

# THESE

présentée à la

FACULTE DES SCIENCES DE CRETEIL  
UFR DE SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE  
UNIVERSITE PARIS XII – VAL DE MARNE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS XII

Mention : Physique des Aérosols

par

**Laure ALLOUL-MARMOR**

## **REENTRAINEMENT PAR ECOULEMENT D'AIR D'UNE CONTAMINATION PARTICULAIRE DEPOSEE SUR UNE SURFACE**

### **APPLICATION AU CAS D'UN "TAS" DE POUDRE**

Soutenue le 11 Avril 2002, devant le Jury constitué par :

Président :	M. A. RENOUX	Professeur à l'Université Paris XII – Val de Marne.
Membres :	M. C. REGNAUT	Professeur à l'Université Paris XII – Val de Marne.
	M. N. MIDOUX	Professeur à l'ENSIC, Rapporteur.
	M. D. BOULAUD	Professeur à l'INSTN, Directeur de Recherches à l'IRSN.
	M. J. F. FABRIES	H.D.R., Chef de Laboratoire à l'INRS, Rapporteur.
	Mme E. GEHIN	Maître de Conférences à l'Université Paris XII – Val de Marne.
	M. O. WITSCHGER	Ingénieur de Recherches à l'IRSN.
Mme J. MONNATTE	Ingénieur à COGEMA.	

## REMERCIEMENTS

Cette thèse a été réalisée à l'Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire (IPSN) du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), au sein du Département de Prévention et d'Étude des Accidents (DPEA), dirigé par Monsieur Natta. Qu'il trouve ici, l'expression de mon respect et de mes remerciements.

Je sais gré à Monsieur Pourprix, Adjoint à la direction du DPEA, d'avoir été présent lors de réunions avec COGEMA. Je le remercie respectueusement pour l'intérêt porté à mon travail.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur le Professeur Renoux, Directeur du Laboratoire de Physique des Aérosols et de Transfert des Contaminations de l'Université Paris XII, pour m'avoir donné la possibilité d'effectuer un Doctorat. Je tiens à lui témoigner ma plus haute gratitude pour l'honneur qu'il m'a fait de diriger cette thèse et d'en présider le jury. Je lui exprime ici toute ma reconnaissance pour m'avoir accueilli au sein de son « DESS Sciences des Aérosols – Génie de l'Aérocontamination », initié à la Physique des Aérosols et prodigué tout au long de ces années son soutien et ses encouragements.

Que Monsieur Denis Boulaud, Professeur à l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN) et chef du Service d'Études et de Recherches en Aérocontamination et en Confinement (SERAC), trouve ici, l'expression de ma reconnaissance pour avoir suivi ce travail de recherche et accepté de participer à ce jury. Je le remercie sincèrement pour les conseils clairvoyants qu'il a su me prodiguer au cours de ces années. Je le remercie également pour m'avoir accueillie dans son équipe lors de mon stage de DESS, car c'est au cours de ce travail que j'ai pris goût à la recherche et qu'il m'a offert la possibilité de poursuivre de tels travaux dans le cadre d'une thèse.

Mes remerciements vont également à Monsieur Vendel pour m'avoir accueillie au sein du Laboratoire de Physique et Métrologie des Aérosols et du Confinement (LPMAC), et m'avoir permis de réaliser mes travaux dans d'aussi bonnes conditions.

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur Olivier Witschger, Ingénieur de Recherches au LPMAC, en charge notamment du PIC « Aérocontamination » à l'IPSN, pour avoir été à l'initiative de ce travail de recherche. Je lui suis profondément reconnaissant de la confiance qu'il m'a témoignée durant ces trois années de thèse. Qu'il

me soit permis de le remercier vivement pour les conseils attentifs et bienveillants qu'il m'a prodigués, pour sa grande disponibilité, ainsi que pour m'avoir fait partager ses compétences lors de nombreuses discussions. Je le remercie également d'avoir bien voulu faire partie de ce jury.

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une collaboration avec la COmpagnie GENérale des MATières nucléaires (COGEMA). Monsieur Robert de la Direction de la Recherche et du Développement, et Madame Monnatte, de la Direction Sûreté Sécurité Qualité, ont assuré un suivi constant du travail effectué, et je les en remercie. Madame Monnatte aura bien voulu consacrer de son temps pour participer au jury, je lui exprime, ici, mes plus vifs remerciements.

Je rends hommage à Monsieur le Professeur Midoux, de l'Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques de Nancy, pour le grand honneur qu'il m'a fait en acceptant de participer à ce jury et d'être rapporteur de cette thèse. Qu'il trouve, ici, l'expression de mes sincères remerciements.

J'ai l'honneur de remercier vivement Monsieur Fabries, Directeur du Laboratoire de Métrologie des Aérosols de l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS de Nancy), pour avoir bien voulu faire partie de ce jury de thèse et accepté d'en être rapporteur. Qu'il trouve ici l'hommage de ma reconnaissance pour l'intérêt porté à mes travaux lors de nos rencontres à différents congrès scientifiques.

Je suis très honorée que Monsieur le Professeur Regnaut et Madame Gehin, Maître de Conférences, de l'Université Paris XII, aient accepté de faire partie de ce jury.

Ma profonde reconnaissance s'adresse également à Monsieur David Le Dur pour son aide précieuse lors de la conception, de l'élaboration des outils informatiques et de la mise en route de l'installation aéraulique. Je tiens à le remercier tant pour sa sympathie, que pour la bonne humeur qu'il a su faire régner dans le laboratoire.

Qu'il me soit permis de remercier également Messieurs Dominique Vailhen, Ingénieur au CEA et Benoît Queffelec, de la Société S.I.E.R., pour m'avoir conseillée et guidée dans l'analyse et l'interprétation des plans d'expériences. Qu'ils trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude.

## Remerciements

---

Je ne saurais oublier d'exprimer mes plus sincères remerciements à Monsieur Guillaume Basso, Technicien au LPMAC, pour sa gentillesse et pour l'aide qu'il m'a apportée sans compter, dans la réalisation de mes travaux expérimentaux.

Je remercie vivement Mademoiselle Jeanne Malet et Monsieur François Gensdarmes, Ingénieurs de Recherches au LPMAC, pour leurs suggestions, leur soutien et leur amitié pendant toutes ces années.

J'adresse également tous mes remerciements aux autres membres du SERAC, aux stagiaires, aux doctorants, et à tous ceux qui ont effectué un séjour au laboratoire. Leur enthousiasme et leur sympathie ont contribué à l'ambiance chaleureuse qui y règne, et m'ont beaucoup apporté.

Enfin, je tiens également à témoigner ma reconnaissance et toute mon affection aux personnes de mon entourage, ma mère et mon père, mon mari, ma famille et tous mes amis, pour m'avoir soutenue et encouragée durant ces trois années. Qu'ils sachent que leur patience et leur indulgence m'ont été d'une aide immense.

A mes parents et mon mari,

A ma famille,

A mes amis.

# TABLE DES MATIERES

<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>xiii</b>
<b>NOMENCLATURE .....</b>	<b>xiv</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>1. ETAT DE L'ART SUR LE REENTRAINEMENT DE PARTICULES .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1. DEFINITION – COEFFICIENTS DE MISE EN SUSPENSION .....</b>	<b>5</b>
1.1.1. INTRODUCTION .....	5
1.1.2. COEFFICIENTS DE MISE EN SUSPENSION .....	6
1.1.3. POSITION DE NOTRE ETUDE .....	8
<b>1.2. ADHERENCE ET DETACHEMENT DE PARTICULES.....</b>	<b>10</b>
1.2.1. FORCES D'ADHERENCE ENTRE PARTICULES ET SURFACE .....	10
1.2.1.1. Forces de Van der Waals .....	11
1.2.1.2. Forces cohésives.....	14
1.2.1.3. Forces de capillarité.....	15
1.2.1.4. Forces électrostatiques .....	16
1.2.1.5. Force de pesanteur.....	17
1.2.2. FORCES AERODYNAMIQUES .....	19
1.2.2.1. Force de portance .....	20
1.2.2.2. Force de traînée.....	22
1.2.3. ANALYSE SUR LES MOMENTS DES FORCES .....	23
1.2.4. CONCLUSION .....	25
<b>1.3. PARAMETRES CARACTERISTIQUES DES FORCES D'ADHERENCE ET AERODYNAMIQUES ...</b>	<b>28</b>
1.3.1. PARAMETRES DES FORCES D'ADHERENCE.....	28
1.3.1.1. Paramètres liés à la poudre et aux particules .....	28
1.3.1.2. Phénomènes interparticulaires .....	33
1.3.1.3. Paramètres liés à la surface de dépôt.....	34

