



HAL
open science

Contribution expérimentale et numérique à l'étude de la remise en suspension des particules par l'activité humaine

Jawad El Hijri

► **To cite this version:**

Jawad El Hijri. Contribution expérimentale et numérique à l'étude de la remise en suspension des particules par l'activité humaine. Physique des Hautes Energies - Expérience [hep-ex]. Université de La Rochelle, 2008. Français. NNT: . tel-00404080

HAL Id: tel-00404080

<https://theses.hal.science/tel-00404080>

Submitted on 15 Jul 2009

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.



*Université Abdelmalek Essaâdi
Faculté des Sciences et
Techniques Tanger - Maroc*

*Université de La
Rochelle
France*



THÈSE de DOCTORAT En Cotutelle

Pour l'obtention du

**Doctorat National en Sciences et Techniques (Maroc)
Doctorat de l'Université de La Rochelle (France)**

**Discipline : Sciences Physiques
Spécialité : GÉNIE CIVIL ET SCIENCES DE L'HABITAT**

Par

Jawad EL HIJRI

**CONTRIBUTION EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE A
L'ÉTUDE DE LA REMISE EN SUSPENSION DES PARTICULES
PAR L'ACTIVITÉ HUMAINE**

Soutenue le 15 Décembre 2008 devant le jury composé de :

<i>Ph. BOURNOT</i>	<i>Professeur, UNIMECA, Université de la Méditerranée de Marseille, France</i>	<i>Président</i>
<i>W. BOSSCHAERTS</i>	<i>Professeur, Royal Military Academy, Bruxelles, Belgique</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>A. CHEDDADI</i>	<i>Professeur, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Rabat Maroc</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>A. BERNOUSSI</i>	<i>Professeur, Faculté des Sciences et Techniques, Tanger, Maroc</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>K. LIMAM</i>	<i>Maître de Conférence HDR, Université de La Rochelle, France</i>	<i>Co-directeur</i>
<i>A. DRAOUI</i>	<i>Professeur, Faculté des Sciences et Techniques, Tanger, Maroc</i>	<i>Co-directeur</i>

REMERCIEMENTS

Par ces modestes mots je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères et mon immense gratitude à mes professeurs, et co-directeurs de thèse, **Monsieur Karim LIMAM MDC-HDR** à l'Université de La Rochelle (France) et **Monsieur Abdeslam DRAOUI**, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir diriger mes travaux et qui n'ont su ménager d'efforts pour guider mes pas durant l'élaboration de cette thèse.

Mon souhait le plus cher est que ce travail soit à la hauteur de la confiance qu'ils ont placée en moi.

Au **Monsieur Philippe BOURNOT**, professeur des Universités (Université de la Méditerranée de Marseille, France), qui a nous a honoré en acceptant de présider le jury de cette thèse et a su toujours garder une attitude professionnelle, aimable et bienveillante. Qu'il trouve ici l'expression de mon respect et de ma reconnaissance.

A Messieurs **Walter BOSSCHAERTS**, professeur à la Royal Military Academy, Bruxelles (Belgique), **Abdelkhalak CHEDDADI**, professeur à l'Ecole Mohammadia d'Ingénieurs (Rabat) et **Abdes-Samed BERNOUSSI**, professeur à la FST de Tanger qui ont accepté avec grande humilité d'analyser au préalable cette thèse et de dresser les rapports pour la soutenance. Que leur investissement moral et leurs qualités scientifiques restent à jamais gravés dans ma mémoire.

A toutes les personnes qui m'ont adopté et soutenu lors de mes séjours au LEPTIAB, je ne saurais jamais trop dire ma reconnaissance.

Aux professeurs et aux collègues de recherche – que ce soit ceux de l'ETTE de la FST de Tanger ou du LEPTIAB (ULR – France) – pour le climat de camaraderie qu'ils ont su créer et leur grande amabilité, qu'ils trouvent en ces modestes lignes l'expression de mon attachement profond et ma gratitude.

A mes professeurs et maîtres qui, au long de ma vie estudiantine, m'ont permis de m'abreuver dans l'immense océan de leur savoir, j'exprime mon éternelle reconnaissance.

Mes remerciements vont aussi à toute personne que j'ai omis de citer par oubli, et qui, de près ou de loin, a participé à la réalisation de ce travail de recherche.

A tous les miens...

RESUME

Concernant les pollutions particulaire des ambiances, qu'elles soient habitables ou destinées à accueillir des populations, c'est essentiellement l'étude du dépôt des particules ou de leur migration dans l'air, qui a le plus souvent été traitée dans la bibliographie.

Pour l'instant trop peu d'études ont été consacrées aux aspects de la remise en suspension des particules car de façon générale, qu'il s'agisse d'habitations ou de grands volumes ouverts au public, les vitesses de l'air restent relativement faibles et permettent difficilement d'«arracher» les particules déposées. C'est dans cet esprit que nous avons élaboré en cellule test, un protocole expérimental pour mettre en évidence ce phénomène. Nos expérimentations permettront de dégager une tendance visant la modélisation du comportement particulaire en phase de remise en suspension.

Nous nous sommes basés sur l'analogie électrique des cycles de charge – décharge d'un self dans une résistance dans un circuit RL pour modéliser le dépôt et la remise en suspension des particules.

Les résultats fournis par le modèle reproduisent dans la majorité des cas les résultats expérimentaux sur des intervalles représentatifs de temps.

ABSTRACT

Particles pollution inside buildings which are designated for living or to welcome peoples is a very important subject treated in bibliography for its parameters such as particles settling and airborne transport.

Nowadays there is a lack of studies developed in the frame of particles suspension in air, as the air speed in big volume rooms is low and so more difficult take off the settled particles. Therefore we have developed a testing room to measure this phenomenon. Our experiments showed out an approche to modelling particles behaviour during the resuspension phenomenon.

Our experiments took into consideration the human activities as a source of air pollution and also as a factor which influences the inside air quality.

INTRODUCTION GENERALE

Beaucoup d'attention a été prêté au contrôle de la qualité de l'air ces dernières années et ceci par la réduction de la pollution extérieure, mais ce n'est que récemment que la communauté scientifique internationale commence à s'inquiéter de la contamination de l'air des ambiances intérieures.

La Qualité de l'Air Intérieur (QAI) préoccupe de plus en plus les citoyens, les politiques et les gouvernements. Cet intérêt provient de la simple constatation que les citoyens passent en moyenne 80% de leurs temps à l'intérieur de lieux clos (habitat, lieu de travail, transport,...). Notons que pour de nombreuses espèces polluantes, la qualité de l'air est plus pauvre à l'intérieur qu'à l'extérieur des bâtiments. Cette situation a même tendance à s'aggraver ces dernières années avec l'augmentation de l'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment et la réduction des débits de ventilation imposées dans l'unique objectif d'économies d'énergie. L'environnement intérieur d'un bâtiment constitue un milieu complexe caractérisé par de nombreux paramètres qui peuvent avoir un impact sur la santé et le confort des occupants. Il existe de multiples interactions entre le bâtiment, son utilisation et les personnes qui y vivent ou y travaillent. C'est aussi un environnement dynamique caractérisé par une grande variabilité des sources de pollution, par des types d'espaces intérieurs différents, et par des conditions de « climat intérieur » et de ventilation également diverses. Les problèmes de pollution intérieure sont complexes car ils peuvent être liés à des éléments structurels (implantation du logement, conception du logement, isolation, chauffage, climatisation, nature du mobilier) et des éléments conjoncturels (conditions d'hygiène, d'entretien, d'isolation, présence humaine et animale, présence de fumeurs, activités comme la cuisine ou le ménage...).

Certes, de multiples travaux de recherches se sont penchés sur les phénomènes de dépôt particulaire (gravitaire pour les grosses particules, diffusionnels pour les particules fines), et ainsi étudier la vitesse de dépôt (en condition isotherme), sur les parois verticales, le sol et le plafond. Mais trop peu d'études de la remise en suspension de particules (notamment de particules marquées par de la radioactivité) ont fait l'objet de recherches approfondies. Or, l'étude de la remise en suspension des particules dans l'habitat par les pas ou autre cause, reste un domaine « quasi-vide », du fait que les activités dans l'habitat restent généralement calmes et du fait de l'absence de forts courants d'air capables d'arracher les particules de leurs adhérences sur les surfaces intérieures des ambiances.

On constate donc que très peu de travaux ont été réalisés sur la remise en suspension, ce qui a engendré une connaissance partielle, voire inexistante de certains scénarii concernant le phénomène de re-suspension.

Soulignons que les principales sources de contaminations sont les occupants eux-mêmes et leurs activités, les matériaux de construction (revêtement des murs, peintures, matériaux d'isolation...), ainsi que les équipements du bâtiment (appareils ménagers, systèmes de ventilation et d'air conditionné...). Il est commun de constater que la physique des particules est une science complexe. Une grande partie des phénomènes entrant en jeu sont mal appréciés ou volontairement non pris en compte. De ce fait les différentes études réalisées dans le domaine des particules se sont concentrées essentiellement sur les phases de génération, de transport et de dépôt des particules. Quelques études ont abordé la remise en suspension des particules, mais sans une application franche au bâtiment.

La présente étude vise en général l'aspect physique du transport particulaire dans un volume fermé (génération, diffusion et dépôt). En particulier elle s'intéresse au développement des connaissances sur le thème de la remise en suspension de particules par l'activité humaine et aux différents paramètres entrant en jeu (nature de l'activité, nombre des occupants, type de pollution etc.).

Une attention particulière sera consacrée à l'étude bibliographique qui montrera l'historique des recherches effectuées dans le domaine, leurs différentes conclusions et les développements éventuels.

Disposant d'une cellule test dont les dimensions sont représentatives à celles d'une pièce d'habitation, et où l'étude du dépôt particulaire a fait l'objet de divers travaux expérimentaux et numériques (M. ABADIE 2000, J. BOUILLY 2003, T DENES 2007), nous nous sommes intéressés à l'utilisation de plusieurs revêtement de rugosité différentes (bois, moquette, linoléum lisse, linoléum antidérapant) avec les quatre configurations de soufflage qu'autorise la cellule test.

Cette fois ci, c'est sur des aspects de remise en suspension inédits dans le registre des transferts particuliers en ambiances ventilées, que nous avons orienté nos travaux en veillant à mener de front une approche expérimentale et une approche numérique.

Nous avons alors développé un protocole expérimental basé sur les études précédentes afin « d'assainir » au maximum les résultats pour pouvoir mettre en évidence l'ampleur de la remise en suspension. La difficulté majeure étant que nous n'avons pas travaillé en « salle blanche » mais dans des conditions standards du bâtiment où la pollution de fond a souvent tendance à « masquer » les sources aussi faibles mais significatives que sont, celles liées à l'activité humaine (en l'occurrence les sources de pollution générées au niveau du sol par un individu qui marche). Il s'agit de sources « mobiles dans l'espace proposé par l'ambiance », et de ce fait difficiles à mettre en œuvre et à maîtriser en terme de mesures expérimentales mais également en terme de modélisation.

C'est dans le second chapitre, nous présentons l'étude de la remise en suspension des particules pour plusieurs types de débits de ventilation et de revêtement de sols. Les résultats obtenus nous ont permis de définir la remise en suspension comme une source supplémentaire de pollution.

Nos multiples expérimentations ont après un grand nombre de tests (qui ont mis en relief le protocole optimum pour l'évaluation du phénomène de remise en suspension), permis d'identifier les différentes tailles de particules susceptibles à être remises en suspension dans les conditions habituelles de déplacement de personne sur un plancher où des particules polydispersées ont été volontairement déposées. Grâce à cette approche expérimentale, nous avons pu identifier les signaux des sources mobiles et quantifier assez proprement l'évolution du nombre de particules réintroduites dans l'air intérieur.

Une fois ce paramètre identifié, il faut le prendre en considération dans la modélisation du phénomène (terme source) via un code de calcul CFD pour une approche fine du phénomène, ou alors via un modèle global (équation de bilan massique) de l'évolution de la concentration dans le domaine d'étude considéré. Nous pouvions donc, à ce niveau, proposer soit un modèle CFD soit globale pour la prédiction. La complexité de l'approche CFD qui déjà très gourmande en temps calcul dans le cas le plus simple d'une source fixe, nous a orienté vers une approche globale de la concentration (évitant le suivi individuel de chaque particule) permettant d'obtenir un modèle fiable pouvant être démultiplié lors de la présence de plusieurs personnes dans la même ambiance (ce qui est un cas fréquent dans le bâtiment).

En conclusion, nous rappelons tout d'abord les différents points abordés au cours de cette étude, ainsi que les résultats majeurs. Puis nous livrons les orientations à prendre à courts termes pour améliorer les connaissances sur le comportement des particules et leur modélisation.

SOMMAIRE

Chapitre 1 : Les particules état des connaissances

I.1. Notions générales.....	p20
I.1.1 Pollution particulaire dans le bâtiment	
I.1.2 Effets sur la santé :	
I.1.3 Syndrome des bâtiments malsains (SBM)	
I.2. Aspects physiques.....	p27
I.2.1 Morphologie	
I.2.2 Dimension	
I.2.3 Concentration	
I.2.4 Grandeurs caractéristiques des particules	
Le libre parcours moyen	
Les lois de FICK	
Le nombre de KNUDSEN	
Le facteur de correction de Cunningham	
Le coefficient de diffusion	
La loi de STOKES	
Dépôt agité et dépôt tranquille	
La vitesse de sédimentation	
I.2.5 Forces agissant sur les particules	
I.2.6 Interactions particule - parois	
I.2.7 Remise en suspension des particules fixées sur une paroi	
Détachement des particules	
Forces agissant sur la remise en suspension :	
Force de réentraînement :	
Effet du dépôt sur la remise en suspension :	
Mécanismes de la remise en suspension	
La remise en suspension dans une pièce	
I.3. Approche globale du comportement particulaire.....	p53
I.4. Approche fine de type CFD.....	p55
I.4.1 Les modèles eulériens et lagrangiens	
I.4.2. Les modèles de sous-couche	
I.4.3. Modélisation de la remise en suspension	
I.5. Expérimentation sur les échanges particulaires dans le bâtiment.....	p61
I.6. Conclusion.....	p68

Chapitre 2 : Etude expérimentale de la remise en suspension des particules

II.1 Introduction.....	p71
II.2 Matériel utilisé.....	p72
II.1 Générateurs de particules	
II.2 Neutraliseur de particules TOPAS EAN 581	
II.3 Compteurs de particules :	
II.4 Autres méthodes de comptage :	
II.3 Analyse de surface.....	p79
II.4. Dispositif expérimental.....	p83
II.5. Protocole expérimental.....	p84
II.6. Etudes expérimentales.....	p86
II.6.1 Etudes préliminaires	
Modèle réduit (2,16m3)	
Cellule Test (9,37m3)	
II.6.2. Analyse des résultats concernant le dépôt	
II.6.3. Analyse des résultats concernant la remise en suspension	
II.7. Conclusion.....	p100

Chapitre 3 : Etude numérique du comportement des particules dans les enceinte fermée

III.1 Aspects physique.....	p103
III.2 Modélisation des transferts particuliers.....	p105
III.2.1 Modélisation fine CFD	
La Simulation Numérique Directe (DNS)	
La Simulation des Grandes Échelles (LES)	
Les Modèles Statistiques (Modèles k-ε)	
Choix du modèle pour l'écoulement fluide	
Les modèles de turbulence	
Modélisation des particules	
Les modèles eulériens	
Les modèles lagrangiens	
III.2.2 Modélisation globale.....	p120
Paramètre de dépôt	
Paramètre de remise en suspension	
III.2.3 Approche globale par analogie électrique.....	p124

Résultats concernant le dépôt

Résultats concernant la remise en suspension

III.3. Résultats.....p129

III.4. Discussion et conclusion.....p135

Chapitre 4 : CONCLUSION & PERSPECTIVES GENERALES

NOMENCLATURE

- Lettres latines

A	constante de Dahneke	J
A_b	aire du sol	m^2
A_h	aire du plafond	m^2
A_{ha}	constante d'Hamaker	J
A_v	aire des parois verticales	m^2
B	Mobilité d'une particule	$cm\ dyn^{-1}\ s^{-1}$
C	concentration en particules dans l'air	kg ou nombre m^{-3}
C_0	concentration initiale en particules	kg ou nombre m^{-3}
C_∞	concentration moyenne en particules	kg ou nombre m^{-3}
C_A	coefficient de masse ajoutée	-
C_c	coefficient de Cunningham	-
C_D	coefficient de traînée	-
C_{Di}	concentration en particules déposées	kg ou nombre m^{-3}
C_{ext}	concentration extérieure en particules dans l'air	kg ou nombre m^{-3}
C_i	concentration intérieure en particules dans l'air	kg ou nombre m^{-3}
C_H	coefficient de Basset	-
C_{pen}	concentration pénétrante de particules	kg ou nombre m^{-3}
C_s	constante de Smagorinski	-
D	diamètre de la gaine	m
d_a	diamètre aérodynamique d'une particule	μm
Di	coefficient de diffusion des particules	$m^2\ s^{-1}$
Di^+	coefficient de diffusion adimensionné	-
d_p	diamètre d'une particule	μm
d_p^+	diamètre adimensionnel de la particule	-
Dr	taux de dépôt	-
E	intensité du champ électrique	$V\ m^{-1}$
E_c	énergie cinétique d'une particule	J
e_r	coefficient de restitution	-
f	facteur de friction	-

f_p	fraction pénétrante	-
F_{adh}	force d'adhérence	N
F_C	force d'électrophorèse	N
F_{cap}	force de capillarité	N
F_D	force de traînée	N
F_g	force gravitationnelle	N
Fp	fraction de pénétration	-
F_{por}	force de portance	N
Fr	fraction de particules retenue	-
F_R	force de réentraînement	N
F_s	force de traînée d'une particule (domaine de Stokes)	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	$m\ s^{-2}$
H	coefficient de thermophorèse	-
J	densité de flux ou taux de dépôt	kg ou nombre $m^{-2}\ s^{-1}$
K	constante de Boltzmann	$J\ K^{-1}$
k_a	conductivité thermique de l'air	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$
K_c	coefficient de captation	-
k_g	conductivité thermique du gaz	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$
Kn	nombre de Knudsen	-
k_p	conductivité thermique de la particule	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$
K_R	fractions de particules réentraînées	-
k	coefficient de dépôt dans les gaines de ventilation	-
L	longueur de la gaine	m
m	masse de la particule	kg
N	constante de dépôt	-
p	pression de l'air	Pa
Pr	nombre de Prandtl	-
Pr_{SGS}	nombre de Prandtl de sous-maille	-
q	charge électrique d'une particule	C
Q	débit massique d'air	$kg\ s^{-1}$
Q_{air}	débit volumique d'air	$m^3\ s^{-1}$
r	distance de l'axe de révolution de la gaine	m

R	rayon de la gaine	m
Re	nombre de Reynolds	-
Re_p	nombre de Reynolds de la particule	-
r_p	rayon de la particule	m
S	Surface	m ²
S_i	source interne de particules	kg ou nombre m ⁻³ s ⁻¹
S_{inj}	surface de la bouche d'injection	m ²
t	temps	s
T	température absolue	K
T_0	température d'entrée du gaz	K
T_w	température constante de la paroi	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
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	composantes moyennes de la vitesse de la particule	m s ⁻¹
u_i	composante de la vitesse de la particule sur l'axe x	m s ⁻¹
u_j	composante de la vitesse de la particule sur l'axe y	m s ⁻¹
u_p, v_p, w_p	composantes fluctuantes de la vitesse de la particule	m s ⁻¹
U	vitesse de l'air	m s ⁻¹
U^*	vitesse de friction	m s ⁻¹
\bar{U}	vitesse moyenne de l'air	m s ⁻¹
U_{max}	vitesse maximale de l'air dans la gaine	m s ⁻¹
U_p	vitesse totale de la particule	m s ⁻¹
V	Volume	m ³
V_c	vitesse critique de rebond	m s ⁻¹
V_d	vitesse de dépôt globale	m s ⁻¹
V_d^+	vitesse de dépôt adimensionnée	-
V_{db}	vitesse de dépôt des particules sur le sol	m s ⁻¹
V_{de}	vitesse de dépôt	m s ⁻¹
V_{dh}	vitesse de dépôt des particules sur le plafond	m s ⁻¹
V_{dv}	vitesse de dépôt des particules sur les parois verticales	m s ⁻¹
v_{inj}	vitesse d'injection de l'air	m s ⁻¹
V_m	vitesse moyenne de la particule	m s ⁻¹

V_p	vitesse de la particule	m s^{-1}
V_s	vitesse de sédimentation de la particule	m s^{-1}
V_{te}	vitesse d'électrophorèse	m s^{-1}
V_{th}	vitesse de thermophorèse	m s^{-1}
x	distance à la paroi	m
x_s	distance de séparation	m
Z	mobilité électrique de la particule	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{V}^{-1}$

▪ **Lettres grecques**

β	constante de rebond	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
δ	épaisseur de la sous-couche laminaire	m
ε	taux de dissipation de l'énergie turbulente	-
λ_{de}	paramètre de dépôt	s^{-1}
λ_d	constante de dépôt	s^{-1}
λ_g	constante de dépôt globale	s^{-1}
λ_p	libre parcours moyen d'une particule	m
λ_r	taux de renouvellement d'air	s^{-1}
λ_R	paramètre de remise en suspension	s^{-1}
μ	viscosité dynamique de l'air	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
ν	viscosité cinématique de l'air	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
σ	tension superficielle	N m^{-1}
ρ	masse volumique de l'air	kg m^{-3}
ρ_g	masse volumique du gaz	kg m^{-3}
ρ_p	masse volumique d'une particule	kg m^{-3}
τ_0	Contrainte de cisaillement à la paroi	N m^{-1}
$\tau_{1,2,3}$	échelles intégrales temporelles lagrangiennes	-
τ	temps de relaxation	s
τ_p	temps de relaxation (constante de temps) d'une particule	s
τ^+	temps de relaxation adimensionné	-

CHAPITRE 1

LES PARTICULES : ETAT DES CONNAISSANCES

Liste des figures

Figure I.1	Granulométrie des particules selon leur origine
Figure I.2	Diamètre des particules et leur point d'atteinte pulmonaire
Figure I.3	Appareil respiratoire et pénétration des particules.
Figure I.4	Particules de pollen (diamètre ~ 10 μm)
Figure I.5	Particule d'amiante (bâtonnets de ~10 μm)
Figure I.6	Différents diamètres caractéristiques des particules
Figure I.7	Coefficient de Cunningham à 20 °C et à la pression atmosphérique
Figure I.8	Facteur correctif de la Loi de Stokes en fonction du diamètre de la particule
Figure I.9	Temps de relaxation t en fonction du diamètre de la particule
Figure I.10	Force de thermophorèse
Figure I.11	Réentraînement des particules
Figure I.12	Représentation schématique d'une structure cohérente à proximité d'une paroi
Figure I.13	Evolution de la fraction réentraînée en fonction de la vitesse de l'air, pour différentes tailles de particules
Figure I.14	Remise en suspension par les pas humains
Figure I.15	Mouvement des particules dans une enceinte
Figure I.16	Représentation graphique de l'équation I.69
Figure I.17	Constantes de dépôt dans des enceintes de petite taille
Figure I.18	Vitesse de dépôt dans des enceintes de petite taille
Figure I.19	Constantes de dépôt dans des enceintes (échelle 1) ou des maisons
Figure I.20	Vitesses de dépôt dans des enceintes (échelle 1) ou des maisons
Figure I.21	Enceinte de Abadie et al. (2001)

Liste des tableaux

Tableau I.1	Paramètres agissant sur la remise en suspension des particules
Tableau I.2	Résumé des conditions expérimentales

I.1. Notions générales

Le mot « particule » a plusieurs significations selon le domaine concerné (chimie, physique, thermique...).

Ainsi, dans le domaine de la protection de l'environnement, une particule désigne une petite partie de matière solide ou liquide en suspension dans l'air ou déposée sur une surface et susceptible de se mettre en suspension. Les particules en suspension ne forment pas un seul et unique polluant de l'air, mais représentent plutôt une classe de polluants constituée de plusieurs sous-classes variant dans une gamme de granulométrie de 0,005 µm à environ 100 µm. Chaque sous-classe de particules peut être constituée de ou contenir différentes espèces chimiques. Ainsi, selon leur origine, les particules ont une gamme de taille et une composition physico-chimique très variables, c'est pourquoi différentes terminologies existent pour classer, définir ou nommer une classe de particules polluantes.

Les particules totales en suspension, ou *total suspended particulates* (TSP), représentent « toutes les particules en suspension dans un volume d'air » d'après les normes NF EN 12341 et NF EN 481. Aux États-Unis, les TSP sont définies comme les particules de diamètre aérodynamique inférieur à 40 à 50 µm, alors qu'en Europe, elles désignent toutes les particules en suspension inférieures à environ 100 µm. Les TSP sont représentatifs de la fraction inhalable des particules de l'air, c'est-à-dire des particules pénétrant le corps humain par le nez ou la bouche. Cependant, une partie des TSP est constituée de particules trop larges pour pénétrer le système respiratoire humain, cet indicateur n'est de ce fait pas bien adapté pour caractériser l'impact potentiel sur la santé.

Les PM10 sont des particules, ou *particulate matter* (PM), de diamètre aérodynamique équivalent inférieur à 10 µm. Cette classe de particules peut pénétrer le système respiratoire humain, et pour cette raison, la US Environmental Protection Agency (EPA) a défini en 1987 les PM10 comme mesure standard de la qualité de l'air. La Communauté européenne a également mis en place la directive 1999/30/CE du 22 avril 1999 pour la mesure des PM10 en remplacement des TSP. Il n'existe pas de méthode universelle de conversion entre PM10 et TSP, mais l'EPA considère que les PM10 représentent 40 à 70 % en masse des TSP, alors que la directive européenne propose une relation simple entre les deux indicateurs : $TSP = 1,2 PM10$.

Les PM_{2,5} représentent les particules de diamètre aérodynamique équivalent inférieur à 2,5 µm. Cette classe de particules qui pénètre les alvéoles pulmonaires représente un facteur pertinent pour qualifier la qualité de l'air d'un point de vue sanitaire. Ainsi, afin de dégager des tendances entre impact sur la santé et taille de particules, certaines études épidémiologiques définissent une sous-classe PM_{10-2,5}, ou *coarse particles* (CP), qui représente les particules de taille inférieure à 10 µm et supérieure à 2,5 µm

Les PM₁ constituent la classe des particules de diamètre aérodynamique équivalent inférieur à 1 µm. Cette classe de particules fait l'objet d'études spécifiques en termes d'échantillonnage et d'impact sur la santé, elle n'est toutefois pas préconisée par les normes et décrets existants.

Les poussières définissent l'ensemble des particules solides en suspension dans l'air. Le terme poussière regroupe en fait les particules solides totales en suspension (TSP solide). Le terme anglais *dust* désigne les particules de dimension inférieure à 75 µm issues de processus mécaniques.

Les brouillards et brumes sont formés par une suspension de gouttelettes dans l'air. La brume est formée par une suspension de gouttelettes liquides de taille supérieure à 1 µm dans l'air et correspond à des conditions de visibilité de 1 à 2 km. Selon les conventions internationales, lorsque les conditions de visibilité sont inférieures à 1 000 m, le terme de brouillard est utilisé.

Les aérosols représentent une suspension dans un gaz de particules solides et/ou liquides dont la vitesse de chute est négligeable.

La notion d'aérosol est équivalente à celle de particules totales en suspension dans l'air ambiant pour des conditions de vent faible.

Les aérosols englobent les poussières, les brumes et brouillards, et les aérosols microbiens.

I.1.1 Pollution particulaire dans le bâtiment:

Depuis quelques années, un grand nombre de scientifiques ont montré que l'air à l'intérieur des bâtiments pouvait être fortement pollué.

Les sources de pollution intérieure qui produisent des gaz ou des particules dans l'air sont les premières causes de problème 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 et renouveler l'air intérieur. Des températures élevées peuvent également augmenter les concentrations de certains polluants particulaires.

L'origine des particules présentes dans l'air influe sur leur granulométrie, comme indiqué sur la figure I.1.

Les particules fines PM_{2,5} sont formées principalement par condensation de gaz et de vapeurs. Elles sont essentiellement émises par des combustions incomplètes telles que trafic automobile, feux de bois, activités industrielles, fumée de tabac, appareils de chauffage, cuisson des aliments...

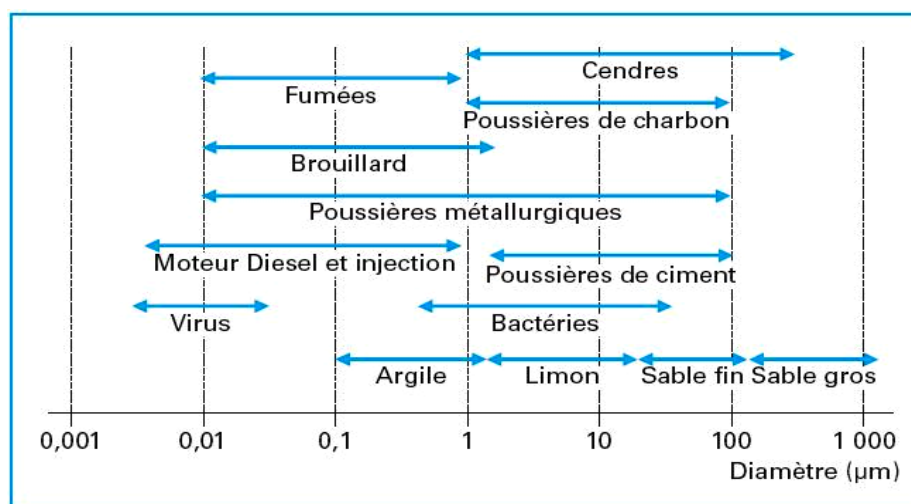


Figure I.1 : Granulométrie des particules selon leur origine

Les particules fines plus volumineuses telles que les PM₁₀ proviennent essentiellement de phénomènes mécaniques tels que l'érosion. À l'intérieur des locaux, les grosses particules sont issues de la mise en suspension de la poussière du sol, de l'abrasion des surfaces et de toutes les activités humaines (déplacement, frottement des textiles, nettoyage...). La plupart de ces grosses particules sédimentent rapidement et sont donc peu présentes dans l'air. En milieu urbain, les particules proviennent surtout du trafic automobile, en particulier des véhicules Diesel et injection et sont majoritairement dans la gamme des PM_{2,5}. Concernant les particules d'origine industrielle, deux types sont distingués :

- les poussières d'origine mécanique, ou particules primaires, générées par les opérations de broyage, concassage, éclatement d'un solide ainsi que les poussières issues de l'attrition (usure par frottement) de solides divisés lors de leur transport ou de leur utilisation. Ces particules sont en général de taille supérieure à 2,5 µm et contiennent une proportion très faible de particules submicroniques ;
- les particules d'origine chimique et thermique, ou particules secondaires, sont formées lors d'un changement d'état de la matière, lors d'une réaction chimique ou lors d'étapes de condensation de gaz ou solidification de liquides. Ces particules sont majoritairement de taille submicronique (PM1), mais s'agglomèrent entre elles et sur d'autres poussières pour former des particules de taille plus importante (PM2,5).

La dimension des particules détermine notamment le transfert extérieur-intérieur des locaux. Ainsi, les particules fines (PM10) et les PM2,5 possèdent des durées de vie et des distances de transport dans l'air très différentes. Les PM2,5 peuvent être transportées sur des distances de 100 à 1 000 km et ont une durée de vie dans l'air pouvant atteindre plusieurs mois alors que les PM10 restent en suspension quelques heures seulement. Ces particules fines se déplacent avec les courants d'air et pénètrent à l'intérieur des locaux par les systèmes de ventilation. La dispersion des grosses particules est bien plus réduite du fait de leur vitesse de déposition élevée.

Contrairement aux fines particules, les grosses particules extérieures pénètrent peu dans les environnements intérieurs.

I.1.2 Effets sur la santé

L'évaluation des émissions de particules revêt un grand intérêt compte tenu de leurs actions nocives sur la santé humaine et sur l'environnement. Les particules posent des problèmes spécifiques par rapport aux polluants gazeux, principalement en raison de la sélectivité de l'inhalation et du dépôt dans les voies respiratoires. Ils ont un double effet sur la santé :

a- Un effet lié à leur taille (figures I.2 et I.3):

- Les particules de plus de 10µm sont retenues dans les voies respiratoires supérieures et rapidement rejetées ;

- Les particules de diamètre compris entre 3 et 10 μm atteignent le segment trachéo-bronchique ;
- Les particules de 0,01 à 3 μm atteignent les alvéoles pulmonaires. Il se dégage un consensus pour considérer que l'essentiel des effets sanitaires liés à la pollution atmosphérique particulaire est le fait de ces particules fines ;
- Les particules de taille inférieure à 0,001 μm se comportent comme une molécule et peuvent ressortir après inhalation ;

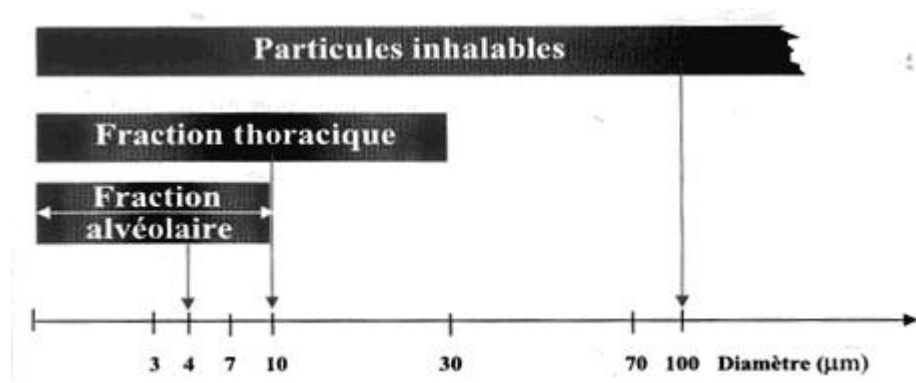


Figure I.2 : Diamètre des particules et leur point d'atteinte pulmonaire.

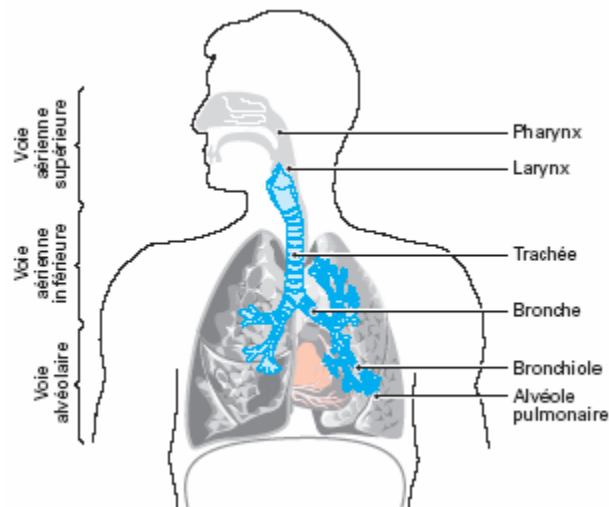


Figure I.3 : Appareil respiratoire et pénétration des particules.

b- Effet lié à leurs caractéristiques toxicologiques, physicochimiques et microbiologiques :

- Les particules contiennent des produits nocifs pour la santé tels que les métaux lourds et les hydrocarbures aromatiques polycycliques ;
- La nocivité dépend également de l'état cristallographique, de la surface des composés et de leur solubilité ;

- Les particules peuvent transporter des micro-organismes vivants tels que moisissures, bactéries ou virus, ainsi que des fragments microbiens, voire des composés organiques volatiles d'origine microbienne (COVm). Ces « particules biologiques » soumises aux mêmes lois physiques que les particules inertes peuvent avoir des effets néfastes sur la santé (légionellose, pneumopathie, intoxication...).

Pour la réalisation d'un inventaire des émissions de particules, une convention existe quant à la prise en compte des particules totales (TSP), des particules fines de diamètre aérodynamique inférieur à 10 μ m (PM10) et des particules fines de diamètre inférieur à 2.5 μ m (PM2.5).

Cependant, les experts sont partagés en ce qui concerne l'impact des particules de diamètre inférieur à 1 μ m et à 0.1 μ m (PM1.0 et PM0.1).

Comme décrit précédemment, il existe une grande diversité de polluants intérieurs avec des intensités d'émission variables. La qualité de l'air intérieur est donc caractérisée par un mélange de différents polluants dont les effets sur le confort et la santé peuvent être de nature et de gravité différente, avec une distinction difficile entre inconfort et pathologie. De plus, il n'est souvent pas possible de distinguer parmi les polluants présents celui ou ceux responsables des effets sur la santé.

Par ailleurs, il faut faire une distinction entre les effets aigus et chroniques, les effets à court terme et à long terme. Les effets aigus sont des effets d'apparition brusque et d'évolution rapide tels que céphalées, nausées, irritations des muqueuses, jusqu'à l'intoxication sévère provoquée par le monoxyde de carbone par exemple. Les effets chroniques correspondent à des manifestations cliniques persistantes se développant lentement. Des manifestations aiguës épisodiques telles que les crises d'asthme peuvent survenir sur un fond chronique. Ces effets, chroniques ou aigus, surviennent après différents temps de latence, les effets à court terme comptent parmi eux, le syndrome des bâtiments malsains (ou Sick Building Syndrom), les maladies infectieuses et les manifestations allergiques. Les effets à long terme sont eux aussi diversifiés, il s'agit de bronchites chroniques, d'asthme, de cancers ou encore du développement d'une sensibilisation allergique. Parmi ces effets, l'asthme et les allergies sont les pathologies les plus souvent reliées à la qualité de l'air intérieur, des études récentes s'intéressent de près à ces questions.

I.1.3 Syndrome des bâtiments malsains (SBM)

Le concept du SBM est apparu au début des années 80 suite à l'observation de symptômes non spécifiques en lien avec l'occupation temporaire d'immeubles de bureau sans que des causes précises puissent être identifiées. De nombreuses enquêtes épidémiologiques ont été menées et la définition proposée est la suivante : *ensemble de symptômes respiratoires, oculaires, cutanés et sensoriels apparaissant chez les sujets travaillant en atmosphère climatisée plusieurs heures par jour, sans critères vraiment objectifs.*

Les signes cliniques se traduisent par des rhinites, sécheresse et larmoiements des yeux, rougeurs, démangeaisons cutanées, impression de mauvaise odeur, céphalées, asthénie et une sensation d'inconfort.

En raison du rythme de travail, ces troubles apparaissent dans la semaine et disparaissent en fin de semaine, s'agissant d'affections bénignes.

Les facteurs expliquant ces troubles sont multiples, il s'agit de facteurs physiques, chimiques, biologiques et probablement aussi de facteurs psychologiques (sensation d'oppression et d'enfermement dans des locaux hermétiques). De nombreux polluants peuvent ainsi être mis en cause tels que la fumée de tabac, le formaldéhyde, les COV, les toxines des micro-organismes mais aussi des paramètres de confort tels que les variations de température, un air trop sec, l'éclairage, le bruit (LEROYER et DEWITTE, 2003).

On s'aperçoit que la problématique de la qualité de l'air intérieur est vaste. L'intérêt des pouvoirs publics pour cette thématique est relativement récent et de nombreuses pistes restent à explorer.

L'exposition aux particules de l'environnement intérieur et les effets sanitaires associés ont cependant fait l'objet de peu de travaux à ce jour. La pollution particulaire à l'intérieur des logements présente des spécificités par rapport à l'extérieur (pollution aggravée par les activités humaines à l'intérieur du logement), et nécessiterait donc une évaluation propre. Les particules ont été classées « substances hautement prioritaires » par l'OQAI « l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur » et sont mesurées à l'occasion de la campagne nationale dans les logements. Une fois qu'un contaminant d'aérosol est présent dans un environnement d'intérieur, il peut rester en suspension dans l'air, déposer sur les différentes surfaces ou s'agglomérer aux particules déjà présentes.

