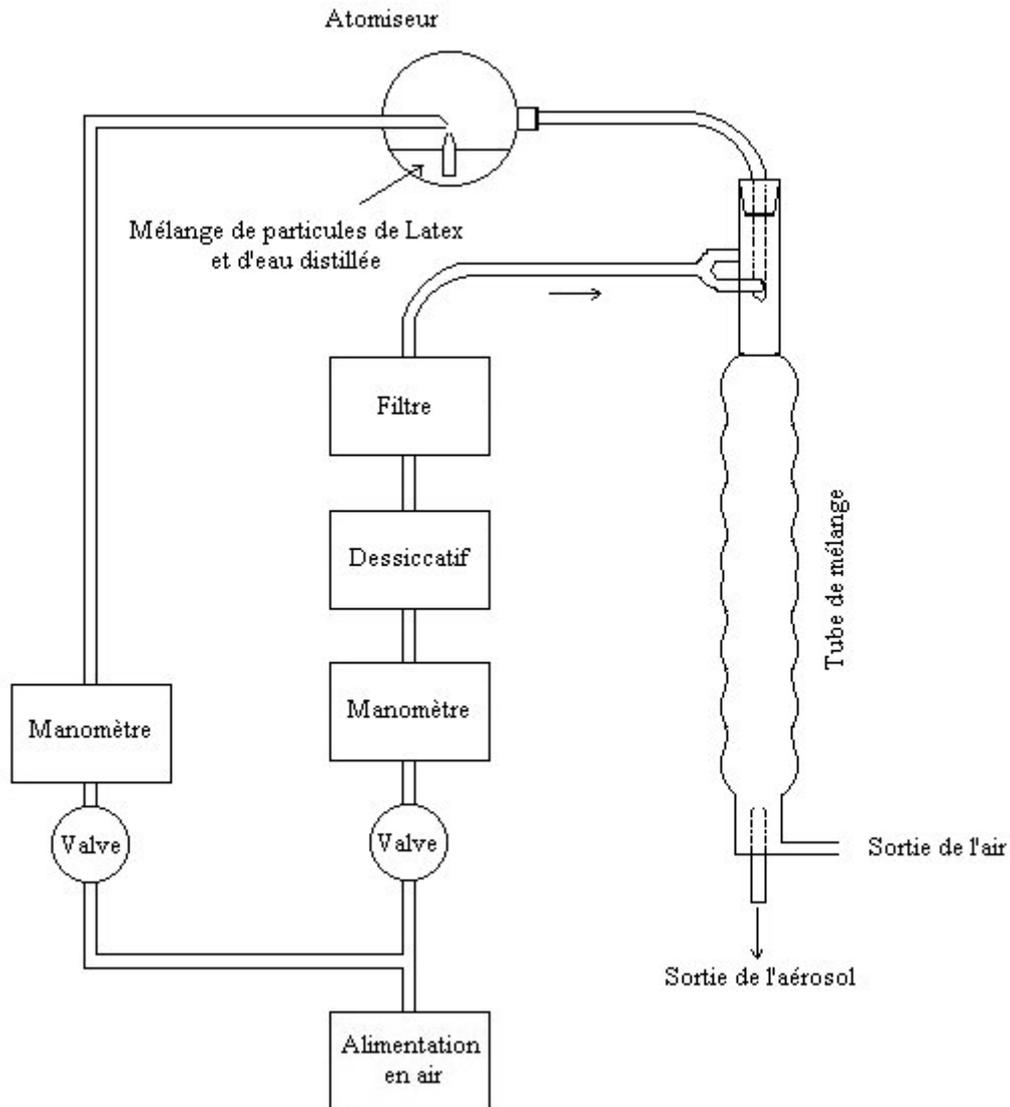


Figure A2.10 : Schéma de principe d'un générateur d'aérosol

La concentration en particules à la sortie du générateur est régulée par le contrôle de la pression au niveau de l'atomiseur, de la concentration en particules de la solution eau distillée – particules de latex, et de la quantité d'air sec. De nombreux essais ont du être effectués afin de déterminer les bons réglages, en particulier les bonnes concentrations du mélange initial, qui diffèrent d'un type de particules à l'autre.