1.3.1.4. Paramètres liés au milieu environnant.....	36
1.3.2. PARAMETRES DES FORCES AERODYNAMIQUES.....	38
1.3.2.1. Paramètres liés à l'écoulement d'air .....	38
1.3.3. CONCLUSION .....	42
<b>1.4. MODELES DE REENTRAINEMENT ET ETUDES EXPERIMENTALES .....</b>	<b>44</b>
1.4.1. MODELES MICROPHYSIQUES – APPROCHE THEORIQUE SUR UNE PARTICULE ISOLEE .....	45
1.4.1.1. Modèles quasi-statiques : Bilan de forces.....	46
1.4.1.2. Modèles dynamiques : Bilan d'énergie.....	47
1.4.1.3. Action des moments/couples de forces .....	50
1.4.2. MODELES MACROPHYSIQUES - APPROCHE THEORIQUE SUR UN ENSEMBLE DE PARTICULES .	53
1.4.3. VALIDITE DES MODELES DE MISE EN SUSPENSION ET ETUDES EXPERIMENTALES.....	55
1.4.4. MISE EN SUSPENSION DANS LE DOMAINE DE LA SURETE NUCLEAIRE .....	60
1.4.4.1. Etude expérimentale et corrélation de Fromentin (1989).....	61
1.4.4.2. Expériences ORNL et Projet STORM .....	64
1.4.4.3. Etude de Biasi <i>et al.</i> (2001) .....	67
1.4.5. CONCLUSION .....	73
<b>2. INSTALLATION EXPERIMENTALE BISE INACTIVE .....</b>	<b>76</b>
<b>2.1. DESCRIPTION .....</b>	<b>77</b>
<b>2.2. PERFORMANCES AERAULIQUES.....</b>	<b>81</b>
2.2.1. TECHNIQUE DE MESURE : L'ANEMOMETRIE A FIL CHAUD.....	81
2.2.1.1. Principe de la mesure .....	82
2.2.1.2. Sonde utilisée et positionnement dans BISE.....	82
2.2.1.3. Fréquence d'acquisition.....	84
2.2.2. REPRODUCTIBILITE ET STABILITE DE L'ÉCOULEMENT .....	85
2.2.3. CHAMPS DE VITESSE ET DE TURBULENCE .....	85
2.2.4. DESCRIPTION DE LA COUCHE LIMITE .....	88
2.2.4.1. La couche limite.....	88
2.2.4.2. Mesures expérimentales.....	94
2.2.4.3. Vitesse de frottement .....	98
2.2.4.4. Couche limite au voisinage d'un obstacle conique .....	100
2.2.5. ACCELERATION .....	103
<b>2.3. CONCLUSION .....</b>	<b>105</b>

<b>3. METHODOLOGIE EXPERIMENTALE .....</b>	<b>106</b>
<b>3.1. PRINCIPE ET EVALUATION DES MESURES .....</b>	<b>107</b>
3.1.1. PRINCIPE DE LA MESURE .....	107
3.1.2. LIMITE DE DETECTION .....	108
3.1.3. ESTIMATION DES INCERTITUDES SUR LES RESULTATS DE MESURE.....	109
3.1.4. EVALUATION DE LA PROCEDURE DE PESEE.....	111
<b>3.2. MATRICE EXPERIMENTALE .....</b>	<b>114</b>
3.2.1. LES PLANS D'EXPERIENCES.....	114
3.2.2. CHOIX DES PARAMETRES ETUDIES .....	115
3.2.3. DETERMINATION DES DOMAINES EXPERIMENTAUX.....	117
3.2.3.1. Paramètres liés à la poudre .....	117
3.2.3.2. Paramètre lié à la surface d'essai.....	126
3.2.3.3. Paramètres liés à l'écoulement d'air .....	126
3.2.3.4. Durée d'exposition .....	127
<b>3.3. REALISATION DES EXPERIENCES .....</b>	<b>129</b>
<b>4. ETUDE EXPERIMENTALE SUR LES PARAMETRES INFLUENTS .....</b>	<b>130</b>
<b>4.1. PARAMETRES PRIMAIRES.....</b>	<b>131</b>
4.1.1. EFFETS PRINCIPAUX.....	131
4.1.2. ETUDE SPECIFIQUE DE LA VITESSE ET DE LA GRANULOMETRIE .....	134
4.1.2.1. Seuil de vitesse de l'air .....	135
4.1.2.2. Les différentes phases du réentraînement.....	138
<b>4.2. PARAMETRES SECONDAIRES ET NON SIGNIFICATIFS.....</b>	<b>144</b>
4.2.1. DEMARCHE ET DOMAINE D'ETUDE .....	144
4.2.2. EFFETS DE LA TENEUR EN EAU ET DE LA MASSE VOLUMIQUE DE LA POUDRE .....	145
4.2.3. EFFETS DE LA DUREE D'EXPOSITION, DE L'ACCELERATION ET DE LA RUGOSITE DE LA SURFACE .....	147
4.2.4. INFLUENCE DE LA FORME DU DEPOT .....	151
<b>4.3. ANALYSE GLOBALE ET DISPERSION DES RESULTATS.....</b>	<b>157</b>
4.3.1. BILAN GLOBAL SUR LES EFFETS DES PARAMETRES ETUDIES .....	157
4.3.2. ECARTS TYPES SUR LES RESULTATS .....	159
<b>4.4. PHENOMENOLOGIE DU REENTRAINEMENT .....</b>	<b>163</b>
4.4.1. DEFORMATION DE DEPOTS CONIQUES .....	163
4.4.2. DEFORMATION D'AUTRES TYPES DE DEPOT .....	167
<b>4.5. CONCLUSION.....</b>	<b>172</b>

<b>5. ELABORATION D'UNE CORRELATION SEMI-EMPIRIQUE .....</b>	<b>173</b>
<b>5.1. COMPARAISON AVEC LA LITTERATURE.....</b>	<b>174</b>
5.1.1. CORRELATION DE FROMENTIN (1989) .....	174
5.1.2. MODELE ROCK'N ROLL CORRELE .....	176
5.1.3. DISCUSSION.....	181
<b>5.2. RECHERCHE D'UN MODELE ADIMENSIONNEL .....</b>	<b>182</b>
5.2.1. DEMARCHE.....	182
5.2.2. CORRELATION PROPOSEE ET DOMAINE DE VALIDITE.....	183
<b>5.3. CONCLUSION .....</b>	<b>187</b>
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>189</b>
<b>Liste des Travaux et Présentations .....</b>	<b>195</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>197</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>206</b>
<b>ANNEXE 1 : MATRICES EXPERIMENTALES REALISEES .....</b>	<b>207</b>
<b>ANNEXE 2 : RESULTATS EXPERIMENTAUX.....</b>	<b>211</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 – Modes de transport éolien des particules (d’après Nickling, 1994).....	5
Figure 1.2 – Illustration du réentraînement de particules d’un dépôt de poudre exposé à un écoulement d’air horizontal turbulent .....	9
Figure 1.3 – Evolution des forces d’adhérence en fonction de la taille des particules.....	18
Figure 1.4 – Modèle Rock’n Roll (d’après Reeks et Hall, 2001) .....	24
Figure 1.5 - Contrainte de cisaillement de la paroi $\tau_0$ permettant de réentraîner la particule de diamètre $d_p$ (Phillips, 1980).....	39
Figure 1.6 - Représentation schématique d’une structure cohérente ou « burst » à proximité d’une paroi (d’après Cleaver et Yates, 1973).....	40
Figure 1.7 – Description du puits de potentiel adhésif pour des forces moyennes de portance croissantes (courbes 1 à 3) .....	48
Figure 1.8 – Description du mouvement de basculement / roulement d’une particule sphérique isolée en contact avec deux points d’aspérités P et Q de la surface dans le modèle Rock’n Roll de Reeks et Hall (2001) :.....	51
Figure 1.9 – Traitement théorique du réentraînement d’un dépôt multicouches homogène d’après Fromentin (1989) .....	54
Figure 1.10 – Evolution temporelle du flux de mise en suspension d’un dépôt multicouches obtenu avec la corrélation de Fromentin (1989) pour des vitesses d’écoulement de 7, 10 et 20 m/s .....	62
Figure 1.11 – Evolution temporelle de la fraction mise en suspension d’un dépôt multicouches obtenu à partir de la corrélation de Fromentin (1989) pour des vitesses d’écoulement de 7, 10 et 20 m/s .....	64
Figure 1.12 – Evolution de $\bar{f}'_a$ et $\sigma'_a$ en fonction du diamètre des particules d’après Biasi <i>et al.</i> (2001) .....	69
Figure 1.13 - Fonctions de densité de probabilité des forces adhésives normalisées pour des particules de 0,5 $\mu\text{m}$ en dépôt multicouches et de 20 $\mu\text{m}$ en dépôt monocouche .....	70
Figure 1.14 - Prédications de la fraction mise en suspension de particules par le modèle Rock’n Roll en fonction des données expérimentales de STORM, ORNL, Hall et Braaten d’après Biasi <i>et al.</i> (2001) .....	72
Figure 2.1 - Schéma de l’installation expérimentale BISE Inactive (Banc de mlse en Suspension par Ecoulement) .....	77