I.2. Aspects physiques

1.2.1 Morphologie

Les particules constituant un milieu aérosol peuvent présenter des formes très variables. Cette variabilité n'existe pas pour les particules liquides que l'on peut assimiler à des sphères. En revanche, la morphologie des particules solides dépend, à la fois, de la nature du matériau qui les constitue et du mécanisme qui les a produites. L'érosion, le meulage ne produisent que très rarement des particules sphériques. De même, l'agglomération de petites particules ne conduit pas plus à la production de particules sphériques.

En fait, à l'exception de particules produites par condensation et solidification d'une vapeur, on ne rencontre que rarement des particules solides sphériques.

En général, on distingue trois grandes familles morphologiques :

- Les particules *isométriques* : les particules ont sensiblement les mêmes dimensions selon les trois dimensions. Les particules sphériques sont évidemment l'exemple idéal de cette famille mais elle inclut également des particules qui approchent la forme de polyèdres réguliers (figure I.4)

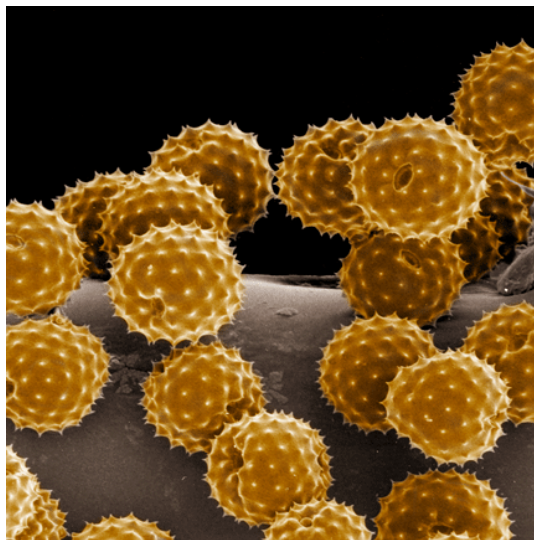


Figure I.4 : particules de pollen (diamètre ~ 10 μm)

- Les *platelets* : il s'agit de particules dont deux dimensions sont grandes par rapport à la troisième. Des exemples caractéristiques sont les fragments de feuilles ou les particules de pollen.

- Les *fibres* : il s'agit de particules dont une dimension est grande par comparaison aux deux autres. Des exemples typiques sont les aérosols résultant de la dégradation de produits fibreux comme la laine de verre ou l'amiante ou les particules émises par la coupe des textiles dans l'industrie des vêtements (figure I.5).

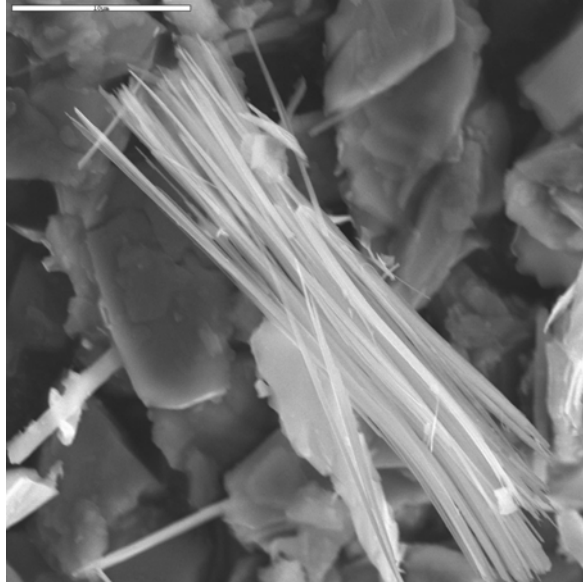


Figure I.5 : Particule d'amiante (bâtonnets de $\sim 10\mu\text{m}$)

I.2.2 Dimension

La variété morphologique complique la description des caractéristiques des particules du milieu aérosol. De surcroît, il est rare de rencontrer qu'un seul type de morphologie pour un même milieu. Les particules peuvent aussi présenter un spectre de dimension qui s'étend sur 4 ou 5 ordres de grandeur avec un nombre variable de particules pour une classe de taille.

Généralement, les scientifiques décrivent les dimensions des particules à l'aide d'une seule grandeur appelée *diamètre équivalent* ou *caractéristique*. Ce diamètre ne correspond à la réalité physique de la particule que si celle-ci est sphérique.

Le diamètre équivalent peut être défini à partir de procédés d'imagerie des particules, mais, souvent, on le définit en se basant sur les propriétés dynamiques des particules.

On utilise principalement deux définitions pour le diamètre caractéristique (dynamique) :

- Diamètre *aérodynamique* : c'est le diamètre de la particule sphérique de densité 1g/cm^3 qui a la même vitesse terminale de chute de la particule réelle.

- Diamètre *de STOKES* : c'est la diamètre de la particule sphérique de densité identique à celle de la particule réelle qui a la même vitesse terminale de chute que celle-ci.

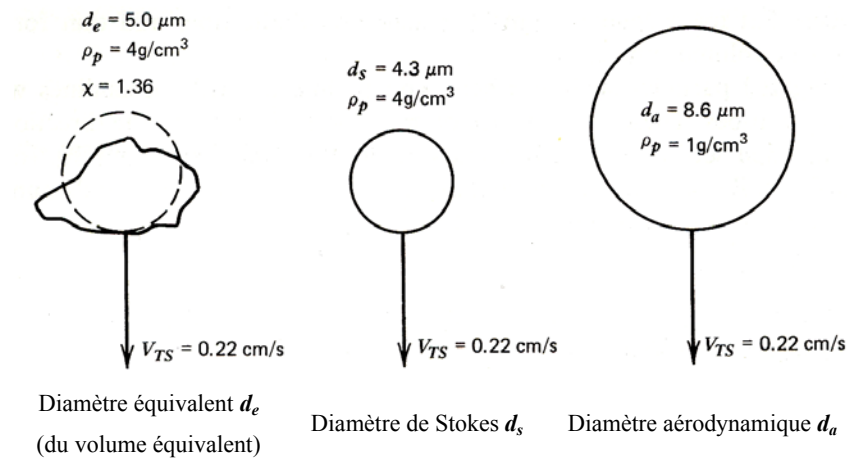


Figure I.6 : Différents diamètres caractéristiques des particules (HINDS 1982)

I.2.3 Concentration

Trois mesures différentes de la concentration des particules dans le milieu aérosol sont couramment utilisées selon les applications industrielles. Il s'agit des concentrations en nombre, en masse et en surface.

Concentration numérique

Cette quantité est le nombre de particules par unité de volume du gaz porteur. Un milieu aérosol est par définition un milieu où la concentration numérique est élevée.

Un air est considéré propre s'il contient moins de 1000 particules par cm^3 , par contre un air pollué contiendra 10^5 voire plus de particules par cm^3 .

Concentration massique

Cette quantité est définie comme la masse M des particules suspendues dans un volume V rapportée à la mesure de ce volume.

Ce volume est la somme du volume du gaz V_G et du volume occupé par les particules V_P . Dans la pratique, ce dernier est négligeable est donc la concentration massique C^M peut être exprimée par :

$$C^M = \frac{M}{V} = \frac{M}{(V_G + V_P)} \cong \frac{M}{V_G} \quad (I.1)$$

Concentration surfacique

Une des caractéristiques d'un milieu aérosol est la très grande surface d'échange qui existe entre les particules et le gaz porteur. Cette grande surface de matériau dispersé sous forme d'aérosol favorise les échanges thermiques ou chimiques entre les particules et le gaz qui les entourent.

La concentration surfacique C^S est définie comme la surface S des particules suspendues dans un volume V rapportée à la mesure de ce volume.

$$C^S = \frac{S}{V} = \frac{S}{(V_G + V_P)} \cong \frac{S}{V_G} \quad (I.2)$$

Pour donner un sens à cette nouvelle grandeur, on citera la valeur caractéristique de la concentration surfacique d'un gaz d'échappement d'un moteur diesel qui est de 1.2 m^{-1} . Ce chiffre signifie que dans chaque m^3 de gaz d'échappement émis par un moteur diesel, les particules qui s'y trouvent offrent 1.2 m^2 de surface susceptible de réagir avec l'atmosphère.

I.2.4. Grandeurs caractéristiques des particules

Le libre parcours moyen

Une analogie peut être faite entre les particules et les molécules d'un gaz. Comme pour ces dernières dont le libre parcours moyen correspond à la distance moyenne parcourue par la molécule entre deux collisions, le libre parcours moyen d'une particule correspond à la distance parcourue par la particule avant qu'elle ne change de direction ou que sa vitesse moyenne (vitesse moyenne d'agitation) suivant une direction donnée devienne nulle.

Le libre parcours moyen d'une particule est défini comme suite :

$$\lambda_p = V_m \tau \quad (I.3)$$

(La particule change de direction à chaque temps τ , 2τ , 3τ , etc)

Quelque soit le diamètre de la particule, le libre parcours moyen reste quasi constant, ce qui fait de ce paramètre une des caractéristiques des aérosols.

τ est le temps de relaxation d'une particule. C'est un paramètre très important de la physique des particules qui dépend des propriétés de la particule (masse volumique et diamètre) et du gaz porteur (viscosité et masse volumique).

Les lois de FICK

Dans un gaz, les particules vont se déplacer des régions de fortes concentrations vers les régions de faibles concentrations, suivant deux lois de la diffusion appelées lois de FICK, de sorte que la concentration devienne homogène dans tout le volume gazeux. Ce mouvement, appelé mouvement brownien, n'est généralement pris en compte que pour les particules inférieures à $1\mu\text{m}$ de diamètre.

La première loi de FICK donne le flux ϕ (pendant l'unité de temps à travers l'unité de surface) se déplaçant comme indiqué précédemment, soit:

$$\bar{\phi} = -D_i \overrightarrow{\text{grad}} C \quad (\text{I.4-a})$$

La seconde loi de FICK, qui fait intervenir le temps t dans un espace tridimensionnel (x,y,z) , s'écrit:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_i \nabla^2 C \quad (\text{I.4-b})$$

Le nombre de KNUDSEN

On caractérise la continuité du milieu à l'aide d'un nombre sans dimension, appelé le nombre de KNUDSEN. Ce nombre est défini par le rapport entre le libre parcours moyen λ_p et le rayon d'une particule r_p :

$$\text{Kn} = \frac{\lambda_p}{r_p} \quad (\text{I.5})$$

Il permet de distinguer trois types de comportement des aérosols:

- Le domaine continu correspondant à $\text{Kn} \ll 1$, Loi de STOKES.
- Le domaine intermédiaire correspondant à $\text{Kn} \approx 1$.
- Le domaine moléculaire correspondant à $\text{Kn} \gg 1$.

Le facteur de correction de Cunningham

Dans le régime de STOKES ($\text{Kn} \ll 1$) nous avons considéré que la vitesse du fluide était égale à zéro à la surface de la particule. Cette hypothèse devient caduque pour le cas de particules petites dont la taille s'approche du libre parcours moyen du gaz. C'est à dire que l'espace libre

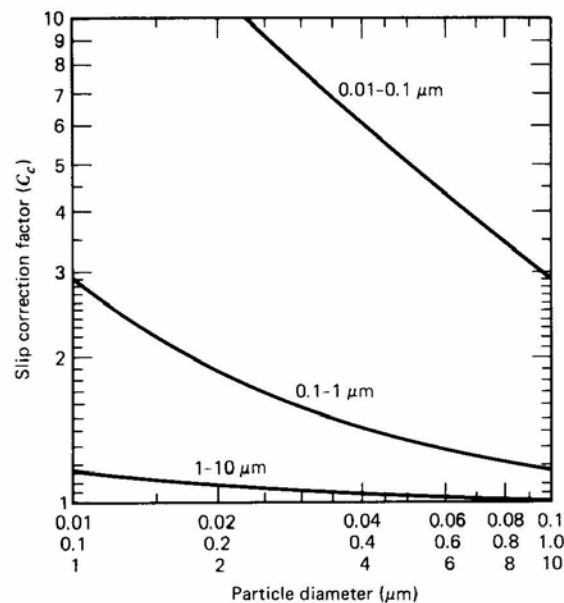
entre les molécules de gaz est comparable à la taille de la particule. Pour prendre en compte cette erreur, CUNNINGHAM a développé pour la loi de STOKES un coefficient permettant de corriger la valeur de la force de traînée :

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda_g}{d_p} \left(1.257 + 0.4e^{-1.1d_p/2\lambda_g} \right) \quad (I.6)$$

Dans l'expression du coefficient de CUNNINGHAM, λ_g est le libre parcours moyen d'une molécule du gaz. Ce coefficient est toujours supérieur à 1 et ainsi tend à diminuer la valeur de la force de traînée selon la taille de particule :

$$\vec{F}_D = \frac{3\pi\mu(\vec{u}_f - \vec{u}_p)d_p}{C_c} \quad (I.7)$$

La variation de la valeur de C_c est présentée sur la Figure I.7 :



**Figure I.7 : Coefficient de CUNNINGHAM à 20 °C
et à la pression atmosphérique (HINDS 1982)**

Lorsque $Kn \approx 1$, soit $r_p \approx 6,4 \times 10^{-8} m$, les dimensions des vides intermoléculaires et des particules étant comparables, le milieu ne peut plus être considéré comme continu. On utilise alors la formule de Millikan-Cunningham, [RENOUX & BOULAUD 1998]:

$$C_c = 1 + A_1.Kn + A_2.Kn.exp\left(-\frac{b}{Kn}\right) \quad (I.8)$$

Où A_1 , A_2 et b sont trois constantes adimensionnelles dont la valeur varie selon les auteurs :

$A_1= 1,25$; $A_2=0,42$; $b=0,87$ (*PERRIN, 1980*);

$A_1= 1,209$; $A_2=0,406$; $b=0,893$ (*MILLIKAN, 1923*);

$A_1= 1,105$; $A_2=0,400$; $b=0,596$ (*ALLEN-RAABE, 1982*);

$A_1= 1,155$; $A_2=0,471$; $b=0,596$ (*BUCKLEY-LOYALKA, 1989*);

$A_1= 1,207$; $A_2=0,440$; $b=0,78$ (*RADER, 1990*).

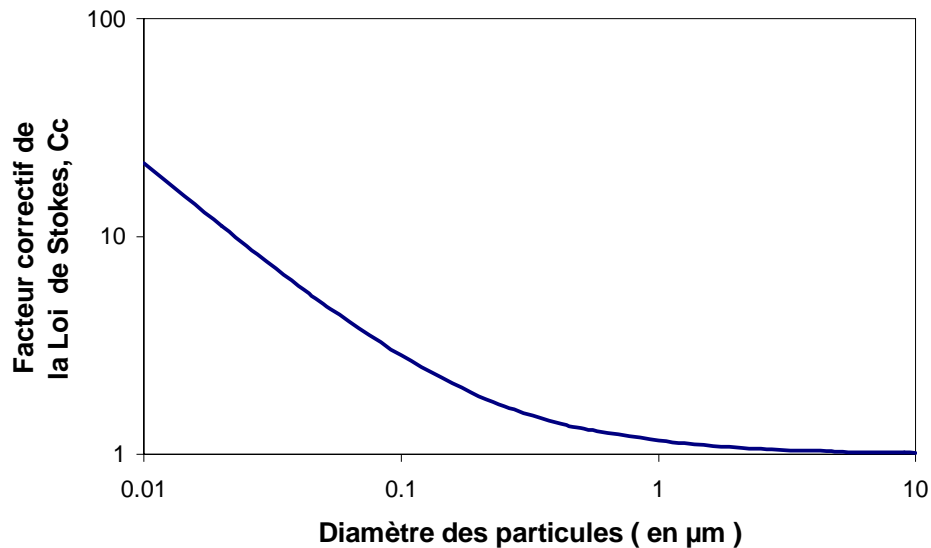


Figure I.8: Facteur correctif de la Loi de Stokes en fonction du diamètre de la particule (CUNNINGHAM 1910).

Le coefficient de diffusion

Le mouvement brownien est le mouvement irrégulier d'une particule d'aérosol dans l'air immobile. Il est dû au gradient d'équilibre qui tend à homogénéiser le nombre des particules dans les molécules de gaz. La diffusion est le transport net de ces particules dans un gradient de concentration.

Le coefficient de diffusion D est le coefficient de proportionnalité entre le flux de particules J et le gradient de concentration.

Une particule est caractérisée par son coefficient de diffusion noté D_i (en $m^2.s^{-1}$). La relation d'Einstein donne l'expression de ce coefficient de diffusion D_i :

$$D_i = K.T.B \quad (I.9)$$

Où K est la constante de BOLTZMANN ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$), T est la température absolue, B est la mobilité dynamique définie pour un milieu donné par le rapport de la vitesse à la force appliquée à la particule :

$$B = \frac{V_p}{F} \quad (\text{I.10})$$

D'où l'expression du coefficient de diffusion :

$$\text{Domaine continu (loi de STOKES)} : Di = \frac{KT}{6\pi r_p \mu} \quad (\text{I.11})$$

$$\text{Domaine intermédiaire (loi de STOKES corrigée)} : Di = \frac{KT}{6\pi r_p \mu} \cdot C_c \quad (\text{I.12})$$

$$\text{Domaine moléculaire} : Di = \frac{KT \lambda_p}{3.66 \pi r_p^2 \mu} \quad (\text{I.13})$$

La loi de STOKES

L'équation de NEWTON est un cas particulier dans lequel les effets visqueux de l'air peuvent être négligés par rapport aux effets d'inertie (Re important). En fait, comme les vitesses d'air et les dimensions des particules sont généralement faibles, la plupart des mouvements particuliers ont lieu pour des nombres de *REYNOLDS* faibles. STOKES a obtenu analytiquement une expression de la résistance de l'air, considéré comme fluide incompressible, sur une particule sphérique, à partir des équations de NAVIER STOKES dans les conditions suivantes : (1) régime permanent ; (2) en l'absence de forces appliquées au fluide ; et (3) pour $Re \ll 1$:

$$F_s = 6\pi r_p \mu V_p \quad (\text{I.14})$$

Dépôt agité et dépôt tranquille

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

- Dépôt tranquille : Il correspond au cas où l'air dans la cavité est au repos, les particules se déplacent seulement sous l'action de la gravité.
- Dépôt agité : Il correspond au cas où il y a un mouvement important d'air dans la cavité et on suppose que la concentration est homogène dans toute la cavité.

Dans les deux cas de figure, la diffusion est négligée.

La vitesse de sédimentation

La vitesse de sédimentation ou vitesse limite de chute, V_s , d'une particule est atteinte lorsque la force de résistance aérodynamique (force de traînée de Stokes F_s , équation I.14) équilibre son poids. La force de gravité F_g s'exerçant sur la particule considérée comme sphérique s'exprime de la manière suivante:

$$F_g = \frac{4}{3} \pi r_p^3 (\rho_p - \rho_g) g \quad (I.15)$$

La vitesse de sédimentation d'une particule de diamètre d_p est déduite de l'égalité de F_s avec F_g , soit:

$$V_s = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_g)}{18\mu} g \quad (I.16)$$

L'expression précédente peut s'écrire sous la forme :

$$V_s = \tau g \quad (I.17)$$

Où τ représente le temps de relaxation de la particule dans un milieu donné et g l'accélération due à la pesanteur.

Généralement, la masse volumique ρ_g du gaz est négligeable devant celle de la particule, soit :

$$\tau = \frac{d_p^2 \rho_p}{18\mu} \quad (I.18)$$

La Figure I.9 représente le temps de relaxation de la particule en fonction de son diamètre.

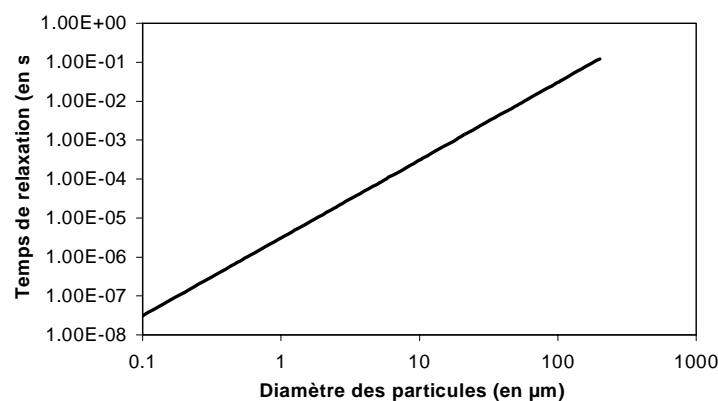


Figure I.9 : Temps de relaxation τ en fonction du diamètre de la particule.

Comme mentionné plus haut, pour le domaine intermédiaire, la formule de STOKES doit être corrigée par le coefficient C_c (Figure I.7) de MILLIKAN et CUNNINGHAM :

$$F_s = \frac{6\pi r_p \mu V_p}{C_c} \quad (I.19)$$

D'où :

$$\tau = \frac{d_p^2 \rho_p}{18\mu} C_c \quad (I.20)$$

I.2.5 Forces agissant sur les particules

Force de photophorèse

La photophorèse est un cas particulier de la thermophorèse. Lorsqu'un rayon lumineux éclaire des particules, celles-ci peuvent être attirées ou repoussées. Des inégalités de température se développent à l'intérieur de la particule, on dit qu'il y a photophorèse. La force de photophorèse dépend de l'intensité et de la longueur d'onde du rayonnement incident ainsi que de la dimension, de la forme, du matériau de la particule, et de la pression du gaz. Elle est maximale pour les particules dont le diamètre est égal au libre parcours moyen des molécules de gaz. Si une particule est fortement absorbante, la force est positive (dans le même sens que la lumière), elle est négative pour les particules peu absorbantes, PREINING, (1966).

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 les particules se traduisent par un transfert de moment vers la particule.

Force de thermophorèse

Cette force apparaît lorsqu'un gradient de température existe dans le milieu, les particules se déplacent de la zone chaude vers la zone froide. La valeur de la thermophorèse dépend du gaz et des propriétés de la particule. L'expression de cette force de thermophorèse est décrite de la manière suivante :

Petite particule ($d_p < \lambda$) :

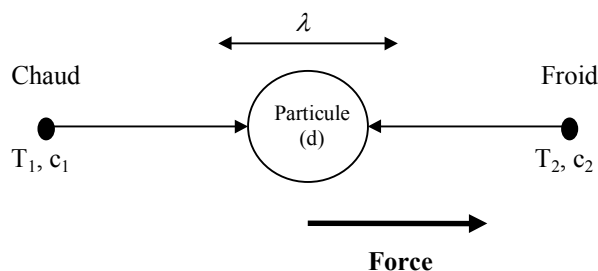


Figure I.10 : Force de thermophorèse ($d_p < \lambda$)

$$F_{th} = \frac{-p\lambda d_p^2 \Delta T}{T} \quad (I.21)$$

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

L'expression de la vitesse de thermophorèse est donnée par WALDMANN et SCHMITT (1966) :

$$V_{th} = \frac{-0.55\mu\Delta T}{\rho_g T} \quad (I.22)$$

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 pour une rotation significative est plus grand que le temps nécessaire pour la transmission de la chaleur dans la particule (FUCHS, 1964).

Force d'électrophorèse

A cause de l'ionisation naturelle, une particule tend vers un état d'équilibre, sa charge est donc nulle. Cependant, des particules peuvent avoir une charge électrique. Cette charge électrique est due à la présence d'ions dans l'atmosphère provenant de différentes sources de rayonnement. Ainsi, une particule portant une charge électrique $q = p.e$ (avec p le nombre d'unités de charge élémentaire e) subit dans un champ électrique E une force F_C (électrophorèse) telle que :

$$F_C = q.E \quad (I.23)$$

De ce fait, la particule chargée acquiert une vitesse V_{te} telle que $V_{te} = Z.E$ où Z est la mobilité électrique de la particule (en $m^2.s^{-1}.V^{-1}$). La vitesse acquise par la particule est telle que la force de traînée équilibre la force électrique. D'où l'expression de la mobilité électrique (Z) pour le domaine de Stokes corrigé du facteur C_c :

$$Z = \frac{Pe}{3\pi d_p \mu} . C_c \quad (I.24)$$

Toutes les forces agissant sur les particules causant leur mouvement dans l'air, n'ont pas forcément la même importance. Ceci dépend plutôt des conditions dans lesquelles on se place.

Dans le domaine de la qualité de l'air intérieur du bâtiment, on s'intéresse surtout aux PM₁₀. Certaines forces peuvent alors être négligées (coalescence thermique, diffusiophorèse et électrophorèse).

Force de diffusionphorèse

La diffusionphorèse est le phénomène suivant lequel les particules d'aérosol en suspension dans un mélange gazeux à température et pression uniformes, mais de constitution inhomogène, se déplacent sous l'action des gradients de concentration des différents constituants du mélange. 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).

1.2.6 Interactions particule – parois

L'interaction des particules avec les surfaces solides est un processus primordial dans le phénomène de dépôt. L'adhérence des particules sur les parois est modérée par les forces d'adhérence telle que la force de *Van der Waals*, la force électrostatique et la tension surfacique des films liquides. L'intensité de ces forces est influencée par les caractéristiques intrinsèques des particules, celles de la surface, la durée de contact, et par les conditions environnementales, comme l'humidité ou la température de l'air. (*HINDS 1982*)

Forces de Van der Waals

La force d'attraction entre une particule et la paroi est dénommée la force de Van der Waals. Elle est due à l'existence de forces d'attraction électrostatiques entre les dipôles de signes contraires qui apparaissent à la suite du mouvement aléatoire des électrons dans chacun des matériaux.

$$F_{vdw} = \frac{A_{ha} d_p}{12x^2} \quad (I.25)$$

Avec A_{ha} , constante de HAMAKER, d_p diamètre de la particule, x la distance à la paroi.

La valeur de la constante de HAMAKER est propre aux différents matériaux qui constituent la particule et la surface ainsi qu'au milieu dans lequel est placé le système.

Si l'on tient compte des déformations possibles de la particule ou/et de la surface du fait des matériaux constitutifs, les forces de Van der Waals peuvent devenir plus importantes. En effet, ces déformations entraînent souvent une augmentation de la surface de contact de la particule (RIMAI et al. 1995). Dans ces conditions, un terme supplémentaire de déformation vient s'ajouter à la force de Van der Waals qui devient :

$$F_{vdw} = F_{vdw} + \frac{h.r'}{8.\pi.x^3} \quad (I.26)$$

Avec r' : rayon de l'aire de contact entre les corps.

Ainsi, en considérant une distance x généralement utilisée de 4 \AA , une particule d'alumine ($h=4,68 \text{ eV}$) de 25 \mu m de diamètre subit une force de Van der Waals sans déformation de $2,3.10^{-6} \text{ N}$. Lorsque le point de contact de cette particule avec la surface est augmenté d'une aire de $0,25 \text{ \mu m}$ de rayon, ce qui équivaut à une déformation de 1% de la particule, il faut ajouter $2,9.10^{-5} \text{ N}$ à la force de Van der Waals soit 12,5 fois sa valeur.

Pour une déformation de 2 % (augmentation de la surface de contact de $0,5 \text{ \mu m}$ de rayon), la force de Van der Waals du système s'accroît beaucoup plus rapidement : elle augmente d'un facteur 50 par rapport à sa valeur initiale pour valoir $1,2.10^{-4} \text{ N}$.

La prise en compte d'une déformation possible de la particule sur la surface peut donc augmenter de façon considérable la valeur de la force de Van der Waals.

Forces cohésives

Il s'agit de l'adhésion des particules entre elles. Les forces auto-adhésives ou cohésives sont à considérer quand l'adhésion a lieu à partir d'un lit de particules. Ces forces inter particulaires ont pour origine principale les forces de Van der Waals mais leur dépendance est différente en fonction de la taille des particules, du fait que la géométrie de contact entre les corps est modifiée.

Les forces auto-adhésives entre particules d'une même couche peuvent conduire à la formation d'agglomérats modifiant ainsi les forces d'adhérence du système. Les interactions entre particules provenant d'un même lit ne permettent pas de décrire une relation avec le diamètre de la particule d_p aussi simplement que dans le cas de l'interaction entre une particule et une surface.

Les forces cohésives qui sont des forces inter particulaires ont des origines communes avec les forces de Van der Waals, mais les deux phénomènes se distinguent dans leur géométrie et semblent montrer une dépendance différente en fonction de d_p .

Forces d'adhérence

L'adhérence d'une particule sur une surface est déterminée principalement par l'action de la force de Van der Waals, de la force électrostatique et de la tension superficielle. L'intensité de ces forces dépend des caractéristiques de la particule (matériau, forme et dimension), du milieu fluide et de l'interaction particule – paroi (durée de contact et vitesse initiale de l'impact). Il est important de préciser qu'il n'existe pas encore de théorie complète prenant en compte tous les facteurs qui influencent l'adhérence.

Collision des particules : rebond sur les parois

Lorsqu'une particule entre en collision avec une surface, l'énergie cinétique de la particule est convertie en énergie de déformation (la particule se déforme ainsi que la surface) et en énergie de rebond (ou ricochet), SANDU (1999). Si cette énergie de rebond est supérieure à l'énergie d'adhésion (énergie nécessaire pour vaincre la force d'adhésion) alors la particule rebondit sur la surface. Plus la vitesse de la particule est élevée, plus les déformations de la surface et de la particule sont importantes. La force d'adhésion devient également plus élevée. La probabilité qu'une particule rebondisse est proportionnelle à la dureté du matériau, à la taille de la particule et à sa vitesse de collision.

Deux approches existent pour prendre en compte le phénomène de rebond. La première consiste à déterminer la valeur limite pour l'énergie d'adhésion ou bien l'énergie cinétique. La seconde consiste à définir une vitesse critique V_c , au dessus de laquelle le rebond a lieu:

$$V_c = \frac{\beta}{d_a} \quad (I.27)$$

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

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 qu'une particule rebondisse est donnée par DAHNEKE, (1971) :

$$E_c = \frac{d_p A (1 - e_r^2)}{2x_s e_r^2} \quad (I.28)$$

Avec x_s : distance de séparation
 A : constante de Dahneke
 e_r : coefficient de restitution

Forces électrostatiques

Très peu d'informations sur l'influence de la charge électrique sur l'adhérence d'une particule sur une paroi sont disponibles dans la littérature. Cependant, on estime que pour des particules de diamètre inférieur à 50 μ m, les forces de Van der Waals restent prépondérantes devant les forces électriques. (ALLOUL MARMOR 2002)

Forces de capillarité

L'adhérence d'une particule sur une paroi augmente avec l'humidité relative de l'air ambiant. Ce phénomène devient appréciable lorsque l'humidité relative est supérieure à 70%, (GUICHARD 1969). Ceci est dû à l'apparition d'un film par condensation capillaire entre la paroi et la particule, la force d'adhésion est calculée par la relation suivante :

$$F_{cap} = 2\pi d_p \sigma \quad (I.29)$$

Avec d_p le diamètre de la particule sphérique et σ la tension superficielle d'un film liquide.

I.2.7 Remise en suspension des particules fixées sur une paroi

Les forces de traînée et de portance sont les forces qui interviennent de façon prépondérante dans le réentraînement des particules fixées sur une paroi. La force de traînée est déterminante pour le détachement des particules, la force de portance joue un rôle important dans le réentraînement (ALLOUL-MARMOR, 2002).

Du fait d'un jet d'air, la particule est soumise à une force d'entraînement dont l'action s'oppose à celle de la force d'adhésion. La particule peut glisser ou rouler sur la paroi sous l'action de la force aérodynamique. Ainsi, soit elle se loge en un endroit où les forces d'adhésion sont plus fortes, soit elle acquiert une vitesse, donc une énergie cinétique suffisante lui permettant d'être arrachée.

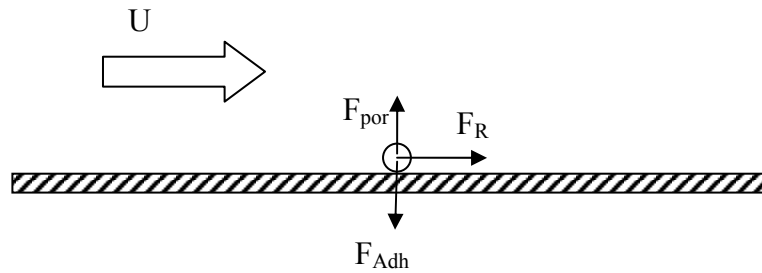


Figure I.11 : Réentraînement des particules.

La force de traînée, horizontale, est une force déterminante pour le détachement des particules. Cependant leur mise en mouvement se faisant avec un angle proche de l'angle droit par rapport à la paroi, la force verticale de portance possède donc aussi une certaine importance dans le mécanisme de réentraînement. Quand un écoulement turbulent est au voisinage d'une paroi, les caractéristiques de la couche limite, peuvent être déterminées à partir de la masse volumique du fluide ρ , de la viscosité cinématique ν du fluide, et de la contrainte de cisaillement à la paroi τ_0 . Cette dernière est reliée à la vitesse de frottement v_* (vitesse fictive de fluctuation turbulente au contact de la sous-couche laminaire) par la relation

$$V_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

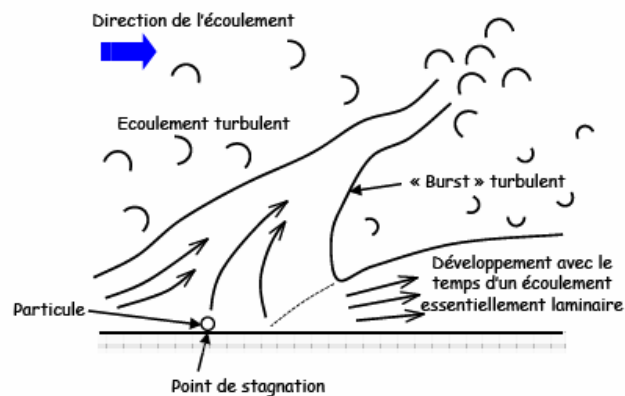


Figure I.12 : représentation schématique d'une structure cohérente à proximité d'une paroi.

Le processus de mise en suspension est le résultat de la compétition entre les forces d'adhérence et les forces aérodynamiques agissant sur une particule ou un ensemble de particules. Cette compétition met donc en jeu un ensemble de paramètres liés au dépôt, aux particules, à la surface sur laquelle sont déposées les particules, à l'écoulement d'air et à l'environnement.

Dans un premier temps, il était donc important de répertorier les paramètres susceptibles d'influencer l'adhérence et, par conséquent le phénomène de réentraînement.

L'objectif de ce travail bibliographique est de pouvoir classer ces différents facteurs d'après les travaux déjà effectués. Notre inventaire des paramètres a été effectué sur la base d'études publiées dans le domaine de l'adhésion mais surtout dans le domaine de la mise en suspension. Le tableau ci-dessous présente les différents paramètres par type et par ordre d'importance décroissant.

Paramètres liés aux particules	Granulométrie de la poudre
	Morphologie
	Type de contamination déposée
	Porosité du lit de particules
	Homogénéité du dépôt
	Teneur en eau de la poudre
	Vieillessement du dépôt
	Etat électrostatique
Paramètres inter particulaires	Agglomération des particules
	Saltation
Paramètres liés à la surface de dépôt	Type de la surface
	Rugosité de la surface
Paramètres lié au milieu environnant	Durée d'exposition
	Température
	Humidité relative

Tableau I.1 : Paramètres agissant sur la remise en suspension des particules.

Détachement des particules

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

- Par centrifugation : on impose aux particules une force centrifuge normale à la surface d'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 détacher 50% (ABADIE 2000).

- 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 (HINDS et ZIMON 1982).

On remarque qu'en général, la force d'adhérence est proportionnelle au diamètre d_p de la particule, alors que 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.

Il est crucial 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 (BOUILLY 2003). Par contre, les couches formées par l'agglomération de ces particules peuvent être facilement disloquées en fines tranches.

Forces agissant sur la remise en suspension

Beaucoup d'auteurs ont traité de la remise en suspension dans la littérature. Tous sont d'accord pour dire que le phénomène est complexe et nécessite une compréhension approfondie des mécanismes de transport et diffusion de particules dans un milieu fluide.

Ci-dessous une liste non exhaustive de différents phénomènes propres à la remise en suspension.

D'après (ZISKIND 1994), deux approches peuvent être distinguées :

- L'approche quasi-statique : elle suppose que lorsque la vitesse du fluide est assez élevée, les forces hydrodynamiques sont alors supérieures aux forces d'adhésion et provoquent ainsi la remise en suspension. Cependant, des mesures expérimentales de remise en suspension indiquent que le décollement de la particule à la surface n'est pas instantané. De plus, (LENGWEILER 1998) indique que d'après (SHAW 1996), une augmentation de la vitesse d'air n'implique pas une augmentation de la remise en suspension. Il explique ce phénomène par les forces électrostatiques induites par le mouvement de l'air.

- Une approche utilisant le concept de force de soulèvement fluctuante a été développée par (REEKS 1988) dans laquelle ils ont proposé un équilibre d'énergie à la place d'un équilibre de force. Leur modèle est basé sur le fait que lorsqu'une particule est exposée à un écoulement turbulent, il y a un transfert d'énergie à la particule. Une particule peut être remise en suspension lorsqu'elle a accumulé assez d'énergie pour être détachée de la surface. Cette approche est intéressante car elle explique le réentraînement de particules qui adhèrent très fortement.

D'après (ZISKIND 1994), de manière générale, les structures cohérentes sont la cause de la remise en suspension, mais leur action diffère selon la taille des particules. Les structures en vortex et les couches de cisaillement près des parois sont les deux mouvements cohérents les plus importants qui influent sur la remise en suspension des particules fines. Toutefois, il insiste sur le fait que les mécanismes expliquant le phénomène de remise en suspension restent encore mal connus.

Force de réentraînement

Si l'écoulement est stable, la force de traînée est horizontale et parallèle à la surface. Dans le cas d'une particule sphérique de diamètre adimensionnel d_p^+ , cette force de traînée est égale à :

$$F_D = 8,02\rho v^2 (d_p^+)^2 \quad (I.30)$$

Certains auteurs prennent en compte l'ensemble des mouvements éventuels de la particule (glissement, rotation, oscillation,...) avant son détachement de la paroi. Ils font alors intervenir les mouvements et les couples des différentes forces présentes. Ainsi à partir de leur modèle *Rock'n Roll*, (REEKS et HALL 2001) aboutissent à l'expression de la force de réentraînement :

$$F_R = 10,45\rho v^2 \left[1 + 300 \left(\frac{d_p}{2} \right)^{-0,31} \right] \left(\frac{d_p^+}{2} \right)^{2,31} \quad (I.31)$$

Dans un travail récent, (ALLOUL-MARMOR 2002) a montré que les deux paramètres les plus importants sont la vitesse du courant d'air et la granulométrie des particules. Elle a défini la fraction réentraînée par la relation suivante :

$$K_R = \frac{\Delta m}{m_0} \quad (I.32)$$

Avec Δm la masse de particules réentraînées et m_0 la masse de particules disposées initialement sur la surface.

La Figure I.13 représente l'évolution de la fraction réentraînée en fonction de la vitesse de l'air, pour différentes tailles de particules.