A2.5. Anémomètre à fil chaud

A2.5.1. Principe

Le principe de l'anémométrie à fil chaud a été abordé à la fin du siècle dernier et L.V. King, par des études systématiques, définit le fil chaud en tant qu'instrument de mesure de la vitesse d'un écoulement. Un fil chauffé est placé dans un écoulement ; à l'équilibre, la puissance électrique nécessaire pour chauffer le fil à une température donnée, supérieure à celle du fluide à étudier, est égale à la quantité de chaleur dissipée dans l'écoulement. La quantité de chaleur transférée du fil au fluide est fonction de la vitesse du fluide, de l'écart de température entre le fil et le fluide, des propriétés physiques du fil et du fluide et des dimensions et de l'orientation du fil. Le refroidissement du fil peut se faire par conduction, rayonnement, convection forcée et convection libre. Si la température du fil n'excède pas 300°C, les effets du rayonnement peuvent être négligés. Le refroidissement par conduction est minimisé par la conception des sondes, par l'utilisation de sonde à fil doré par exemple, et la convection libre n'est importante que dans le cas des faibles vitesses. La convection forcée, directement liée à la vitesse, reste le phénomène prépondérant. Les anémomètres sont conçus suivant deux principes différents : le fil est, dans tous les cas, l'une des branches d'un pont de Wheastone ; il peut être alimenté à courant constant ou maintenu à température constante par un système d'asservissement électronique (la sonde de vitesse utilisée pour les mesures dans l'enceinte expérimentale fait partie de cette dernière famille). On montre que la tension V de déséquilibre du pont est alors directement fonction de la vitesse du fluide U :

$$V^2 = A + BU^n \quad (\text{A2.1})$$

Où A , B et n sont des constantes à déterminer lors de l'étalonnage.

A2.5.1. Sondes de mesure

L'élément sensible de l'anémomètre peut être soit un fil métallique très fin tendu entre deux broches, soit une mince couche de métal déposée sur un support à quartz. Dans le premier cas, l'élément sensible est appelé « sonde à fil chaud », et dans le second cas, « sonde à film chaud ». L'élément utilisé pour les mesures dans l'enceinte de notre étude est d'un type mêlant les deux principes précédents. Le film de cette « sonde à fibre » est déposé sur un barreau de quartz maintenu entre les deux broches (de la même manière que le fil des sondes à fil chaud). Les extrémités de la fibre sont plaquées de cuivre et d'or pour réduire la longueur de la partie sensible et écarter les broches, les pertes par conduction étant ainsi limitées au

mieux. Diverses configurations de sondes existent, permettant l'obtention d'une représentation spatiale de la vitesse suivant trois plans perpendiculaires. La sonde utilisée n'étant munie que d'un unique élément, c'est la vitesse dans le plan de l'élément qui est mesurée.

A2.5.1. Mesures

L'anémomètre permet d'obtenir la vitesse instantanée du fluide. Pour notre étude, deux quantités ont été déduites de ces mesures : la vitesse moyenne de l'écoulement d'air ainsi que son intensité turbulente. Une étude de l'influence de la période d'échantillonnage sur ces grandeurs a montré qu'une période de mesure de 30 secondes était suffisante. La température de l'air était de 20.5 °C.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [ABA 98] Abadie, M., Limam, K. et Allard, F.
Etude de la Ventilation Naturelle par Grande Ouverture : Cas de la Simple Exposition.
Annales du BTP, n° 3, pp. 43-53, 1998.
- [ACG 91] *Source ACGIH*
American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, USA, 1991.
- [ADA 93] Adam, N.M. and Riffat, S.B.
Deposition of Aerosol Particles in Buildings.
Proceedings of Clima 2000, the 9th International Conference on Heating, Ventilating and Air Conditioning, London, 1993.
- [ALE 94] Alevantis L.E. and Xenaki – Petreas.
Indoor Air Quality in Practice.
Energy conservation in Buildings, European Commission, Directorate General XVII for Energy, University of Athens, 210 p., 1994.
- [ALL 82] Allen, C.M.
Numerical Simulation of Contaminant Dispersion in Estuary Flows.
Proceedings R. Soc. Lond., Vol. A 381, pp. 179-194, 1982.
- [ALL 98] Allard, F., Santamouris, M., Alvarez, S., Dascalaki, E., Guarracino, G., Maldonado, E., Sciuto, S., Vandaele, L. + Contributors : Limam, K., Abadie, M., Wouters, P., Ducarme, D., Grosso, M., Priolo, C., Bruant, M., Alexandre, J.L. and Richalet, V.
Natural Ventilation in Buildings : A Design Handbook.
Editor: F.ALLARD, James & James ed., 1998.
- [BEN 96] Benes, M. and Holub, R.F.
Aerosol Wall Deposition in Enclosures Investigated by Means of a Stagnant Layer.
Environment International, Vol. 22, Suppl. 1, pp. S883-S889, 1996.
- [BER 90] Berlemont, A., Desjonquieres, P., Gouesbet, G.
Particle Lagrangian Simulation in Turbulent Flows.
International Journal of Multiphase Flow, Vol. 16, pp. 19-34, 1990.