Figure 2.2– Zoom sur le cône de poudre déposé sur la surface d’essai dans BISE Inactive .....	78
Figure 2.3 – Système d’anémométrie fil chaud Haute Fréquence (Dantec) .....	82
Figure 2.4 – Représentation de BISE instrumentée de l’anémométrie à fil chaud.....	83
Figure 2.5 – Champs de vitesse (à gauche) et de turbulence (à droite) dans le plan (x,z) en $y = 0$ exprimés respectivement en biais par rapport à la vitesse moyenne $V$ et en intensité pour 3 vitesses $V = 0,5 ; 5$ et $10$ m/s .....	87
Figure 2.6 – Calculs effectués pour la distribution de $v_+$ en fonction de $z_+$ dans la zone interne de la couche limite turbulente .....	91
Figure 2.7 - Etablissement du profil de vitesse dans un conduit en écoulement turbulent .....	94
Figure 2.8 – Profils de vitesse à proximité de la surface à $x = 0$ pour $V = 0,5 ; 5$ et $10$ m/s.....	95
Figure 2.9 – Profils d’intensité de turbulence à proximité de la surface pour $x = 0$ à $V = 0,5 ; 5$ et $10$ m/s.....	96
Figure 2.10 – Profils de vitesse normalisée en représentation logarithmique à $x = 0$ et $y = 0$ pour différentes vitesses moyennes .....	97
Figure 2.11 - Evolution de la vitesse de frottement à la paroi $v_*$ en fonction de la vitesse moyenne $V$ dans l’installation BISE.....	99
Figure 2.12 – Champs de vitesse (à gauche) et de turbulence (à droite) dans la section (x,z) à $y = 0$ à proximité de la surface et en présence d’un obstacle conique pour une vitesse moyenne de $10$ m/s .....	101
Figure 2.13 – Champs de vitesse (à gauche) et de turbulence (à droite) dans la section (y,z) à $x = 0$ à proximité de la surface et en présence d’un obstacle conique pour une vitesse moyenne de $10$ m/s .....	102
Figure 2.14 – Evolutions temporelles de la vitesse au démarrage de l’écoulement d’air dans BISE Inactive pour une vitesse moyenne imposée à $7,5$ m/s .....	103
Figure 3.1 – Evolution de la fraction $K_R$ en fonction de la période d’exposition $\Delta t$ pour un même dépôt et pour des dépôts différents.....	112
Figure 3.2 – Echantillons d’images de particules d’alumine Durmax (SPM 91) effectués au Microscope à Balayage Electronique.....	118
Figure 3.3 - Distributions granulométriques en volume des poudres d’ $Al_2O_3$ (Durmax)	119
Figure 3.4 - Evolution de la masse d’eau évaporée pour différentes alumines (Etuve à $180$ °C).....	120
Figure 3.5 – Evolution des poudres sèches laissées à l’air libre en pourcentage d’eau repris.....	122
Figure 3.6 – Résultat du déversement naturel de poudre d’ $Al_2O_3$ au travers d’un entonnoir .....	124

Figure 3.7 – Photographies des différentes formes de tas étudiés : Cône H, d, Obélisque et Galette .....	126
Figure 4.1 – Contribution des effets sur $K_R$ – Analyse du plan de criblage Plackett et Burman 12.11p .....	133
Figure 4.2 – $K_R(d_{50}, v_*)$ : Modèle statistique obtenu sur les expériences du plan 12.11p .....	134
Figure 4.3 – Positionnement des points expérimentaux des matrices 12.11p et 13.2p	136
Figure 4.4 – Représentation 2D du modèle quadratique de $K_R$ en fonction de la granulométrie $d_{50}$ et de la vitesse $v_*$ , obtenu à partir des points expérimentaux des plans 12.11p et 13.2p .....	137
Figure 4.5 – Evolution de la fraction réentraînée moyenne en fonction de la vitesse de frottement pour différentes granulométries de poudre d'alumine .....	139
Figure 4.6 - Evolution de la fraction réentraînée en fonction de la vitesse de frottement de l'air $v_*$ pour les poudres d' $Al_2O_3$ de $d_{50}$ égal à 17, 27, 46 et 59 $\mu m$ - Valeurs moyennes présentées avec leur intervalle de confiance à 95 %. .....	140
Figure 4.7 – Evolution de la fraction réentraînée en fonction de la vitesse de frottement de l'air $v_*$ pour la poudre d' $Al_2O_3$ de $d_{50} = 5 \mu m$ – Valeurs moyennes présentées avec leur intervalle de confiance à 95 %. .....	140
Figure 4.8 – Evolution de la fraction réentraînée moyenne pour des tailles de particules de 46 $\mu m$ en fonction de la vitesse de frottement de l'air – Mise en évidence de la zone de transition. ....	142
Figure 4.9 - Evolution de la fraction réentraînée en fonction de la teneur en eau de la poudre pour différentes masses volumiques tassées et vitesses d'air.....	146
Figure 4.10 – Evolution temporelle de la fraction réentraînée pour trois conditions expérimentales du couple vitesse – granulométrie .....	148
Figure 4.11 – Evolution de la fraction réentraînée en fonction de l'accélération pour différentes durées d'exposition et rugosités de surface – Résultats du plan d'expériences 8.3p.....	149
Figure 4.12 – Fractions réentraînées moyennes obtenues pour l'obélisque en fonction des fractions réentraînées moyennes obtenues pour le cône pour différentes vitesses d'air ( $0,18 \leq v_* \leq 0,52$ m/s ou $3 \leq V \leq 10$ m/s) - $d_{50} = 46 \mu m$ . ....	152
Figure 4.13 – Comparaison des $K_R$ moyens obtenus pour la galette avec ceux du cône, et des $K_R$ moyens obtenus pour l'obélisque avec ceux de la galette pour différentes vitesses – $d_{50} = 46 \mu m$ . ....	154
Figure 4.14 – Comparaison de deux profils verticaux de vitesse dans la veine ( $V = 5$ et 10 m/s) avec les dimensions des trois formes de tas (cône, obélisque et galette). 155	
Figure 4.15 - Représentation de l'écart type de mesure en fonction des valeurs du logarithme des fractions réentraînées expérimentales $K_R$ .....	159