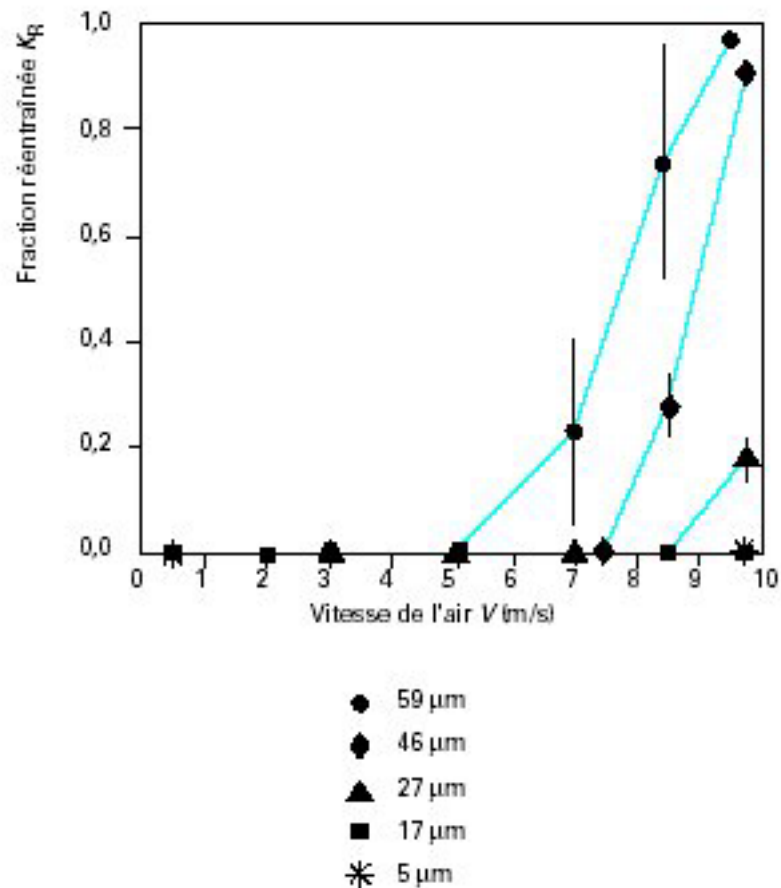


Figure I.13 : Evolution de la fraction réentraînée en fonction de la vitesse de l'air, pour différentes tailles de particules, (ALLOUL-MARMOR 2002).

D'après la Figure I.16, on peut voir qu'il faut une vitesse d'écoulement d'environ $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour que des particules de $5\mu\text{m}$ soient réentraînées. Pour notre étude, on peut donc considérer que les particules qui sont collées sur les parois ne seront pas réentraînées (vitesse d'écoulement $<1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

L'ensemble des forces présentées ici agissent sur les particules et sont les causes de leurs mouvements dans l'air. Cependant, selon le cas traité, certaines forces deviennent négligeables devant les autres. Par exemple, en l'absence d'un gradient de température élevé, on négligera les forces de thermophorèse.

Dans la section suivante, nous présentons le comportement des particules dans des conduits de ventilation et les mécanismes de dépôt.

Effet du dépôt sur la remise en suspension

LENGWEILER (1998) présente des mesures de concentrations en poussières comme une fonction de paramètres environnementaux (température, humidité,..), des conditions de surface et du type de particules sous des conditions contrôlées en laboratoire dans une petite soufflerie. Les résultats montrent que l'orientation de la surface est le paramètre qui influence le plus la charge en particules.

Il semble que l'influence de la turbulence est plus importante pour la déposition que pour la remise en suspension. Toutefois, la déposition et la remise en suspension semblent être grandement dépendantes de la vitesse de l'air.

La charge en particules sur le sol semble être indépendante de l'humidité relative et de la température. Il y a probablement une dépendance mais elle peut être négligée comparativement à la gravité.

Mécanismes de la remise en suspension

Divers articles, relatant des expériences sur les allergènes et les disséminations de brins d'herbes, font état d'études menées sur les mécanismes provoquant la remise en suspension.

OULD-DADA (2001) détaille une étude réalisée dans une soufflerie où de jeunes arbres, sur lesquels des particules ont été déposées, ont été exposés à une vitesse d'air constante de 5 m/s. Il a donné des estimations quantitatives sur le potentiel de ce type d'arbre à fournir le risque d'inhalation d'aérosols dans l'environnement d'une forêt et l'existence d'une source secondaire de contamination après une déposition.

GILLETTE (2004) a étudié la remise en suspension à petite échelle et plus particulièrement la remise en suspension de l'herbe. On peut voir que des études expérimentales sur les mouvements de particules ont montré que les particules entraînées dans un fluide turbulent ont tendance à avoir un mouvement instable vertical (SUTHERLAND 1967).

Les expériences de GILLETTE (2004) suggèrent que la remise en suspension :

- augmente avec les impacts mécaniques,

- due aux effets mécaniques prédomine pour les particules de 2 μm , mais pour des particules plus grandes les mécanismes aérodynamiques sont plus efficaces.

GOMES (2004) décrit le développement d'une méthodologie expérimentale et analytique pour étudier « l'aérosolisation » de particules quand les réservoirs de particules sont soumis à des perturbations dues aux activités humaines. Le but est d'établir une base de données détaillant la remise en suspension comme une fonction des vibrations du sol et des écoulements transitoires proches de la surface, caractéristiques de la marche humaine.

D'une manière générale, le facteur de remise en suspension est défini comme le rapport de la concentration en particules par la concentration en particules par unité de surface (voir équation I.33).

$$RF(m^{-1}) = \frac{\text{concentration de particules (nombre de particules.m}^{-3}\text{)}}{\text{concentration surfacique (nombre de particules.m}^{-2}\text{)}} \quad (\text{I.33})$$

Une deuxième manière d'exprimer la remise en suspension est d'utiliser le taux de remise en suspension défini comme suit :

$$RR(\text{min}^{-1}) = \frac{\text{taux de dépôt surfacique (nombre de particules.s}^{-1}\text{.m}^{-2}\text{)}}{\text{concentration surfacique (nombre de particules.m}^{-2}\text{)}} \quad (\text{I.34})$$

Bien que généralement les mécanismes de perturbations au sol puissent être mécaniques, aérodynamiques et électrostatiques, il n'y a pas encore de consensus pour expliquer la théorie de remise en suspension qui peut prédire les effets des perturbations de la surface du sol sur le ré-entraînement des particules.

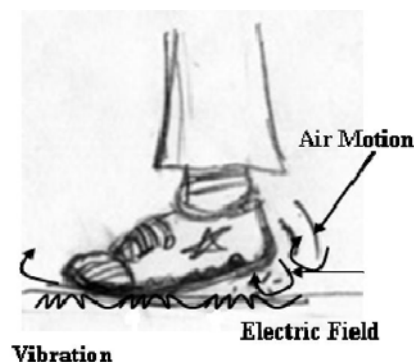


Figure I.14 : Remise en suspension par les pas humains

La remise en suspension dans une pièce

L'article de (KARLSSON 1996), décrit brièvement une expérience et quelques résultats de remise en suspension dans une pièce.

Les résultats montrent également que la remise en suspension est un phénomène important et que le taux de remise en suspension doit être donné en fonction de la taille de l'aérosol, de l'activité humaine et du revêtement de sol.

L'étude de (BIASI 2001) fait état d'un modèle simple permettant d'étudier la remise en suspension en prenant comme hypothèse une distribution log-normale pour les forces d'adhésion. Il est utilisé pour l'analyse de mesures de remise en suspension issues de séries d'expérimentations de la littérature et couvrant des gammes de particules de tailles inférieures au micron jusqu'à 30 μm .

Le but du travail décrit par (BIASI 2001) est d'exposer le rôle que peuvent jouer des particules remises en suspension dans l'émission de matériel radioactif provenant d'un réacteur nucléaire après un accident grave.

En introduction, deux types de modèles sont décrits. Il s'agit de modèles dynamiques (accumulation d'énergie) et de modèles quasi-statiques (équilibre de moment/force).

BIASI 2001 décrit assez précisément les équations physiques mises en jeu dans le modèle de Reeks et Hall (ce modèle étant basé sur l'équation du mouvement d'une particule) puis détaille et analyse des expérimentations menées par HALL ET AL. (1988) sur la remise en suspension.

L'article de LEDE (1994) a pour objet l'étude théorique du comportement hydrodynamique de particules entraînées par un jet gazeux dirigé perpendiculairement vers une surface plane (cas des jets gazeux sortants de buse). Elle est réalisée au voisinage direct d'une surface réceptrice. La modélisation a été effectuée par une approche lagrangienne de la description de la trajectoire des particules moyennant des hypothèses simplifiées sur le champ de vitesse de l'écoulement gazeux. La comparaison de ces résultats avec des données expérimentales révèle un bon accord quantitatif.

Certains résultats obtenus par LEDE (1994) montrent que :

- les trajectoires sont faites d'une succession de chocs et rebonds d'autant plus importants et nombreux que les particules sont plus grosses.
- au delà de $d_p = 30 \mu\text{m}$, la distance d'arrêt augmente avec la granulométrie. Pour les particules plus fines, le phénomène est inversé : les forces de frottement l'emportent sur les forces d'inertie et les particules sont entraînées plus loin dans le jet pariétal.
- les particules subissent un certain nombre de chocs séparés par des rebonds avant de se déposer à une certaine distance du point d'arrêt de jet. Cette distance d'arrêt dépend fortement de la granulométrie des particules. Elle est par contre peu sensible aux coefficients de frottement et à la distance buse/paroi.

ZISKIND (1994) indique également que les modèles actuels basés sur l'approche d'équilibre de force, tout comme ceux basés sur l'accumulation d'énergie, ne tiennent pas compte des effets des moments qui agissent sur les particules. Il insiste sur le fait que les données expérimentales disponibles actuellement ne sont pas suffisantes pour les modèles existants.

Selon *LENGWEILER*, les modèles CFD (Computational Fluid Dynamic) existants ne contiennent pas ou ne contiennent qu'un modèle très simple de déposition, c'est à dire une déposition totale sur le sol et rien sur les murs ou les plafonds. Il semble donc d'après ces deux auteurs que les codes de calcul soient encore à perfectionner. Toutes les 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 le comportement vis-à-vis des parois rencontrées réellement dans le bâtiment.

En 2000, *ABADIE* a pris en compte deux lois de parois dans son approche CFD, (loi physique basée sur les vitesses de rebond, et loi probabiliste) pour simuler le comportement des particules au niveau des parois de l'ambiance. Mais il faut souligner que l'approche CFD est très pénalisante car lourde en temps calcul (surtout lorsque les particules sont fines, *DENES-BEJAT* (2007)).

Par contre l'approche globale, plus rapide, donne des résultats satisfaisant (*ABADIE* et al. 2002) dans le cas des ambiances confinées (par contre les difficultés sont importantes pour les grands volumes semi-ouverts *FORTAIN* (2008)).

I.3. Approche globale du comportement particulaire

Afin de déterminer la concentration particulaire de l'ambiance intérieure, nous avons besoin de connaître les interactions des particules avec leur environnement intérieur. Nous pouvons dissocier ces interactions en trois ensembles. Tout d'abord, nous considérons les interactions dues à la ventilation (échanges entre l'extérieur et l'ambiance), caractérisées généralement par le taux de renouvellement d'air. Ensuite, nous pouvons considérer la présence d'une source interne de polluants particulaires. Finalement, nous considérons les interactions avec les parois (phénomènes de dépôt, de ricochet ou bien de remise en suspension), (Abadie 2000). La Figure I.15 illustre les différents échanges particulaires à l'intérieur d'une enceinte.

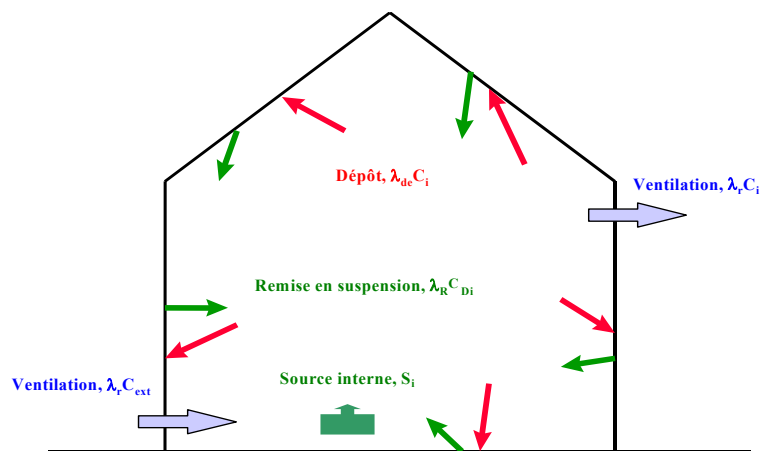


Figure I.15 : Mouvement des particules dans une enceinte.

Le bilan de conservation massique du polluant particulaire dans une enceinte mono zone peut être exprimé par la relation suivante, Nazaroff (1993) :

$$\frac{dC_i}{dt} = fp \times \lambda_r C_{ext} - \lambda_r C_i - \lambda_{de} C_i + \lambda_R C_{Di} + S_i \quad (I.35)$$

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

En l'absence de ventilation et de source de pollution particulaire interne, l'équation I.35 peut se simplifier. La concentration particulaire décroît avec le temps et la solution de l'équation devient :

$$C(t) = C_0 \exp(-\lambda_d t) \quad (I.36)$$

Où $C(t)$ est la concentration en particules à l'instant t , C_0 est la concentration initiale et λ_d est la constante de dépôt en $[s^{-1}]$. Dans l'expression, λ_d inclue la sédimentation, la diffusion et les autres mécanismes dus aux forces extérieures (remise en suspension...).

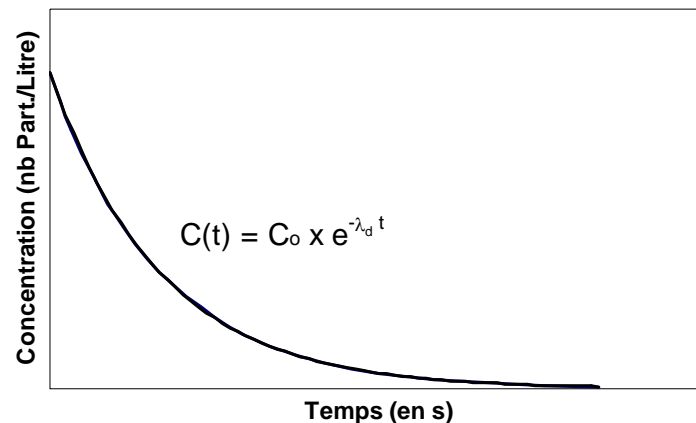


Figure I.16 : Représentation graphique de l'équation I.38.

Les phénomènes de coagulation ne sont pas pris en compte du fait du très faible impact comparé aux autres mécanismes, (*Okuyama 1986*).

On utilise également la vitesse de dépôt V_d pour décrire le phénomène de dépôt particulaire dans une enceinte :

$$V_d = \lambda_d \times \frac{V}{S} \quad (I.37)$$

Cette vitesse de dépôt permet une comparaison directe du phénomène de dépôt entre différents lieux de mesures puisqu'elle tient compte des caractéristiques géométriques de l'enceinte.

La constante de dépôt traduit le « niveau de pollution » d'une ambiance ventilée. Ce paramètre pouvant être évalué de façon globale (concentration dans une pièce) ou encore de façon plus fine (nombre de particules déposées sur une paroi par exemple) et c'est une évaluation de type CFD qui s'impose.

I.4. Approche fine de type CFD

Les évaluations CFD (Computational Fluid Dynamic) sont en générales préconisées lorsque l'on est en présence d'hétérogénéités dans l'ambiance et que l'hypothèse d'une concentration homogène n'est pas acquise. Deux type d'approche sont alors possible l'approche eulérienne (où les particules sont vues comme un milieu continu) et l'approche lagrangienne (où les particules sont traitées de façon individuelle).

Les modèles eulériens et lagrangiens

Dans les modèles eulériens, on considère que les mécanismes de transport et de dépôt s'additionnent. Cette hypothèse est vraie dans la plupart des cas. Cependant, YUDINE (1959) a montré que l'effet de la diffusion turbulente diminue devant l'influence des forces gravitationnelles. Le comportement des particules est modélisé en introduisant la concentration moyenne dans un élément de volume et par l'équation de conservation massique des particules.

Dans l'approche lagrangienne, l'air est considéré comme un milieu continu et la trajectoire des particules est prédite à partir de la somme de l'ensemble des forces agissant sur celle-ci. En modélisant les trajectoires d'un nuage de particules (initialement réparties à différents points de localisation), on peut obtenir la vitesse de dépôt des particules.

Les deux méthodes nécessitent la connaissance de l'écoulement turbulent. Des comparaisons entre ces méthodes ont été réalisées par DURST (1984), GOUESBET & BERLEMONT (1999).

En général, les simulations lagrangiennes représentent le mieux possible le mouvement des particules puisqu'elles se réfèrent aux aspects physiques liés aux particules, mais elles requièrent un temps de calcul coûteux.

Ces modèles ont quelques limitations. En effet, les particules sont considérées sphériques. L'écoulement turbulent est toujours considéré comme pleinement développé. La concentration des particules est considérée faible afin d'ignorer les interactions particule-particule. Les particules ne modifient pas la structure de l'écoulement. Lorsqu'une particule est déposée sur la paroi d'un conduit, elle ne se détache jamais.

a) Les modèles eulériens

Il existe trois types de modèles eulériens: les modèles basés sur un gradient de diffusion, les modèles de libre parcours et les modèles de turbophorèse. Les deux premiers modèles résolvent l'équation de conservation de la masse pour les particules alors que le modèle de turbophorèse résout également l'équation du moment.

Le modèle de libre parcours a été introduit par *FRIEDLANDER & JOHNSTONE (1957)*. Par la suite, plusieurs auteurs ont ajouté des modifications. On pourra se reporter à *Papavergos & HEDLEY (1984)*, ou bien *WALLIN (1994)*, pour une revue bibliographique de l'ensemble de ces modifications. Tous ces modèles de libre parcours, ne prédisent que le dépôt sur des surfaces verticales lisses. Le modèle de libre parcours le plus proche des valeurs expérimentales est celui de *DAVIES (1966)*.

BROWNE (1974) a été le premier auteur à prendre en compte la rugosité des surfaces en modifiant le modèle de *DAVIES (1966)*. *EL-SHOBOKSHY & ISMAIL (1980)* ont choisi de modifier le modèle de *LIU & ILORI (1974)* pour prendre en compte l'effet de la rugosité des surface ainsi que les phénomènes de diffusion brownienne. *WOOD (1981)* a également présenté un modèle de libre parcours qui prend en compte la diffusion brownienne et la rugosité des parois en s'appuyant sur les données expérimentales proposées par *LIU & AGARWAL (1974)*. Pour prendre en compte la rugosité, il a utilisé la même démarche que *BROWNE (1974)*.

Le modèle basé sur un gradient de diffusion a été introduit par *SEHMEL (1970)*. Il a ensuite étendu son modèle pour des surfaces horizontales, cependant ces corrélations sont basées sur peu de données, en comparaison à celles relatives aux surfaces verticales. *LAI & NAZAROFF (2000)* ont également utilisé ce genre de modèle pour des surfaces à l'intérieur d'un bâtiment. *Sippola (2002)* a montré que ce genre de modèle était probablement inadapté pour la prédiction du dépôt particulaire dans les gaines de ventilation lorsque les vitesses d'écoulement sont élevées ou lorsque les particules ne suivent pas l'écoulement (forces gravitationnelles des particules).

Le modèle de turbophorèse a été introduit par *CAPORALONI (1975)*. *GUHA (1997)* et *Young & LEEMING (1997)* ont ensuite développé ce genre de modèle. Ces modèles semblent les plus adaptés pour prédire le dépôt des particules dans un conduit de ventilation. Cependant, ils ne sont applicables que pour des écoulements pleinement turbulents.

b) Les modèles lagrangiens

Les premiers travaux dans ce domaine ont été réalisés par HUTCHINSON (1971) et REEKS & SKYRME (1976). La première simulation lagrangienne sur le dépôt des particules pour un écoulement turbulent a été présentée par KALLIO & REEKS (1989). Par la suite, LI & AHMADI (1993) ont utilisé cette méthode, notamment pour étudier le rôle de la rugosité des surfaces. Ils ont montré que l'augmentation de la rugosité des surfaces entraîne une augmentation de la vitesse de dépôt. Plus récemment, CHEN ET AHMADI (1997) ont introduit les interactions suivantes : diffusion brownienne, forces de gravité et de cisaillement. Pour tous ces modèles la turbulence est modélisée à l'aide de modèles stochastiques.

La première simulation lagrangienne sur le dépôt des particules utilisant un champ de vitesse généré par la méthode DNS (Direct Numerical Simulation) a été effectuée par MCLAUGHLIN (1989). Ensuite, nous pouvons citer les travaux de OUNIS (1991) ainsi que ceux de BROOKE (1994). Du fait de temps de calculs trop coûteux, la simulation numérique directe est limitée à des écoulements à faible nombre de Reynolds.

WANG & SQUIRES (1996) ont démontré qu'il était possible de simuler le mouvement des particules en utilisant la méthode de simulation des grandes échelles (LES) pour générer l'écoulement et ainsi d'atteindre des nombres de Reynolds plus élevés.

L'évaluation du dépôt des particules par des méthodes lagrangiennes a montré de bons résultats en comparaison avec des données expérimentales, SIPPOLA (2002). Cependant, peu de simulations ont été réalisées pour des surfaces rugueuses. La contrainte principale de ces méthodes lagrangiennes est leur temps de calcul.

Les modèles de sous-couche

Les modèles de sous-couche utilisent un schéma lagrangien pour calculer les trajectoires des particules dans la région proche de la paroi. Cependant, on ne calcule que quelques trajectoires de particules dans la sous-couche. La vitesse de dépôt est calculée en fonction du pourcentage de trajectoires qui entrent en contact avec la paroi. Dans ce domaine, nous pouvons citer les travaux de CLEAVER & YATES (1975) qui ont proposé un modèle mathématique de sous-couche pour des surfaces lisses. Ensuite, FICHMAN (1988) a proposé un modèle de sous-couche qui prend en compte l'équation du moment des particules.

Le modèle de sous-couche le plus développé est celui de *FAN & AHMADI (1993)*, incluant les forces de poussée, de cisaillement et de gravité. Il est probablement le plus approprié pour déterminer numériquement le dépôt des particules dans des gaines de ventilation puisqu'il ne nécessite pas des temps de calculs aussi longs que pour une méthode lagrangienne "complète".

Modélisation de la remise en suspension

ZISKIND (1994) explique qu'un grand nombre de modèles théoriques ont été développés ces dernières années pour expliquer le phénomène de remise en suspension.

En général, ils sont basés sur le concept d'éjection de turbulence et incluent l'équilibre de la force hydrodynamique comme un critère de remise en suspension de particules. Une alternative à cette approche est fondée sur le transfert d'énergie turbulente à la particule et d'équilibre d'énergie potentielle. Le taux de remise en suspension et la concentration en particules sont généralement tirés de l'analyse théorique.

a) Modèles basés sur l'équilibre de force

Le concept d'équilibre de force suppose que la force hydrodynamique ou celle de fluctuation dépasse la force d'attraction à la surface, ce qui entraîne la remise en suspension.

En résumant les études sur la remise en suspension trouvées dans la littérature, *WEN ET KASPER (1989)* ont conclu que le concept de structures turbulentes aléatoires avec une fréquence temporelle et spatiale est un des mieux adapté à l'expérimentation et permet la dérivation du taux de remise en suspension. Il a été aussi remarqué que le phénomène de remise en suspension est constitué d'un phénomène à court terme et d'un autre à plus long terme. Malheureusement, *ZISKIND (1994)* ne précise pas quelles échelles de temps sont mises en jeu.

b) Modèles basés sur l'accumulation d'énergie

Une autre approche a été proposée par *REEKS ET AL (1988)*. Leur modèle était basé sur le fait que la force hydrodynamique ne dépasse pas la force d'attraction à la surface. Au lieu de cela, il y a un transfert d'énergie turbulente à la particule. Cette dernière peut être décollée de la

surface où elle se trouve après qu'elle ait emmagasiné assez d'énergie. De manière similaire, des particules peuvent être remises en suspension à l'aide d'une vitesse d'écoulement plus faible que celle calculée avec l'équilibre des forces attractive et aérodynamique.

d) Modèle à deux compartiments

SCHNEIDER (1998) décrit un modèle semi empirique, utilisé pour prévoir les concentrations en aérosols dans l'air et sur des surfaces. Le modèle est destiné à calculer des concentrations dans une pièce et non pas une exposition des personnes.

Ce modèle est constitué de deux compartiments, un pour l'air, l'autre pour le sol et est utilisé pour étudier la contribution des sources de particules internes et externes, les trajectoires des particules, de la remise en suspension et de la déposition sur les surfaces sur la concentration en particules dans une chambre. Le modèle est utilisé pour des particules de tailles comprises entre $0,1 \mu\text{m}$ et $100\mu\text{m}$. il inclut un facteur de modification de taille de particules (due à l'agglomération ou dé-agglomération) et un taux de disparition par déposition sur une surface de celles-ci. Une limitation du modèle est que la plupart des variables d'entrée comme le taux d'émission des sources, celui de la remise en suspension et la vitesse de friction sont corrélées.

Schneider indique également qu'une personne crée une vitesse d'air maximum de $0,22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à une distance de $0,2 \text{ m}$ au-dessus de la tête.

e) Remise en suspension sur une courte période :

LOOSMORE (2002) décrit les étapes du développement d'un modèle approprié à la remise en suspension pour de brèves périodes et compare les résultats obtenus avec différents codes. L'auteur ne donne pas d'indication très précise quant à l'échelle de temps mise en jeu ; il indique simplement que des mesures réalisées en tunnel peuvent être appliquées à de la remise en suspension sur une courte échelle de temps, à savoir moins d'un jour. Il examine ensuite des séries de mesures de référence faites en tunnel applicables à de la remise en suspension sur une courte échelle de temps (moins d'un jour). Les mesures ont montré l'importance d'inclure la dépendance au temps dans la modélisation de la remise en suspension sur une courte échelle de temps. Il détaille ensuite l'évaluation de plusieurs modèles sur ces mesures.

I.5. Expérimentation sur les échanges particulaires dans le bâtiment

Comme nous l'évoquions plus haut, c'est les phénomènes de dépôt particulaire qui ont largement été étudiés dans la bibliographie.

Nous pouvons dissocier les études en modèles réduits et les études dans des pièces de dimension courante (échelle 1). Dans la littérature, quelques valeurs de coefficients de dépôt dans des maisons réelles sont reportées (*ÖZKAYNAK ET AL. 1996*) en mesurant les concentrations en particules de diamètre inférieur à $2,5\mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$) et celles inférieures à $10\mu\text{m}$ (PM_{10}). Cependant, Les mesures de ce type ne sont pas suffisantes pour évaluer les constantes de dépôt puisqu'elles dépendent de la taille des particules. Les données de ce type ne seront donc pas reportées dans ce document.

La figure I.17 et la figure I.19 (*LAI, 2002*) représentent les constantes de dépôt pour différentes tailles de particules. La figure I.18 et la figure I.20 représentent les vitesses de dépôt (définies précédemment par l'équation I.37). Les détails des conditions d'expérimentation sont répertoriés dans le tableau 1. Pour les très petites particules ($<0,1\mu\text{m}$), la diffusion brownienne et la diffusion turbulente sont les mécanismes dominants, tandis que pour les particules supérieures à $1\mu\text{m}$, ce sont les effets dus à la gravité qui sont prédominants. Pour les particules comprises entre $0,1$ et $1\mu\text{m}$, aucun phénomène ne prédomine, on parle de mode d'accumulation. En termes de risque pour la santé ce sont ces particules qui présentent le plus grand danger puisque ce sont elles qui ont un temps de résidence dans l'air le plus grand.

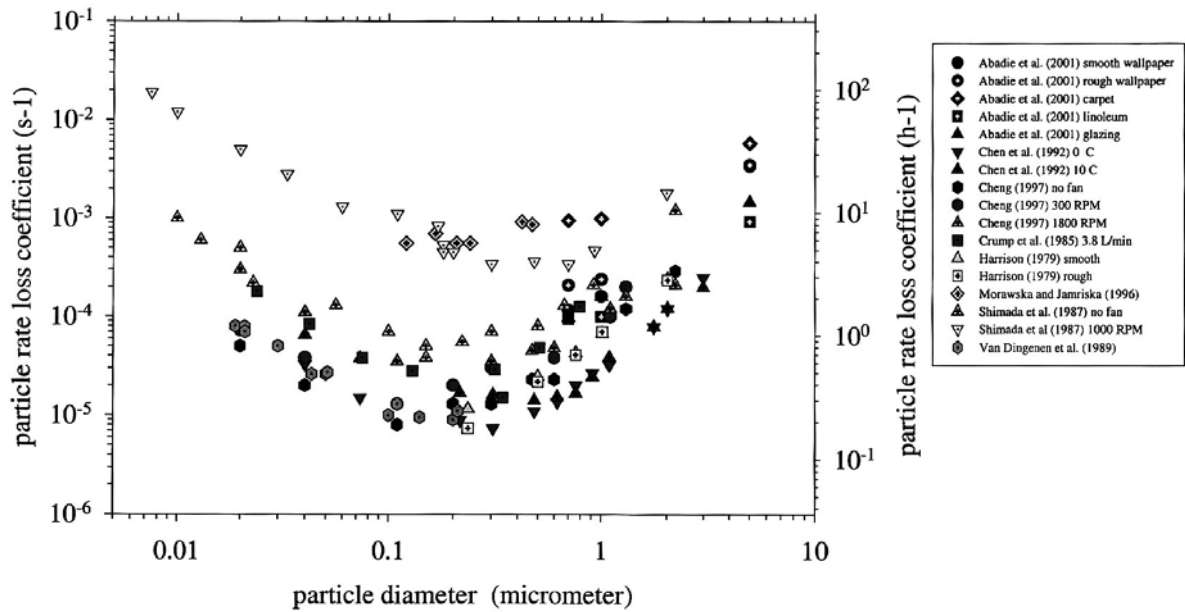


Figure I.17: Constantes de dépôt dans des enceintes de petite taille, Lai (2002).

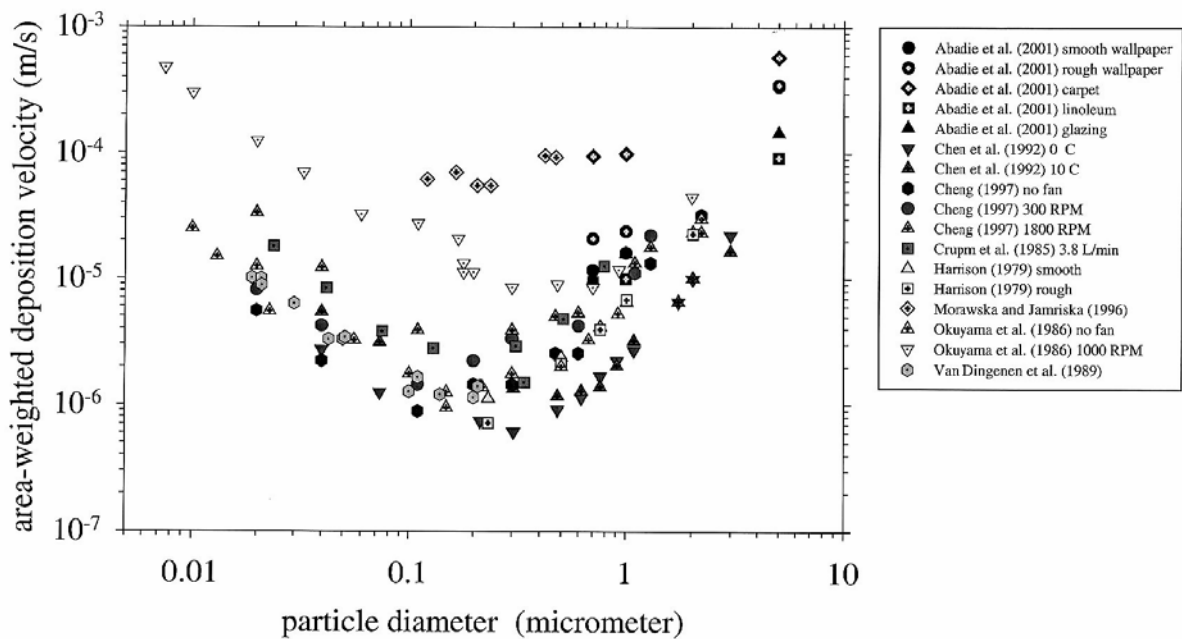


Figure I.18 : Vitesse de dépôt dans des enceintes de petite taille, Lai (2002).

On peut noter que les valeurs de MORAWSKA ET JAMRISKA (1996) sont significativement supérieures comparées aux autres valeurs. Ceci semble provenir des différents mécanismes de brassage du volume. Parfois, le brassage est dû à la convection naturelle (CHEN ET AL. 1992 ; HARRISON 1979 ; VAN DINGENEN ET AL. 1989) ou bien à un flux continu (CRUMP ET AL. 1983 ; MORAWASKA ET JAMRISKA, 1996 ; NOMURA ET AL. 1997). Pour la plupart des autres études, le brassage se fait par une hélice. Il est cependant difficile de caractériser les expériences du fait de descriptions incomplètes (température, différence en température de paroi et air, présence

de forces externes, la rugosité des surfaces, ou la turbulence de l'air). Tous ces paramètres ont une influence sur l'évaluation de la constante de dépôt.

Pour un volume parallélépipédique, λ_d peut être évaluée à partir de la vitesse de dépôt, THATCHER (2002), pour différentes orientations de surface et leur aire respective :

$$\lambda_d = \frac{V_{dh} \cdot A_h + V_{db} \cdot A_b + V_{dv} \cdot A_v}{V} \quad (I.38)$$

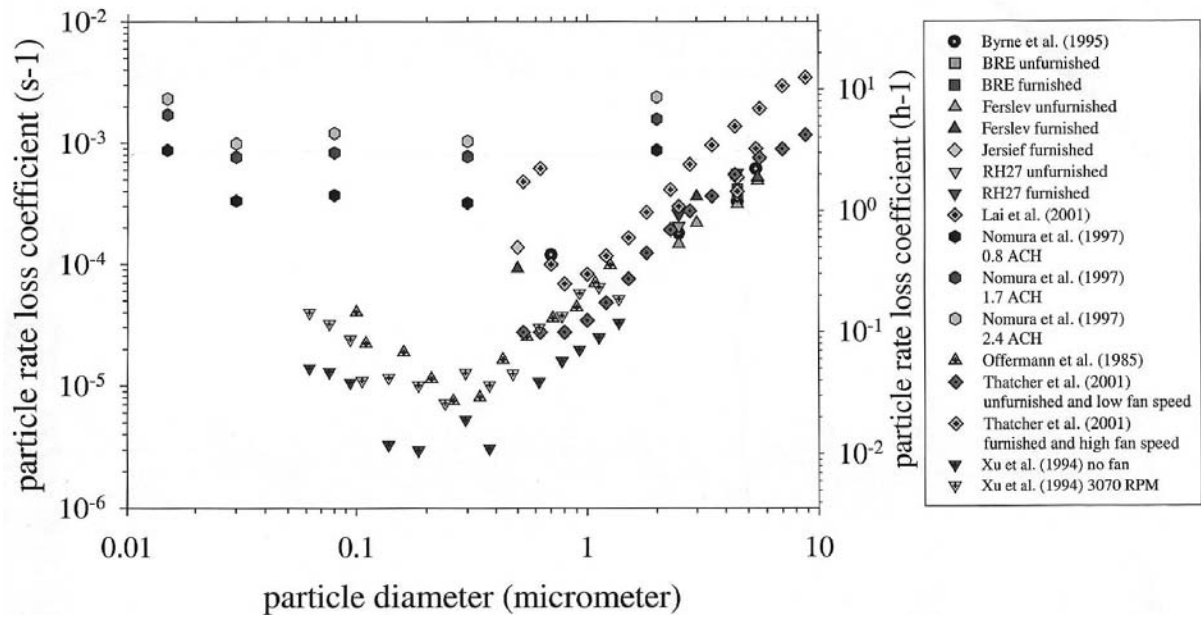


Figure I.19 : Constantes de dépôt dans des enceintes (échelle 1) ou des maisons, LAI (2002).

On peut noter qu'il est difficile de comparer les résultats puisque les ratios de volume peuvent varier d'un facteur 30.

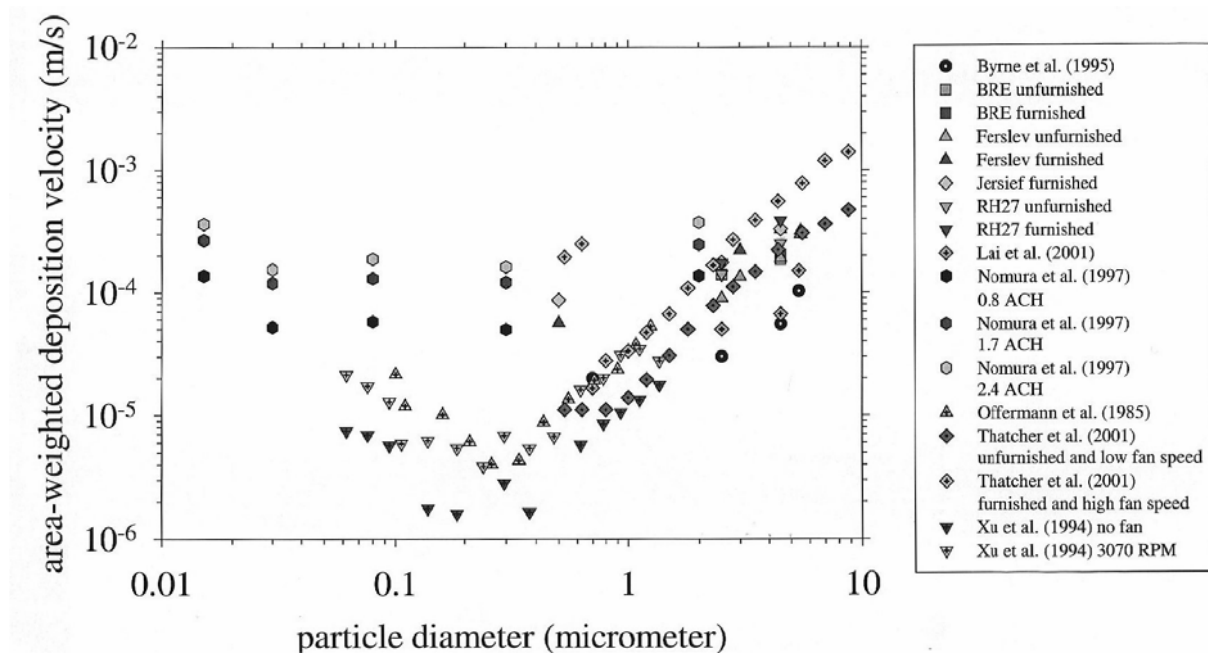


Figure I.20 : Vitesses de dépôt dans des enceintes (échelle 1) ou des maisons, LAI (2002).

Nous pouvons exprimer la vitesse moyenne de dépôt $\overline{V_d}$ de la manière suivante:

$$\overline{V_d} = \lambda_d \frac{V}{\sum A} \quad (I.39)$$

Avec λ_d la constante de dépôt en $[s^{-1}]$, V le volume de l'enceinte en $[m^3]$, et $\sum A$ la surface totale de l'enceinte en $[m^2]$.

Pour notre cas de laboratoire, nous nous intéressons plus particulièrement aux études menées soit dans des enceintes à l'échelle 1 soit dans des maisons.

BYRNE ET AL. (1995), *LAI ET AL., (2001)* ont mesuré la constante de dépôt des particules de taille comprise entre 0,7 et 5,4 μm , ceci dans une cellule cubique en aluminium. Concernant les travaux de *BYRNE ET AL. (1995)*, la face interne était relativement lisse et le brassage était assuré par un ventilateur. *LAI ET AL. (2001)* a étendu les expériences en faisant varier la vitesse du ventilateur, et en y ajoutant des pseudo-3D éléments pour faire apparaître l'influence de la rugosité des surfaces.

FOGH ET AL. (1997) ont réalisé des expériences dans quatre différentes maisons. Ils ont mesuré les constantes de dépôt pour des particules de taille comprise entre 0,5 et 5,4 μm . Cependant nous n'avons pas d'information sur l'intensité turbulente ou sur l'écoulement d'air. Ce que l'on

peut remarquer c'est que la constante de dépôt augmente lorsque on ajoute du mobilier dans la maison.