[BOW 73] Bowen, B.D. and Masliyah, J.H.

Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol 51, pp. 8-15, 1973.

[BOX 76] Box, G.E.P. and Jenkins, G.M.

Time Series Analysis.

Holden-Day, Oakland, California, 1976.

[BRO 62] Brock, J.R.

On the Theory of Thermal Forces Acting on Aerosol Particles.

Journal of Colloid Science, Vol. 17, pp. 768–780, 1962.

[BSJ 95] Béghein, C., Sandu S., Joubert P.

Ecoulement de Convection Naturelle et Mixte, Thermique et Thermosolutale, Turbulente en Cavité.

Rapport d'activité CNUSC, Nov. 1995.

[BSJ 97] Béghein, C., Sandu S., Joubert P.

Ecoulement de Convection Naturelle et Mixte, Thermique et Thermosolutale, Turbulente en Cavité.

Rapport d'activité CNUSC, Oct. 1997.

[BSJ 98] Béghein, C., Sandu S., Joubert P.

Ecoulement de Convection Naturelle et Mixte, Thermique et Thermosolutale, Turbulente en Cavité.

Rapport d'activité CNUSC, Oct. 1998.

[BSJ 99] Béghein, C., Sandu S., Joubert P.

Ecoulement de Convection Naturelle et Mixte, Thermique et Thermosolutale, Turbulente en Cavité.

Rapport d'activité CNUSC, Oct. 1999.

[BUR 90] Burnage, H., Moon, S.

Prédétermination de la Dispersion des Particules Matérielles dans un Ecoulement Turbulent.

C.R. Académie des Sciences de Paris, T. 310, Série II, pp.1595-1600, 1990.

[BYR 95] Byrne, M.A.

An Experimental Study of the Deposition of Aerosol on Indoor Surfaces.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy of the University College of London and the Diploma of Imperial College, 1995.

[CAR 86] Carlier, M.

Hydraulique Générale et Appliquée.

Editions Eyrolles, 1986.

[CHE 83] Chen, P.P. and Crow, C.T.

On the Monte-Carlo Method for Modelling Particle Dispersion in Turbulence.

Fluids Engineering Division, ASME, New York, Proceedings of Gas-Solids Flows, Vol. 10, pp. 37-41, 1983.

[CIT 96] CITEPA.

Journées d'études sur les poussières, Minutes du colloque du 17/12/96.

[COH 96] Cohas, M.

Ventilation et Qualité de l'Air dans l'Habitat.

Numéro spécial de la revue Chaud Froid Plomberie, 1996.

[COR 51] Corner, B.J. and Pendlebury, E.D.

The Coagulation and Deposition of a Stirred Aerosol.

Proceedings of the Physical Society, B64, pp. 645-654, 1951.

[CUN 10] Cunningham, E.

On the Velocity of Steady Fall of Spherical Particles Through Fluid Medium.

Proc. R. Soc., Vol. A83, pp. 357-365, 1910.

[CRU 83] Crump, J.G., Flagan, R.C. and Seinfeld, J.H.