Figure 4.16 - Représentation de l'écart type de dispersion en fonction des valeurs moyennes du logarithme des fractions réentraînées expérimentales.....	160
Figure 4.17 – Rapport en pourcentage entre les variances de mesure et la variance expérimentale moyenne en fonction de la fraction réentraînée expérimentale.....	161
Figure 4.18 - Séquence photographique montrant l'évolution d'un dépôt conique de poudre d'Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en fonction du temps ( $d_{50} = 59 \mu\text{m}$ et $v_* = 0,52 \text{ m/s}$ ( $V = 10 \text{ m/s}$ ) – $K_R = 9,7 \cdot 10^{-1}$ .....	164
Figure 4.19 – Séquence photographique montrant l'évolution d'un dépôt conique de poudre d'Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en fonction du temps ( $d_{50} = 27 \mu\text{m}$ et $v_* = 0,52 \text{ m/s}$ ( $V = 10 \text{ m/s}$ ) - $K_R = 4,0 \cdot 10^{-2}$ .....	166
Figure 4.20 – Séquence photographique montrant l'évolution d'un obélisque de poudre d'Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en fonction du temps ( $d_{50} = 46 \mu\text{m}$ et $v_* = 0,52 \text{ m/s}$ ( $V = 10 \text{ m/s}$ ) – $K_R = 6,3 \cdot 10^{-1}$ .....	168
Figure 4.21 – Séquence photographique montrant l'évolution d'une galette de poudre d'Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en fonction du temps ( $d_{50} = 46 \mu\text{m}$ et $v_* = 0,52 \text{ m/s}$ ( $V = 10 \text{ m/s}$ ) – $K_R = 7,3 \cdot 10^{-2}$ .....	170
Figure 5.1 –Fraction réentraînée moyenne dans BISE ( $v_* = 0,52 \text{ m/s}$ ( $V = 10 \text{ m/s}$ ), et $d_{50} = 5$ et $27 \mu\text{m}$ ) en fonction de la fraction réentraînée à partir de la corrélation de Fromentin (1989).....	175
Figure 5.2 – Comparaison des résultats expérimentaux de BISE avec le modèle corrélé de Biasi <i>et al.</i> (2001) en fonction de la vitesse de frottement pour des dépôts de poudre de $d_{50} = 17$ et $59 \mu\text{m}$ .....	177
Figure 5.3 - Comparaison des résultats expérimentaux de BISE avec le modèle de Biasi ajusté pour des dépôts de poudre de $d_{50} = 17$ et $59 \mu\text{m}$ .....	178
Figure 5.4 - Comparaison des résultats expérimentaux de BISE avec le modèle corrélé de Biasi <i>et al.</i> (2001) et l'ajustement de ce modèle effectué sur BISE.....	179
Figure 5.5 – Comparaison des valeurs $\bar{f}'_a$ et $\sigma'_a$ ajustées dans BISE avec les corrélations $\bar{f}'_a$ et $\sigma'_a$ de Biasi <i>et al.</i> (2001) en fonction de la taille des particules.....	180
Figure 5.6 –Fractions réentraînées expérimentales en fonction des fractions réentraînées calculées à partir de la corrélation semi-empirique.....	185
Figure 5.7 – Fraction réentraînée expérimentale en fonction du diamètre adimensionnel pour les conditions limites de la teneur en eau et de l'accélération, et pour des tailles de particules de $5 \mu\text{m}$ et une durée d'exposition inférieure à 2 min. Corrélation $K_R(d_{50+})$ suivant l'équation ( 5.3 ) et intervalle de confiance à $\pm$ un ordre de grandeur.....	186

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 – Liste des différentes études expérimentales de mise en suspension recensées dans la littérature .....	56
Tableau 2.1 – Instruments de mesure utilisés dans BISE Inactive .....	80
Tableau 2.2 – Caractéristiques de l'écoulement d'air dans BISE pour trois vitesses 0,5 ; 5 et 10 m/s .....	95
Tableau 2.3 – Valeurs des épaisseurs de couche limite à différentes vitesses .....	98
Tableau 2.4 – Gamme de variation de l'accélération au démarrage de l'écoulement d'air pour différentes vitesses .....	104
Tableau 3.1 – Test de comparaison des régressions de type $K_R = a_0 + a_1 \log (\Delta t)$ obtenues sur les méthodes A et B .....	112
Tableau 3.2 – Distributions granulométriques des poudres d' $Al_2O_3$ .....	119
Tableau 3.3 – Teneur en eau des poudres d' $Al_2O_3$ à l'ambiance .....	121
Tableau 3.4 – Masses volumiques apparentes et tassées des différentes poudres d'alumine déterminées suivant la méthode éprouvette et avec le Powder Tester ..	123
Tableau 3.5 – Dimensions retenues pour les cônes de poudre d'alumine .....	125
Tableau 4.1 – Domaines d'étude des 8 paramètres retenus pour le premier plan de criblage de Plackett et Burman (type 12.11p) – Poudre d' $Al_2O_3$ – Volume de poudre $3 \text{ cm}^3$ .....	132
Tableau 4.2 – Valeurs des granulométries et des vitesses choisies pour l'étude spécifique de ces deux paramètres sur $K_R$ .....	136
Tableau 4.3 – Limites des vitesses d'air caractérisant la zone de transition .....	142
Tableau 4.4 – Valeurs des paramètres retenus pour les plans 4.2p et 8.3p .....	145
Tableau 4.5 - Vitesses instantanées maximales observées pour les fortes accélérations dans BISE .....	150
Tableau 4.6 – Tests de comparaison de la régression $\text{Log } K_R(\text{Obélisque}) = a_0 + a_1 \text{Log } K_R(\text{Cône})$ .....	153
Tableau 4.7 – Tests de comparaison des régressions $\text{Log } K_R(\text{Cône}) = a_0 + a_1 \text{Log } K_R(\text{Galette})$ et $\text{Log } K_R(\text{Obélisque}) = a_0 + a_1 \text{Log } K_R(\text{Galette})$ .....	154
Tableau 4.8 – Classement des paramètres et domaines expérimentaux dans BISE Inactive .....	158

# NOMENCLATURE

## Lettres latines

Symboles	Grandeurs	Dimensions
A	Constante de Hamaker	J
a	Distance entre deux aspérités de surface	m
a(F)	Constante de taux du premier ordre	-
a <sub>i</sub>	Coefficients de régression avec i = 0...n	-
C <sub>f</sub>	Coefficient de frottement	-
CV	Coefficient de variation	%
d <sub>50</sub>	Diamètre médian de la distribution granulométrique	m
d <sub>50+</sub>	Diamètre médian adimensionnel	-
D <sub>H</sub>	Diamètre hydraulique de la veine parallélépipédique	m
d <sub>p</sub>	Diamètre de la particule	m
d <sub>p+</sub>	Diamètre adimensionnel de la particule	-
F	Rapport des forces aérodynamiques et d'adhérence	-
f	Facteur de correction de la force de traînée de Stokes	-
f <sub>a</sub>	Force d'adhérence telle que f' <sub>a</sub> = f <sub>a</sub> .F <sub>a</sub>	N
F <sub>a</sub>	Force d'adhérence entre particule et surface lisse	N
F <sub>adh</sub>	Forces d'adhérence	N
F <sub>aéro</sub>	Forces aérodynamiques	N
f' <sub>a</sub>	Force d'adhérence normalisée	-
$\overline{f'_a}$	Valeur moyenne de la distribution des forces d'adhérence normalisées	-
f <sub>0,975</sub>	Valeur critique du test de Fisher à 97,5% de confiance	-
f <sub>b</sub>	Fréquence d'apparition des « bursts »	1/s
F <sub>Cap</sub>	Forces de capillarité	N
F <sub>c<sub>p-p</sub></sub>	Forces de cohésion entre particules d'un même lit	N
F <sub>c<sub>p-s</sub></sub>	Forces de cohésion entre une particule donnée et une surface composée d'un lit de particules semblables	N
F <sub>c<sub>s-s</sub></sub>	Forces de cohésion entre deux surfaces planes parallèle d'un lit	N
F <sub>D</sub>	Force de traînée	N

<b>Symboles</b>	<b>Grandeurs</b>	<b>Dimensions</b>
$F_{EI}$	Force électrostatique	N
$F_G$	Force de gravité ou de pesanteur	N
$F_L$	Force de portance	N
$\overline{F}_L$	Force de portance moyenne	N
$f_L$	Force de portance fluctuante	N
$f_{L1}$	Premier terme de la force de portance fluctuante	N
$f_{L2}$	Second terme de la force de portance fluctuante	N
$Flux_R$	Flux de matière réentraînée	kg/m <sup>2</sup> .s
$f_{obs}$	Valeur observée du test de Fisher	-
$\overline{F}_R$	Valeur moyenne de la distribution des forces aérodynamiques	N
$F_{VdW}$	Forces de Van der Waals	N
$F_{VdWp-s}$	Forces de Van der Waals entre une particule et une surface	N
$F_{VdWp-p}$	Forces de Van der Waals entre deux particules identiques	N
$g$	Accélération gravitationnelle	m/s <sup>2</sup>
$h$	Constante de Lifshitz – Van der Waals	J
$H$	Hauteur de la veine parallélépipédique de BISE	m
$HR$	Humidité relative du milieu	%
$I$	Intensité de turbulence	%
$K_R$	Fraction de matière réentraînée	-
$\overline{K}_R$	Fraction réentraînée moyenne	-
$K_{Rmax}$	Fraction réentraînée maximale obtenue à 95 %	-
$K_{Rmin}$	Fraction réentraînée minimale obtenue à 95 %	-
$L$	Périmètre d'un conduit	m
$L_e$	Longueur d'établissement du profil de vitesse d'un écoulement turbulent	m
$m$	Nombre de couches dans un lit de particules	-
$m_0$	Masse de poudre initialement déposée sur la surface d'essai	kg
$M_a$	Moment des forces d'adhérence	J
$m_D$	Masse déposée entre la surface d'essai et le filtre	kg
$M_D$	Moment aérodynamique	J
$m_F$	Masse de poudre transférée sur le filtre	kg
$m_f$	Masse de la surface d'essai et de la poudre finale récupérée sur la surface d'essai	kg