OFFERMANN ET AL. (1985), ET XU ET AL. (1994) ont utilisé la même maison pour réaliser leurs expériences. Le volume de la maison est de $36,5\text{m}^3$ ($4,56\text{m}\times 3,38\text{m}\times 2,4\text{m}$). Les valeurs de constante de dépôt sont données pour des particules de taille comprise entre $0,9$ et $1,4\mu\text{m}$.

XU ET AL. (1994) ont mesuré les constantes de dépôt pour des particules de fumée de tabac. Deux configurations ont été testées : avec ou sans brassage de l'air. Les mesures sont réalisées pour des particules de taille comprise entre $0,05$ et $2\mu\text{m}$. La rugosité des surfaces n'est pas précisée.

NOMURA ET AL. (1997) ont mesuré les constantes de dépôt pour des particules de taille comprise entre 15nm et $2\mu\text{m}$. Les valeurs observées sont très supérieures aux études similaires, ceci est probablement dû à l'effet du taux de renouvellement d'air.

Une étude récente a permis de mettre en évidence le rôle du mobilier et de la vitesse de l'air, *THATCHER ET AL. (2002)*. Le volume de la pièce est de 14m^3 . Les particules étudiées sont de taille comprise entre $0,5$ et $10\mu\text{m}$. L'augmentation de la vitesse de brassage favorise le dépôt des particules, de même que la présence de mobilier.

Dans la pratique, les surfaces intérieures des bâtiments (excepté les vitres) sont rugueuses. Quelques études expérimentales ont mis en évidence l'influence de la surface sur le dépôt des particules. *HARRISON (1979)* a mené ses expériences dans une enceinte de $0,2\text{m}^3$, avec des particules de $0,2$ à $2\mu\text{m}$ de diamètre. Cependant il n'a pas trouvé de différence significative entre les surfaces lisses ou rugueuses.

ABADIE (2001) a étudié le dépôt particulaire pour différents revêtements de surface tels que le bois, la moquette ou le papier peint. L'enceinte expérimentale est cubique de $0,216\text{m}^3$ de volume et brassée à l'aide d'une hélice (figure I.21). Trois tailles de particules sont étudiées : $0,7$, 1 et $5\mu\text{m}$. Les valeurs des constantes de dépôt sont relativement élevées d'une part à cause de la rugosité des surfaces et d'autre part à cause de la vitesse de brassage. L'écoulement d'air généré à l'intérieur de l'enceinte correspond à une gamme de vitesses comprise entre $0,5$ et $2,9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ et l'intensité turbulente varie de 30 à 57% .



Figure I.21 : Enceinte de ABADIE ET AL. (2001).

L'originalité de cette étude a été d'introduire un coefficient de captation lié aux caractéristiques des revêtements. Puisque la vitesse de dépôt V_d augmente avec la rugosité du revêtement, il suffit de multiplier V_d par un coefficient K_c appelé coefficient de captation. Si $K_c=1$ on considère que la surface est lisse alors que si $K_c>1$ on considère que la surface est rugueuse. Ils ont remarqué que ce coefficient de captation peut être très élevé pour les particules inférieures à $1\mu\text{m}$ ($K_c=6,1$) alors qu'il n'atteint que 1,8 pour les grosses particules ($5\mu\text{m}$).

Le tableau I.2 résume l'ensemble des conditions expérimentales, des études commentées précédemment ; aussi bien pour des cellules test que pour des maisons. La taille des particules étudiée y est reportée ainsi que les caractéristiques géométriques du volume étudié et le mécanisme de brassage.

Auteurs	Taille des particules (μm)	Dimension enceinte (m) Et surface/volume (m^{-1})	Mécanisme de brassage	Type d'enceinte et Texture des parois
<i>Abadie et al. (2001)</i>	0.7, 1 et 5	0.6x0.6x0.6, S/V=10	Hélice de brassage	Cellule test, lisse
<i>Byrne et al. (1995)</i>	0.7, 2.5, 4.5 et 5.4	2x2x2, S/V=2	Hélice de brassage	Cellule test, lisse
<i>Chen et al. (1992)</i>	0.04 - 3	165L cylindre, S/V=12	Convection naturelle	Cellule test, lisse
<i>Cheng (1997)</i>	0.005 - 2.2	161L sphère, S/V=9	Hélice de brassage	Cellule test, lisse
<i>Crump et al. (1983)</i>	0.024 - 0.3	118L sphère, rugueuse, S/V=10	Flux continu 2.1L et 3.8L/min	Cellule test, lisse
<i>Harrison (1979)</i>	0.2 - 2	0.2m ³ , S/V=10.3	Convection naturelle	Cellule test, lisse et sable
<i>Lai et al. (2001)</i>	0.7, 2.5, 4.5, et 5.4	2x2x2, S/V=2	3 hélices de brassage	Cellule test, lisse et pseudo-3D éléments
<i>Morawska et Jamiriska (1996)</i>	0.12 - 0.5	1.44x1.44x1.44, S/V=4.2	Flux continu 0.37 et 0.74 vol/h	Cellule test, lisse
<i>Nomura et al. (1997)</i>	0.015, 0.03, 0.08, 0.3 et 2	0.75x0.75x1.8, S/V=6.4	Flux continu 0.8, 1.7 et 2.4 vol/h	Cellule test, lisse
<i>Offermann et al. (1985)</i>	0.09 - 1.25	4.56*3.38*2.37, S/V=1.87	Ventilation naturelle	Maison test
<i>Okuyama et al. (1986)</i>	0.01 - 0.2	2.6L cylindre, S/V=40	Hélice de brassage différentes vitesses	Cellule test, lisse
<i>Fogh et al. (1997)</i>				
1. Brè	2.5 et 4.5	32.1m ³ , S/V=2.05	Hélice de brassage	Avec et sans mobilier
2. Ferslev	0.5, 3, 4.5 et 5.5	74m ³ , S/V=1.64	arrêtée après brassage initial	Avec et sans mobilier
3. Jersie	0.5, 2.5, et 4.5	77.5m ³ , S/V=1.59	ensuite	Avec mobilier
<i>Xu et al. (1994)</i>	0.06 - 1.5	4.56x3.38x2.37, S/V=1.87	4 hélices de brassage	Maison sans mobilier
<i>Van Dingenen et al. (1989)</i>	0.019 - 0.21	230L sphère, S/V=7.89	Convection naturelle	Cellule test, lisse
<i>Thatcher et al. (2002)</i>	0.5 - 10	2.2x2.7x2.4, S/V=2.48	4 hélices de brassage	Cellule test, avec et sans mobilier
<i>El Hijri et al. (2007, 2008)</i>	0.3 - 1	1.5x2.5x2.5, S/V=2.88	1 hélice à 3 pales	Cellule test avec différents revêtements du sol

Tableau I.2 : Récapitulatif des expérimentations – Bibliographie.

I.6 Conclusion

A travers ces différentes études, on s'aperçoit qu'il est difficile de garantir la qualité de l'air à l'intérieur d'un bâtiment du fait de l'influence de plusieurs facteurs.

Nous avons pu notamment voir l'effet de la texture des surfaces, du mécanisme de brassage, de la présence de mobilier, ou bien encore des caractéristiques géométriques du volume étudié sur les valeurs de constantes de dépôt, les sources de pollution et la remise en suspension des particules.

Le but de notre étude étant d'inclure la remise en suspension des particules dans les modèles de prédiction de la concentration en polluant à l'intérieur des locaux, la principale difficulté sera de quantifier l'ampleur de la remise en suspension, due à une activité humaine, pour pouvoir l'identifier comme une source supplémentaire de pollution et ainsi espérer trouver des corrélations entre l'ampleur de la remise en suspension et certains aspects de l'activité humaine (intensité de l'activité, nombre des participant, corpulence...).

Pour tenter de remédier à ces difficultés nous nous orientons vers deux démarches :

- La première de type expérimentale vise à démontrer l'impact des pas de marche sur le remise en suspension de particules déposées sur un plancher. Plusieurs revêtements seront utilisés.
- La seconde démarche est une approche numérique du phénomène basée sur une analogie électrique : un montage électronique dont les composants reproduisent les caractéristiques physiques du problème (concentration, paramètre de dépôt et nature du revêtement du sol).

CHAPITRE 2

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA REMISE
EN SUSPENSION DES PARTICULES

Liste des figures

<i>Figure II.1</i>	<i>Disperseur de particules TOPAS SAG 410</i>
<i>Figure II.2</i>	<i>Générateur de particules HIAC ROYKO 256</i>
<i>Figure II.3</i>	<i>Neutralisateur de particules TOPAS EAN 581</i>
<i>Figure II.4</i>	<i>Principe de fonctionnement</i>
<i>Figure II.5</i>	<i>Schéma de montage</i>
<i>Figure II.6</i>	<i>Compteur de particules MetOne 227 A</i>
<i>Figure II.7</i>	<i>Compteur optique de particules GRIMM 1.108</i>
<i>Figure II.8</i>	<i>Fonctionnement de la PIV</i>
<i>Figure II.9</i>	<i>Stylet pivotant</i>
<i>Figure II.10</i>	<i>Capteur optique laser</i>
<i>Figure II.11</i>	<i>Capteur optique lumière blanche</i>
<i>Figure II.12</i>	<i>Capteurs optiques à triangulation</i>
<i>Figure II.13</i>	<i>Banc d'analyse de rugosité des matériaux</i>
<i>Figure II.14</i>	<i>Cellule test</i>
<i>Figure II.15</i>	<i>Système VMC avec filtre intégral</i>
<i>Figure II.16</i>	<i>Dispositif expérimental (PRIMEQUAL)</i>
<i>Figure II.17</i>	<i>Schéma synoptique du fonctionnement du caisson PRIMEQUAL</i>
<i>Figure II.18</i>	<i>Evolution du nombre de particules dans le temps (0.3=> 0.65µm)</i>
<i>Figure II.19</i>	<i>Mise en évidence de la remise en suspension (0.3=> 20µm)</i>
<i>Figure II.20</i>	<i>Cartographie des différents revêtements de sol utilisés</i>
<i>Figure II.21</i>	<i>Evolution du nombre de particules dans le temps (Bois)</i>
<i>Figure II.22</i>	<i>Evolution du nombre de particules dans le temps (Linoléum lisse)</i>
<i>Figure II.23</i>	<i>Evolution du nombre de particules dans le temps (linoléum rugueux)</i>
<i>Figure II.24</i>	<i>Evolution du nombre de particules dans le temps (Moquette)</i>
<i>Figure II.25</i>	<i>Analyse de la phase dépôt avec une courbe de tendance (Bois)</i>
<i>Figure II.26</i>	<i>Analyse de la phase dépôt avec une courbe de tendance (Linoléum lisse)</i>
<i>Figure II.27</i>	<i>Analyse de la phase dépôt avec une courbe de tendance (Linoléum rugueux)</i>
<i>Figure II.28</i>	<i>Analyse de la phase dépôt avec une courbe de tendance (Moquette)</i>
<i>Figure II.29</i>	<i>Représentation graphique des différents coefficients de dépôt</i>
<i>Figure II.30</i>	<i>Analyse de la phase de remise en suspension (Bois)</i>
<i>Figure II.31</i>	<i>Analyse de la phase de remise en suspension (Linoléum lisse)</i>
<i>Figure II.32</i>	<i>Analyse de la phase de remise en suspension (Linoléum rugueux)</i>
<i>Figure II.33</i>	<i>Analyse de la phase de remise en suspension (Moquette)</i>
<i>Figure II.34</i>	<i>Ampleur de la remise en suspension</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau II.1</i>	<i>Caractéristiques du Compteur de particules GRIMM</i>
<i>Tableau II.2</i>	<i>Coefficients de dépôt des différents matériaux en fonction du diamètre</i>
<i>Tableau II.3</i>	<i>Concentration des particules (Seuil 1 : équilibre après le dépôt ; Seuil2 : équilibre après la remise en suspension)</i>

II. Etude expérimentale de la remise en suspension des particules

L'étude vise à démontrer que l'activité humaine (notamment le déplacement) constitue un des facteurs contribuant à la remise en suspension des particules déjà déposées sur les différentes parois (surtout les planchers) de l'enveloppe bâti.

C'est dans ce sens qu'une campagne expérimentale a été programmée pour essayer de mettre en évidence les phénomènes de transport, de dépôt et finalement la remise en suspension des particules dans une enceinte fermée.

Les expérimentations ont été conduites dans l'enceinte expérimentale (cellule test) du LEPTAB.

La cellule test est un parallélépipède de 9 m^3 de volume, construit en bois et est équipé d'un système de ventilation multi configurations (haut-haut ; haut-bas ; bas-haut et bas-bas) muni d'un filtre intégral garantissant une excellente qualité de l'air injecté dans la cellule.

II.1. Introduction

Plusieurs thèses ont déjà été réalisées au LEPTAB pour étudier le comportement des particules au sein des locaux influencés par les systèmes de ventilation. Dans la première partie de ce chapitre, nous allons passer en revue ces différents travaux.

Les premiers travaux de SANDU (1999) ont été des travaux numériques qui ont permis le développement d'un code décrivant le mouvement particulaire dans des écoulements turbulents bidimensionnels. Ce code a été amélioré par ABADIE (2000) qui a élargi la validité au cas tridimensionnel, puis a étudié l'influence des revêtements sur le taux de dépôt des particules de $0,7$; $1,0$ et $5,0\mu\text{m}$ de diamètre.

Plusieurs revêtements ont été utilisés afin de définir des corrélations pouvant décrire une loi de paroi (dépôt, rebond ou ricochet de la particule) et de se rapprocher plus de la réalité.

Par la suite, BOUILLY (2003) a étudié le dépôt particulaire dans un des organes prédominant dans les installations de ventilation à savoir les gaines. Grâce à une mesure de fraction retenue, BOUILLY a pu mesurer le dépôt particulaire dans les gaines horizontales pour deux types de conduites : les gaines lisses et les gaines flexibles (annelées).

Un autre volet des travaux de BOUILLY traitait de l'influence de la stratégie de ventilation sur le dépôt des particules de taille comprise entre 0,3 et 10 μ m.

Plus récemment, DENES (2007) a étudié la cohérence de résultats obtenus dans des cellules de tailles différentes afin d'évaluer l'intérêt des résultats obtenus en cellules test de taille réduite.

II.2. Matériel utilisé

Générateurs de particules

- *Disperseur de poudres TOPAS SAG 410 :*

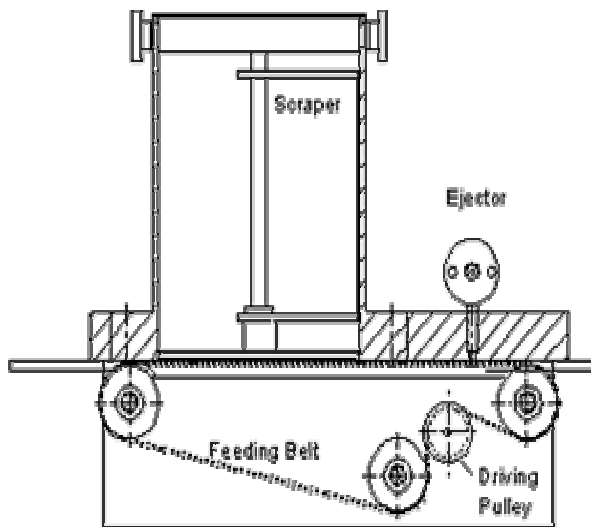


Figure II.1 : Disperseur de particules TOPAS SAG 410

Ce générateur disperse une poussière fine grâce à une double buse d'injection. La poussière est amenée par une courroie d'alimentation ce qui permet de régler le débit.

Le disperseur de poudre SAG est un générateur de poussière très précis et très stable sur une longue durée.

Fondamentalement, deux processus permettent la dispersion de poussière: l'alimentation continue dans le disperseur et la dispersion elle-même en un nuage aérosol.



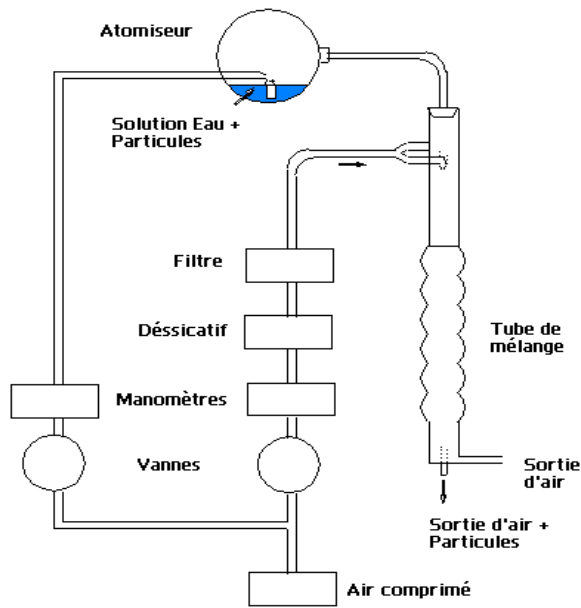
L'utilisation de bande doseuse est une technique éprouvée. La courroie est segmentée en volume définis ce qui permet une alimentation stable même pour de très petites quantités. La concentration en nombre de particules peut donc facilement être réglée en modifiant la vitesse de la courroie.

Une double buse d'injection (selon la norme ISO 5011) à la fin de la courroie prend la poudre (mélange polydispersé d'alumine ou d'orgasol) et la met sous forme d'aérosol. Un excavateur (scraper) spécialement conçu assure le remplissage constant de la courroie dentée et réduit l'influence du niveau de remplissage de la trémie. Selon la vitesse d'alimentation un réservoir plein peut fonctionner en continu environ 50 heures. Le réservoir peut aussi être rempli durant l'opération sans affecter la stabilité du dosage.

- ***HIAC/ROYCO modèle 256 :***



Figure II.2 : Générateur de particules HIAC ROYKO 256



Ce type de générateur utilise des microsphères de polystyrène Latex en solution comme polluant. 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 μm 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.

La concentration en particules à la sortie du générateur est réglée 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.

Neutraliseur de particules TOPAS EAN 581



Figure II.3 : Neutralisateur de particules TOPAS EAN 581

L'EAN 581 repose sur le principe de décharge CORONA avec une chambre de mélangeage et 2 têtes d'ionisation indépendantes. Les ions positifs et négatifs sont générés dans deux flux mélangés consécutivement au flux d'aérosol dans la chambre de mélangeage. Une source d'air comprimé propre est raccordée à chaque tête d'ionisation et le bloc de commande, branché au secteur assure l'alimentation électrique.

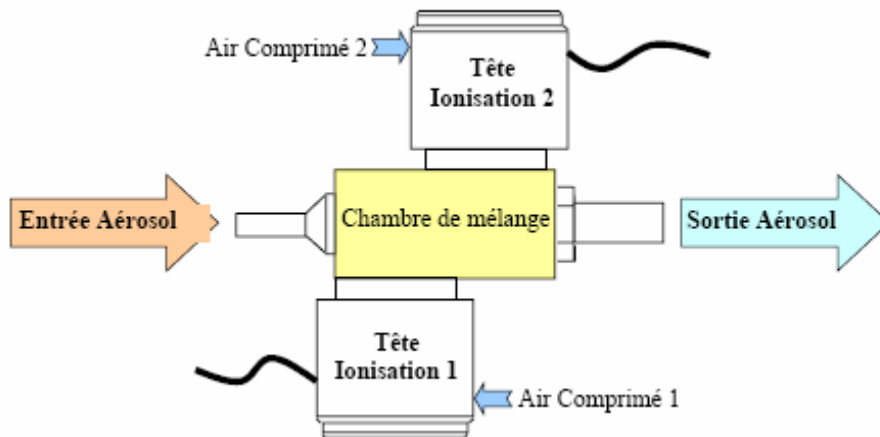


Figure II.4 : Principe de fonctionnement

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

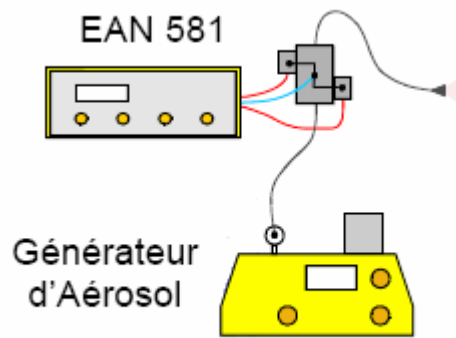


Figure II.5 : Schéma de montage

Compteurs de particules

- *Compteur optique MetOne 227 A*



Figure II.6 : Compteur de particules MetOne 227 A

Le modèle 227 A permet de mesurer simultanément deux tailles de particules (0.5 et 3 μm) sur une plage horaire pouvant atteindre 24 heures.

Les données sont stockées sur la mémoire interne de l'appareil, et sont facilement récupérables et exploitables par ordinateur.

Le MetOne 227 A donne une approximation assez précise du nombre de polluants particulaires dans la pièce étudiée, en se basant sur un échantillon recueilli pendant une durée tampon de 1 à 10 secondes.

Compteurs optiques Grimm 1.101 et 1.108



Figure II.7 : Compteur de particules GRIMM 1.108

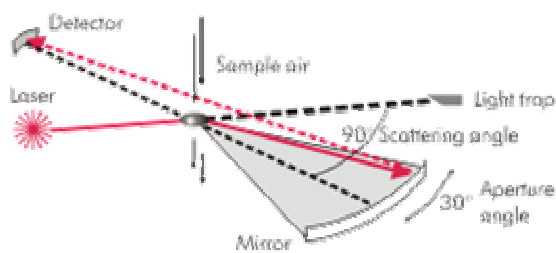
Spécifications :

Modèle	1.101	1.108
Gamme de mesure $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1...65.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1...100.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Gamme de Taille	0,5...>15 μm	0,3...>20 μm
Canaux de Tailles	3 fractions de l'EN 481 et les fractions environnementales PM10, PM2.5	Comme le 1.101 mais avec 16 canaux de tailles, la masse en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et les Particules /Litre
Volume échantillonné par heure	36 l	72 l

Tableau II.1 : Caractéristiques du Compteur de particules GRIMM

Une sonde isocinétique prélève la poussière et envoie les particules directement dans la chambre optique intégrant le Laser. Chaque particule est comptée et classifiée par taille et la concentration est proportionnelle au temps collecté. Les résultats peuvent être donnés en continu toutes les secondes, ou par intervalle d'une minute.

L'utilisation en extérieur de ces appareils est possible avec un boîtier spécialement développé pour cette application, de façon à pouvoir effectuer des mesures sous la pluie, tout en étant insensible à l'humidité (condensation des particules). Ce système ne chauffe pas la tête de prélèvement, ceci est important, car chauffer la tête conduirait à supprimer les composés semi-volatils de l'air échantillonné (et amènerait à des résultats faussés).



La concentration en masse est très dépendante de la concentration en poussières et aussi de la taille des particules. Les grosses particules vont induire une grande masse, mais sont les plus souvent les moins dangereuses, du fait qu'elles sédimentent très vite et restent dans la fraction extra-

thoracique (nez). Cependant, les particules fines restent dans l'air par diffusion, ont aussi une plus grande surface et sont capables d'absorber des vapeurs chimiques et finalement, entrer à l'intérieur des poumons. Ainsi, les aérosols fins sont beaucoup plus dangereux pour le corps humain.

Autres méthodes de comptage

Parmi les méthodes de comptage des particules, la plus attrayante est sans doute la vélocimétrie par image de particule (*Particle Image Velocimetry (PIV)*).

La PIV consiste en la mesure de la vitesse des particules entraînées par l'écoulement à partir de deux photos successives prises à un très court intervalle de temps

$$V = \frac{\Delta X}{t_2 - t_1}$$

La mesure se fait suivant les étapes suivantes :

- ensemencement de l'écoulement par des particules submicroniques ;
- deux illuminations successives par deux flashes laser ;
- enregistrement sur caméra CCD (haute fréquence) des deux images ;
- traitement par techniques de corrélation pour déterminer les positions successives de la même particule.

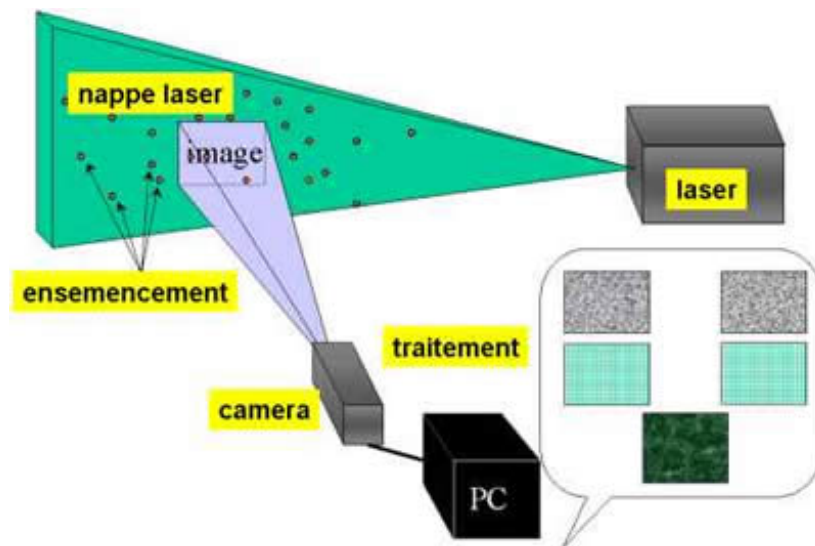


Figure II.8 : Fonctionnement de la PIV

II.3. Analyse de surface :

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.

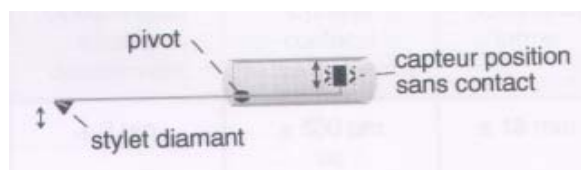


Figure II. 9 : Stylet pivotant

- 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.

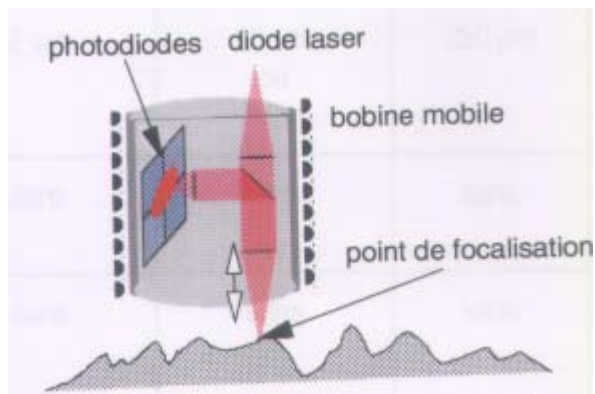


Figure II.10 : Capteur optique laser

- 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.

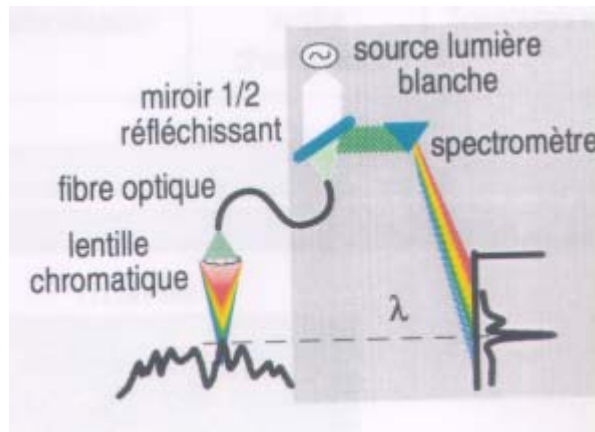


Figure II.11 : Capteur optique lumière blanche

- 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.

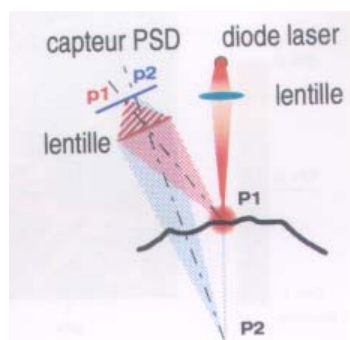


Figure II.12 : Capteurs optiques à triangulation

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

Analyse de la rugosité des revêtements utilisés

L'analyse des surfaces des revêtements a été effectuée à l'aide d'un capteur mécanique. Les données brutes sont ensuite sauvegardées sur le système de traitement informatique afin d'être traitées en temps différé. La figure ci-dessous représente le matériel utilisé. Il s'agit du MMB (Microscope Mécanique à Balayage). C'est un outil d'observation et de caractérisation des états de surface. Il mesure les variations d'altitude de la surface des matériaux et quantifie la topographie à l'aide d'outils issus de la statistique, du traitement de signal ou du traitement d'image. La conception du Microscope Mécanique à Balayage est modulaire, ces derniers sont composés de trois sous ensembles :

- ✓ L'unité de mesure est constituée par :
 - un ou plusieurs capteurs de rugosité tactile ;
 - un module électronique assurant le conditionnement et l'amplification du signal capteur ;
 - une carte de conversion analogique/numérique (CAN).

- ✓ L'unité de déplacement, assurant le positionnement et le déplacement de l'échantillon, est constituée par :
 - deux moteurs croisés pas à pas (mouvement plan ou circulaire pour la mesure de cylindre) ;
 - un module d'alimentation moteur ;
 - une carte de pilotage moteur (S.M.C.) pouvant gérer jusqu'à 4 axes.

L'ensemble informatique (matérielles et logicielles) assurant le contrôle de l'acquisition des données et leurs exploitations. Il permet de réaliser des acquisitions 2D et 3D. Il dispose aussi de fonctions de redressement, de filtrage, de calcul de paramètres de rugosité et d'édition haute résolution des représentations tridimensionnelles

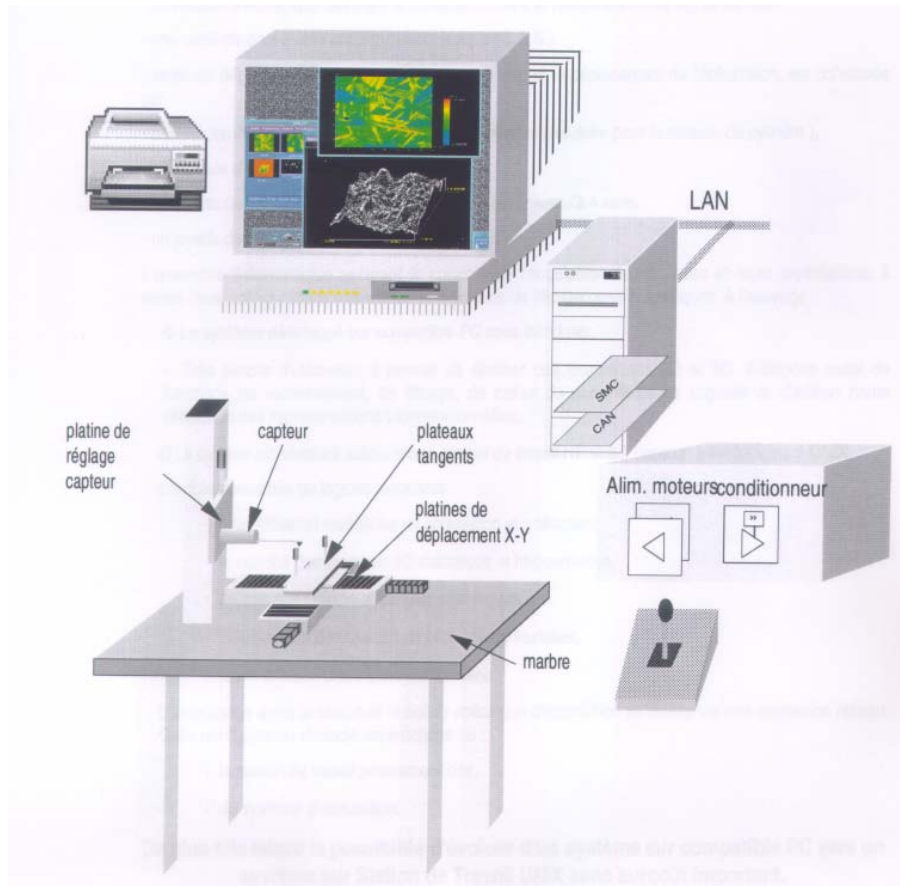


Figure II.13 : Banc d'analyse de rugosité des matériaux

II.4. Dispositif expérimental

Dans notre souci de vouloir mettre en évidence le phénomène de remise en suspension par les pas humain, nous avons construit un protocole expérimental assez simple et très flexible, afin que nous puissions changer les différents paramètres entrant en jeu.

Nos manipes se sont déroulées dans la cellule test du LEPTAB ($2.5 \times 1.5 \times 2.5 \text{ m}^3$) avec une installation de VMC à débit réglable.



Figure II.14 : Cellule test

Le système VMC utilisé, puise de l'air dans la salle, le fait passer à travers un filtre intégral pour garantir sa propreté, puis l'injecte dans la cellule via une canalisation d'une longueur bien définie ($30 \times \Phi$ de la canalisation pour homogénéiser l'écoulement).



Figure II.15 : Système VMC avec filtre intégral

II.5. Protocole expérimental

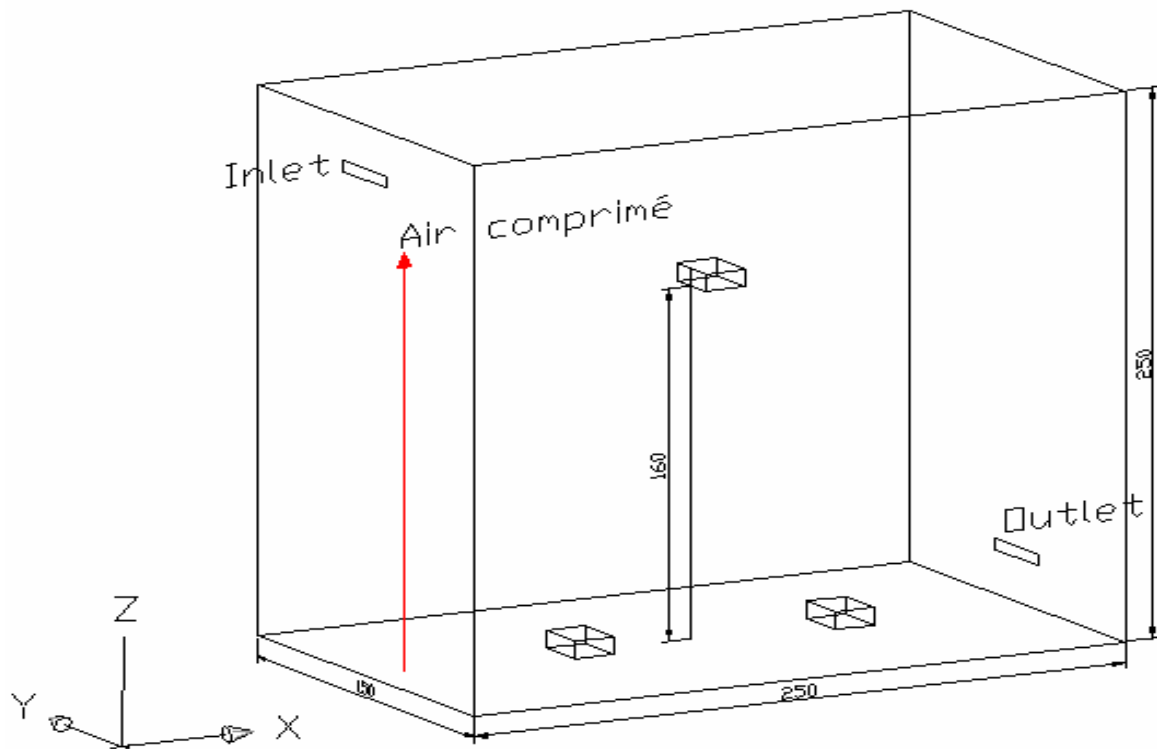
Les expérimentations que nous comptons mener visent la mise en évidence de la remise en suspension des particules par l'activité humaine.

Sachant que, ni les vitesses de l'air intérieur (très insuffisantes), ni la perturbation de l'écoulement par l'activité humaine ne peuvent remettre en suspension les particules déjà déposés sur les parois, on se concentrera surtout sur le fait de se déplacer (marcher !) sur un plancher « pollué » vu que la majorité des particules présentes à ce niveau se trouvent entraînés par les chaussures.

On essayera de quantifier l'ampleur de cette remise en suspension en fonction de plusieurs paramètres, à savoir le nombre d'occupants, la corpulence et l'intensité de l'activité (fréquence des pas).

Plusieurs types de revêtement pourront être envisagés pour le plancher (moquette, linoléum, bois), ainsi qu'une large gamme de taux de renouvellement d'air dans la cellule test (1, 2 et 3 vol/h) pour pouvoir identifier d'une part, le débit le plus approprié pour assurer une bonne qualité d'air intérieur, et d'autre part le taux de renouvellement d'air en deçà duquel la remise en suspension n'est plus perceptible (mesurable).

- 1) La première étape consiste à nettoyer la cellule test avec un jet d'air comprimé, en faisant marcher la VMC en pleine puissance. Ceci est essentiellement pour pouvoir commencer notre expérimentation sur une base plus « contrôlée ».
- 2) On installe 3 compteurs de particules (GRIMM 1.108) dans la cellule test selon la configuration ci-dessous et on les met en marche.



- 3) On ferme la cellule et on arrête la VMC. A présent, on pollue, pendant environ 10 secondes, la cellule par une poudre poly-dispersée (0.35 à $2 \mu\text{m}$) à l'aide du générateur de particules TOPAS modèle SAG 410 (les particules ayant été démunies de leurs éventuelles charges électriques par un Neutraliseur TOPAS EAN 581). Pendant cette phase, le ventilateur du plafond est mis en marche pour brasser l'air intérieur (pendant 15 minutes) et permettre une meilleure homogénéisation de la dispersion des particules
- 4) On obstrue la bouche d'extraction, et on laisse les particules déposer pendant une durée de 90 minutes au minimum.
- 5) On met en marche la VMC au débit choisi, pendant 20 minutes.
- 6) Environ 30 minutes après l'arrêt de la VMC, on pénètre dans la cellule. plusieurs cas se présentent :
 - a) La personne reste immobile pendant 5 minutes. Ceci est un cas « témoin » pour isoler la génération des particules due à la simple présence d'un individu à l'intérieur.
 - b) La personne fait des allers-retours sur un marquage fait sur le plancher pendant une durée de 5 minutes.

7) Une heure après, on arrête les compteurs de particules.

La possibilité de changer le revêtement du plancher nous permettrait de mieux caractériser les paramètres influençant la remise en suspension, et constituerait un complément aux différentes études déjà menées sur le dépôt particulaire à l'intérieur des bâtiments.

II.6. Etude expérimentale

II.6.1 Etudes préliminaires

- **Modèle réduit (2,16 m³)**

Dans un premier temps, il était question de définir la granulométrie de la poudre prévue pour nos expérimentations de remise en suspension.

A cet effet, une série de mesure a été effectuée à l'aide du caisson expérimental *PRIMEQUAL* en utilisant un polluant à base de billes de Latex d'un diamètre de 0.1 µm conditionnées sous forme liquide (dissoutes dans une solution aqueuse).

Le générateur de particules *HIAC/ROYCO* permet de d'extraire les particules de leur solution porteuse et de les injecter dans le volume d'étude.