Particle Wall Loss Rates in Vessels.

Aerosol Science and Technology, Vol. 2, pp. 303-309, 1983.

[CSH 96] Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France, section de l'Evaluation des risques de l'environnement sur la santé.

Pollution atmosphérique à l'intérieur des bâtiments : Sources, Expositions et Risques Sanitaires.

Ed. Lavoisier Tec&Doc, p. 5, 1996.

[DAN 71] Dahneke, B.

The Capture of Aerosol Particles by Surfaces.

Journal of Colloid Interface Science, Vol. 37, pp 342-353, 1971.

[DAV 45] Davies, C.N.

Definitive Equation for the Fluid Resistance of Spheres.

Proc. Phys. Soc., Vol. 57 , pp. 322, 1945.

[DGR 96] Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement (D.G.R.N.E.).

Rapport « Réseau Air ».

Ministère de la Région wallonne, 1996.

[DUR 84] Durst, F., Milojevic, D. and Shonung B.

Eulerian and Lagrangian Predictions of Particulate Two-Phase Flows : A Numerical Study.

Applied Mathematical Modeling, Vol. 8, pp. 101-115, 1984.

[DUT 94] Duthu, H.

La Technique du Bâtiment tous Corps d'Etat.

Moniteur référence technique, 1994.

[EIN 56] Einstein, A.

On the Kinetic Molecular Theory of Thermal Movements of Particles Suspended in a Quiescent Fluid.

Ann. Physik, 17, 549-60 (1905). English Translation « Investigations on The Theory of Brownian Movement » R. Furth (Ed.), translated by A.D. Cowper, Dover, New York, 1956.

[EPA 92] USEPA.

Respiratory Health Effects of Passive Smoking: Lung Cancer and other Disorders.

EPA/600/6-90/006F, Washington DC, 1992.

[EPA 94] USEPA.

Setting the Record Straight: Second - Hand Smoke is A Preventable Health Risk.

EPA/402-F-94-005, Washington DC, 1994.

[ETK 94] Etkin, D. S.

Particulates in Indoor Environments: Characterization and Health Effects.

Indoor Air Quality Update, Cutter Information Corp., 1994.

[FRE 48] Frenkiel, F.N.

Etude Statistique de la Turbulence. Fonctions Spectrales et Coefficients de Corrélation.

Rapport Technique, ONERA, n°34, 1948.

[FUC 64] Fuchs, N.A.

The Mechanics of Aerosols.

Pergamon, Oxford, 1964.

[GOD 96] Goddard A.J.H., Byrne, M.A., Lockwood, F.C., Nasrullah M. and Lai, C.K.

Aerosol Deposition on Internal Building Surfaces : Experimental Validation of a Computational Model.

5th International Conference on Air Distribution in Rooms, Roomvent'96, pp. 105-111, 1996.

[GOS 81] Gosman A.D., Ioannides E.

Aspects of Computer Simulation of Liquid-Fuel Combustor.

AIAA 19th Aerospace Science Meeting, St. Louis, paper 81-0323, 1981.

[HAR 79] Harrison, A.W.

Quiescent Boundary Layer Thickness on Aerosol Enclosures under Convective Stirring Conditions.

Journal of Colloid and Interfacial Science, Vol. 69, pp. 563-570, 1979.

[HEY 62] Heywood, H.

Symposium Interaction Fluids and Particles.

Institute Chemical Engineering, London, pp.1-8, 1962.

[HIG 88] Highsmith, V.R., C.E. Rhodes and R.J. Hardy

Indoor Particle Concentrations Associated with Use of Tap Water in Portable Humidifiers.
Environmental Science & Technology. Vol. 22, pp109-112, 1988.

[HIN 82] Hinds, W.C.

Aerosol Technology : Properties, Behaviour, and Measurement of Airborne Particles.
Edited by John Wiley & Sons, Inc, 1982.

[HIN 87] Hinze, J.O.

Turbulence.
McGraw-Hill Book Company, Inc., 790 p., 1987.

[HJE 67] Hjelmfelt, A.T.

Dynamic Response of a Restrained Sphere in a Fluid.
Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, pp. 41-56, 1967.