Symboles	Grandeurs	Dimensions
$m_i$	Masse de la surface d'essai et de la poudre initialement déposée sur la surface d'essai	kg
$M_R$	Masse de particules réentraînées et par unité de surface	kg/m <sup>2</sup>
$m_{SE}$	Masse de la surface d'essai	kg
$n$	Nombre de mesurages	-
$n'$	Nombre de mesurages	-
$O$	Origine du repère cartésien (x,y,z)	-
$\overline{PE}$	Energie potentielle moyenne d'une particule dans le puits	J
$p(f_a)$	Distribution gaussienne des forces aérodynamiques pour la force adhésive $f_a$ au point de réentraînement	N
$Q$	Energie potentielle de la surface adhésive	J
$q$	Charge de la particule	C
$Q_v$	Débit volumique	m <sup>3</sup> /h
$r$	Distance entre deux molécules	m
$r'$	Rayon de l'aire de contact entre deux corps	m
$R^2$	Coefficient de corrélation	-
$Re$	Nombre de Reynolds de l'écoulement (dans un conduit)	-
$Re_p$	Nombre de Reynolds de la particule	-
$Re_y$	Nombre de Reynolds local	-
$R_H$	Rayon hydraulique de la veine parallélépipédique	m
$r_p$	Rayon de la particule	m
$S$	Section d'un conduit	m <sup>2</sup>
$s$	Aire de la surface exposée à l'écoulement d'air	m <sup>2</sup>
$T$	Tension superficielle d'un film liquide	kg/s <sup>2</sup>
$t$	Temps	s
$t_{0,975}$	Valeur critique du test de Student à 97,5% de confiance	-
$t_1$	Durée de la rampe d'accélération	s
$t_2$	Durée d'un essai	s
$t_{obs}$	Valeur observée du test de Student	-
$T_R$	Taux de matière réentraînée	1/s
$U$	Différence de potentiel	V
$V$	Vitesse moyenne au centre de la section d'essai	m/s
$\overline{V}$	Vitesse moyenne réelle subie par la particule	m/s
$V_\infty$	Vitesse moyenne de l'écoulement	m/s
$v_*$	Vitesse de frottement à la paroi	m/s
$v(t)$	Composante fluctuante de la vitesse instantanée	m/s

<b>Symboles</b>	<b>Grandeurs</b>	<b>Dimensions</b>
$V(t)$	Vitesse instantanée	m/s
$V_{\max}$	Vitesse moyenne maximale atteinte dans l'installation BISE	m/s
$v_p$	Vitesse relative entre le fluide et la particule à une hauteur correspondant au centre de la particule	m/s
$(x, y, z)$	Composantes du repère orthogonal cartésien	-
$z$	Distance entre la surface de deux corps	m
$z+$	Hauteur adimensionnelle	-

### Lettres grecques

<b>Symboles</b>	<b>Grandeurs</b>	<b>Dimensions</b>
$\alpha$	Accélération de la vitesse au démarrage	m/s <sup>2</sup>
$\alpha_{\max}$	Accélération maximale de la vitesse au démarrage	m/s <sup>2</sup>
$\alpha_{\min}$	Accélération minimale de la vitesse au démarrage	m/s <sup>2</sup>
$\beta$	Rayon du cercle de la matrice expérimentale d'un plan composite centré	-
$\Gamma$	Moment aérodynamique des forces traînée - portance	J
$\gamma$	Energie de contact particule - surface	J/m <sup>2</sup>
$\dot{\gamma}$	Taux de cisaillement	1/s
$\delta$	Epaisseur de la couche limite	m
$\Delta m$	Masse de poudre réentraînée	kg
$\Delta t$	Durée d'exposition	s
$\varepsilon$	Permittivité de l'espace libre	C <sup>2</sup> /N.m <sup>2</sup>
$\lambda$	Constante attractive de Van der Waals	-
$\mu$	Viscosité dynamique du fluide	kg/m.s
$\nu$	Viscosité cinématique du fluide (pour l'air, $\nu = 1,515 \cdot 10^{-5}$ aux CNTP)	m <sup>2</sup> /s
$\nu_{\text{exp}}$	Degré de liberté fusionné	-
$\nu'$	Degré de liberté	-
$\theta$	Angle décrivant la géométrie d'un tétraèdre formé par quatre particules adjacentes	rad
$\rho$	Masse volumique de fluide (pour l'air, $\rho = 1,293$ aux CNTP)	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_p$	Masse volumique de la particule	kg/m <sup>3</sup>

## Nomenclature

---

$\sigma(\text{Log } K_R)$	Ecart type de mesure sur Log $K_R$	-
$\sigma(X)$	Ecart type de la variable X	dim(X)
$\sigma'(\text{Log } K_R)$	Ecart type de dispersion sur Log $K_R$	-
$\sigma^2(\text{Log } K_R)$	Variance de mesure sur Log $K_R$	-
$\sigma^2(X)$	Variance de la variable X	dim( $X^2$ )
$\sigma_{\text{exp}}$	Ecart type fusionné de dispersion expérimentale sur Log $K_R$	-
$\sigma'_a$	Ecart type géométrique de la distribution des forces adhésives normalisées $f'_a$	-
$\sigma_g$	Ecart type géométrique d'une distribution granulométrique	-
$\sigma_R$	Ecart type de la distribution des forces aérodynamiques $F_R$	N
$\tau_0$	Contrainte de cisaillement à la paroi	N/m <sup>2</sup>
$\varphi(f'_a)$	Distribution logarithmique des forces adhésives normalisées	-
$\omega_0$	Fréquence typique de vibration	1/s

## Autres

### Abréviation Signification

BISE	Banc de mise en Suspension par Ecoulement d'air
CNC	Compteur de particules à Noyaux de Condensation
DPS	Double Pesée sur la Surface d'essai
LD	Limites de Détection des méthodes expérimentales
LD <sub>F</sub>	Limite de Détection du Filtre
LD <sub>SE</sub>	Limite de Détection de la Surface d'Essai
LPC	Compteur de Particules Laser
LWR SA	Abréviation anglaise pour accidents graves d'un réacteur à eau légère (Light Water Reactor following a Severe Accident)
MeS	Mise en Suspension
PEX	Plan d'Expériences

## Introduction

La mise en suspension par écoulement d'air de particules déposées sur une surface, ou réentraînement, intervient dans de nombreux domaines liés à des procédés industriels et à des applications environnementales. En effet, elle joue un rôle dans la sûreté nucléaire, la pollution de l'air, le transport éolien de poussières minérales ou bien encore la contamination de surface en électronique (altération des dispositifs micro-électroniques).

Dans le domaine nucléaire, l'évaluation des conséquences d'une situation accidentelle dans les laboratoires et usines du cycle du combustible, pose des questions spécifiques de sûreté. Entre autres, dans certains scénarios d'accidents étudiés (séisme, incendie, explosion, chute d'objets...), des matières radioactives sont susceptibles d'être dispersées dans l'atmosphère des enceintes et / ou des locaux concernés, et éventuellement, d'être transférées jusqu'aux voies de rejet à l'environnement voire d'atteindre l'homme (Foulquier et Bretheau, 1998).

Parmi les scénarios d'accidents étudiés, la mise en suspension d'une contamination particulaire par écoulement de l'air suscite encore de nombreuses interrogations notamment dans la connaissance des coefficients de mise en suspension. En effet, ces coefficients sont essentiels pour l'analyse de la sûreté et de la radioprotection. Ils permettent, pour un scénario d'accident hypothétique donné et à partir d'une quantité de matière radioactive potentiellement dispersable (par exemple un « tas » de poudre), de calculer la quantité de matière qui serait réellement dispersée.

En définitive, ces coefficients de mise en suspension présentent un intérêt primordial lorsqu'il s'agit, d'une part d'estimer les conséquences radiologiques de situations d'exploitation normales ou accidentelles, d'autre part, d'optimiser les moyens de protection à mettre en œuvre dans la conception des installations nucléaires (Libmann, 1996).