Figure II.16 : Dispositif expérimental (PRIMEQUAL)

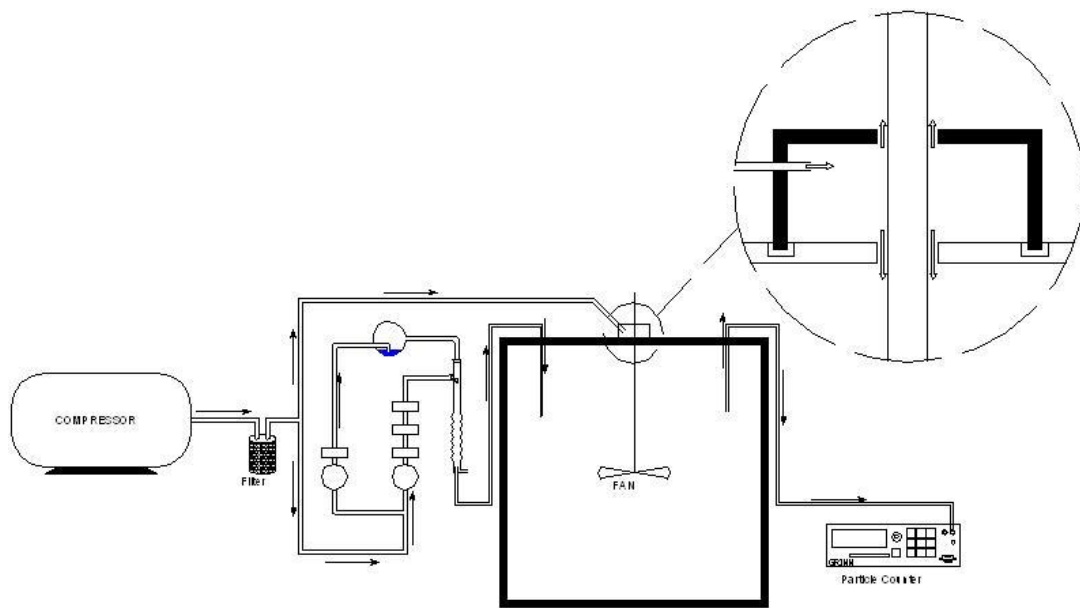


Figure II.17 : Schéma synoptique du fonctionnement du caisson PRIMEQUAL

Afin d'isoler le caisson des niveaux de pollution extérieure, il a fallu équiper la tige de brassage par un capuchon étanche, muni d'une alimentation en air comprimé filtré permettant ainsi de créer un joint « fluide » évitant toute infiltration de l'extérieur.

Le ROYCO a démontré dès les premières expérimentations son inadaptation pour le but recherché, à savoir, la mise en évidence de la remise en suspension. Cela est dû au fait que ce générateur de particules fonctionne de façon continue, par conséquent, si une augmentation du nombre de particules dans le volume est notée, il nous serait impossible d'en définir, avec exactitude, la cause.

Par ailleurs, le caisson PRIMEQUAL n'est pas adapté non plus aux objectifs recherchés parce qu'il est quasiment hermétique, et une fois les mesures lancées, on ne peut faire intervenir un stimuli pour induire une remise en suspension.

En définitive, les expérimentations sur le caisson PRIMEQUAL ont uniquement servi à caractériser la source (nature + diamètre) qui sera utilisée pour les manipes à la cellule test du LEPTAB.

• Cellule Test (9,37 m³)

Les expérimentations préliminaires ont permis de définir la nature du polluant et le générateur de particules qui seront utilisés.

Une poudre d'Alumine poly dispersée autour du diamètre 0.3 μm a été utilisée (cf. Protocole expérimental) à l'aide du générateur de particules TOPAS.

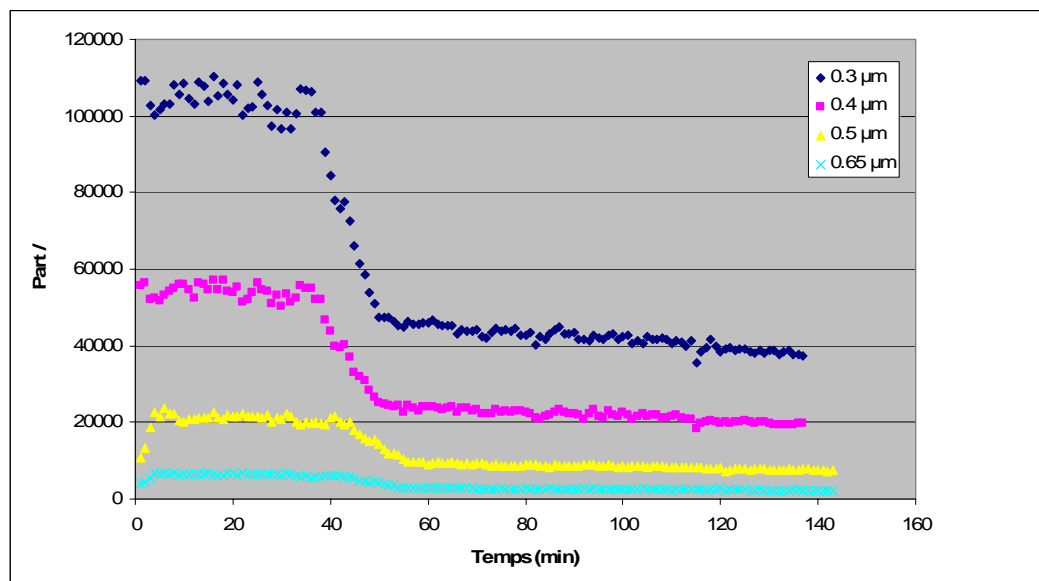


Figure II.18 : Evolution du nombre de particules dans le temps (0.3 \rightarrow 0.65 μm)

Dans le graphique ci-dessus, on note clairement l'existence de trois phases d'évolution du nombre de particule pour les diamètres étudiés :

- L'injection et l'homogénéisation (brassage) du niveau de pollution ;
- le dépôt, caractérisé par la diminution notable de la concentration des particules ;
- la définition d'un nouveau seuil de « propreté » de l'ait de la cellule test.

La phase de remise en suspension des particules n'est pas visible à cause du nouveau seuil de propreté de la cellule qui masque l'augmentation infime des particules re-suspendues.

Pour palier à cette situation, une injection d'air comprimé propre a été ajoutée dans la cellule test afin d'assurer une meilleure propreté d'air dans le volume d'étude, permettant ainsi de déceler une éventuelle augmentation du nombre de particule à cause de l'activité humaine.

Compteur Grimm situé à z=30cm

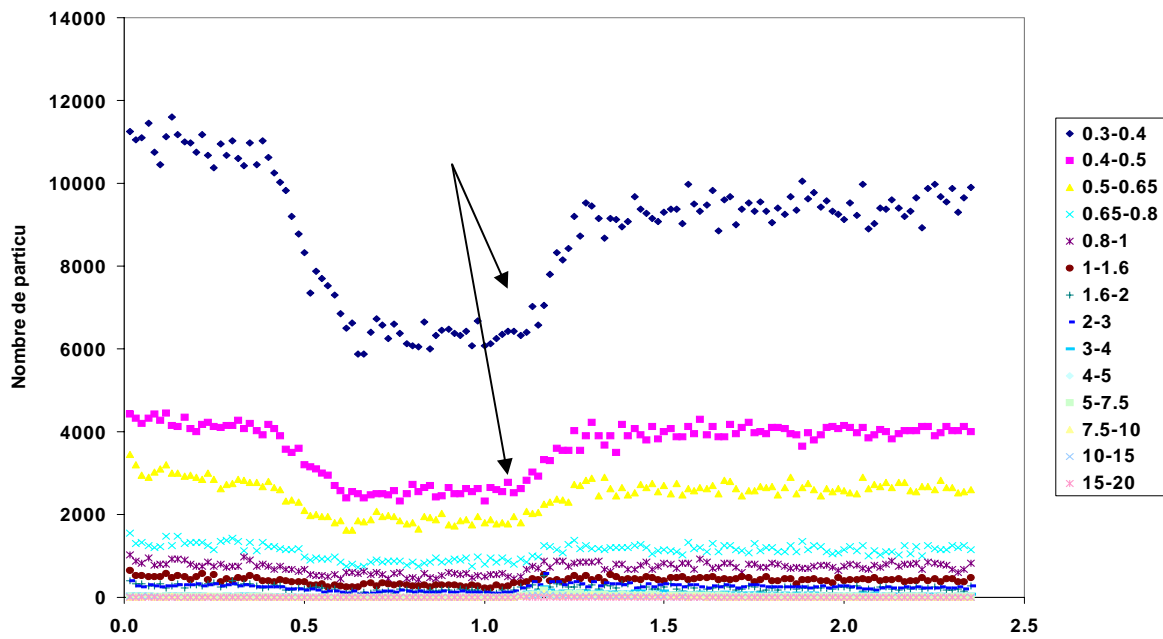


Figure II.19 : Mise en évidence de la remise en suspension (0.3 → 20µm)

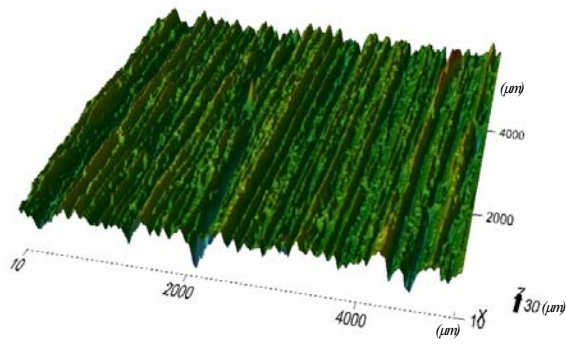
A la différence de la figure II.18, sur la figure ci-dessus, on remarque clairement une quatrième phase après la définition du nouveau seuil de pollution, qui représente l'augmentation du nombre de particules à cause des pas de marche (durée : 5min.) dans la cellule test.

Durant notre étude, il nous a semblé intéressant de comparer les comportements de différents revêtements de sol vis-à-vis de la remise en suspension des particules. Une étude similaire a été déjà effectuée au LEPTAB par ABADIE concernant le dépôt particulaire.

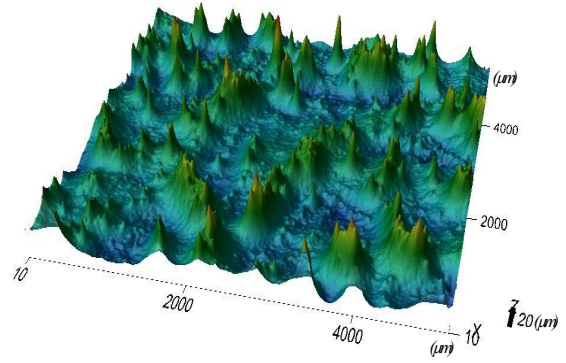
Les revêtements utilisés dans la présente étude sont :

- Bois ;
- Linoléum lisse ;
- Linoléum rugueux ;
- Moquette.

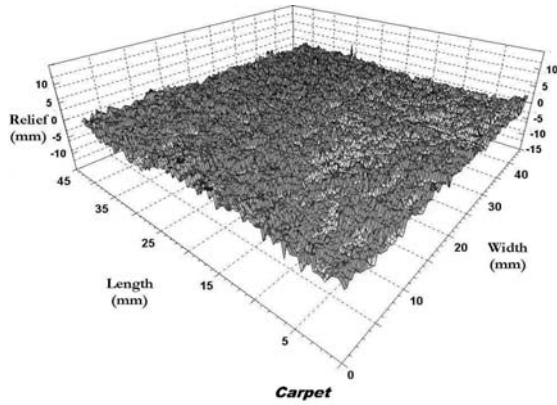
Des analyses de surface et de dureté ont été effectuées sur ces matériaux afin de disposer de données supplémentaires visant à mieux appréhender leur comportement vis-à-vis de la remise en suspension. Les résultats sont énoncés dans le tableau suivant :



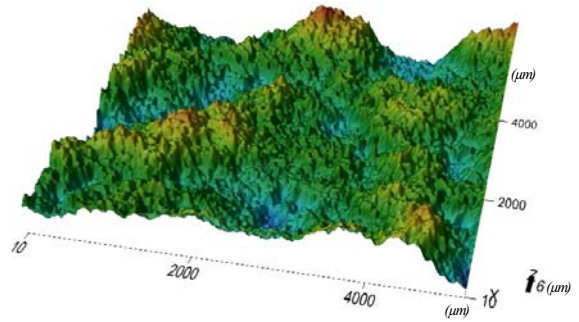
BOIS



LINOLEUM RUGUEUX



MOQUETTE



LINOLEUM LISSE

Figure II.20 : Cartographie des différents revêtements de sol utilisés

- **Bois :**

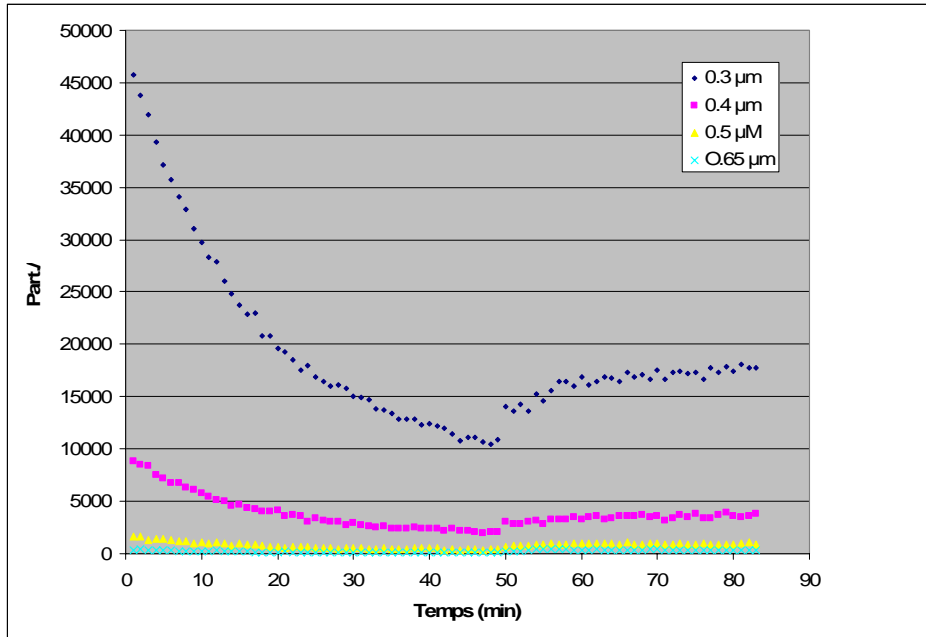


Figure II.21 : Evolution du nombre de particules dans le temps (Bois)

- **Linoléum lisse :**

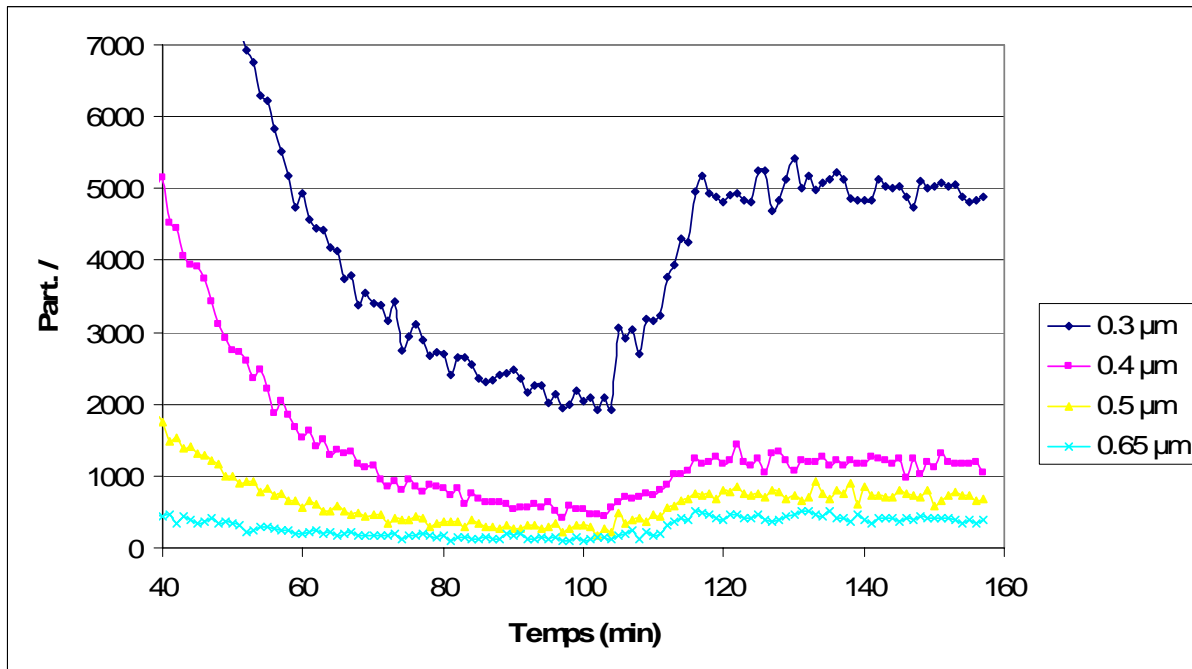


Figure II.22 : Evolution du nombre de particules dans le temps (Linoléum lisse)

• **Linoléum rugueux :**

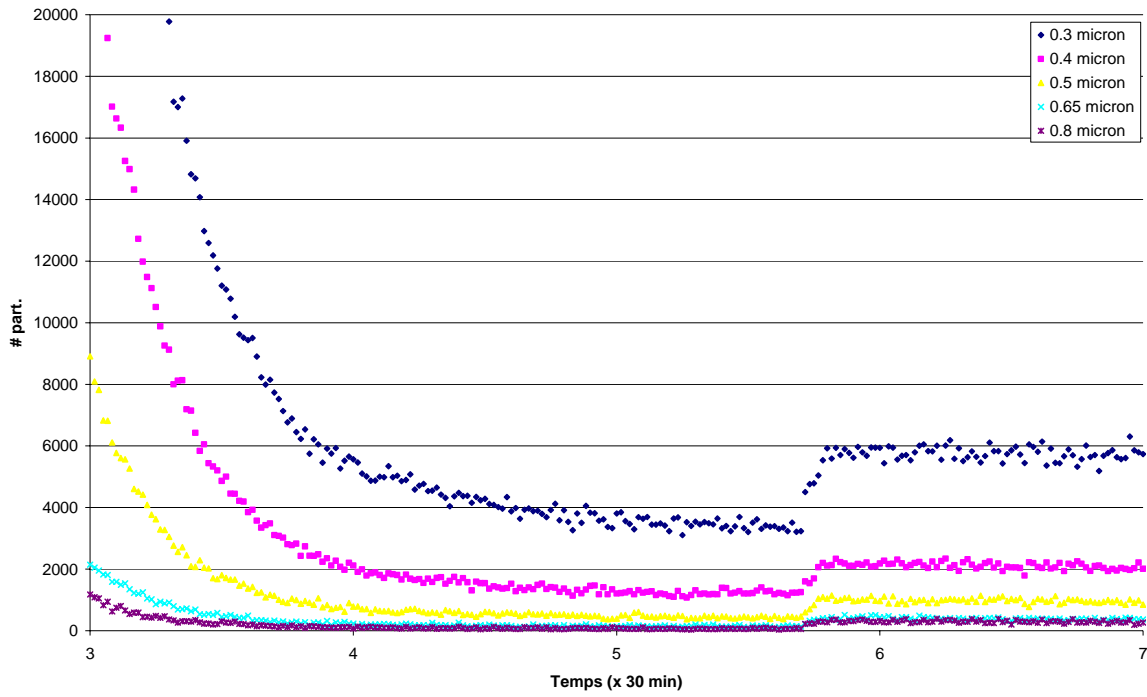


Figure II.23 : Evolution du nombre de particules dans le temps (linoléum rugueux)

• **Moquette :**

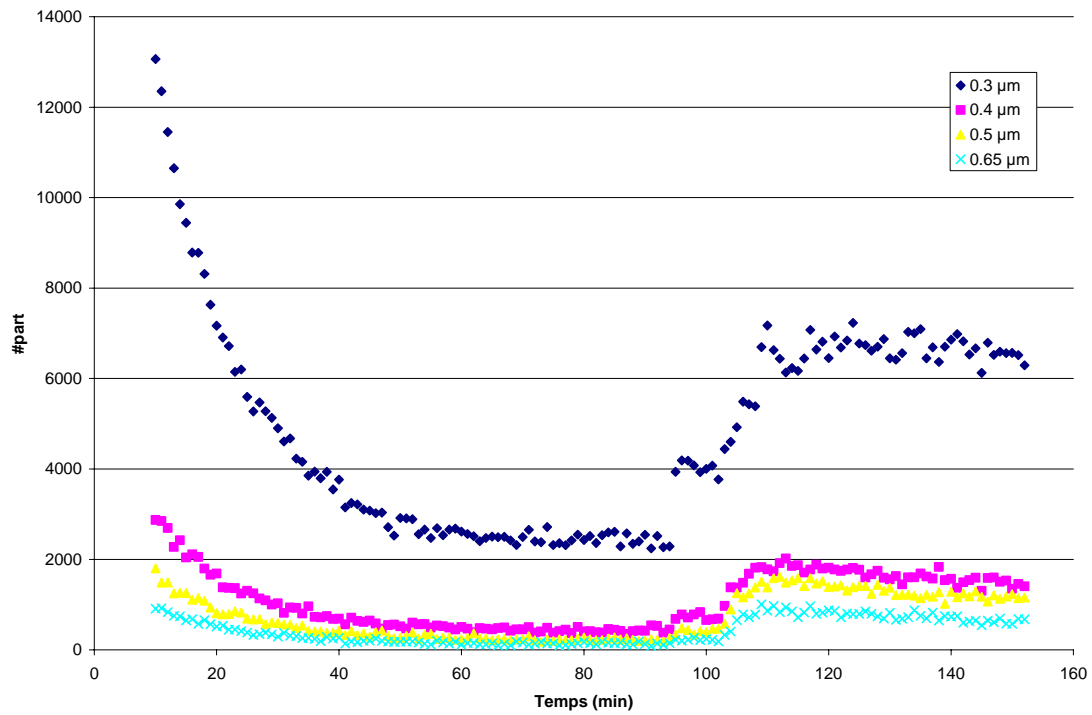


Figure II.24 : Evolution du nombre de particules dans le temps (Moquette)

II.6.2 Analyse des résultats concernant le dépôt

Les différentes figures ci-après livrent pour chacun des revêtements étudié, les corrélations obtenues expérimentalement concernant la **décharge** de l'air intérieur :

- **Bois :**

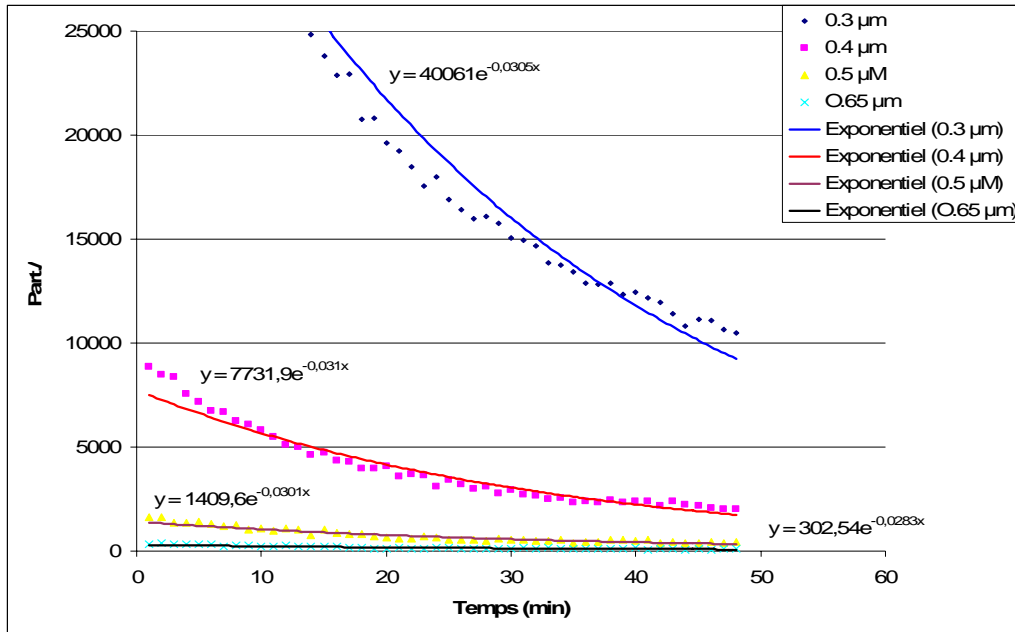


Figure II.25 : Analyse de la phase dépôt avec une courbe de tendance (Bois)

- **Linoléum lisse :**

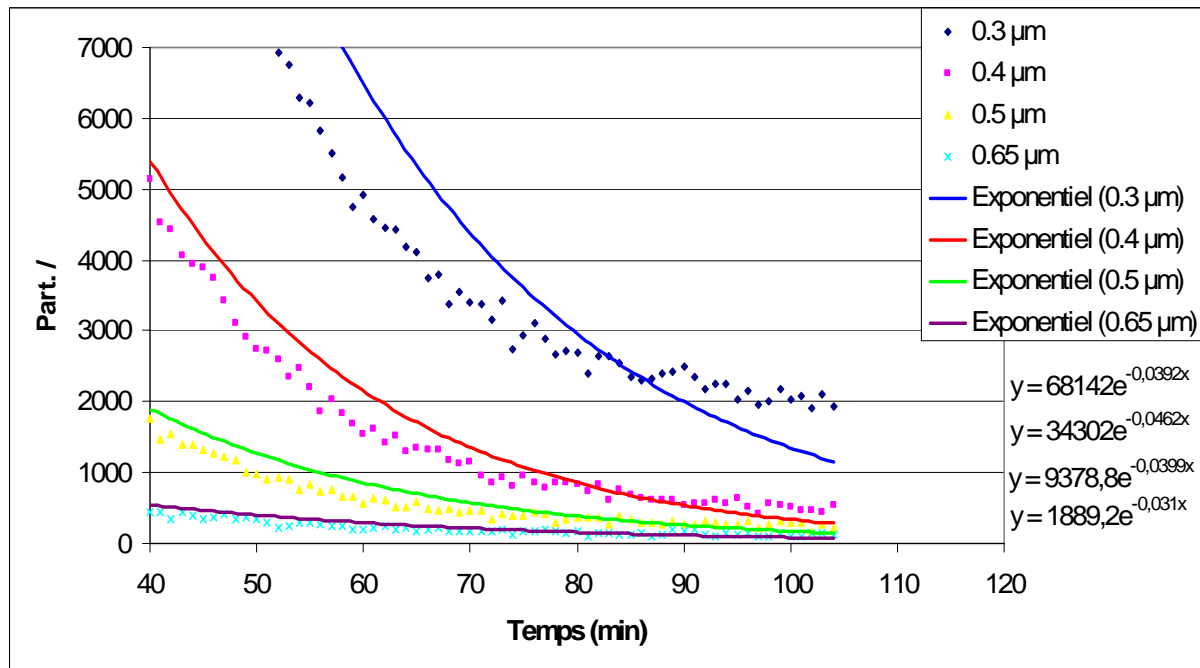


Figure II.26 : Analyse de la phase dépôt avec une courbe de tendance (Linoléum lisse)

• **Linoléum rugueux :**

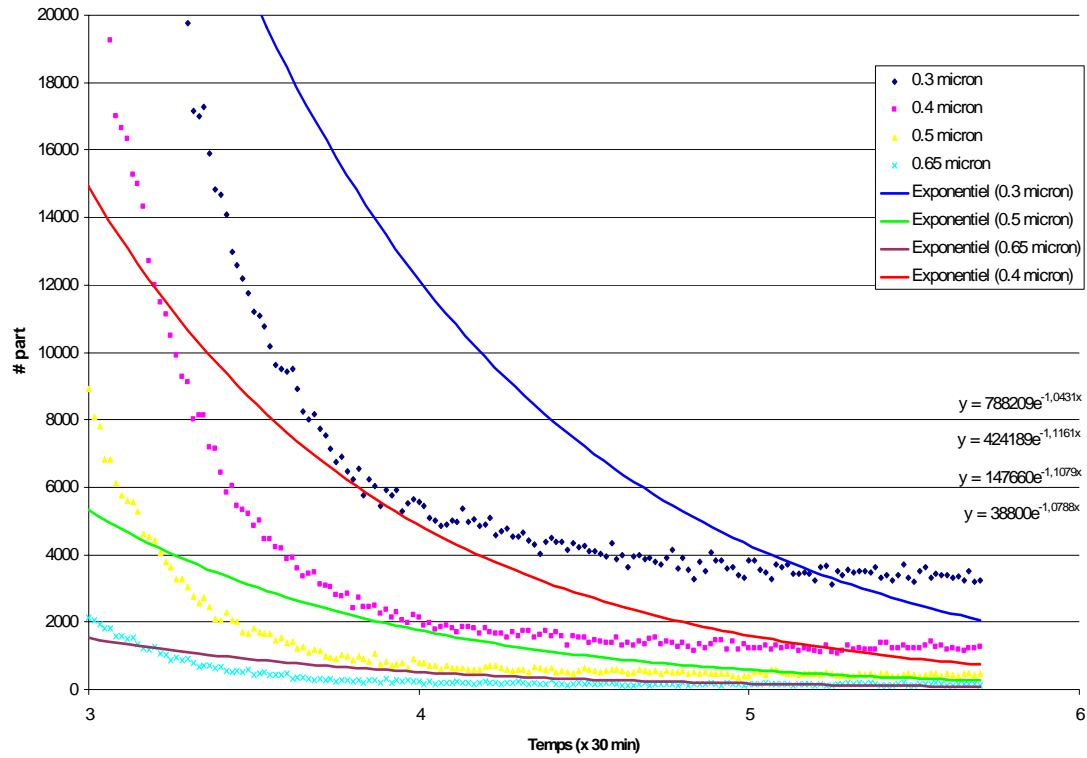


Figure II.27 : Analyse de la phase dépôt avec une courbe de tendance (Linoléum rugueux)

• **Moquette :**

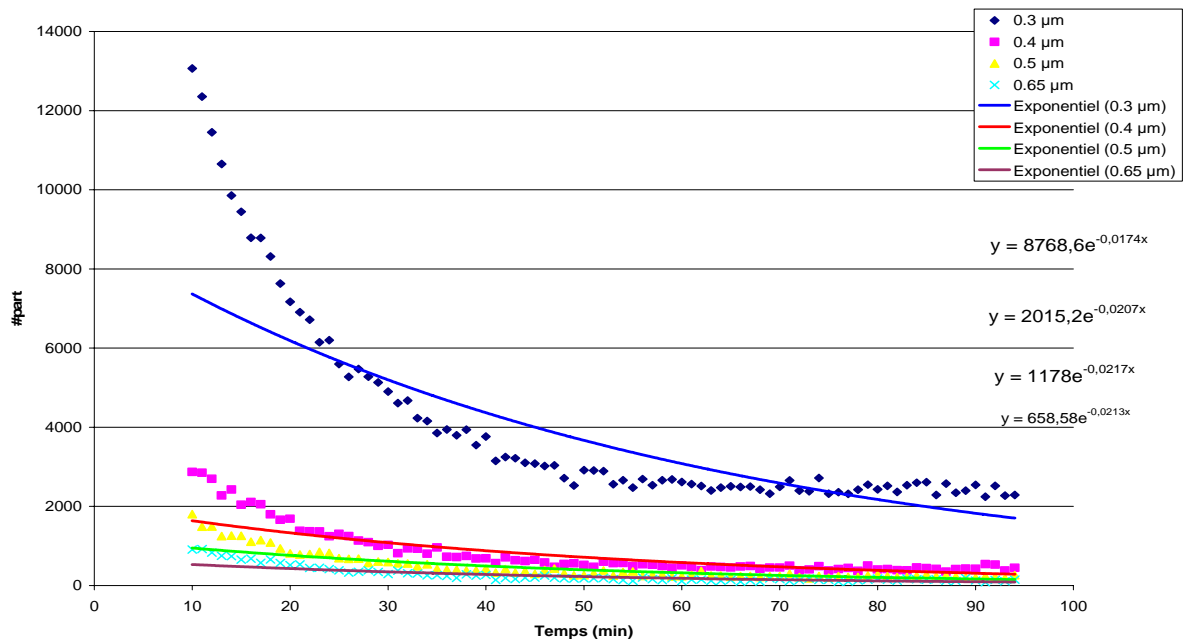


Figure II.28 : Analyse de la phase dépôt avec une courbe de tendance (Moquette)

Une analyse comparative entre les différents coefficients de dépôt relatifs aux matériaux utilisés est représentée dans le tableau suivant :

	Coefficient de dépôt λ_d / Diamètre				Ecart type
	0,3 μm	0,4 μm	0,5 μm	0,65 μm	
Bois	0,0305	0,031	0,0301	0,0283	0,118%
Lino, Lisse	0,0392	0,0462	0,0399	0,031	0,624%
Lino, Rugueux	0,0348	0,0372	0,0369	0,036	0,108%
Moquette	0,0174	0,0207	0,217	XXXXXX	11,430%

Tableau II.2 : Coefficients de dépôt des différents matériaux en fonction du diamètre

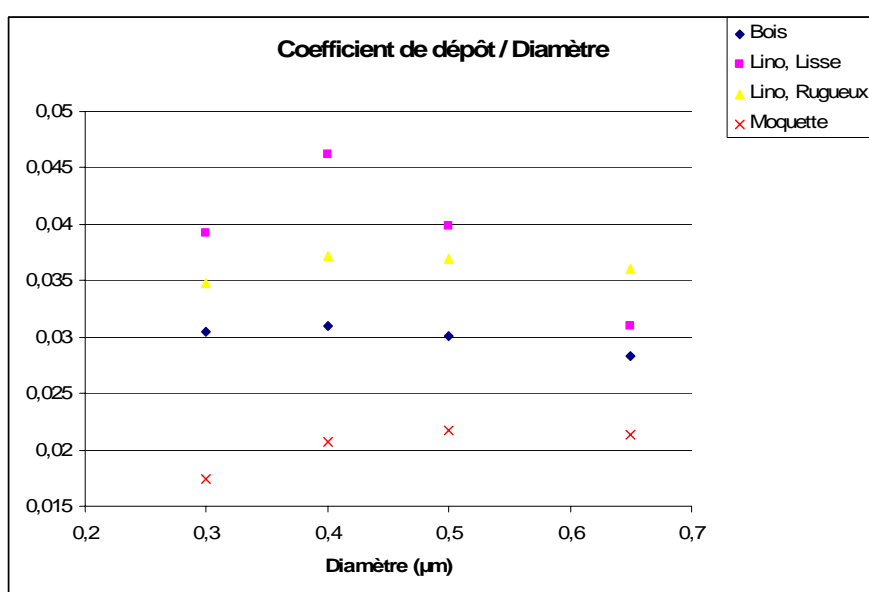


Figure II.29 : Représentation graphique des différents coefficients de dépôt

D'après les courbes de dépôt représentées ci-avant, on peut clairement établir que les résultats obtenus sont en accord avec les résultats présents dans la bibliographie.

L'évolution de la concentration particulaire suit globalement une régression exponentielle (modèle de NAZAROFF).

L'analyse des coefficients de dépôt montre que les revêtements synthétiques sont plus « réceptifs » au dépôt particulaire. Ceci peut être expliqué par les champs électrostatiques présents au voisinage de la surface et qui favorisent le dépôt, quelque soit le diamètre (0.3, 0.4 ou 0.5 μm).

Ce constat peut même aiguiller les hypothèses de remise en suspension pour ces matériaux ; les particules déposées sur les linoléums seraient arrachées difficilement.