[HOL 88] Holub, R.F., Raes F., Van Dingenen, R. and Vanmarcke, H.

Deposition of Aerosols and Unattached Radon Daughters in Different Chambers : Theory and Experiment.
Radiation Protection Dosimetry, Vol. 24, pp. 217-220, 1988.

[JAN 99] Jansson A., Christensson B., Johansson J. and Must A.

Indoor Air Particles – Determination of Presence and Behaviour.
8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 1999.

[KER 69] Kerker, M.

The Scattering of Light.
Academic Press, New York, 1969.

[KIL 99] Kildeso, J., Nielsen J.B. and Schneider T.

Cross-sectional study of Surface Dust Contamination in Danish Schools and Day-Care Centers.
8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 1999.

[KIM 96] Kim, Y.S., Jang, J.H. and Shin, E.B.

Elemental Composition of Indoor and Outdoor Respirable Particle in Séoul Office Building.

Indoor Air '96, Vol. 2, pp. 949-953, Japan, 1996.

[KOU 92] Koutrakis, P., Briggs, S.L.K. and Leaderer, B.P.

Source Apportionment of Indoor Aerosols in Suffolk and Onondaga Counties.

Environment Science Technology, Vol. 26, pp. 521-527, 1992.

[LAI 00] Lai, C.K. and Nazaroff, W.W.

Modeling Indoor Particle Deposition from Turbulent Flow onto Smooth Surfaces.

Journal of Aerosol Science, Vol. 31, n° 4, pp. 463-476, 2000.

[LAN 47] Langstroth, G.O. and Gillespie, T.

Coagulation and Surface Losses in Disperse Systems in Still and Turbulent Air.

Canadian Journal of Research, B25, pp. 455-471, 1947.

[LAN 95] Lange, C.

Indoor Deposition and the Protective Effect of Houses against Airborne Pollution.

Ph.D Thesis (Riso National Laboratory), Denmark, Mai 1995.

[LEE 96] Lee, SC. and Tse, M.L.

Effectiveness of Commercial Air Cleaners on Indoor Air Pollutants.

Indoor Air '96, Vol. 2, pp. 411-416, Japan, 1996.

[LEN 99] Lengweiler, P., Moser, A. and Nielsenk, P.V.

New Functions to Model Measured Deposition and Resuspension Rates of Particles.

8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 1999.

[LOE 90] Loewenstein, J.C.

Etude des Relations Fines entre Pollutions Intérieure et Extérieure dans un Hôpital de la Région Parisienne.

E.D.F., mars 1990.

[LU 92] Lu, Q.Q., Fontaine, J.R., Aubertin, G.

Particle Motion in Two Dimensional Confined Turbulent Flows.

Aerosol Science and Technology, Vol. 17, pp. 169-185, 1992.

[MDO 86] Massachusetts Division of Occupational Hygiene, 1986.

[MON 99] Monn, C. and Junker, M.

Indoor/Outdoor Ratios, Deposition and Resuspension of Fine and Coarse Particles.

8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 1999.

[MOS 87] Mostafa, A.A. and Mongia, H.C.

On the Modeling of Turbulent Evaporating Sprays : Eulerian Versus Lagrangian Approach.

International Journal of Heat Transfer, Vol. 30, pp. 2583-2593, 1987.

[NAZ 89] Nazaroff, W.W. and Cass, G.R.

Mass-Transport Aspects of Pollutant Removal at Indoor Surfaces.

Environment International, Vol. 15, pp. 567-584, 1989.

[NAZ 93] Nazaroff, W.W., Gadgil, A.J. and Weschler, C.J.

Critique of the Use of Deposition Velocity in Modeling Indoor Air Quality.

Modeling of Indoor Air Quality and Exposure, ASTM STP 1205, Niren L. Nadga, Ed., American Society for Testing and Material, Philadelphia, pp 81-104, 1993.

[NIT 93] Nitta, H., M. Ono, S. Nakai, M. Ichikawa, M. Sato and S. Konishi.

Source Apportionment of Fine Particles Inside Residences Close to Major Roads with Heavy Traffic in Tokyo.