Les expertises actuelles évoluant vers des estimations plus réalistes (et donc moins enveloppes) des rejets potentiels, un Programme d'Intérêt Commun entre l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN) et la COmpagnie GENérale des MATières nucléaires (COGEMA), a vu le jour. Il vise à constituer une bibliothèque de données sur les coefficients de mise en suspension. L'un des objectifs de cette collaboration est d'effectuer des études expérimentales conduites sur des scénarios qui ont été bien

identifiés et jugés importants. Parmi celles-ci, l'étude de la mise en suspension par écoulement d'air d'une contamination particulaire d'un dépôt de poudre, a été retenue en priorité. Elle fait l'objet de notre travail.

Sous forme pulvérulente, un produit radioactif étant facilement dispersable, sa manipulation demande de grandes précautions d'utilisation. C'est pourquoi notre travail de thèse traite le cas d'une contamination particulaire non radioactive. Cette étude en inactif effectuée avec de la poudre d'alumine  $\alpha$ , ainsi, l'avantage de pouvoir réaliser aisément de nombreuses configurations expérimentales, et ce, en absence de tout risque radiologique.

Il s'agit donc pour nous d'améliorer le niveau de connaissance de la phénoménologie de la mise en suspension de particules issues d'un « tas » de poudre exposé à un écoulement d'air horizontal et turbulent. Notre travail expérimental vise, d'une part à rechercher les différents paramètres fondamentaux de mise en suspension et à quantifier leurs effets sur le réentraînement, et d'autre part, à proposer un modèle semi-empirique décrivant le phénomène. De ce fait, notre étude présente un intérêt particulier pour toutes les personnes qui sont confrontées à la problématique de la mise en suspension de contamination particulaire radioactive par écoulement d'air, et notamment les spécialistes en charge des analyses de la sûreté.

Le premier chapitre expose l'étude bibliographique que nous avons réalisée sur le phénomène physique de mise en suspension. Nous y présentons les différentes forces qui agissent sur une particule, ainsi que celles qui entrent en jeu dans le réentraînement. La valeur de ces forces pouvant varier en fonction des conditions expérimentales, nous recensons l'ensemble des paramètres susceptibles de les modifier. Enfin, on s'intéresse aux nombreux modèles de réentraînement élaborés ces dernières années ainsi qu'aux études expérimentales disponibles dans la littérature. En particulier, nous décrivons les travaux qui se rapprochent le plus de la situation de mise en suspension d'un tas de poudre et ceux qui, fort prometteurs, laissent entrevoir une avancée remarquable dans la compréhension du mécanisme.

L'étude expérimentale du réentraînement par écoulement d'air d'un tas de poudre nécessite des moyens performants et qualifiés pour les gammes de vitesses d'air (0,5 à 10 m/s) et de tailles de particules (diamètres médians compris entre quelques micromètres et 60  $\mu\text{m}$ ) envisagées dans notre étude. Nous décrivons ainsi, dans le second chapitre, notre installation originale BISE Inactive (Banc de mise en Suspension par Ecoulement) conçue et réalisée au laboratoire. L'évaluation des caractéristiques

aérauliques de notre installation est une étape importante, puisque de la bonne connaissance de celles-ci va dépendre la fiabilité de nos résultats expérimentaux. Nous présentons donc également l'étude aéraulique que nous avons effectuée sur ce dispositif.

Avant de réaliser les expériences, il nous faut évaluer la méthodologie expérimentale que nous avons choisie, et bien définir les domaines d'étude des paramètres expérimentaux pour les expériences. C'est l'objet du troisième chapitre.

Dans le quatrième chapitre, nous décrivons notre étude expérimentale de l'influence de huit paramètres sur le réentraînement d'un tas de poudre. Nos résultats expérimentaux, obtenus notamment sur la base de plans d'expériences, sont présentés et discutés dans ce chapitre. Au final, nous présentons un classement relatif des paramètres étudiés vis à vis de la mise en suspension et validons notre méthodologie sur l'ensemble de nos résultats expérimentaux.

Enfin, dans une dernière partie, nous comparons nos données à deux modèles théoriques de la littérature. Ceci nous amène à proposer un modèle semi-empirique qui permet de décrire les données de fractions réentraînées d'un tas de poudre, que nous avons obtenues expérimentalement, et de calculer, à l'intérieur du domaine étudié, cette fraction réentraînée en fonction d'un paramètre adimensionnel qui prend en compte les deux paramètres ressortis prépondérants de notre travail.

Les interprétations de tous nos résultats nous permettent finalement de définir les perspectives dégagées par notre Thèse.

## **1. Etat de l'art sur le réentraînement de particules**

L'objectif de ce premier chapitre est de faire une synthèse bibliographique sur le réentraînement de particules par écoulement d'air. Il s'agit ici de présenter les différentes études théoriques et expérimentales de mise en suspension disponibles de la littérature, ainsi que les modèles et corrélations qui ont été élaborés plus ou moins récemment. Bien entendu, les études qui s'approchent le plus de notre sujet seront particulièrement décrites.

Le processus de mise en suspension est le résultat de la compétition entre les forces d'adhérence et les forces aérodynamiques qui agissent sur une particule ou un ensemble de particules. Afin donc de mieux appréhender la physique des modèles de réentraînement, nous consacrons un paragraphe à la description des différentes forces agissant sur une particule ou un ensemble de particules. Chaque paramètre susceptible alors de modifier la valeur de ces forces et par conséquent le réentraînement, est ensuite décrit.

## 1.1. Définition – Coefficients de mise en suspension

### 1.1.1. Introduction

■ D'une façon générale, dans le domaine du transport éolien de particules, on définit principalement trois modes de transport. Ces trois modes qui dépendent essentiellement de la taille des particules, sont illustrés sur la Figure 1.1 (d'après Nickling, 1994) :

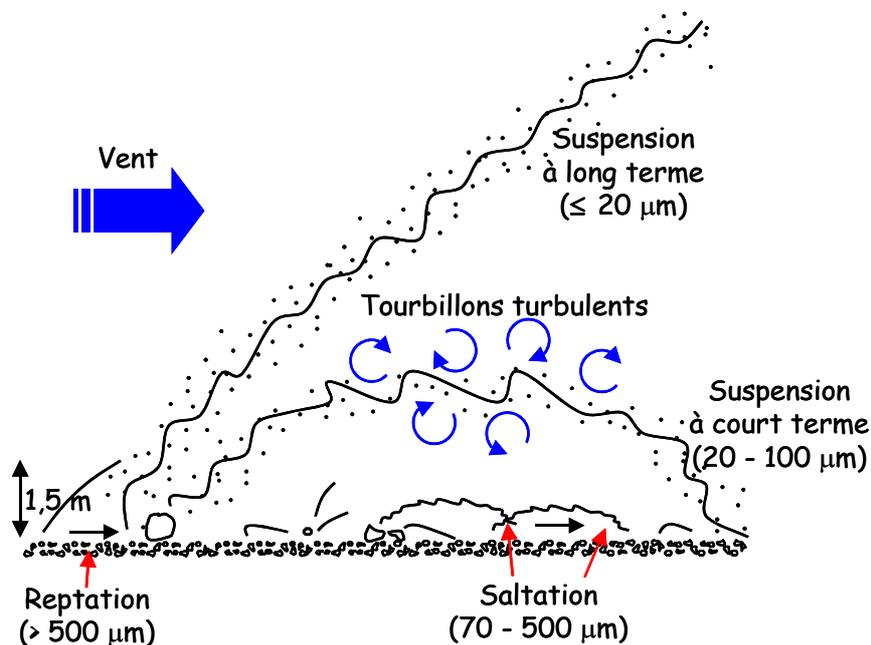


Figure 1.1 – Modes de transport éolien des particules (d'après Nickling, 1994)

Les tailles de particules inscrites sur ce graphe sont données à titre indicatif. Il s'agit de limites approximatives.

Le terme de *saltation* concerne les particules atteignant plusieurs centaines de micromètres de diamètre et est défini comme un déplacement par bonds successifs des particules (ce mécanisme peut également jouer un rôle dans la mise en suspension de particules plus fines comme nous le verrons au chapitre 1.3.1.2). Le terme de *reptation* quant à lui, est associé aux particules les plus grosses (supérieures à environ 500 µm). Il correspond à celles qui sont poussées et qui roulent le long de la surface, essentiellement par l'impact des grains en saltation.