II.6.3 Analyse des résultats concernant la remise en suspension

Les différentes figures ci-après livrent cette fois-ci (pour chacun des revêtements), les corrélations obtenues expérimentalement concernant la **charge** de l'air intérieur :

- **Bois :**

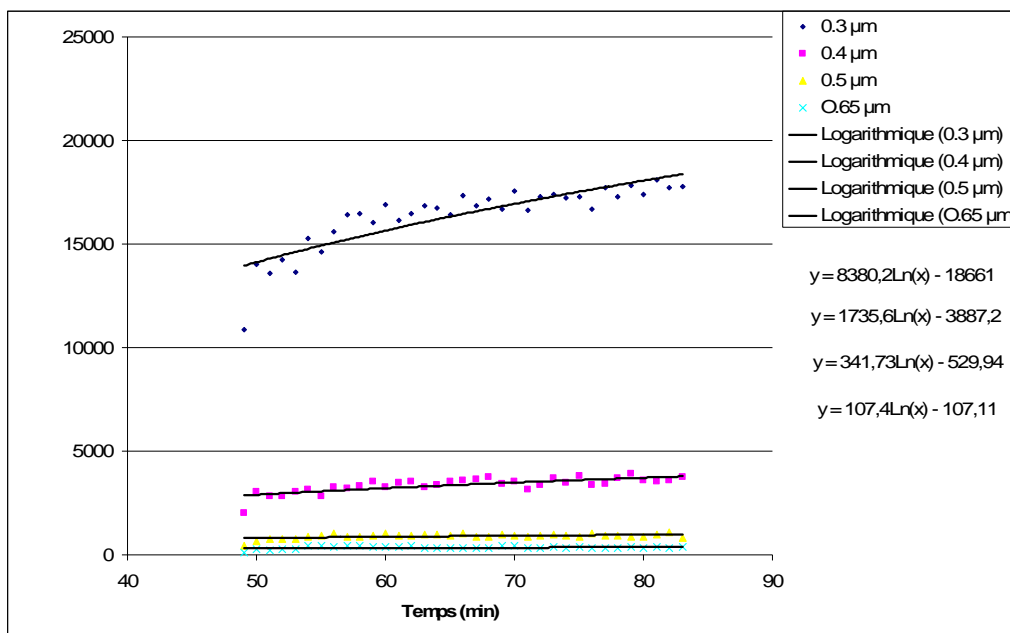


Figure II.30 : Analyse de la phase de remise en suspension (Bois)

• **Linoléum lisse :**

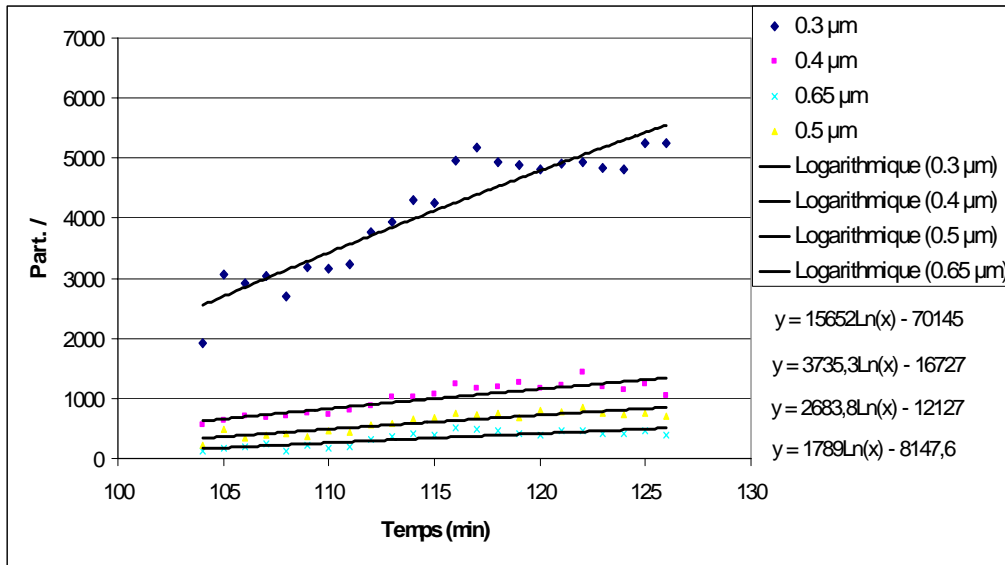


Figure II.31 : Analyse de la phase de remise en suspension (Linoléum lisse)

• **Linoléum rugueux :**

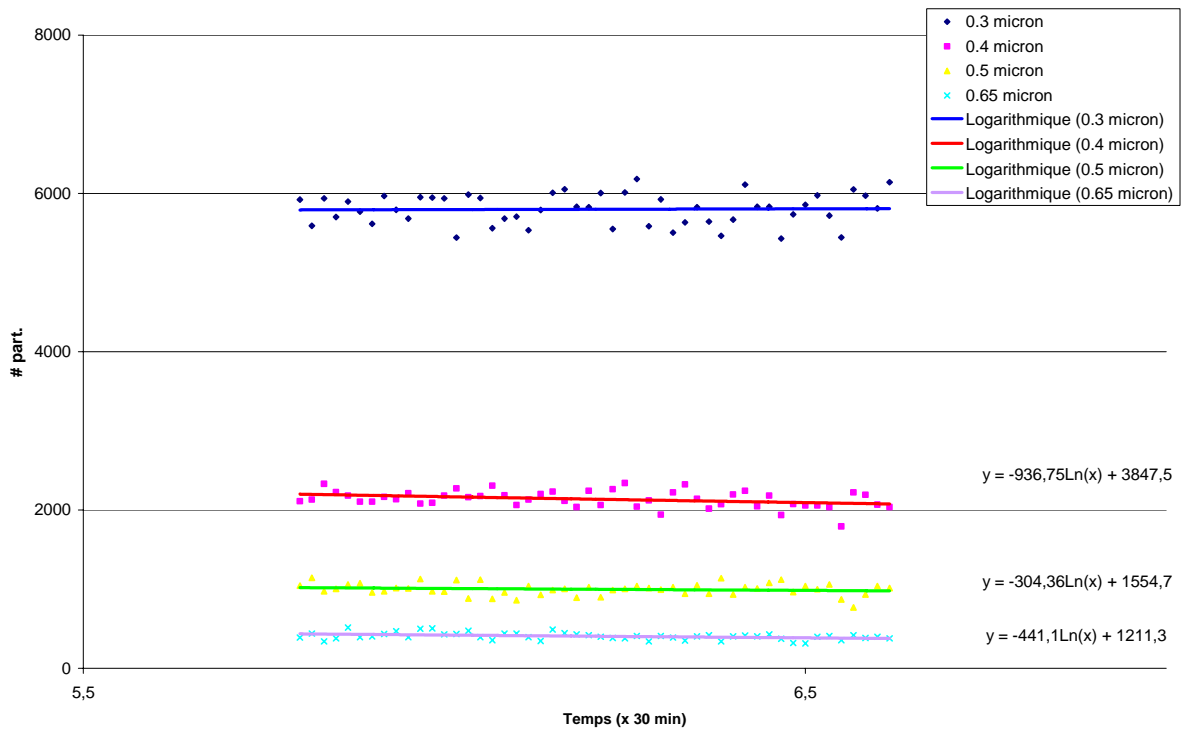


Figure II.32 : Analyse de la phase de remise en suspension (Linoléum rugueux)

• **Moquette :**

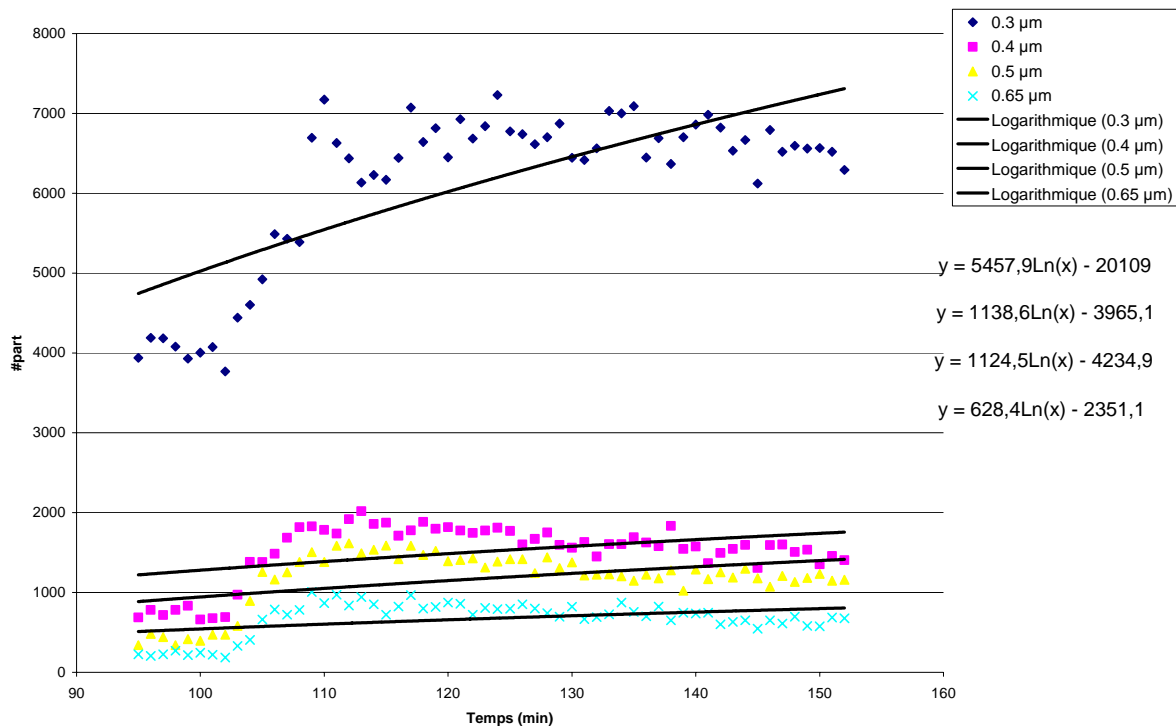


Figure II.33 : Analyse de la phase de remise en suspension (Moquette)

		0.3 μm	0.4 μm	0.5 μm
BOIS	<i>Seuil 1</i>	10477	2021	440
	<i>Seuil 2</i>	17788	3759	820
Lino lisse	<i>Seuil 1</i>	1931	550	225
	<i>Seuil 2</i>	5238	1041	695
Lino rug	<i>Seuil 1</i>	5922	2112	1045
	<i>Seuil 2</i>	6141	2037	1015
moquette	<i>Seuil 1</i>	14224	2817	775
	<i>Seuil 2</i>	18094	3514	980

*Tableau II.3 : Concentration des particules (Seuil 1 : équilibre après le dépôt ;
Seuil2 : équilibre après la remise en suspension)*

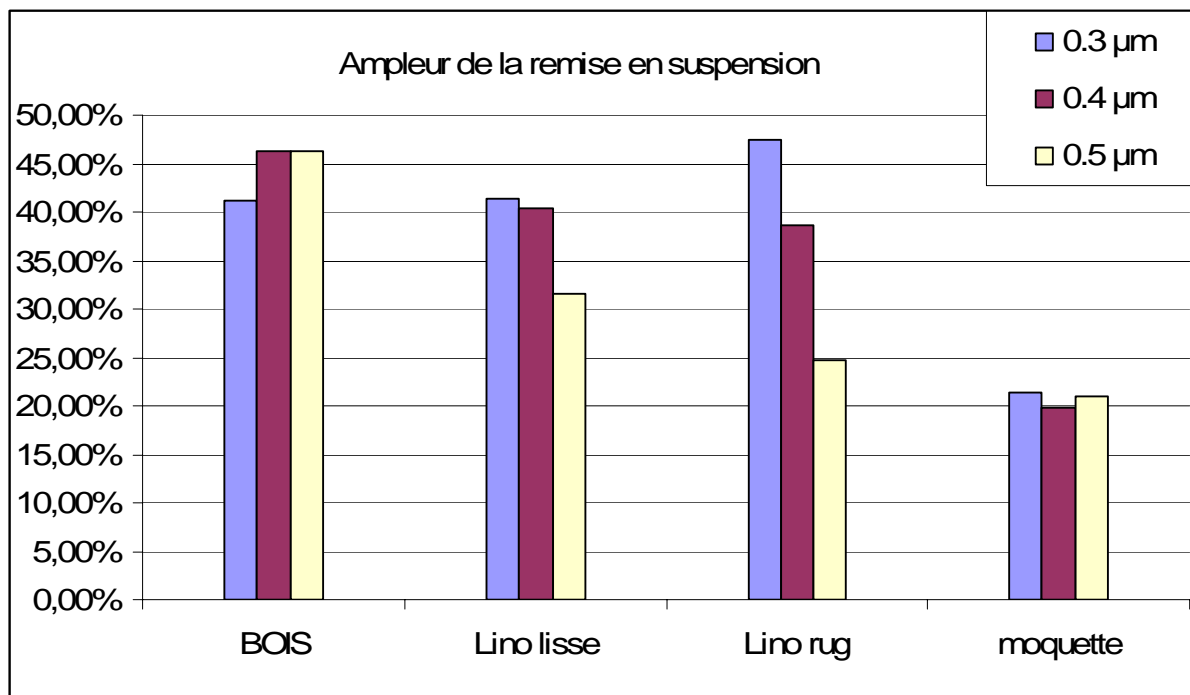


Figure II.34 : Ampleur de la remise en suspension

La première information que l'on peut tirer de la figure ci-dessus est que la moquette possède un grand pouvoir de rétention des particules par rapport aux autres revêtements et ce pour tous les diamètres étudiés :

- ✓ 0.3 µm : les particules de ce diamètre ont quasiment le même comportement (remise en suspension) vis-à-vis du bois et du linoléum lisse. Le pourcentage sensiblement plus élevé constaté dans le cas du linoléum rugueux peut probablement être justifiée par les aspérités présentes à la surface de ce revêtement qui provoquent un effet de friction favorisant la remise en suspension (GOMES 2004).
- ✓ 0.4 µm : ces particules semblent avoir une « préférence » pour les revêtements synthétiques (linoléums). L'ampleur de la remise en suspension est plus faible dans le cas du revêtement rugueux à cause des frottements plus importants augmentant les forces électrostatiques qui contribuent au dépôt des particules.
- ✓ 0.5 µm : idem pour le diamètre 0.4 µm

II.7.Conclusion

En ce qui concerne l'étude du comportement des particules dans une ambiance habitable, nous avons développé un protocole expérimental qui nous a permis d'observer l'évolution des particules de pollution durant les phases de dépôt et de remise en suspension.

Il est évident de noter que l'ampleur de la remise en suspension est un paramètre difficilement quantifiable à cause des nombreux paramètres, encore méconnus, entrant en jeu d'une part, et du fait que la quantité de pollution injectée dans la cellule test n'est pas maîtrisée avec précision d'autre part. Pour remédier à cette situation, nous avons exprimé l'ampleur de la remise en suspension en pourcentage par rapport au seuil de propreté atteint après la phase du dépôt.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus pour le dépôt particulaire et la remise en suspension. Une analyse comparative de l'ampleur de la remise en suspension des particules en fonction du revêtement utilisé a été présentée.

Il reste à étudier dans le chapitre suivant les différentes méthodes de modélisation du comportement particulaire {dépôt + remise en suspension} dans la cellule test.

CHAPITRE 3
ETUDE NUMERIQUE DU
COMPORTEMENT DES PARTICULES
DANS UNE ENCEINTE FERMEE

Liste des figures

<i>Figure III.1</i>	<i>Représentation schématique du mouvement turbulent (a,) et la dépendance du temps d'une composante de vitesse dans un point donné (b,)</i>
<i>Figure III.2</i>	<i>Moyenne dans le temps pour un écoulement stationnaire (a,) et moyenne pour un écoulement instationnaire (b,)</i>
<i>Figure III.3</i>	<i>Forces agissant sur une particule</i>
<i>Figure III.4</i>	<i>Mouvement des particules dans une enceinte</i>
<i>Figure III.5</i>	<i>Evolution de la quantité de particules (0.35μm) à l'intérieur de l'enceinte Primequal2</i>
<i>Figure III.6</i>	<i>Montage pour la charge et décharge d'une bobine dans un circuit RL</i>
<i>Figure III.7</i>	<i>Courbes de charge/décharge d'une bobine dans un circuit RL</i>
<i>Figure III.8</i>	<i>Superposition des résultats numérique par analogie électrique (bois)</i>
<i>Figure III.9</i>	<i>Superposition des résultats numérique par analogie électrique (linoléum lisse)</i>
<i>Figure III.10</i>	<i>Superposition des résultats numérique par analogie électrique (linoléum rugueux)</i>
<i>Figure III.11</i>	<i>Superposition des résultats numérique par analogie électrique (Moquette)</i>
<i>Figure III.12</i>	<i>Superposition des résultats numérique par analogie électrique (bois)</i>
<i>Figure III.13</i>	<i>Superposition des résultats numérique par analogie électrique (Linoléum lisse)</i>
<i>Figure III.14</i>	<i>Superposition des résultats numérique par analogie électrique (Linoléum rugueux)</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau III.1</i>	<i>Equations fondamentales de la mécanique des fluides</i>
<i>Tableau III.2</i>	<i>Equations caractéristiques d'une charge et décharge d'une bobine</i>
<i>Tableau III.3</i>	<i>Analogie entre les paramètres particuliers et les paramètres électriques</i>

III.1 Aspects physiques

Le transport et la diffusion des particules ne sont pas liés uniquement à l'écoulement environnant, ils sont occasionnés par la présence de phénomènes diffusifs qui vont homogénéiser les concentrations au sein du fluide. Nous décrivons ci-dessous les phénomènes diffusifs rencontrés dans les écoulements porteurs.

La diffusion brownienne

Le mouvement brownien a été découvert par ROBERT BROWN en 1827 en observant des pollens de fleurs suspendues dans l'eau. D'abord, il a cru que ce qu'il avait trouvé était lié à des organismes vivants, comme les plantes ou des fragments de plantes mortes. Il a examiné plusieurs types de matières après les plantes et il a découvert que si l'on écrase pratiquement n'importe quelle matière en petites « *molécules* » – comme il les a appelées – un mouvement constant est observable dans chaque échantillon dilué dans l'eau (BROWN 1829).

L'explication physique de ce phénomène a été donnée par EINSTEIN en 1905 qui a déterminé le déplacement des particules appelé « mouvement brownien ». L'expression fournissant le déplacement moyen pendant le temps t d'une particule sphérique s'écrit comme suit :

$$\overline{r^2} = \overline{x^2} + \overline{y^2} + \overline{z^2} \quad (\text{III.1})$$

soit :

$$\overline{r^2} = 6D_{Bro} \cdot t \quad (\text{III.2})$$

Ainsi dans une direction donnée, on obtient la relation d'Einstein :

$$\overline{x^2} = \sqrt{2D_{Bro} \cdot t} \quad (\text{III.3})$$

Einstein a utilisé comme coefficient de diffusion l'expression définie par FICK 50 ans auparavant.

Selon LANGEVIN (1909) l'expression d'EINSTEIN s'écrit comme :

$$\overline{x^2} = \frac{R \cdot T}{N_a^*} \frac{1}{3\pi\mu r_p} t \quad (\text{III.4})$$

où N_a^* est le nombre d'Avogadro ;

La diffusion brownienne est générée par la diffusion moléculaire du gaz, car le mouvement des molécules de gaz produit des collisions sur la surface de chaque particule. Selon la théorie cinétique des gaz, les particules prennent la même énergie thermique que les molécules qui les entourent et le déplacement d'une particule sera proportionnel à la racine carré du temps. EINSTEIN a montré en 1905 les faits suivants :

- Le mouvement brownien d'une particule est équivalent à un mouvement brownien d'une molécule géante ;
- L'énergie cinétique d'une particule est équivalente à celle des molécules où la particule est suspendue $k_{cin} = \frac{3}{2} k_B T$;
- La force de diffusion qui agit sur une particule est égale à la force de la pression osmotique qui agit sur cette même particule.

En développant la formule du coefficient de diffusion brownienne D_{Bro} , qui a été reprise par plusieurs auteurs, comme RAMSHAW (1970), on obtient l'expression suivante :

$$D_{Bro} = \frac{k_B T}{m \beta} \quad (III.5)$$

où T est la température, m est la masse de la particule, β est le coefficient de friction de Stokes.

$$\beta = \frac{3\pi\mu d_p}{m} \quad (III.6)$$

La diffusion moléculaire :

La diffusion moléculaire est décrite par le transfert d'un gaz au travers d'un autre gaz dans le sens opposé au gradient de concentration.

La diffusion moléculaire est toujours un processus qui essaie de répartir les concentrations partout dans le domaine et se caractérise le coefficient de diffusion du gaz D_{mol} , qui décrit la relation entre la densité de flux de molécules transférées et le gradient de concentration. La première loi de FICK décrit ce phénomène :

$$J = -D_{mol} \frac{dC_p}{dx} \quad (III.7)$$

Les autres formes de diffusion :

RAMSHAW (1979) distingue quatre phénomènes de diffusion, en plus du moléculaire et du brownien, il utilise la diffusion due à la différence de la température et la diffusion due à la différence de pression. Ces deux dernières n'interviennent pas dans le cadre de notre étude. Dans ce chapitre nous avons adopté une expression qui prend en compte par le biais du coefficient de Cunningham le « glissement » entre les molécules du gaz et la particule (voir la définition de C_c plus tard) :

$$D_{Bro} = \frac{k_B T C_c}{3\pi\mu d_p} \quad (\text{III.1})$$

III.2 Modélisation des transferts particuliers

Il existe deux méthodes de modélisation du comportement particulaire dans les enceintes : l'approche globale (modèle de NAZAROFF, 1999) et l'approche numérique fine (CFD). Cette dernière permet la description la plus fine des phénomènes de transport et de dépôt particulaire. Pour mettre en évidence certains phénomènes tels que les zones de dépôt préférentiel, les zones de forte concentration, ou encore les zones où nous avons la présence d'une hétérogénéité, il est nécessaire d'utiliser l'approche numérique de type CFD. Les trajectoires des particules sont alors modélisées, et ce n'est plus la concentration globale (modèle de NAZAROFF, 1999) qui nous intéresse mais l'évolution des particules dans l'espace au cours du temps.

III.2.1. Modélisation fine CFD:

Pour prédire l'écoulement fluide, trois grandes familles se distinguent : la Simulation Numérique Directe (DNS), la Simulation des Grandes Échelles (LES) et les Modèles Statistiques (modèles k-ε).

La Simulation Numérique Directe (DNS) :

Cette méthode permet de résoudre directement les équations de Navier Stokes, mais son principal inconvénient est la nécessité d'avoir un maillage très resserré pour permettre la convergence des calculs. La conséquence immédiate est l'augmentation des temps de calculs. Actuellement, de part la limitation des machines de calcul, il est difficile d'atteindre plus de 2

millions de points. Il apparaît que la Simulation Numérique Directe (DNS) n'est pas l'outil adapté à la représentation des écoulements pour un bâtiment.

La Simulation des Grandes Échelles (LES) :

Le principe de cette méthode est de résoudre les équations de conservation qui gouvernent l'écoulement sur un maillage moins resserré que la DNS. Les tourbillons de taille supérieure à la maille sont déterminés par le calcul et le transfert d'énergie des petits tourbillons vers les plus gros tourbillons est modélisé pour prendre en compte l'effet de ces petits tourbillons.

On utilise pour cela un modèle de sous-maille. Le modèle le plus répandu est le modèle de SMAGORINSKY (1963). Cependant ce dernier demande la spécification du coefficient du modèle C_s et on doit connaître la fonction de paroi. Par la suite, GERMANO et al. (1991) ont développé un modèle dynamique de sous-maille qui permet de déterminer le coefficient C_s en fonction du temps et de la position.

Les Modèles Statistiques (Modèles k- ϵ) :

Les Modèles Statistiques (par analogie de REYNOLDS, ou modèles RANS) consistent à introduire les moyennes temporelles des différentes variables (vitesse, 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 dits k- ϵ sont classiquement utilisés. Le modèle standard est semi-empirique, basé sur les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente k et de son taux de dissipation ϵ . L'écoulement est supposé parfaitement turbulent et que les effets de viscosité moléculaire sont négligeables.

Ce modèle a été utilisé pour le code développé au LEPTAB, SANDU (1999), ABADIE (2000). On obtient 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 (ϵ) en chacun des points du maillage.

Comme nous obtenons les vitesses moyennes de l'écoulement, il faut reconstituer artificiellement les fluctuations de vitesse. ALLEN (1982) a introduit une fluctuation constante qui change de signe aléatoirement. D'autres méthodes plus complexes ont été développées notamment par GOSMAN et IOANNIDES (1981), LU et al. (1992). Les caractéristiques locales de la turbulence sont prises en compte.

Choix du modèle pour l'écoulement fluide :

Actuellement, la méthode de simulation numérique directe (DNS) ne peut être envisagée pour simuler les écoulements d'air dans un bâtiment à cause du temps de calculs beaucoup trop longs.

Les modèles statistiques (k-ε) sont peu coûteux en temps calculs, cependant les vitesses fluctuantes sont recrées artificiellement. Ainsi, la méthode de simulation des grandes échelles (LES) semble la mieux adaptée pour représenter l'écoulement fluide instantané dans les bâtiments. Dans le cas de convection forcée, des comparaisons avec les expérimentations de NIELSEN et al. (1978) ont été réalisées. Les résultats obtenus numériquement correspondent aux valeurs expérimentales. Pour un écoulement turbulent homogène isotrope l'expérience de SNYDER et LUMLEY (1972) a été reproduite numériquement. Les résultats obtenus sont également en accord avec l'expérimentation, CHEN (2001).

Le code numérique développé en collaboration avec le LEPTAB [EL HIJRI et al. 2004, 2006] permet d'obtenir de bons résultats en accord avec les études relevées dans la littérature. De plus, les vitesses fluctuantes ne sont plus recrées arbitrairement, les particules subissent le champ de vitesse instantané. Le paragraphe suivant décrit la méthode de simulation des grandes échelles.

On utilise les coordonnées cartésiennes où le vecteur de vitesse du fluide, \vec{u}_f , a trois composantes u_f , v_f et w_f suivant x, y et z.

D'après FERZIGER et PERIC (2002) l'équation générale de la conservation d'une entité ϕ dans un écoulement (selon l'axe x) est donnée par :

$$\frac{\partial(\rho_f \phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f \phi u_f)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + q_\phi \quad (\text{III.9})$$

où ϕ est la variable pour laquelle on écrit l'équation de conservation, q_ϕ la source ou le puit de ϕ et D_ϕ le coefficient de diffusion de ϕ .

	ϕ	D_ϕ	q_ϕ
Continuité	1	0	0
quantité de mouvement	u_f	$\nu\rho_f$	$-\frac{\partial p}{\partial x} - \rho_f g$
Energie	$c_p T$	$c_p k_{term}$	q_ϕ
Contaminants	C	D_{mol}	S

Tableau III.1 : Equations fondamentales de la mécanique des fluides

Dans le tableau III.1, g est l'accélération de la pesanteur. Comme nos configurations restent isothermes, l'équation de l'énergie ne sera pas utilisée. A l'intérieur des bâtiments les écoulements d'air sont turbulents. Or, la résolution directe des écoulements turbulents n'est en général pas possible du fait des échelles de temps et d'espace qui seraient nécessaire à leur résolution. De ce fait, on introduit des modèles spécifiques permettant de travailler à des échelles supérieures. De façon à récupérer les effets des échelles non simulées, il faut alors introduire des modèles dits de turbulence.

Les modèles de turbulence

Le mouvement turbulent se caractérise par des tourbillons de différentes tailles, de constantes de temps variables, d'orientations et de vitesses différentes. Ceux-ci donnent à l'écoulement une composante fluctuante dans l'espace et dans le temps. On considère que ces irrégularités du mouvement dans l'espace, restent à une échelle supérieure à celle des molécules du gaz transporté par l'écoulement, rendant l'équation de Navier Stokes utilisable pour nos études. Cette hypothèse est justifiée si nous regardons la cascade des tourbillons, car, pendant les mouvements turbulents dus aux grands gradients de vitesse du fluide, il y a une dissipation de l'énergie cinétique turbulente. Cet effet diminue la taille des tourbillons par frottement, et cette diminution continue jusqu'à ce que dans les plus petits tourbillons les forces d'inertie et les forces de viscosité soient en équilibre. La taille de ce tourbillon est appelée micro échelle de longueur de Kolmogorov (λ_K).

Pour résoudre ce système d'équations, plusieurs voies existent. Si nous ne faisons aucun compromis et si nous voulons résoudre complètement la turbulence, on utilise la méthode **DNS (Direct Numerical Simulation – simulation numérique direct)**. Cette méthode permet de résoudre directement les équations de Navier-Stokes. Les calculs sont beaucoup plus volumineux et plus lents que dans les autres méthodes (car le spectre des tourbillons varie de

plusieurs ordres de grandeurs). Ainsi pour décrire l'ensemble des tourbillons, un maillage numérique très fin est indispensable, ce qui impose un pas de temps très petit. C'est pour cette raison également que cette approche est aujourd'hui limitée à l'étude de configurations géométriques élémentaires et aux écoulements à faibles nombres de *Reynolds*.

En général, nous n'avons pas la possibilité de résoudre la turbulence jusqu'à la plus petite structure de l'écoulement et, dans la plupart des cas, nous n'avons pas besoin de connaître toutes les caractéristiques du mouvement. Dans ce cas, on introduit des modèles représentant les effets de la turbulence sur l'écoulement. Le fait que les gros tourbillons sont plus importants énergétiquement que les petits, a conduit au développement de la méthode **LES** (**L**arge **E**ddy **S**imulation – simulation des grandes échelles). Dans cette méthode les équations sont résolues pour les grosses structures de la turbulence, et l'effet des structures plus petites est pris en compte par des modèles de sous – mailles. Cette hypothèse permet d'utiliser un maillage largement plus grossier que dans la méthode DNS, mais aussi de l'adapter au problème traité. Ainsi, en LES, on utilise des équations filtrées sur l'espace. Une bonne description de cette approche a été donnée par CHEN (2001).

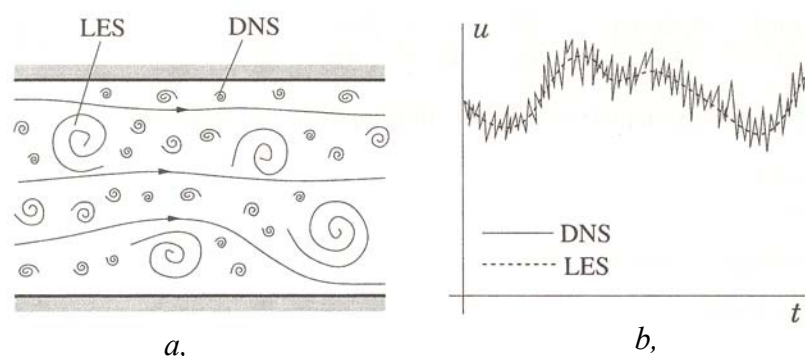


Figure III.1 : Représentation schématique du mouvement turbulent (a,) et la dépendance du temps d'une composante de vitesse dans un point donné (b,) [FER02]

Sur la figure III.1 une représentation schématique du mouvement turbulent est présentée. La limite entre les deux modèles DNS et LES est lisible, les plus petits tourbillons font partie de la description apportée par la DNS, alors que les grosses structures sont présentes dans les deux approches. Sur la figure b, on voit la différence entre les deux calculs de vitesse, car la LES donne une moyenne « lisse » dans le temps alors que la DNS suit le mouvement de toutes les structures et la présence des petites variations est visible sur le résultat. La courbe représentant la vitesse est plus perturbée, on y voit l'influence directe des petites structures. Une étude exhaustive sur la comparaison entre DNS et LES a été menée par PIOMELLI (2001).

BOUILLY (2003) a utilisé la LES avec différents modèles de sous – maille pour étudier le dépôt de particules de diamètre 5 μm . BEGHEIN et al. (2005) ont utilisé la LES avec le modèle de sous - maille *Smagorinsky* pour calculer la dispersion des grosses particules polluantes (5 et 20 μm de diamètre) dans une chambre de taille de 2.5*2.5*2.5 m^3 .

Le dernier groupe de modèles est celui des modèles liés à l'utilisation de moyennes temporelles. Dans ces modèles, largement employés aujourd'hui, on introduit les moyennes temporelles des différentes variables dans l'équation de Navier-Stokes et on fait des hypothèses de fermeture pour résoudre les équations supplémentaires (contraintes de *Reynolds*) qui apparaissent dans ces équations du fait de l'introduction des champs moyens. On utilise les équations de Reynolds aux moyennes temporelles (**RANS – Reynolds Averaged Navier Stokes**). Ces modèles peuvent être regroupés de la manière suivante :

- modèles à zéro équation (ou modèles de longueur de mélange)
- modèles à deux équations (k- ϵ modèles)
- modèles à contraintes de Reynolds
- modèles des contraintes algébriques.

La moyenne temporelle d'une quantité s'exprime dans le cas d'un écoulement stationnaire et turbulent, comme la somme de la moyenne dans le temps, $\overline{\varphi}$:

$$\overline{\varphi} = \frac{1}{t_{\text{int}}} \int_0^{t_{\text{int}}} \varphi dt \quad (\text{III.20})$$

et de la partie instantanée, φ' :

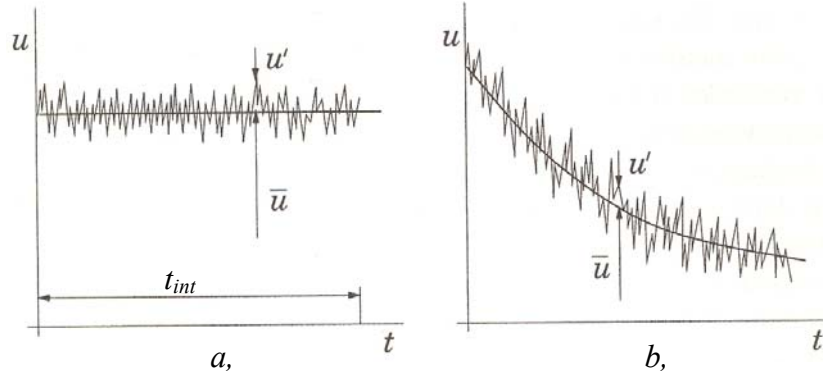
$$\varphi = \overline{\varphi} + \varphi' \quad (\text{III.31})$$

Le temps t_{int} [s], sur lequel on intègre l'équation, doit être significativement plus grand que la période pendant laquelle un tourbillon traverse un point de l'espace. La moyenne temporelle d'une quantité instantanée est nulle :

$$\overline{\varphi'} = \frac{1}{t_{\text{int}}} \int_0^{t_{\text{int}}} \varphi' dt = 0 \quad (\text{III.42})$$

et l'écoulement moyen est supposé stationnaire

$$\frac{\partial \overline{\varphi}}{\partial t} = 0 \quad (\text{III.53})$$



**Figure III.2 : (a) Moyenne dans le temps pour un écoulement stationnaire ;
(b) moyenne pour un écoulement instationnaire (FERZIGER 2002)**

L'équation gouvernant l'écoulement dans les modèles RANS devient alors:

$$\frac{\partial(\rho_f \bar{\phi})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f \bar{\phi} \bar{u}_f)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_\phi \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} - \rho_f \overline{u_f' \phi'} \right) + q_\phi \quad (\text{III.64})$$

Les modèles RANS sont basés sur l'analogie entre les effets des contraintes visqueuses et des contraintes de *Reynolds* sur l'écoulement moyen (d'après *Boussinesq*). Ainsi, dans les écoulements laminaires, la dissipation de l'énergie ou le transport des quantités (masse, moment, énergie) perpendiculairement à la direction de l'écoulement est réalisée par la viscosité, par conséquent on considère l'effet de la turbulence comme une augmentation de la viscosité. De fait, les contraintes de *Reynolds* peuvent être modélisées comme une viscosité turbulente (eddy - viscosity models) :

$$-\rho_f \overline{u_f' v_f'} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_f}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}_f}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \rho_f \delta_{ij} k \quad (\text{III.7})$$

où δ_{ij} est le symbole de Kronecker ($\delta_{ij} = 1$ si $i = j$ et $\delta_{ij} = 0$ autrement) et k est l'énergie cinétique turbulente. Le modèle de diffusion des tourbillons pour le flux de concentration turbulent est :

$$-\rho_f \overline{u_f' c'} = \varepsilon_p \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \quad (\text{III.8})$$

où

$$\varepsilon_p = \frac{\mu_t}{Le} \quad (\text{III.9})$$

est le coefficient de diffusion turbulente, et dans l'expression (III.17) Le est le nombre de *Lewis* de la quantité ϕ , rapport entre le nombre de *Schmidt* et celui de *Prandtl*.

$$Le = \frac{Sc}{Pr} \quad (\text{III.10})$$

Dans l'expression III.7 nous avons introduit μ_t , la viscosité dynamique turbulente. Cette quantité μ_t est proportionnelle à une échelle de vitesse u_f , mais aussi à une échelle de longueur, L_t , caractérisant l'échelle spatiale des gros tourbillons de l'écoulement turbulent :

$$\mu_t = u_f L_t \rho_f \quad (\text{III.11})$$

Pour la fermeture du système formé par les équations de conservation, il faut alors déterminer μ_t , la viscosité turbulente, seule inconnue de ces modèles.

Les modèles $k - \varepsilon$

Le modèle $k - \varepsilon$ le plus utilisé dans la bibliographie est le modèle *standard* (BEGHEIN (1992), SANDU (1999)). Il existe selon la relation entre les contraintes de *Reynolds* et les effets visqueux des modèles linéaires, des modèles quadratiques et cubiques. Selon la différence de traitement de la couche limite, on distingue les modèles à haut nombre de Reynolds et à bas nombre de Reynolds. Cependant les modèles $k - \varepsilon$ ont des difficultés à suivre les écoulements complexes comme les écoulements rotatifs, les écoulements à couche limite très fine ou encore des écoulements à fluides séparés. Malgré ces critiques, les modèles $k - \varepsilon$ ont eu un succès indiscutable dans les applications industrielles et pour les bâtiments, et restent encore en plein développement de nos jours. Avec les progrès réalisés ces dernières années dans la construction des supers calculateurs, les simulations avec les modèles à bas nombre de *Reynolds* sont de plus en plus utilisées. L'avantage des modèles à bas nombre de *Reynolds* est que nous n'avons plus besoin d'utiliser de modèles empiriques pour représenter la couche limite, elle est complètement intégrée au domaine de calcul. De ce fait, il est alors nécessaire d'avoir un maillage beaucoup plus fin, surtout au voisinage des parois.

• Les modèles eulériens :

Dans le modèle eulérien, les particules sont vues comme un milieu continu. La concentration des particules dans le milieu fluide est considérée comme une grandeur scalaire et on suppose que la dispersion des particules respecte les lois de Fick. Cette approche n'est valable que dans certains écoulements turbulents, (BATCHELOR, 1949). Pour le cas général des écoulements, quand la constante de temps de la particule devient grande, le modèle de loi de Fick peut être irréaliste.

Pour pouvoir considérer le mélange des particules et du fluide comme un milieu hétérogène et par la suite modéliser le phénomène de diffusion des particules dans le fluide il faut tenir

compte de certaines hypothèses et surtout négliger l'inertie de la particule. Cette hypothèse n'est plus valable que pour les particules très petites (dont la taille est voisine de celle des molécules du fluide). Il existe 2 types de modèles Eulériens : à une phase et à deux phases.

- Les modèles eulériens à une phase considèrent le système particules/air comme un milieu hétérogène dans lequel les particules suivent fidèlement l'écoulement fluide RUDINGER (1964). 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, ELGHOBASHI et al. (1983), 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 lagrangiens :

Le mouvement des particules dans un écoulement turbulent est soumis à deux influences : l'inertie de la particule et la vitesse instantanée du fluide. La première empêche la particule de répondre aux fluctuations turbulentes du fluide et par conséquent rend la valeur de la variance de la particule différente de celle du fluide. La deuxième fait que la particule change d'une manière continue son environnement fluide et passe d'un tourbillon à un autre. Par conséquent, l'histoire du mouvement de la particule est différente de celle du fluide et ses corrélations lagrangiennes sont alors différentes.

Les particules sont traitées de manière individuelle : celles-ci sont suivies le long de leur trajectoire grâce à la résolution de l'équation de la dynamique du mouvement. Les propriétés globales des particules sont obtenues par une moyenne d'ensemble sur toutes les trajectoires des particules.

L'avantage des méthodes lagrangiennes est d'une part qu'elles s'appuient sur un nombre plus petit d'hypothèses pour le mécanisme de diffusion et d'autre part que l'interaction entre les particules et les limites du domaine peuvent être menées naturellement.

Les interactions des particules avec le fluide (ou avec les parois) sont explicitement prises en compte. Par rapport aux modèles Eulériens, où, après la résolution, l'accès aux champs de concentration et de vitesse particulaire 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.

On considère que dans un bâtiment, les niveaux de concentration particulaire relevés permettent de négliger les effets de coagulation entre les particules. Pour l'étude numérique, les particules sont rigides, de forme sphérique et de densité 1000kg.m^{-3} . Les particules ne se déforment pas, même lors d'une collision avec la paroi.

L'équation du mouvement d'une particule solide sphérique soumise à la force de pesanteur dans un fluide au repos a été obtenue grâce aux travaux de Basset en 1888, Boussinesq en 1903 et Oseen en 1927, puis modifiée par différents auteurs pour l'appliquer à une particule dans un fluide en mouvement.

En 1971, Riley a obtenu l'équation suivante:

$$\underbrace{\rho_P \frac{\pi d_P^3}{6} \frac{d\vec{U}_P}{dt}}_I = \underbrace{\frac{\pi d_P^2}{8} \rho C_D |\vec{U} - \vec{U}_P| (\vec{U} - \vec{U}_P)}_{II} + \underbrace{\rho \frac{\pi d_P^3}{6} \frac{D\vec{U}}{Dt}}_{III} + \underbrace{\rho \frac{\pi d_P^3}{6} C_A \frac{d(\vec{U} - \vec{U}_P)}{dt}}_{IV} + \underbrace{\frac{\pi d_P^3}{6} (\rho_P - \rho) \vec{g}}_V + \underbrace{\frac{\pi d_P^2}{4} C_H \frac{\sqrt{\rho\mu}}{\pi} \int_{-\infty}^0 \frac{d(\vec{U} - \vec{U}_P)}{dt} (t-t')^{-1/2} dt'}_{VI} + \underbrace{\vec{F}_e}_{VII} \quad (\text{III.20})$$

- Où:
- I force nécessaire pour accélérer la particule
 - II force de traînée de la particule
 - III terme dû au gradient de pression (induit par l'accélération du fluide) autour de la particule
 - IV force nécessaire pour accélérer le volume équivalent de fluide qui bouge avec la particule (force de masse ajoutée)
 - V force de gravité
 - VI terme historique de Basset (dû au développement temporel du sillage de la particule)
 - VII autres forces extérieures (par exemple, force de Saffman, force de thermophorèse, etc ...)

Avec: ρ, ρ_P masses volumiques du fluide et de la particule
 d_P diamètre de la particule

μ	viscosité dynamique du fluide
C_D	coefficient de traînée
C_A	coefficient de masse ajoutée
C_H	coefficient de Basset
\vec{g}	vecteur accélération de la pesanteur
\vec{U}, \vec{U}_p	vecteurs vitesses instantanées du fluide et de la particule

Et: D/Dt représente la dérivée particulaire.