Proceedings of Indoor'93, 6th International on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 4, pp 23-26, 1993.

[ODA 64] Odar, F., Hamilton, W.S.

Forces on a Sphere Accelerating in a Viscous Fluid.

Journal of Fluid Mechanics, Vol. 18(2), pp. 302-314, 1964.

[OFF 85] Offermann, F.J., Sextro, R.G., Fisk, W.J., Grimsrud, D.T., Nazaroff, W.W., Nero, A.V., Revzan, K.L. and Yater J.

Control of Respirable Particles in Indoor Air with Portable Air Cleaners.

Atmospheric Environment, Vol. 19, n° 11, pp. 1761-1771, 1985.

[OKU 77] Okuyanna, K., Kousaka, Y., Kida, Y. and Yoshida, T.

Turbulent Coagulation of Aerosols in a Stirred Tank.

Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 10, n° 2, pp. 142-147, 1977.

[OKU 86] Okuyanna, K., Kousaka, Y., Yamamoto, S. and Hosokaya, T.

Particle Loss of Aerosols with Particle Diameters between 6 and 2000 nm in a Stirred Tank.

Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 110, pp. 214-223, 1986.

[ORM 84] Ormancey, A., Martinon, J.

Prediction of Particle Dispersion in Turbulent Flows

Physico-Chemical Hydrodynamic, Vol. 5, pp. 229-240, 1984.

[OWE 90] Owen, M.K. and Sparks, L.E.

Airborne Particle Sizes and Sources Found in Indoor Air.

Indoor Air 90, July 1990.

[PRE 66] Preining, O.

Photophoresis.

Aerosol Science, C.N. Davies (Ed.), Academic Press, London, 1966.

[PRI 99] PRIMEQUAL.

Programme Interministériel pour une Meilleure QUALité de l'air à l'échelle locale et urbaine.

Projets, 1999 – 2002.

[PSH 95] Pacific Scientific Hiac/Royco division

Les compteurs de particules aéroportées.

Guide de l'utilisateur de compteur de particule, 1995.

[RAU 89] Raunemaa, T., Kulmala, M., Saari, H., Olin, M. and Kulmala, M.H

Indoor Air Aerosol Model : Transport Indoors and Deposition of Fine and Coarse Particles.

Aerosol Science and Technology, Vol. 11, pp. 11-25, 1989.

[REN 98] Renoux, A. et Boulaud, D.

Les Aérosols : Physique et Métrologie.

Lavoisier Tech&Doc, 1998.

[REP 80] Repace, J.L. and A.H. Lowery.

Indoor Air Pollution, Tobacco Smoke, and Public Health.

Science. Vol. 208, pp. 464-472, 1980.

[ROE 88] Roed, J. and Cannell, R.J.

The Deposition of Beryllium - 7 Marked Particles on Surfaces in Unfurnished and Furnished Rooms.

Proceedings of CEC/OECD Workshop on Recent Advances in Reactor Accident Consequence Assessment (Rome), 1988.

[ROE 91] Roed, J., Goddard A.J.H., Mac Curtain, J.A., Byrne, M.A. and Lange, C.

Reduction of Dose from Radioactive Matter Ingressed into Buildings.

Proceedings of the CEC International Seminar on Intervention Levels and Countermeasures for Nuclear Accidents, Caderache, France, 1991.

[SAN 99] Sandu, A.

Contribution à l'Etude Numérique du Transport Turbulent de Polluants Particulaires en Cavités.

Thèse de doctorat des universités de La Rochelle (France) et de Bucarest (Roumanie), décembre 1999.

[SCH 99] Schneider, T., Kildeso, J. and Breum, N.O.

A Two Compartment Model for Determining the Contribution of Sources, Surface Deposition and Resuspension to Air and surface Dust Concentration Levels in Occupied Rooms.

Building and Environment, Vol. 34, pp. 583-595, 1999.

[SER 00] Sergent, A., Joubert, P., et Le Quéré, P.

Simulation Numérique de l'Écoulement Instationnaire dans une Pièce Chauffée par une Approche de Simulation des Grandes Echelles.

Congrès SFT 2000, Elsevier, France, pp.735-740, 2000.