Le troisième mode de transport qui nous concerne est dit de *suspension*. Il est attribué aux particules de diamètre aérodynamique inférieur à environ 100 µm, ce qui correspond

approximativement à la limite supérieure habituellement admise pour définir un aérosol (Renoux et Boulaud, 1998).

Comme le terme de *suspension* l'indique, les petites particules régies par ce phénomène sont transportées en suspension et maintenues dans l'air par de petits tourbillons turbulents provenant de l'écoulement, sur des distances plus ou moins longues (suspension à long terme, suspension à court terme ou saltation modifiée). Le phénomène de suspension induit donc une notion de transfert.

■ Par définition, le terme de *mise en suspension* introduit un mécanisme supplémentaire dans le phénomène de suspension. Il s'agit du détachement de la particule de la surface sur laquelle elle repose, avant son envol dans l'écoulement libre (ou bien son retour). Lorsque l'on ne différencie pas les différents modes de transfert de la particule après le détachement, on peut également utiliser le terme de *réentraînement*.

■ Dans notre étude, nous nous intéresserons uniquement à la quantité de matière immédiatement détachée de la surface. Nous ne tiendrons donc pas compte des différents mécanismes qui peuvent se produire après que la particule se soit détachée de la surface. Nous emploierons donc indifféremment les termes de *réentraînement* ou de *mise en suspension*.

Enfin, pour décrire le réentraînement de particules qui est effectué par un écoulement d'air horizontal, on pourra employer également le terme générique de *léchage*.

### 1.1.2. Coefficients de mise en suspension

Dans la littérature, la quantité de matière mise en suspension est exprimée en terme de coefficients de réentraînement. Il en existe un grand nombre. Nous réserverons donc l'appellation *coefficient* pour parler du terme générique.

Les études expérimentales dans le domaine de l'environnement, conduisent à des résultats de type évolution de la concentration du contaminant visé en fonction de la hauteur par rapport au sol, la vitesse du vent, le type de sol (Sehmel et Lloyd, 1974) à partir desquels il est souvent difficile d'évaluer un coefficient de mise en suspension. Dans leurs synthèses bibliographiques qui ont été largement exploitées, Sehmel (1980), et plus tard, Nicholson (1988), mettent en évidence le domaine très vaste, couvert par ces coefficients en fonction de différents « stress ». De plus, pour une même configuration, le domaine peut s'étendre sur plusieurs ordres de grandeurs. Il est donc important, dans un premier temps, de définir correctement ces coefficients de mise en

suspension. Nous nous limitons aux coefficients les plus fréquemment employés dans le cas du réentraînement par écoulement d'air.

Trois expressions du coefficient de réentraînement sont couramment utilisées dans le cas du léchage de poudre : la fraction de mise en suspension, le taux de réentraînement et le flux de réentraînement. Explicitons rapidement ces différents coefficients relativement à la masse.

■ La fraction réentraînée  $K_R$  est définie par le rapport de la quantité de poudre mise en suspension sur la quantité initialement déposée sur une surface. Cette fraction est donnée par la relation :

$$K_R = \frac{\Delta m}{m_0} \quad (1.1)$$

où  $\Delta m$  : masse réentraînée (g)

$m_0$  : masse initialement déposée sur la surface (g).

Bien entendu,  $K_R$  est sans dimension.

La fraction mise en suspension est utilisée principalement lorsque le phénomène évolue peu dans le temps ou sur une période définie intéressante, ce qui est notre situation comme nous le verrons au chapitre 4.

Les deux autres termes introduisent la notion de temps en intégrant dans leur expression la durée d'exposition à l'écoulement :

■ Le taux de réentraînement  $T_R$  exprime la fréquence avec laquelle la matière particulaire est réentraînée. Expérimentalement, il se détermine pour une durée d'exposition qui peut être plus ou moins longue suivant la méthodologie utilisée, et généralement suivant le nombre ou bien la masse des particules. Le taux de mise en suspension  $T_R$  est défini par le rapport de la fraction mise en suspension  $K_R$  sur la période d'exposition  $\Delta t$  (s) :

$$T_R = \frac{\Delta m}{m_0 \cdot \Delta t} \quad (1/s) \quad (1.2)$$

Il s'agit d'un taux moyen sur la période d'exposition.

■ Le flux de réentraînement  $\text{Flux}_R$  est défini par le débit d'émission de matière par unité de surface. Il correspond donc à la quantité de matière mise en suspension en moyenne sur la durée d'exposition et par unité de surface et s'applique particulièrement pour décrire le cas d'un dépôt homogène en surface :

$$\text{Flux}_R = \frac{\Delta m}{\Delta t \cdot s} \quad (\text{g/cm}^2 \cdot \text{s}) \quad (1.3)$$

avec  $s$  : aire de la surface de la poudre exposée à l'écoulement ( $\text{cm}^2$ ).

Pour exemple, dans le cas d'un dépôt surfacique,  $s$  représente l'aire de ce dépôt. Par contre, dans le cas d'un dépôt conique où seule la surface enveloppe du cône est directement en contact avec l'écoulement d'air, il faudra considérer la surface enveloppe du cône initial, c'est à dire la surface du cône sans l'aire de sa base. On suppose ici que la forme du dépôt n'évolue pas ou peu au cours du temps.

Pour une même situation étudiée, on peut donc utiliser l'un ou l'autre de ces trois coefficients. Toutefois, la diversité de ces expressions peut compliquer les interprétations notamment lorsque l'on cherche à comparer des études de la littérature entre elles. Il convient donc d'être prudent devant de telles situations.

### 1.1.3. Position de notre étude

Parmi les différents scénarios accidentels étudiés dans le cadre de la sûreté des installations nucléaires, le cas d'un tas de poudre radioactive qui se trouverait accidentellement au fond d'une boîte à gant a été envisagé. Ce tas de poudre constituée de particules polydispersées de dimensions comprises entre environ 1 et 100  $\mu\text{m}$ , pourrait alors être exposé à un écoulement d'air plus ou moins important selon les scénarios étudiés ; la gamme de vitesse pouvant varier de quelques  $\text{cm/s}$  jusqu'à environ 10  $\text{m/s}$ .

Une représentation schématique de cette situation est illustrée par la Figure 1.2. Un dépôt ayant la forme d'un tas de poudre constituée de particules polydispersées, est déposé sur une surface rugueuse. Lorsque ce dépôt est soumis à un écoulement d'air horizontal comportant des structures turbulentes semblables à des tornades microscopiques ou « bursts » (cf. 1.3.2.1), une certaine fraction voire la totalité des particules de la poudre peut soit rouler ou glisser, soit être mise en suspension dans l'air

et se retrouver dans l'écoulement libre. C'est à cette quantité de matière réentraînée que nous nous intéresserons.

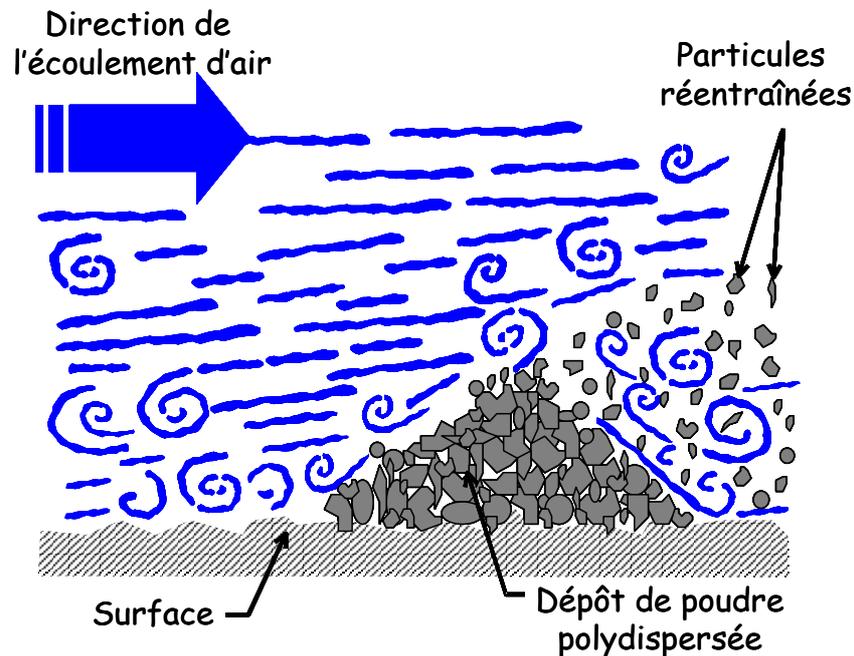


Figure 1.2 – Illustration du réentraînement de particules d'un dépôt de poudre exposé à un écoulement d'air horizontal turbulent

Nous l'avons dit, le processus de mise en suspension est le résultat de la compétition entre forces d'adhérence et forces aérodynamiques agissant sur cet ensemble de particules (cf § 1.2) pendant une période donnée. Cette compétition met en jeu un ensemble de paramètres liés au dépôt, aux particules de la poudre, à la surface sur laquelle est déposée la poudre, à l'écoulement d'air et à l'environnement. Le réentraînement d'un tas de poudre exposé à un écoulement d'air turbulent est donc un phénomène multi-paramètres complexe.