Lorsque la masse volumique de la particule est très supérieure à celle du fluide, et pour de faibles accélérations du fluide (c'est le cas si on s'intéresse à la dispersion de particules solides dans les écoulements d'air rencontrés dans le bâtiment), on peut négliger les termes III, IV et VI. L'équation du mouvement d'une particule devient alors:

$$\rho_p \frac{\pi d_p^3}{6} \frac{d\vec{U}_p}{dt} = \frac{\pi d_p^2}{8} \rho C_D |\vec{U} - \vec{U}_p| (\vec{U} - \vec{U}_p) + \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_p - \rho) \vec{g} + \vec{F}_e \quad (\text{III.21})$$

Le coefficient de traînée dépend du régime d'écoulement autour de la particule, et donc du nombre de Reynolds Re_p basé sur le diamètre de la particule et la vitesse relative de la particule:

$$Re_p = \frac{|\vec{U} - \vec{U}_p| d_p}{\nu} \quad (\text{III.22})$$

Lorsque les effets visqueux l'emportent (c'est-à-dire pour un nombre de Reynolds très faible), on utilise la loi de Stokes, Hinds (1987):

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \text{ pour } Re_p < 1 \quad (\text{III.23})$$

Lorsque les effets inertiels sont les plus importants (donc pour un nombre de Reynolds important), le coefficient de traînée est constant:

$$C_D = 0.44 \text{ pour } Re_p > 1000 \quad (\text{III.24})$$

Entre ces deux comportements extrêmes, on a une région de transition, pour laquelle le coefficient de traînée suit la loi:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left(1 + \frac{Re_p^{2/3}}{6} \right) \text{ pour } 1 < Re_p < 1000 \quad (\text{III.25})$$

Pour la résolution, l'équation III.20 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:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du_p}{dt} = \sum F_x \\ \frac{dv_p}{dt} = \sum F_y \\ \frac{dw_p}{dt} = \sum F_z \\ \frac{dx_p}{dt} = u_p \\ \frac{dy_p}{dt} = v_p \\ \frac{dz_p}{dt} = w_p \end{array} \right. \quad (\text{III.26})$$

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 et de la vitesse du fluide, U .

Forces extérieures agissant sur la particule :

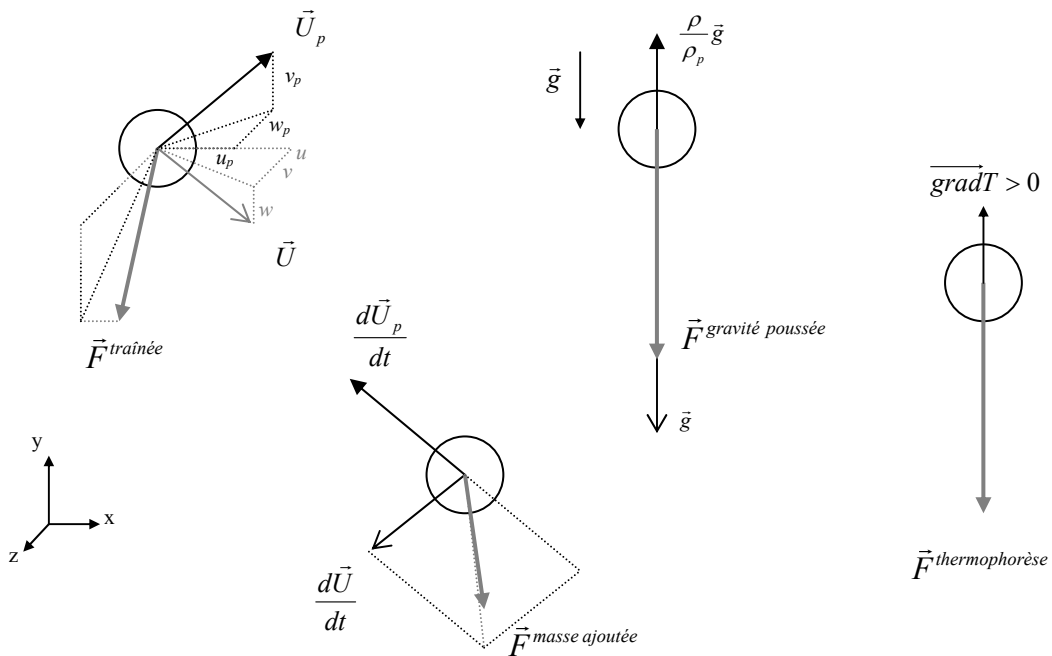


Figure III.3 : Forces agissant sur une particule (BOUILLY 2003)

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.

La force de traînée :

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 :

$$\begin{cases} F_x^{traînée} = 0.75 \times C_C \times C_D \times \frac{\rho}{\rho_p d_p} |U - U_p| (u - u_p) \\ F_y^{traînée} = 0.75 \times C_C \times C_D \times \frac{\rho}{\rho_p d_p} |U - U_p| (v - v_p) \\ F_z^{traînée} = 0.75 \times C_C \times C_D \times \frac{\rho}{\rho_p d_p} |U - U_p| (w - w_p) \end{cases} \quad (III.27)$$

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

C_D : coefficient de traînée.

Le coefficient de traînée C_D est constant pour les valeurs de Reynolds supérieures à 1000 sinon il varie selon le régime de turbulence (Cf. Chapitre I). Pour les particules dont le diamètre est inférieur à 1 μm , il est nécessaire d'introduire le coefficient de Cunningham C_C (défini au Chapitre I), 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.

La force de masse ajoutée :

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 :

$$\begin{cases} F_x^{masse\ ajoutée} = C_a \times \frac{\rho}{\rho_p} \left(\frac{du}{dt} - \frac{du_p}{dt} \right) \\ F_y^{masse\ ajoutée} = C_a \times \frac{\rho}{\rho_p} \left(\frac{dv}{dt} - \frac{dv_p}{dt} \right) \\ F_z^{masse\ ajoutée} = C_a \times \frac{\rho}{\rho_p} \left(\frac{dw}{dt} - \frac{dw_p}{dt} \right) \end{cases} \quad (III.28)$$

Le coefficient de masse ajoutée C_a est calculé à partir de l'expression ODAR et HAMILTON (1964):

$$C_a = 1.05 - \frac{0.066}{A_c^2 + 0.12} \quad (\text{III.29})$$

$$\text{Et } A_c = \frac{|U - U_p|^2}{d_p \left| \frac{dU_p}{dt} - \frac{dU}{dt} \right|} \quad (\text{III.30})$$

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})

Pour notre étude, nous négligeons la force de masse ajoutée du fait que les particules sont très petites (inférieures à $10\mu\text{m}$ de diamètre).

Les forces de gravité et de poussée :

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 :

$$\begin{cases} F_x^{\text{gravité poussée}} = g_x \times \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) \\ F_y^{\text{gravité poussée}} = g_y \times \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) \\ F_z^{\text{gravité poussée}} = g_z \times \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

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

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

La force de 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.

Nous avons souligné précédemment que pour mettre en évidence certains phénomènes tels que les zones de dépôt préférentiel, ou encore les zones où nous avons la présence d'une hétérogénéité, il est nécessaire d'utiliser l'approche numérique de type CFD qui reste très

laborieuse à mettre en place lorsque de surcroît nous avons pour objectif de prendre en compte la remise en suspension par les pas d'une personne se déplaçant sur le plancher.

Comme c'est l'évolution de la concentration globale qui nous intéresse (apport en tant que source globale généré par les pas) et non le transfert au « voisinage des pas » ainsi que la trajectoire des particules « éjectées par les chaussures ». Nous avons donc choisi d'orienter nos recherches sur une approche globalisante similaire à celle précédemment évoquée : l'approche globale Nazaroff (1993) que nous abordons donc dans le paragraphe ci-après.

III.2.2. Modélisation globale

Nous allons reprendre brièvement ce que nous avons développé dans le chapitre 1, afin d'introduire notre nouvelle approche : l'analogie électrique.

La concentration particulaire de l'air intérieur dépend de plusieurs paramètres. En effet, l'échange avec l'air extérieur (caractérisé généralement par le taux de renouvellement d'air), la présence d'une source interne de polluants particulaires et les interactions avec les parois (phénomènes de dépôt, de ricochet ou bien de remise en suspension) influencent énormément la concentration en particules dans l'ambiance intérieure Abadie (2000). La figure II.4 illustre les différents échanges particulaires à l'intérieur d'une enceinte.

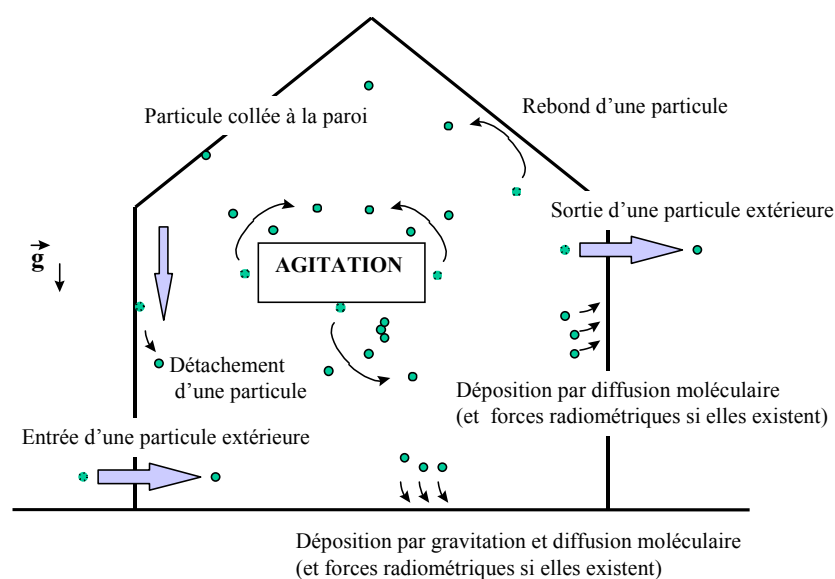


Figure III.4 : Mouvement des particules dans une enceinte

Le bilan de conservation massique du polluant particulaire dans une enceinte mono zone peut être exprimé par la relation suivante, Nazaroff (1993) :

$$\frac{dC_i}{dt} = f\lambda_r C_{ext} - \lambda_r C_i - \lambda_{de} C_i - \lambda_R C_{Di} + S_i \quad (\text{III.32})$$

Avec :

C_i : concentration intérieure en particules dans l'air (kg ou nombre m^{-3}),

C_{ext} : concentration extérieure en particules dans l'air (kg ou nombre m^{-3}),

C_{Di} : concentration en particules déposées (kg ou nombre m^{-3})

S_i : source interne de particules (kg ou nombre $m^{-3} s^{-1}$)

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 l'équation III.32 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.

Le coefficient de pénétration f est défini par la relation suivante :

$$f = \frac{C_{ext}}{C_{int/ouv}} \quad (\text{III.33})$$

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 (1990) évalue ce coefficient pour un hôpital de la région parisienne à 30% pour les particules inférieures à $10\mu m$. Pour la même taille de particules, KOUTRAKIS (1992) et THATCHER (1995) obtiennent un coefficient de 100%. Cette dernière valeur est communément admise pour les particules inférieures à $10\mu m$.

III.2.2.1. Paramètre de dépôt

Le paramètre de dépôt 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.

$$\lambda_{de} = \frac{S}{V} V_d \quad (\text{III.34})$$

Avec :

S : surface intérieure (m^2),

V : volume total (m^3),

V_d : vitesse globale de dépôt (ms^{-1}).

La vitesse globale de dépôt 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 :

$$V_d = \frac{J}{C_i} \quad (\text{III.35})$$

III.2.2.2. Paramètre de remise en suspension

L'évaluation du paramètre de remise en suspension est difficile. En effet, plusieurs paramètres sont mis en jeu, le type d'écoulement d'air existant à l'intérieur des bâtiments (vitesse d'écoulement, intensité de la turbulence..), l'activité humaine et la température jouent un rôle dans la remise en suspension des particules déjà déposées. Lengweiler et al. (1999) 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 $30\mu m$), 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.

Dans le modèle de Nazaroff (1993) (III.32) certains paramètres peuvent selon le cas être nuls ou négligés : S_i (source interne de particules) et λ_R (paramètre de remise en suspension).

Donc l'équation se réduit à :

$$\frac{dC_i}{dt} = f\lambda_r C_{ext} - \lambda_r C_i - \lambda_{de} C_i \quad (\text{III.36})$$

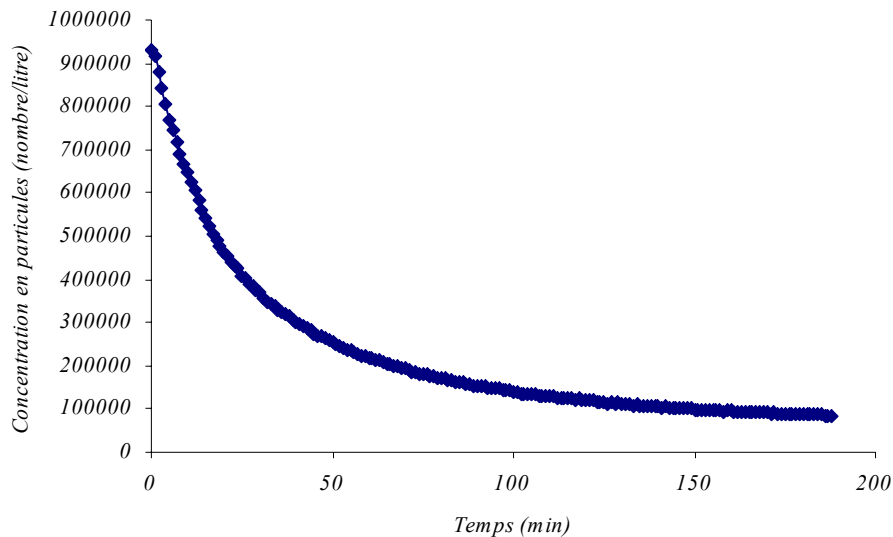
Ou encore :

$$\frac{dC_i}{dt} = f\lambda_r C_{ext} - (\lambda_r + \lambda_{de}) C_i \quad (\text{III.37})$$

Cela a permis à différents auteurs qui ont été cités dans le chapitre I (Figures I.20 à I.23), de mesurer le paramètre $\lambda_{dépôt}$ (h^{-1}) ($\lambda_{dépôt} = \lambda_r + \lambda_{de}$) pour différents revêtements intérieurs du bâtiment testés dans l'enceinte. Ce paramètre n'est autre que la pente de la décroissance exponentielle (Figure III.5) du nombre de particules calibrées présentes dans l'ambiance.

L'obtention du paramètre $\lambda_{dépôt}$ (h^{-1}) pour différents revêtements intérieurs du bâtiment testés, permet alors de considérer selon la taille des particules un dépôt global du polluant particulaire pour un niveau d'agitation donné. Ci-dessous nous fournissons les résultats de l'étude PRIMEQUAL2 (LIMAM et al. 2006) pour des particules étudiées (diamètre de $0.35 \mu\text{m}$). L'homogénéisation des particules dans l'enceinte est assurée par l'agitateur à hélices dont la vitesse de rotation est de l'ordre de $\omega = 1278 \text{ t} / \text{min}$.

Les mesures sont enregistrées avec un pas de temps de 1 minute pendant une période de quatre heures. La figure III.5 montre l'évolution de la quantité de particules à l'intérieur de l'enceinte.



Figure

**III.5 : Evolution de la quantité de particules (0.35µm) à l'intérieur de l'enceinte
Primequal2**

La courbe obtenue est de type $C(t) = C_0 \exp(-\lambda_{\text{dépôt}} t) + cte$. Dans ce cas, il y a infiltration d'air extérieur pollué, on a donc :

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = f\lambda_r C_{\text{ext}}(t) - (\lambda_r + \lambda_{de})C_i(t) \quad \text{(III.38)}$$

Nous allons proposer maintenant une démarche consistant à utiliser une superposition de deux phénomènes : charge et décharge en pollution particulaire d'une ambiance ventilée. Pour ce faire l'analogie électrique est donc proposée dans ce qui suit.

III.2.3. Approche globale fondée sur l'analogie électrique

Le comportement d'une bobine dans un circuit peut permettre de réguler l'intensité du courant en contrôlant la croissance du courant dans les différents dispositifs d'électronique de puissance.

Cette capacité de « retenir » ou de les injecter les électrons dans un circuit électrique nous a amené à considérer la possibilité d'assimiler les cycles de charge/décharge de ce composant électronique aux phases de dépôt particulaire et de remise en suspension.

Une bobine est un terme générique en électricité pour désigner un dipôle formé de une à une multitude de spires de fil autour d'un noyau. On peut donc définir la bobine comme un dipôle

électrique auto-inductif qui est caractérisé principalement par son inductance L , mais également par une résistance électrique (celle du fil utilisé, a priori faible).

Les modèles les plus simples et les plus fréquemment utilisés sont les modèle en série et en parallèle (figure III.4.a) :

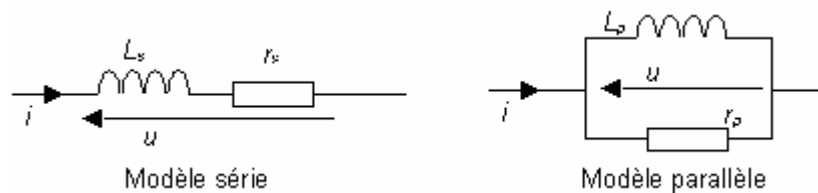


Figure III.4.a : montage pour la charge et décharge d'une bobine dans un circuit RL

- **Modèle série**

Il est constitué de l'association en série (cf. schéma ci-dessus) d'une inductance et d'une résistance, il correspond à l'équation suivante

$$u = L_s \cdot \frac{di}{dt} + r_s \cdot i \quad (\text{III.39})$$

- **Modèle parallèle**

Il est constitué de l'association en parallèle (cf. schéma plus haut) d'une inductance et d'une résistance, il correspond à l'équation suivante :

$$i = \frac{1}{L_p} \cdot \int_t u dt + \frac{u}{r_p} \quad (\text{III.40})$$

La tension u_B aux bornes de la bobine et l'intensité i du courant sont reliés par l'équation différentielle :

$$u_B = L \frac{di}{dt} + r i \quad (\text{III.41})$$

où L est l'inductance de la bobine et r sa résistance propre.

L'équation III.41 admet deux solutions usuelles : la première correspond au régime libre, c'est-à-dire lorsqu'on résout l'équation différentielle sans second membre. La seconde solution corresponde au régime forcé, c'est-à-dire le régime établi lorsque toutes les dérivées sont nulles.

La caractéristique d'une bobine a une allure exponentielle par rapport au temps (voir figure ci-dessous) :

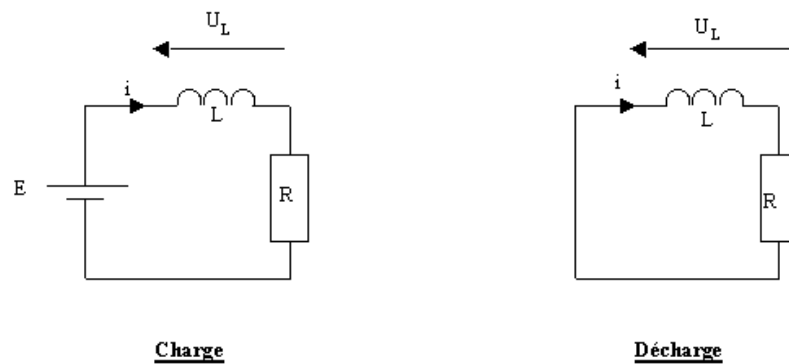


Figure III.4.b : montage pour la charge et décharge d'une bobine dans un circuit RL

La résolution de l'équation III.41 conduit aux expressions de $i_L(t)$ suivantes:

- **Solution du régime libre**

$$0 = L \frac{di}{dt} + ri \quad (\text{III.42})$$

Séparation des variables :

$$L \frac{di}{dt} = -ri \Rightarrow \frac{di}{dt} = -\frac{r}{L} \cdot i \Rightarrow \frac{di}{i} = -\frac{r}{L} \cdot dt \quad (\text{III.43})$$

On intègre les deux membres

$$\text{Log}i = -\frac{r}{L} \cdot t + Cte \quad (\text{III.44})$$

Donc la solution est :

$$i_t = e^{-\frac{r}{L} \cdot t + Cte} \Rightarrow i_t = K \cdot e^{-\frac{r}{L} \cdot t} \quad (\text{III.45a})$$

Usuellement on écrit cette solution sous la forme :

$$i_t = \frac{E}{r} \cdot e^{\left(-\frac{1}{\tau} t\right)} \quad (\text{III.45b})$$

Avec : $K = E / R$

$\tau = L / r$

- *Solution du régime forcé*

Lorsque la bobine est soumise à une tension E , la solution du régime forcé est :

$$i_f = \frac{E}{r} \quad (\text{III.46})$$

Par conséquent, la solution de l'équation III.41 en régime forcé s'écrit sous la forme :

$$i = K.e^{-\frac{r}{L}.t} + \frac{E}{r} \quad (\text{III.47})$$

La détermination de la constante K est faite grâce à la condition physique suivante : *Le courant à travers une inductance ne peut en aucun cas subir de discontinuité.*

À l'instant $t = 0$, le courant vaut I_{initiale} . En injectant dans l'équation III.47, on obtient :

$$I_i = K + \frac{E}{r} \Rightarrow K = I_i - \frac{E}{r} \quad (\text{III.48})$$

Donc :

$$i = \left(I_i - \frac{E}{r}\right).e^{-\frac{r}{L}.t} + \frac{E}{r} \quad (\text{III.49})$$

Souvent, dans les *cas d'école*, le courant initial est nul. On obtient alors :

$$i = \frac{E}{r} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (\text{III.50})$$

Charge d'une bobine:

$$i_L(t) = \frac{E}{R} [1 - \exp(-t/\tau)]$$

(Régime forcé)

L'instant $t=0$ correspond au début de la charge

Décharge d'une bobine:

$$i_L(t) = \frac{E}{R} \exp(-t/\tau)$$

(Régime libre)

L'instant $t=0$ correspond au début de la décharge

Tableau III.2 : Equations caractéristiques d'une charge et décharge d'une bobine

Dans les deux expressions ci-dessus, la constante τ est appelée constante de temps du circuit "RL". L'expression de τ est : $\tau = L/R$.

La représentation de $i_L(t)$ en fonction du temps est:

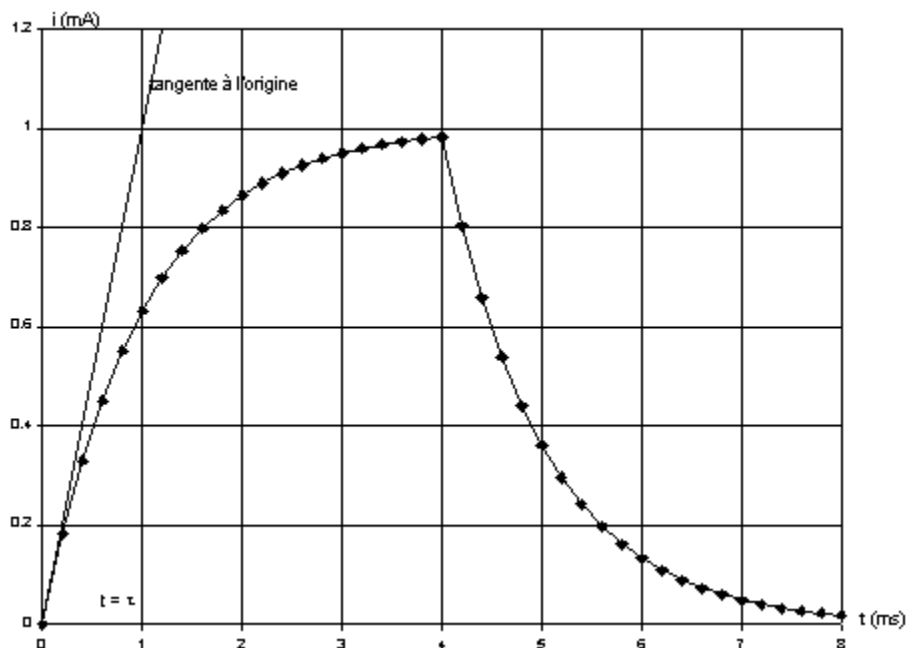


Figure III.5 : Courbes de charge/décharge d'une bobine dans un circuit RL

La courbe ci-dessus a été tracée pour $E=1V$, $R = 1k\Omega$ et $\tau = 1ms$. Cette courbe représente une charge puis une décharge. Sur ce graphe apparaît aussi la tangente à l'origine (en trait plein) et la valeur maximale atteinte avant la décharge (en trait pointillé).

Dans notre étude, nous allons modéliser le comportement particulier dans la cellule test en deux phases :

- Dépôt ;
- Remise en suspension des particules déposées ;

• **Phase 1 : Modélisation dépôt particulaire**

Il est possible d'assimiler le mécanisme du dépôt particulaire à la décharge d'une bobine dans un circuit RL selon le tableau suivant :

<i>Grandeurs particulières</i>	<i>Grandeurs électriques</i>
Concentration $c(t)$	Intensité du courant $i(t)$
Coefficient du dépôt λ_d	$1/\tau$
C_0	E/R
Dépôt	Régime forcé
Remise en suspension	Régime libre

Tableau III.3 : Analogie entre les paramètres particuliers et les paramètres électriques.

En mettant en œuvre cette similitude, on aboutit à la formule ci-dessous :

$$C(t) = f(\Phi) \frac{E}{R} . e^{(A.t)} \quad \text{(III.51)}$$

Avec f est une fonction du diamètre de la particule et du revêtement utilisé. En fonction du revêtement utilisé, la fonction f peut être soit une fonction de puissance, soit un polynôme de second degré.

A est l'inverse de la constante du temps du circuit RL.

III.3. Résultats

Les résultats concernant le dépôt sont fournis ci-après par l'ensemble des figures relatives aux différents revêtements.

- **Bois :**

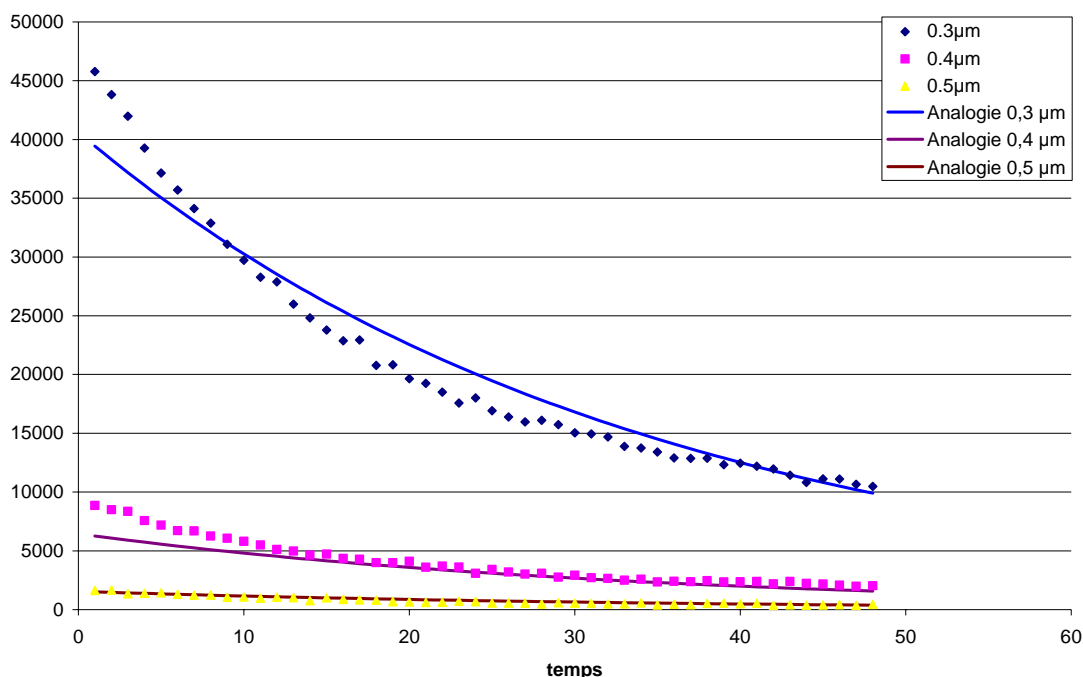


Figure III.6 : superposition des résultats numérique par analogie électrique (bois)

D’après la courbe ci-dessus, on note clairement que l’allure des résultats numériques est en accord avec l’allure des résultats expérimentaux.

Une analyse d’erreur a été effectuée pour apprécier la précision du modèle. Les résultats sont reportés dans le tableau suivant :

Diamètre (μm)	0.3	0.4	0.5
Ecart moyen (Exp/Num)	1698,42	602,167	98,32
Seuil de référence (moyenne)	21438,77	3404,80	817,06
Erreur relative	3,96%	8,84%	6,02%

Tableau III.4 : Erreur relative du modèle global par analogie électrique (bois).

On remarque que l’erreur relative ne dépasse pas 10% pour toute la plage des diamètres étudiés, par conséquent, on peut dire que le modèle global basé sur l’analogie électrique reproduit correctement le comportement des particules.

Il est intéressant de préciser que le modèle est plus précis pour le diamètre 0,3 μm que pour le 0,4 et le 0,5 μm . (environ 35% de précision en plus).

Linoléum lisse :

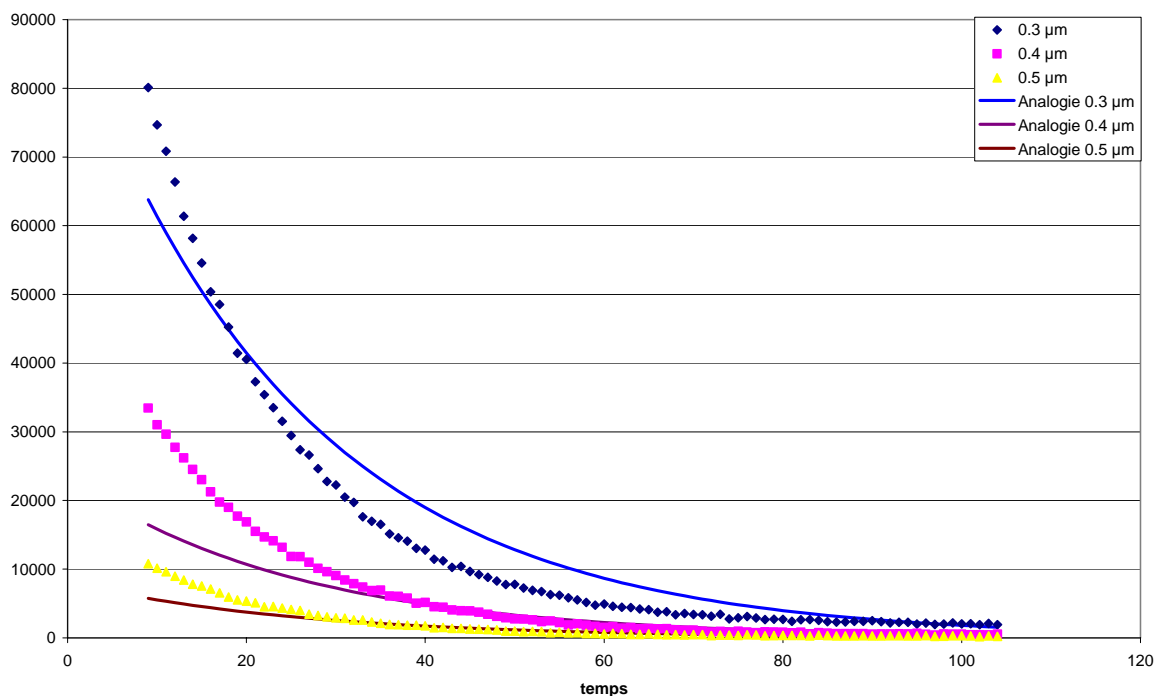


Figure III.7 : superposition des résultats numérique par analogie électrique (Linoléum lisse)

De la même façon, on présente ci-dessous un calcul d'erreur relative des résultats numériques par rapport aux résultats expérimentaux :

Diamètre (μm)	0.3	0.4	0.5
Ecart moyen (exp/Num)	4076,93	2491,32	707,28
Seuil de référence (moyenne)	16986,40	6878,15	2285,02
Erreur relative	12,00%	18,11%	15,48%

Tableau III.5 : Erreur relative du modèle global par analogie électrique (Linoléum lisse).

Contrairement au bois, l'erreur relative du linoléum lisse est plus prononcée (supérieure à 10%), ce qui montre que le modèle global basé sur l'analogie électrique est moins précis pour ce type de revêtement.

- **Linoléum rugueux :**

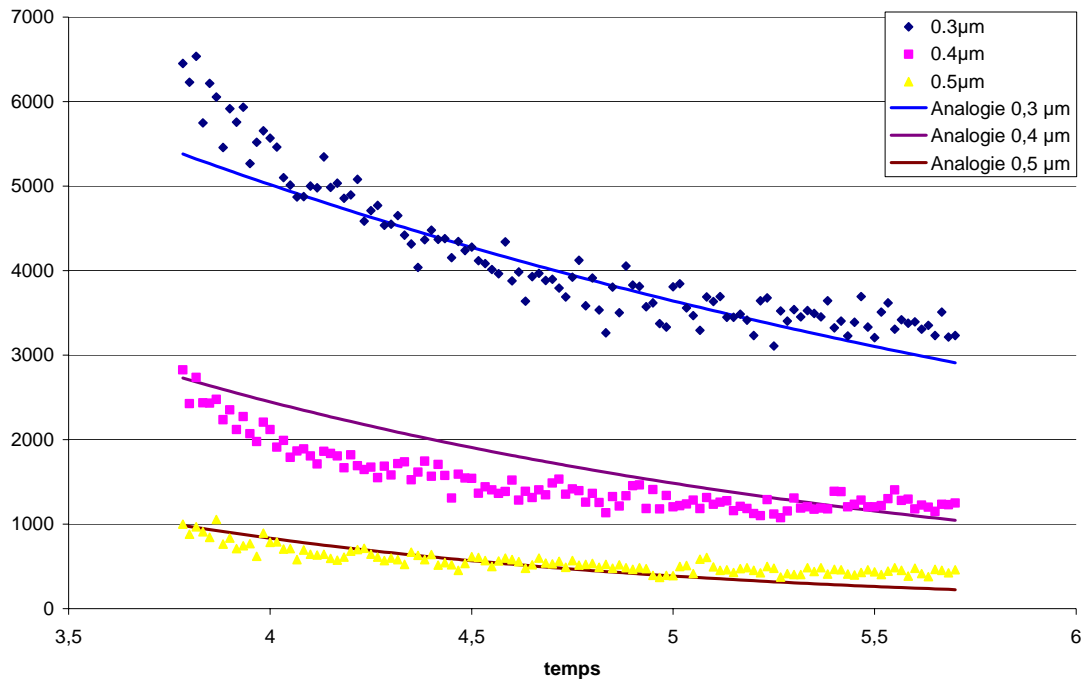


Figure III.8 : superposition des résultats numérique par analogie électrique (linoléum rugueux)

Diamètre (μm)	0.3	0.4	0.5
Ecart moyen (exp/Num)	257,12	285,67	101,20
Seuil de référence (moyenne)	4019,66	1755,61	515,86
Erreur relative	3,20%	8,14%	9,81%

Tableau III.6 : Erreur relative du modèle global par analogie électrique (Linoléum rugueux).

L'analyse de la figure III.8 montre que les allures des courbes des résultats expérimentaux et numériques sont semblables.

Cette similitude se confirme par le ratio de l'erreur relative (inférieure à 10%) pour tous les diamètres étudiés.

On en déduit que le modèle global par analogie électrique est approche correcte du comportement particulière, notamment le dépôt, pour le linoléum rugueux.

- **Moquette :**

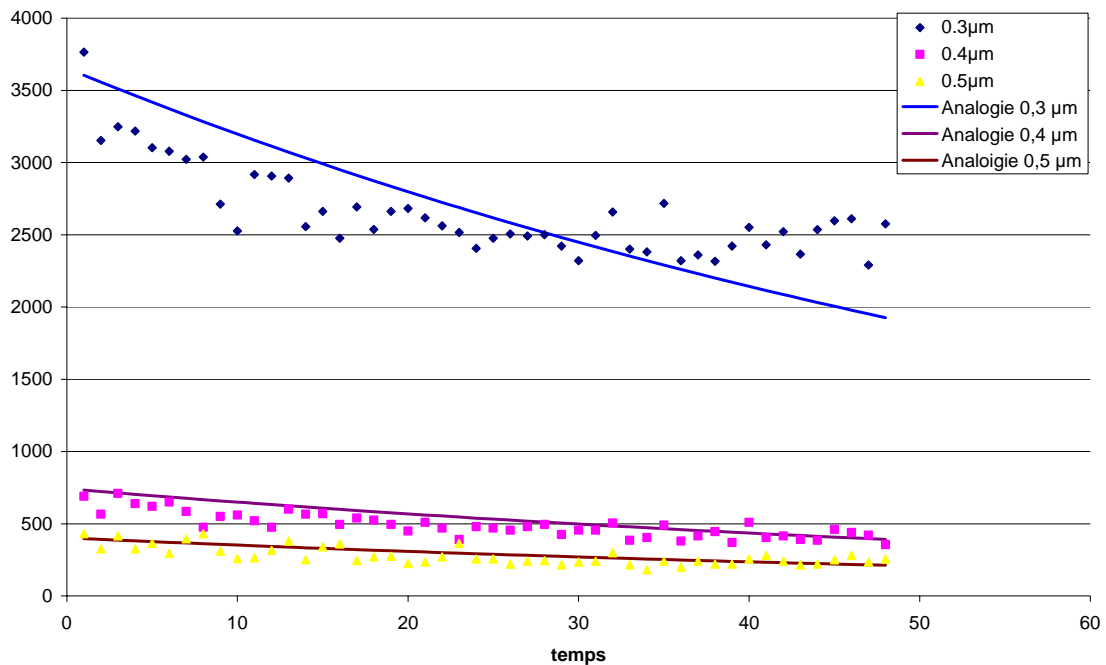


Figure III.9 : superposition des résultats numérique par analogie électrique (Moquette)

Diamètre (µm)	0.3	0.4	0.5
Ecart moyen (exp/Num)	306,17	66,19	40,03
Seuil de référence (moyenne)	2571,55	522,42	283,34
Erreur relative	5,95%	6,34%	7,06%

Tableau III.7 : Erreur relative du modèle global par analogie électrique (Moquette).

D'après l'analyse des résultats de la phase dépôt, obtenus par application du modèle global basé sur l'analogie électrique, nous pouvons conclure que le modèle donne des résultats avec une précision satisfaisante (erreur inférieure à 10% dans 75% des cas étudiés).

● **Phase 2 : Modélisation de la remise en suspension**

De la même façon que pour le dépôt particulaire, on peut assimiler la remise en suspension des particules déposées au processus de décharge d'une bobine dans un circuit RL (cf. figure III.4).

De ce fait l'équation analogique sur la base des paramètres de similitude mentionnés précédemment est de la forme :

$$C(t) = f(\Phi) \frac{E}{R} \cdot (1 - e^{(A.t)}) \quad (\text{III.52})$$

Avec f est une fonction du diamètre de la particule et du revêtement utilisé. En fonction du revêtement utilisé, la fonction f peut être soit une fonction de puissance, soit un polynôme de second degré.

A est l'inverse de la constante du temps du circuit RL.

Les résultats concernant la remise en suspension sont fournis ci-après par l'ensemble des figures relatives aux différents revêtements.