[SHA 95] Shaw, B.W.

Use of a Convective Emission Chamber to Study Particle Resuspension.

Ph.D Thesis, University of Illinois, 1994.

[SHI 88] Shimada, M., Okuyama, K., Kousaka, Y. and Seinfeld, J.H.

A Model Calculation of Particle Deposition onto a Rough Wall by Brownian and Turbulent Diffusion.

Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 125, n° 1, 1988.

[SIN 90] Sinclair, J.D., Psota-Kelty, L.A., Weschler, C.J. and Shields, H.C.

Measurement and Modelling of Airborne Concentrations and Indoor Surface Accumulation Rates of Ionic Substances at Neenah, Wisconsin.

Atmospheric Environment, Vol. 24A, n° 3, pp. 627-638, 1990.

[SNY 71] Snyder, W.H., Lumley, J.L.

Some Measurements of Particle Velocity Autocorrelation Functions in a Turbulent Flow.

Journal of Fluid Mechanics, Vol. 48, part 1, pp. 41-47, 1971.

[SPE 81] Spengler, J.D.

Long-term Measurements of Respirable Sulfates and Particles Inside and Outside Homes

Atmospheric Environment, Vol. 15, pp. 105-110, 1981.

[STE 94] Stetzenbach, L.D.

Microbiology of Indoor Environment.

Proceedings of Assessing Microbiological Contamination of Indoor Environments, Fairfax, Virginia, USA. Mid-Atlantic Environmental Hygiene Resource Center, Philadelphia, USA, 1994.

[THA 95] Thatcher, T.L. and Layton, D.W.

Deposition, Resuspension and Penetration of Particles within a Residence.

Atmospheric Environment, Vol. 29, pp. 1487-1497, 1995.

[THA 96] Thatcher, T.L., Fairchild, W.A. and Nazaroff, W.W.

Particle Deposition from Natural Convection Enclosure Flow Onto Smooth Surfaces.

Aerosol Science and Technology, Vol. 25, pp. 359-374, 1996.

[THA 97] Thatcher, T.L. and Nazaroff, W.W.

Effect of Small-Scale Obstruction and Surface Textures on Particle Deposition from Natural Convection Flow.

Aerosol Science and Technology, Vol. 27, pp. 709-725, 1997.

[VAN 72] Van de Vate, J.F.

The Thickness of the Stagnant Air Layer in Aerosol Containments and the Aerodynamic Diameter of Aggregates of Small Spheres.

Journal of Colloid and Interfacial Science, Vol. 41, pp. 194-197, 1972.

[WAD 33] Wadell, H.

Journal of Geology, Vol. 41, pp 310-331, 1933.

[WAL 66] Waldmann, L. and Schmitt, K.H.

Aerosol Science.

C.N. Davies (Ed.), Academic Press, London, 1966.

[WAL 96] Wallace, L.

Indoor Particles : A Review.

Journal of the Air & Waste Management Association, Vol. 46, pp. 98-126, 1996.

[WEL 83] Wells, M.R. and Stock, D.E.

The Effects of Crossing Trajectories on the Dispersion of Particles in a Turbulent Fluid.

Journal of Fluid Mechanics, Vol. 136, pp. 31-62, 1983.

[WHI 75] Whitby, K.T. and Cantrel, B.

Atmospheric Aerosols : Characteristics and Measurements.

Proceedings of the International Conference on Environmental Sensing and Assessment, paper 29-1 , Las Vegas, Nevada , Sept. 14-17, 1975.

[XU 94] Xu, M., Nematollahi, M., Sextro, R.G., Gadgil, A.J. and Nazaroff, W.W.

Deposition of Tobacco Smoke Particles in a Low Ventilation Room.

Aerosol Science and Technology, Vol. 20, pp. 194-206, 1994.

[ZEB 66] Zebel, G.

Coagulation of Aerosols.

Aerosol Sciences, C.N. Davies (Ed ;), Academic Press, New York, 1966.

[ZIM 82] Zimon, A.D.

Adhesion of Dust and Powder.

Consultants Bureau, New York, USA, 1966.

Références bibliographiques