● **Bois**

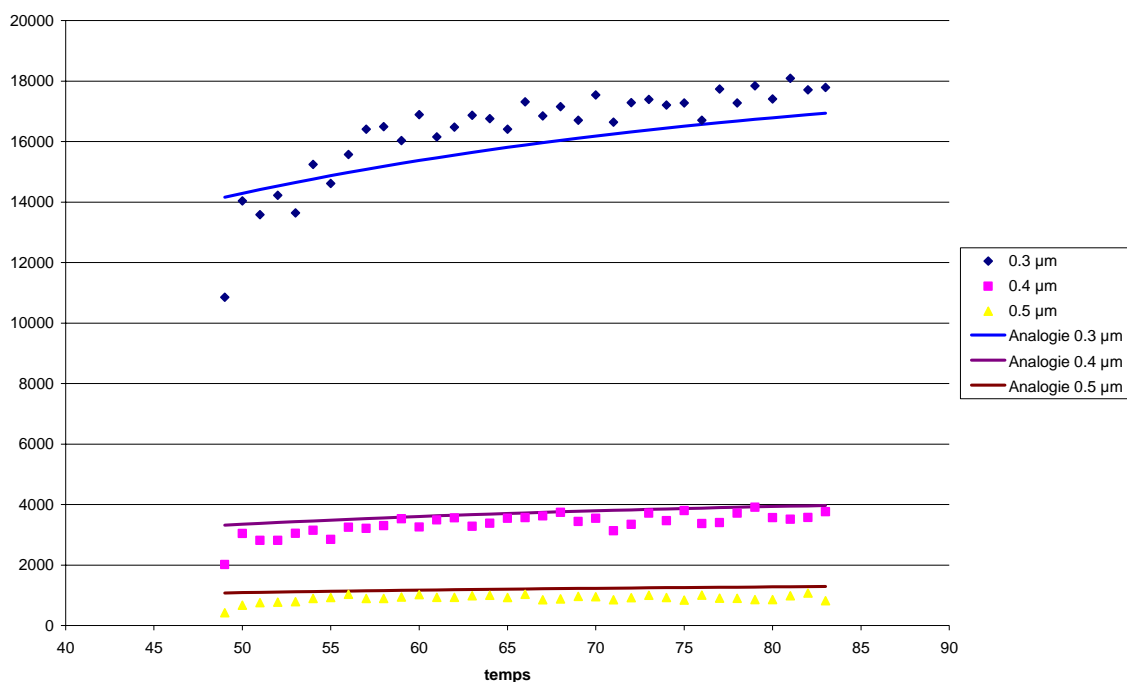


Figure III.10 : superposition des résultats numérique par analogie électrique (bois)

Diamètre (µm)	0.3	0.4	0.5
Ecart moyen (exp/Num)	622,62	218,83	153,15
Seuil de référence (moyenne)	16166,16	3224,52	1046,45
Erreur relative	1,93%	3,39%	7,32%

Tableau III.8 : Erreur relative du modèle global par analogie électrique (Bois).

Notre modèle donne des résultats stables et reproductibles pour les différents types de revêtements. Pour la remise en suspension des particules sur du bois, l'erreur de calcul est dans l'intervalle de tolérance (inférieure à 10%).

- **Linoléum rugueux**

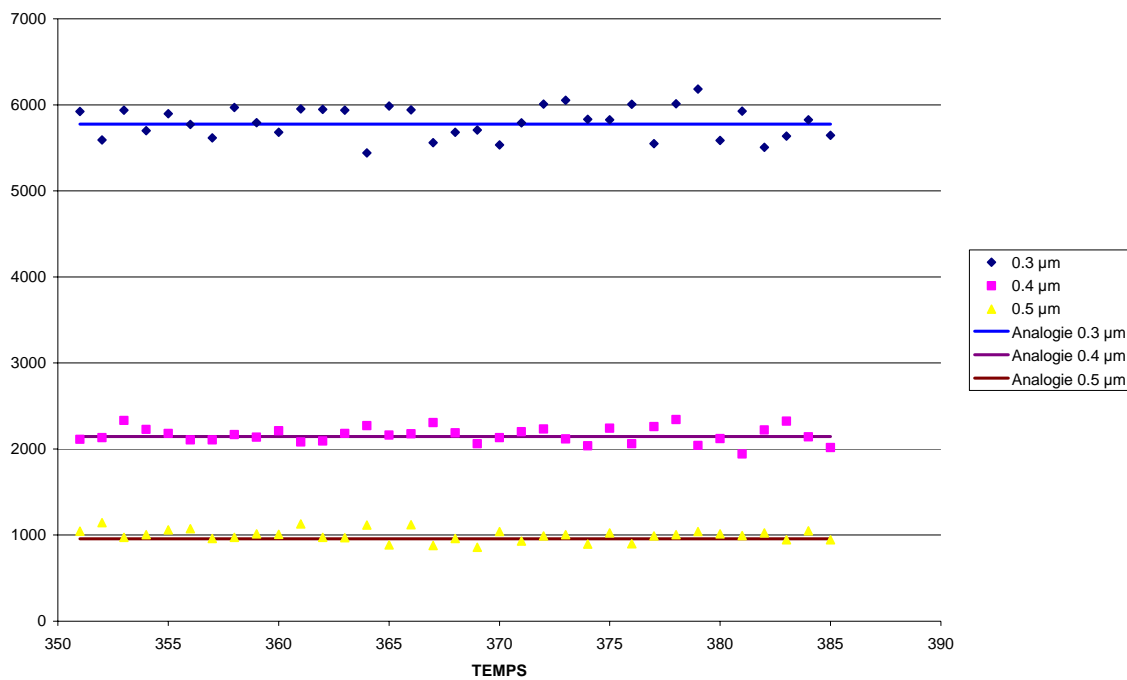


Figure III.11 : superposition des résultats numérique par analogie électrique (Linoléum rugueux)

Diamètre (μm)	0.3	0.4	0.5
Ecart moyen (exp/Num)	168,92	84,56	71,22
Seuil de référence (moyenne)	5774,67	2146,36	957,66
Erreur relative	1,46%	1,97%	3,72%

Tableau III.8 : Erreur relative du modèle global par analogie électrique (Linoléum rugueux).

En ce qui concerne la remise en suspension, le modèle global basé sur l'analogie électrique donne des résultats assez corrects vu que l'erreur relative ne dépasse pas 4%.

Cette précision est principalement due aux faibles fluctuations des points de mesure durant la phase de remis en suspension (phénomène long dans le temps) ce qui permet d'avoir une meilleure approche et réduit par conséquent les résidus de calcul.

- **Linoléum lisse**

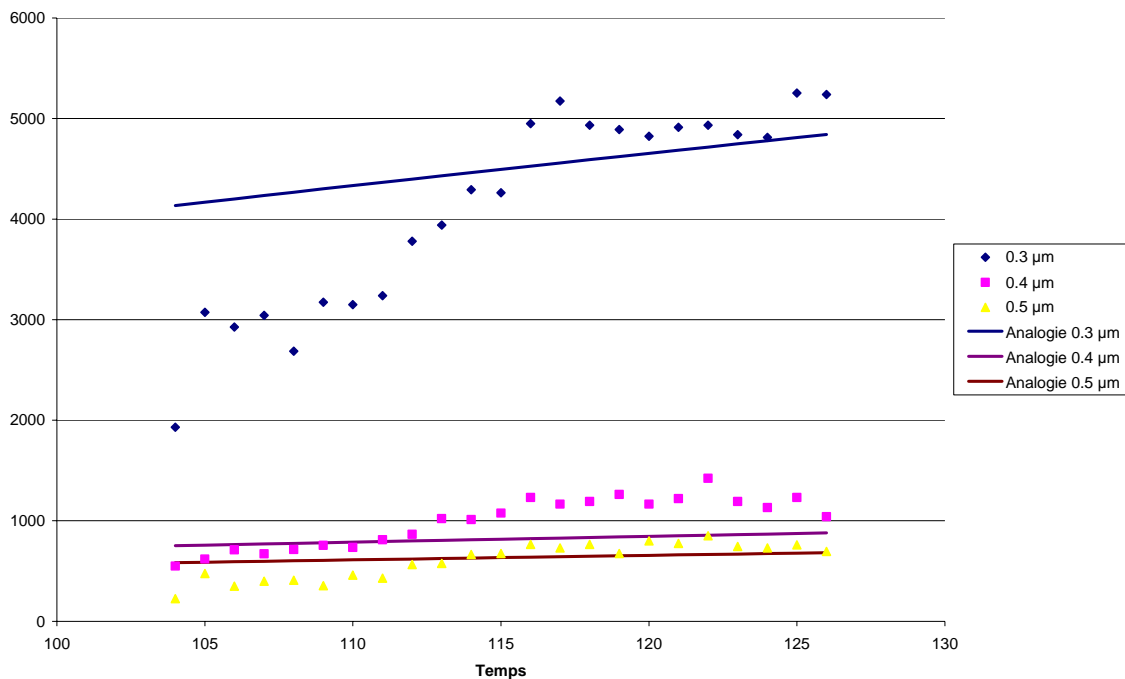


Figure III.12 : superposition des résultats numérique par analogie électrique (Linoléum lisse)

Que ce soit en phase du dépôt ou en phase de remise en suspension, le modèle global utilisé montre une limitation concrète : les résultats relatifs au linoléum lisse sont en désaccord avec les mesures. Ceci peut éventuellement être expliqué par le fait que le modèle utilisé, à ce stade de recherche, ne tient pas compte de la totalité des paramètres qui influence le comportement des particules.

Ceci dit, notre modèle reste valable pour des caractérisations du comportement particulaire avec un taux de précision avoisinant les 80%.

Après analyse des courbes ci-dessus, nous pouvons établir clairement que le modèle basé sur l'analogie électrique avec les cycles de charge / décharge d'une bobine dans un circuit résistance inductance, permet d'avoir des résultats en accord avec les données expérimentales.

Ci après, la figure III.13 représente les résultats numériques du couplage entre les deux phases (dépôt et remise en suspension) superposés sur les mesures expérimentales :

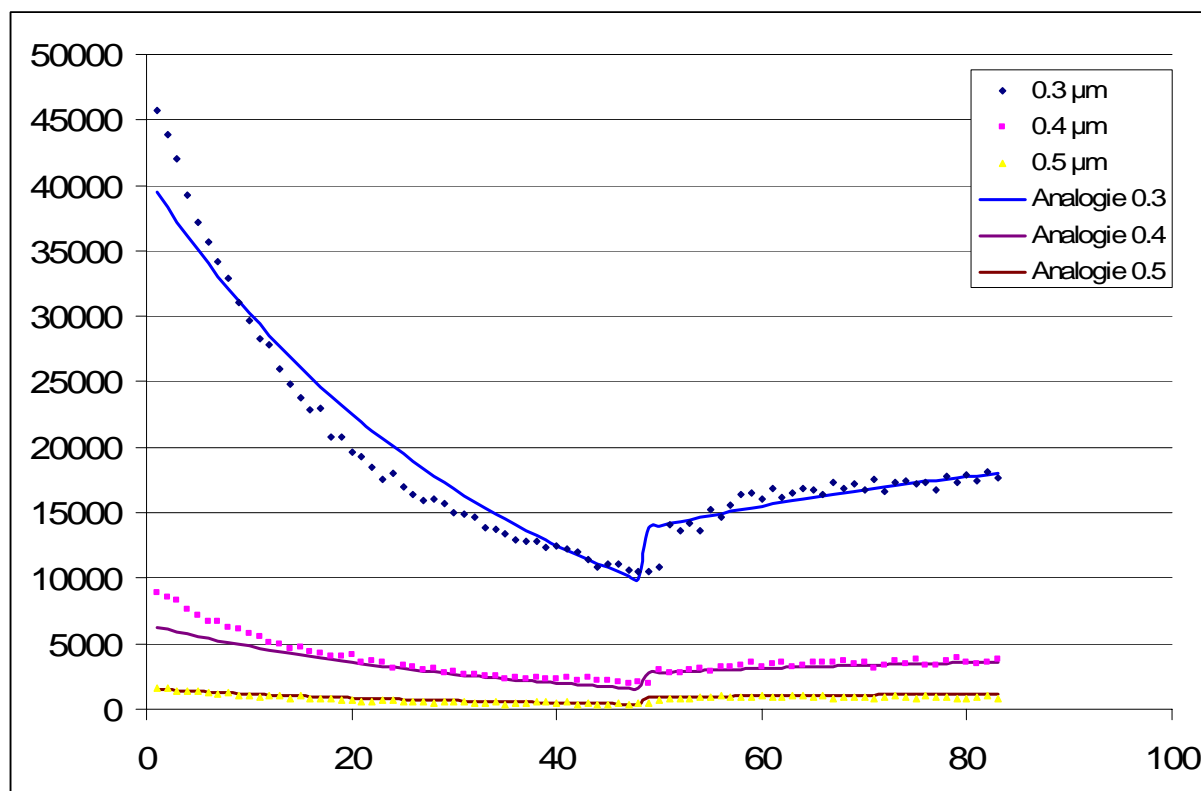


Figure III.13 : Comparaison : Numérique – Expérimental
(bois, pour 3 tailles de particules)

Comme on peut clairement constater sur la figure III.13 ci-dessus, les résultats numériques coïncident avec les résultats expérimentaux. On note quand même une petite discontinuité lors du passage du dépôt à la remise en suspension.

Cette discontinuité est due au fait que le modèle ne prend pas en compte le facteur de l'activité humaine de façon explicite. Aussi, la transition entre les deux phénomènes est considérée de façon discrète.

Nous constatons également que lorsqu'il existe une dispersion plus importante (concernant les mesures et c'est le cas pour les particules les plus fines) le modèle présente plus d'écarts notamment sur le phénomène de décharge, la remise en suspension présentant une prédiction plus fiable.

III.4. Discussion et Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les différentes méthodes de modélisation numérique du comportement particulaire. La spécificité d'une approche fine CFD à tout d'abord été montrée dans sa complexité.

Dans ce chapitre, on a présenté les différentes méthodes de modélisation numérique du comportement particulaire. La spécificité d'une approche fine CFD a tout d'abord été montrée dans sa complexité.

Les travaux de thèse d'ABADIE (2000), BOUILLY (2003) ont permis de mettre au point deux codes Lagrangiens de calcul des trajectoires de particules solides au sein d'écoulements turbulents tridimensionnels. Le premier générant artificiellement les vitesses instantanées du fluide, le second les calculant, pour les grosses structures uniquement (LES).

Le problème majeur de ces approches est que celles-ci deviennent rapidement trop onéreuses et donc inopérantes pour les particules de taille inférieure à $0,5\mu\text{m}$.

En effet, plus une particule est légère plus son libre parcours moyen est important faisant que pour bien appréhender son évolution dans l'air il est nécessaire de réduire de façon considérable le pas de temps calcul (principal handicap observé face aux codes CFD).

Comme nous avons tenu à expérimenter en cellule Test un polydispersé (différentes tailles allant jusqu'à $0.5\mu\text{m}$, qui sont les plus nocives) et voir de façon globale l'apport (resuspension) éventuellement apporter par une personne en déplacement sur le sol, nous avons cherché à réaliser une modélisation simple valable pour les différents diamètres de poudre utilisée.

D'après nos résultats du modèle réalisé dans ce chapitre, un seuil critique de sensibilité concernant la taille des particules semble se distinguer ($0,3$ et $0,4\mu\text{m}$ présentant moins de variation dans le temps en comparaison aux particules de $0,5\mu\text{m}$ qui évoluent entre 45000part/l et 10000part/l au cours de l'expérimentation). Il apparaît donc important de bien cerner le seuil quant à la taille des particules étudiées car les lois de comportement sont à améliorer d'un point de vue de la modélisation. L'analogie électrique semble en tout cas apporter une prédiction tout à fait convenable pour qu'à court terme nous puissions intégrer l'apport de plusieurs typologie et nombre de personnes considérées comme sources potentielles au sein d'une ambiance de type lieu publique.

CHAPITRE 4
CONCLUSION ET PERSPECTIVES
GENERALES

Ces travaux de thèse ont eu pour objectif d'apporter une contribution à l'évaluation du transfert particulaire au sein des ambiances ventilées. Pour ce faire nous avons procédé à une évaluation à la fois expérimentale et numérique.

Dans le premier chapitre, nous avons réuni diverses informations sur la physique des particules en abordant les spécificités de celles-ci (différents types de morphologie, les classifications....) mais également les phénomènes d'interaction entre celles-ci et le domaine dans lequel elles évoluent (comportement d'une particule sphérique dans un fluide porteur, dépôt, arrachement, remise en suspension...).

Après une revue bibliographique qui a mis en relief les besoins de recherche dans le domaine du transfert particulaire au sein d'ambiances ventilées de type bâtiment, nous avons pu noter à cette occasion une large diversité d'études expérimentales dédiées au dépôt particulaire. Les travaux visant la remise en suspension des particules au sein des ambiances, restent encore aujourd'hui quasi inexistantes.

Nous avons alors ciblé notre étude sur un aspect inédit : la remise en suspension de particules submicroniques (les plus dangereuses car pouvant pénétrer en profondeur dans le système respiratoire humain). Nous avons utilisé de la poudre poly-dispersée d'Alumine centrée autour de $0,3 \mu\text{m}$.

Afin de mieux cerner les aspects liés à la remise en suspension des particules déjà déposées sur un support quelconque, il a fallu passer en revue les différentes phases « provoquant » cette 're-suspension' à savoir : la génération de la pollution, sa diffusion dans le volume d'étude, son dépôt sur les surfaces intérieures et enfin sa remise en suspension par un facteur externe (les pas de marche dans notre cas). La première phase a consisté à caractériser la source de pollution qui sera utilisée tout le long des expérimentations. A cet effet, une série d'expérimentations préliminaires ont donc été opérées au sein d'un modèle réduit d'une part puis d'une cellule (ayant un volume plus conséquent) d'autre part.

L'évaluation par la mesure du phénomène de décharge de l'air (déjà étudié au LEPTAB) n'a pas posé de difficultés particulières. En revanche, pour mettre en évidence le phénomène de remise en suspension des particules, il a fallu assurer des niveaux élevés de propreté dans la cellule test pour que l'augmentation du nombre de particules résultant de la perturbation de l'équilibre du système par l'activité humaine puisse être mesurée.

Dans un premier temps, du fait que l'ampleur des augmentations du nombre de particules à cause de l'activité humaine reste infime, il nous a été ardu d'acquiescer un signal relatif à la remise en suspension des particules du fait que le niveau résiduel de pollution est assez élevé.

Pour palier à cette difficulté nous avons amélioré notre protocole expérimental en incorporant à la cellule test un dispositif d'alimentation en air propre (additif à la VMC) qui a permis de descendre à des niveaux de propreté assez bas pour permettre l'observation de la remise en suspension des particules déjà déposées sur le plancher.

Ces différents essais ont permis d'aboutir à un contrôle optimal des conditions expérimentales et enfin de pouvoir lancer des protocoles types d'évaluation.

Les résultats que nous avons obtenus ont permis, de façon satisfaisante, de caractériser par la mesure, le dépôt et la remise en suspension particulaire sur différents revêtements de surfaces et pour des débits de renouvellement d'air et tailles de particules variés.

Bien que la méthode d'évaluation globale ne permet pas de prendre en compte les inhomogénéités dans l'écoulement et dans la concentration des particules au sein d'une cellule ce qui explique sans doute les divers comportements obtenus pour des tailles différentes. Une amélioration des moyens expérimentaux est sans doute nécessaire, car bien que les résultats obtenus montrent de façon claire des lois de comportement du phénomène {décharge + charge}, il reste néanmoins important de souligner que l'hypothèse de conditions standard en température et en humidité relative ont été supposées. Ainsi un équipement de contrôle des conditions de l'ambiance devrait permettre de cerner avec précision les valeurs des champs intérieurs des différentes variables : vitesse, température et humidité relative du fluide porteur.

A partir d'une connaissance à la fois plus poussée des conditions intérieures, mais également des caractéristiques des surfaces (lisse, rugueuse, charge électrique...), du polluant (taille, charge), et des personnes en activité (taille, poids, nombre...); nous devrions réussir à alimenter une banque de « données types » nécessaires à l'utilisation d'un outil global de prédiction numérique.

Suite à ce second chapitre dédié aux expérimentations, le chapitre 3 fait une synthèse des niveaux de modélisation et oriente notre choix vers l'approche globale. En effet jusqu'à présent, pour éviter le coût exorbitant en temps calcul des codes CFD, la modélisation de la

qualité particulière des ambiances intérieures s'est basée sur des modèles globaux qui ne prennent en compte que le taux de renouvellement d'air et parfois la nature des surfaces.

Notons ici, que les résultats expérimentaux que nous avons obtenus dans le chapitre 2 nous ont permis d'observer une similarité avec les courbes de charge / décharge d'un self. Par conséquent nous avons construit un modèle basé sur une analogie électrique avec un circuit RL qui permet, moyennant un paramétrage adéquat, de représenter assez fidèlement l'évolution du nombre des particules. Néanmoins, ce modèle demeure approximatif mais permet une approche relativement simplificatrice du comportement particulière dans les bâtiments.

Cette étude nous a permis d'accroître les connaissances sur le comportement des particules notamment en aval de leur dépôt sur les surfaces intérieures du bâtiment. Cependant, de nombreux paramètres entrant en jeu restent méconnus pour pouvoir modéliser de manière réaliste le comportement des particules. Ces paramètres peuvent être liés soit aux particules, soit aux surfaces de dépôt.

La perspective d'étudier d'une manière plus avancée l'influence de la dureté des matériaux (matériaux du plancher mais également des chaussures utilisées) sur la remise en suspension reste une voie vierge. Le modèle que nous avons développé pourrait être amélioré pour tenir en compte les différentes forces causant la remise en suspension (forces mécaniques (vibrations), électrostatiques, aérodynamique). Ainsi les nouvelles techniques telles que celles de la Vélocimétrie par Images de Particules (PIV) pourraient nous permettre d'avancer dans les connaissances sur la remise en suspension.

Une autre démarche expérimentale aux moyens de la technique de Vélocimétrie par Images de Particules (PIV) existe et commence à être explorée au LEPTAB (acquisition récente par le Laboratoire). Cette technique extrêmement puissante et en particulier non intrusive permet d'avoir des mesures très fiables des grands champs de vitesses spécifiques aux écoulements généralement rencontrés dans le bâtiment. Ceci est possible grâce à une source laser extrêmement puissante (200mJ) qui permet d'éclairer des tranches importantes d'écoulement.

Il est à noter que l'utilisation de ce système est à prévoir dans les perspectives des travaux futurs bien qu'une attention particulière doit être mise en oeuvre pour exclure tout danger dans les investigations « Laser PIV ». Il va falloir affiner des plans de cartographie laser au

voisinage proche mais non immédiat «de la personne en déplacement sur le plancher ». Ainsi grâce à un éclairage judicieux du plan laser, le flux de l'écoulement moyen devrait être mesuré dans un des plans verticaux parallèle à la trajectoire du marcheur. Des informations d'une grande valeur devraient alors nous permettre d'envisager une modélisation fine et poussée du phénomène.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABADIE M. (2000) "Contribution à l'étude de la pollution particulaire : rôle des parois, rôle de la ventilation". Thèse Université de La Rochelle, Leptab.

ABADIE M. et al. (2001) "Indoor particle pollution: effect of wall textures on particle deposition". Building and Environment, **36**, pp 821-827.

ADAM N. et al. (1993) "Deposition of aerosol particles in ventilation ducts". Proceeding of Clima 2000, the 9th International Conference on Heating, Ventilating and Air Conditioning, London, 1993.

ALLOUL MARMOR (2002) "Réentraînement par écoulement d'air d'une contamination particulaire déposée sur une surface". Thèse, Université de Paris XII (Lpatc).

BATCHELOR (1949) "Diffusion in a field of homogeneous turbulence". Aus Journal Science Res. **2**, pp 437-450.

BEGHEIN C. (2002) "Study of particle dispersion in buildings with large eddy simulation". Article accepté à Indoor Air 2002, Californie, USA.

BIASI L. et al. (2001) "Use of a simple model for the interpretation of experimental data on particle resuspension in turbulent flows" Università di Pavia, Italy, février 2001

BYRNE et al. (1995) "Stable tracer aerosol deposition measurements in a test chamber". Journal of Aerosol Science, **26**, pp 645-653.

CHAN L.Y. et al. (2000) "Human exposure to respirable suspended particulate and airborne lead in different roadside microenvironments". Chemosphere. **41**, pp 93-99.

CHEN P.P. & CROW C.T. (1983) "On the Monte-Carlo Method for Modelling Particle Dispersion in Turbulence". Fluids Engineering Division, ASME, New York, Proceedings of Gas-Solids Flows, **10**, pp. 37-41.

CHEN Q. et al. (1992) "Evaluation of an environmental reaction chamber". Aerosol Science and Technology, **17**, pp 9-24.

CHEN Q. & AHMADI G. (1997) "Deposition of particles in a turbulent pipe flow". Journal of Aerosol Science. **28**, pp 789-796.

CHEN Q. et al (2001) "Particulate dispersion and transportation in buildings with large eddy simulation". Rapport final pour le Laboratoire Lincoln de MIT, novembre 2001.

CHENG (1997) "Wall deposition of radon progeny and particles in a spherical chamber". Aerosol Science and Technology, **27**, pp 131-146.

CRANE & EVANS (1977) "Inertial deposition of particles in a bent pipe". J. of Aerosol Science, **8**, pp 161-170.

CRUMP et al. (1983) "Particle wall loss rates in vessels". Aerosol Science and Technology, **2**, pp 303-309.

CUNNINGHAM E. (1910) "On the velocity of steady fall of spherical particles through fluid medium". Proc. R. Soc., **A83**, pp 357-365.

DAHNEKE B. (1971) "The capture of aerosol particles by surfaces". Journal of Colloid Interface Science. **37**, pp 342-353.

DALE A. et al. (2004) "A test of concept comparison of aerodynamic and mechanical resuspension mechanisms for particles deposited on field rye grass (*Secale cereale*). Part 1. Relative particle flux rates" Fluid Modeling Facility, Air-Surface Processes Modeling Branch, Atmospheric Sciences Modeling Division, Air Resources Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Laboratory, MD 81, Research Triangle Park, NC 27711, USA, , 30 March 2004

DAVIES (1965) "The rate of deposition of aerosol particles from turbulent flow through ducts". Ann. Occup. Hyg., **8**, pp 239-245.

DURST F. et al. (1984) "Eulerian and Lagrangian predictions of particulate two-phase flow: a numerical study". Applied Mathematical Modeling. **8**, pp 101-115.

EL HIJRI et al. (2004) "Modélisation du transport et diffusion des polluants dans une cavité bidimensionnelle différentiellement chauffée" Mémoire du DESA, Laboratoire des transferts thermiques et énergétique. Faculté des sciences et techniques Tanger- MAROC (2004).

EL HIJRI et al. (2006) « Modélisation du transport et diffusion des polluants dans une cavité bidimensionnelle », Les Cahiers de la Recherche – Série : Sciences et Technologies, Volume 1, n°1, Septembre 2006, pp. 12-19.

EL HIJRI et al. (2006) « Transferts de polluants particulaires dans le bâtiment : remise en suspension par l'activité humaine », 22ème Congrès Français des Aérosols, Paris, 29-30 Novembre 2006, pp 21 – 26.

EL HIJRI et al. (2007) « Etude expérimentale de la remise en suspension des particules : comparaison entre des revêtements lisses et rugueux », 8ème Congrès de Mécanique, El Jadida (Maroc), 17-20 avril 2007, Tome 2 ; pp. 346 – 348.

EL HIJRI et al. (2008) « Etude expérimentale de la remise en suspension des particules - Comparaison entre revêtement lisse et rugueux », Cahiers Techniques de la revue Mécanique & Industries (Acceptée, à paraître en 2008).

ELGHOBASHI et al. (1983) "A two equation turbulence model for two-phase flows". Physics of Fluids, **26:4**, pp 931-8.

EL-SHOBOKSHY M.S & ISMAIL I.A. (1980) "Deposition of aerosol particles from turbulent flow onto rough pipe wall". Atmospheric Environment. **14**, 297-304.

EL-SHOBOKSHY M.S. (1983) "Experimental measurements of aerosol deposition to smooth and rough surfaces". Atmospheric Environment, **17:3**, pp 639-644.

FERZIGER, J. H. et al. (2002) "Computational Methods for Fluid Dynamics" Springer-Verlag, Berlin,

FICHMAN W.J. et al. (1988) "A model for turbulent deposition of aerosols". Journal of Aerosol Science. **19**, pp 123-136.

FOGH et al. (1997) "Size specific indoor aerosol deposition measurement and derived I/O concentrations ratios". Atmospheric Environment, **31**, pp 2193-2203.

FRIEDLANDER S.K. & JOHNSTONE H.F. (1957) "Deposition of suspended particles from turbulent gas streams". Industrial and Engineering Chemistry. **49**, 1151-1156.

FUCHS N.A. (1964) "Mechanics of Aerosols". Pergamond Oxford, 400p.

GOMES, C.S. (2004), "Resuspension of allergen-containing particles subject to mechanical and aerodynamic disturbance - introduction to an experimental controlled methodology", M.S. Thesis, Pennsylvania State University, University Park, PA, USA

GOSMAN A.D. & IOANNIDES E. (1981) "Aspects of computer simulation of liquid-fuel combustor". AIAA 19th Aerospace Science Meeting, St Louis, paper 81-0323.

GOUESBET G. & BERLEMONT A. (1999) "Eulerian and Lagrangian approaches for predicting the behaviour of discrete particles in turbulent flows". Progress in Energy and Combustion Science. **25**, pp 133-159.

GUHA A. (1997) "A unified Eulerian theory of turbulent deposition to smooth and rough surfaces". Journal of Aerosol Science. **28**, pp1517-1537.

GUICHARD (1969) "la pollution particulaire des milieux gazeux". Journée d'étude des problèmes de mesure et de contrôle de la pollution particulaire en milieu gazeux. Seeri Ed., Paris.

GWEN A. LOOSMORE, (2002) "Evaluation and development of models for resuspension of aerosols at short times after deposition" Lawrence Livermore National Laboratory, Atmospheric Sciences Division, USA, octobre 2002

HALL D. (1988) "Measurements of the mean force on a particle near a boundary in turbulent flow". *J. Fluid Mech.* **187**, pp 451-466.

HINDS W.C. (1982) "Aerosol Technology : Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles". Edited by John Wiley & Sons, Inc, 1982.

HUTCHINSON P. (1971) "Distribution of liquid or solid dispersions from turbulent gas streams: a stochastic model". *Chemical Engineering Science.* **26**, pp 419-439.

IORDACHE V. (2003) "Etude de l'impact de la pollution atmosphérique sur l'exposition des enfants en milieu scolaire". Thèse Université de La Rochelle, Leptab.

KALLIO G.A. & REEKS M.W. (1989) "A numerical simulation of particle deposition in turbulent boundary layers". *International Journal of Multiphase Flow.* **15**, pp 433-446.

KARLSSON E. et al. (1996) "resuspension of an indoor aerosol", National Defence Research Establishment, Department of NBC Defence, S-901 82 Umea Sweden, 1996

KATSOUYANNI K. et al. (1997) "Short term effects of ambient sulfur dioxide and particulate matter on mortality in 12 European cities : results from time series data from the APHEA project". *British Medical Journal.* **314**, pp 1658-1663.

KOUTRAKIS, P. et al. (1992) "Source Apportionment of Indoor Aerosols in Suffolk and Onondaga Counties" *Environment Science Technology*, Vol. 26, pp. 521-527.

LAI C.K. (1997) "An experimental study of the deposition of aerosol on rough surfaces and the implications for indoor air quality control". Phd Thesis. University of London, Imperial College, London, England.

LAI et al (1999) "Measured deposition of aerosol particles on a two dimensional ribbed surface in a turbulent duct flow". *J. Aerosol Science*, **30**, pp 1201-1214.

LAI C.K. & NAZAROFF W.W. (2000) "Modelling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces". *Journal of Aerosol Science.* **31**, pp 463-476.

LAI et al (2001) "Aerosol deposition in turbulent channel flow on a regular array of three dimensional roughness elements". J. of Aerosol Science. **32**, pp 121-137.

LAI A.C.K. (2002) "Particle deposition indoors: a review (summary version)". Indoor Air. **12**, pp 211-214.

LANGEVIN, P (1909) « Sur la théorie du mouvement brownien » note présentée par M. *MASCART*, séance du 9 mars 1908 de l'Académie des Sciences.

LEDE J., B. BARILLON, J. VILLERMAUX (1994) "Modélisation des trajectoires de particules projetées par un jet gazeux sur une surface plane. Comparaison avec l'expérience." Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, Nancy, 1994

LENGWEILER P. et al. (Air & Climate group, Suisse), P.V. Nielsen (Dpt of Building Technology and Structural Engineering, Denmark), H.Takai (Dpt of Agricultural Engineering and Production Systems, Denmark), "Deposition and Resuspension of particles : which parameters are important"

LEONARD A. (1974) "Energy cascade in large-eddy simulations of turbulent flows". Adv. In Geophys. **18A**, 237.

LI A. & AHMADI G. (1993) "Deposition of aerosols on surfaces in a turbulent channel flow". International Journal of engineering Science. **31**, pp 435-451.

LIMAM, K. (2005) « Etude du transport des particules à l'intérieur des locaux » Rapport à 12 mois, projet PRIMEAQUAL II.

LIU B.H.Y. & AGARWAL J.K. (1974) "Experimental observation of aerosol deposition in turbulent flow". Aerosol Science. **5**, pp 145-155.

LOEWENSTEIN, J.C. 1990 « Etude des Relations Fines entre Pollutions Intérieure et Extérieure dans un Hôpital de la Région Parisienne » E.D.F.

LYONS T. & SCOTT B. (1990) "Principles of air pollution meteorology". CRC Press Inc., Boca Raton, FL, 1990, ISBN 0-8492-7106-6, 224 pp.

McLAUGHLIN J.B. (1989) "Aerosol particle deposition in numerically simulated channel flow". *Physics of Fluids A*, **1**, pp 1211-1224.

MONTGOMERY & CORN (1970) "Aerosol deposition in a pipe with turbulent air flow". *J. of Aerosol Science*, **1**, pp 185-213.

MORAWSKA L. et al. (2003) "Characteristics of particle number and mass concentrations in residential houses in Brisbane, Australia". *Atmospheric environment*, **37**, pp 4195-4203.

NAMDEO A.K. et al. (1999) "Dispersion and re-suspension of fine and coarse particulates in an urban street canyon", University of Nottingham, UK, , 1999

NAZAROFF et al. (1993) "Critique of the use of deposition velocity in modeling indoor air quality". ASTM STP 1205, Niren L. Nadga, Ed., Philadelphia, American Society for Testing and Material.

NIELSEN et al. (1978) "The velocity characteristics of ventilated room". *Journal of Fluids Eng.* **100**, pp 291-298.

NOMURA et al. (1997) "Deposition of particles in a chamber as a function of ventilation rate". *Aerosol Science and Technology*, **27**, pp 62-72.

ODAR F. & HAMILTON W.S. (1964) "Forces on a sphere accelerating in a viscous fluid". *Journal of Fluid Mechanics*. **18:2**, pp 302-314.

OFFERMANN et al. (1985) "Control of respirable particles in indoor air with portable air cleaners". *Atmospheric environment*, **19**, pp1761-1771.

OULD-DADA Z. et al. (2001) "Resuspension of small particles from tree surfaces" EAS, T.H. Huxley School, Imperial College at Silwood Park, Ascot, Berkshire, SL5 7TE, UK, , 7 March 2001

OUNIS H. et al. (1991) "Dispersion and deposition of Brownian particles from point sources in a simulated turbulent channel flow". *Journal of Colloid and Interface Science*. **147**, pp 233-250.

ÖZKAYNAK et al. (1996) "Personal exposure to airborne particles and metals: results from the particle team study in Riverside, California". Journal of exposure Analysis and environmental Epidemiology, **6**, 57-78.

PERRIN M.L. (1980) "Etude de la dynamique d'aérosols fins produits artificiellement. Application à l'atmosphère". Thèse, Paris VI, rapport CEA R 5062, 140p.

PIOMELLI U. (2001) "Large-eddy and direct simulation of turbulent flows" Short course delivered at CFD2001 - 9 e conférence annuelle de la Société canadienne de CFD. Kitchener, Ontario.

PREINING O. (1966) "Photophoresis". Aerosol Science, C.N Davies (Ed.), Academic Press, London.

RADER D.J. (1990) "Momentum slip correction factor for small particles in nine common gases". Journal of Aerosol Science. **21:2**, pp 161-168

RAMSHAW, J. D. (1979) "Brownian motion in a flowing fluid" Phys. Fluids ; Vol/Issue: 22:9, pp. 1595-1601.

REEKS M.W. & HALL D. (2001) "Kinetic models for particle suspension in turbulent flow". Journal Physics D. Appl. Phys. **21**, pp 574-589.

REEKS M.W. & SKYRME G. (1976) "The dependence of particle deposition velocity on particle inertia in turbulent pipe flow". Journal of Aerosol Science. **7**, pp 485-495.

RENOUX A. & BOULAUD D. (1998) "Les aérosols, physique et métrologie." Lavoisier (Ed.), 300p.

RUDINGER (1964) "Some proprieties of shock relaxation in gas flows carrying small particles". Physics of fluids, **7:5**, pp 658-663.

SANDU A. (1999) "Contribution à l'Étude Numérique du Transport Turbulent de Polluants Particulaires en Cavités". Thèse de doctorat des universités de La Rochelle (France) et de Bucarest (Roumanie), décembre 1999.

SCHNEIDER T. et al. (1998) "A two compartment model for determining the contribution of sources, surface deposition and resuspension to air and surface dust concentration levels in occupied rooms" National Institute of Occupational Health, Denmark, , septembre 1998

SCHWENDIMAN L.C. et al (1965) "Radioactive particle retention in aerosol transport system". La pollution radioactive des milieux gazeux, Saclay, Nov 1963, Paris, presse universitaire de France. **2**, pp 373-385.

SEHMEL G.A. (1973) "Particle eddy diffusivities and deposition velocities for isothermal flow and smooth surfaces". J. Aerosol Science. **4**, pp 125-138.

SERGEANT A. (2000) "Simulation numérique de l'écoulement instationnaire dans une pièce chauffée par une approche de simulation des grandes échelles". Congrès SFT 2000, Elsevier, France, pp 735-740.

SIPPOLA M.R. & NAZAROFF W.W. (1999) "Particle deposition from turbulent duct flow". Indoor Air'99, 1999.

SIPPOLA M.R & NAZAROFF W.W. (2002) "Particle deposition from turbulent flow: review of published research and its applicability to ventilation ducts in commercial buildings". Lawrence Berkeley National Laboratory Report, LBNL - 51432, Californie, Etats-Unis.

SMAGORINSKI J. (1963) "General circulation experiments with subgrid models." Rech. Aero. **1**, pp 51-63.

STERNBECK J. et al. (2002) "Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension—results from two tunnel studies", Swedish Environmental Research Institute, Box 210 60, S-100 31 Stockholm, Sweden, , 12 July 2002

THATCHER T.L. et al. (2002) "Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors". Atmospheric Environment. **36**:11, pp 1811-1819.

TAYLOR (1921) "Diffusion by continuous movements". Proc. London Math. Soc., **151**, pp 421-478.

THOMAS J.W. (1967) "Particle loss in sampling ducts in: the assessment of airborne radioactivity in nuclear operations". AIEA, Vienna, July 1967, pp 701-711.

VAN DINGENEN R. et al. (1989) "Molecule and aerosol particle wall loss in smog chambers made of glass". Journal of Aerosol Science, **20**, pp 113-122.

WALDMANN L. & SCHMITT K.H. (1966) "Aerosol Science". C.N. Davies (Ed.), Academic Press, London, 1966.

WANG Q. & SQUIRES K.D. (1996) "Large eddy simulation of particle deposition in a vertical turbulent channel flow". International Journal of Multiphase Flow. **22**, pp 667-683.

WELLS A.C. & CHAMBERLAIN A.C. (1967) "Transport of small particles to vertical surfaces". British Journal of Applied Physics. **18**, pp 1793-1799.

WHITBY K.T. & CANTREL B. (1975) "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.

WHITBY K.T. & SVERDRUP G.M. (1980) "The character and origins of smog aerosols: a digest of results from the California aerosol characterization experiment (ACHEX)". Hidy G.M., Mueller P.K., Grosjean D., Appel B.R., Wesolowski J.J. (Eds.). Wiley, New York, pp 477-517 (Adv. Environ. Sci. Technol., **9**).

WOOD N.B. (1981) "A Simple method for calculation of turbulent deposition to smooth and rough surfaces". Journal of Aerosol Science. **12**, pp 275-290.

XU M. et al. (1994) "Deposition of tobacco smoke particles in a low ventilation room". Aerosol Science and Technology, **20**, pp 194-206.

YUDINE M.I. (1959) "Physical considerations on heavy-particle diffusion". Advances in geophysics. **6**, pp 185-191.

ZISKIND G., et al. (1994) “Resuspension of particulates from surfaces to turbulent flows. Review and analysis” Faculty of Mechanical Engineering, Technion, Israel Institute of Technology, Haifa 32000, Israel, 6 October 1994.