Afin de comprendre l'influence que pourraient avoir ces différents paramètres sur le réentraînement, nous allons décrire succinctement les différentes forces pouvant agir sur les particules.

## **1.2. Adhérence et détachement de particules**

Les forces susceptibles d'agir sur une particule déposée sur une surface et exposée à un écoulement d'air turbulent sont essentiellement de deux types :

- les forces d'adhérence qui retiennent la particule sur la surface sur laquelle elle repose,
- les forces aérodynamiques qui contribuent au détachement de la particule de la surface.

La mise en suspension est donc la conséquence de la compétition entre ces deux types de forces.

### **1.2.1. Forces d'adhérence entre particules et surface**

Les forces d'adhérence entre solides sont principalement des forces d'origine électromagnétique et de nature attractive. Elles sont le résultat d'une combinaison de forces physiques et chimiques ainsi que de contraintes et de tensions mécaniques.

Ces forces dites « de surface » apparaissent lorsque les particules entrent en contact avec des parois solides et s'y fixent fortement. On parle alors de phénomène d'adhérence. De nombreux auteurs ont rédigé des travaux théoriques sur l'adhérence. Parmi les plus cités, on trouve Krupp (1967), Ranade (1987) et Bowling (1988).

Les principales forces d'adhérence comprennent les forces de Van der Waals, les forces électrostatiques et les forces de capillarité. Lorsque l'on est en présence d'un lit de particules, les forces cohésives jouent également un rôle dans l'adhésion globale. Peut intervenir également, pour les particules les plus grosses, la force de pesanteur de la particule. En règle générale pour des tailles de particules inférieures à 100  $\mu\text{m}$ , la force de Van der Waals a la contribution la plus importante.

Les principales méthodes pour quantifier les forces adhésives sont la méthode centrifuge, la méthode aérodynamique et la méthode par vibration. Ces méthodes ont montré que les forces d'adhérence entre les particules et la surface sont généralement distribuées selon une loi logarithmique due en partie aux irrégularités physiques des particules et de la surface (Reed, 1989). Récemment, Matsusaka et Masuda (2001) ont proposé une nouvelle méthode pour mesurer la distribution des forces d'adhérence qui

agissent sur des dépôts de particules. Elle est basée sur le phénomène de réentraînement des particules et sur l'analyse des interactions interparticulaires et particules-surface.

### **1.2.1.1. Forces de Van der Waals**

Les forces de Van der Waals sont des forces moléculaires comme les forces correspondant aux liaisons métalliques, ioniques ou covalentes. Ces trois dernières liaisons d'intensité forte, sont essentiellement des liaisons de faible portée, c'est à dire que leur force prédominante s'exerce entre atomes immédiatement voisins. Les forces de Van der Waals, moins intenses, ont un plus grand rayon d'action que ces dernières et sont donc les seules à intervenir dans l'adhérence des particules.

L'origine de ces forces dont la description a été développée par London puis par Lifshitz, est liée à la structure des atomes ou molécules du matériau qui peuvent être considérés comme des dipôles oscillants : il y a polarisation des atomes ou des molécules c'est à dire modification de la répartition des électrons et des particules négatives, due à la présence d'un champ électrique local dans le matériau. Les forces de Van der Waals sont donc une combinaison de plusieurs forces séparées telles que les forces de dipôles permanents, les forces de dipôles induits et les forces de dispersion (Israelachvili, 1991). Mais parmi ces trois forces, les forces de dispersion appelées encore forces de London - Van der Waals ont généralement la contribution la plus importante des forces de Van der Waals. C'est pour cette raison qu'on assimile souvent les forces de Van der Waals uniquement aux forces attractives de London - Van der Waals.

L'approche microscopique des forces de London – Van der Waals, est utilisée pour calculer les forces entre particules macroscopiques. Ainsi, en supposant l'additivité des énergies d'interaction de ces forces pour une assemblée de molécules ou d'atomes (Hamaker, 1937) et à partir de la force attractive de London – Van der Waals entre deux molécules situées à une distance voisine  $r$ , donnée par l'équation :

$$F_{\text{vdW}} = \lambda r^{-7} \quad (1.4)$$

avec  $\lambda$  : constante d'attraction de Van der Waals,

on peut calculer la force attractive de Van der Waals entre deux corps macroscopiques par intégration sur toutes les paires d'atomes et de molécules. De façon générale, pour deux corps de taille  $d_{p1}$  et  $d_{p2}$ , cette force s'écrit :

$$F_{\text{vdW}} = \frac{A}{12z^2} \cdot \frac{d_p^1 \cdot d_p^2}{(d_p^1 + d_p^2)} \quad (\text{N}) \quad (1.5)$$

avec  $A$  : constante de Hamaker (J),  
 $z$  : distance entre la surface des deux corps (m).

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.

■ Dans le cas de l'interaction entre une particule sphérique de diamètre  $d_p$  et une surface plane, la force de Van der Waals s'écrit alors :

$$F_{\text{vdWp-s}} = \frac{A}{12z^2} d_p \quad (1.6)$$

Elle agit perpendiculairement à la paroi.

■ Si l'interaction a lieu entre deux particules sphériques de diamètre identique, les forces de Van der Waals deviennent alors :

$$F_{\text{vdWp-p}} = \frac{A}{24z^2} d_p \quad (1.7)$$

Pour des surfaces lisses, la distance  $z$  généralement utilisée est de 4 Å. Les forces de Van der Waals décroissent alors fortement lorsque cette distance de séparation entre les deux corps augmente.

On peut également écrire la force de Van der Waals en fonction de la constante de Lifshitz – Van der Waals notée  $h$ , reliée à la constante de Hamaker par l'équation (Visser, 1972) :

$$h = \frac{4\pi A}{3} \quad (1.8)$$

Comme  $A$ , cette constante  $h$  ne dépend que des matériaux qui entrent en contact et du milieu dans lequel ils se trouvent. Sa valeur varie entre 0,6 eV (1 eV =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  J) pour les polymères et 9,0 eV pour les métaux comme l'or et l'argent (Bowling, 1988). Dans l'air, cette constante vaut 4,68 eV pour de l'alumine.

■ 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 :

$$F_{\text{vdW}} = F_{\text{vdW}} + \frac{hr'}{8\pi z^3} \quad (1.9)$$

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

Ainsi, en considérant une distance  $z$  généralement utilisée de 4 Å, une particule d'alumine ( $h=4,68$  eV) de 25 µm de diamètre subit une force de Van der Waals sans déformation de  $2,3 \cdot 10^{-6}$  N. Lorsque le point de contact de cette particule avec la surface est augmenté d'une aire de 0,25 µm de rayon, ce qui équivaut à une déformation de 1% de la particule, il faut ajouter  $2,9 \cdot 10^{-5}$  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 µm 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  $1,2 \cdot 10^{-4}$  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.

Certains auteurs comme Reed (1989) utilisent des modèles théoriques de calcul de forces d'adhérence, telles que la théorie de JKR (Johnson *et al.*, 1971), celle de DMT (Derjaguin *et al.*, 1975) ou bien encore celle de Tsai *et al.* (1991a). Ces théories dont Ziskind *et al.* (1995) font une comparaison dans leur étude, sont basées sur l'analyse de la surface de déformation et de contact entre la particule et la surface.

En se basant sur la théorie JKR, Wang (1990) définit la composante de la force normale d'adhérence à la paroi pour une surface de contact parfaitement lisse et une particule sphérique de rayon  $r_p$  :

$$F_a = \frac{3}{2}\pi\gamma r_p \quad (N) \quad (1.10)$$

avec  $\gamma$  : énergie de contact entre la particule et la surface par unité de surface.

Pour exemple,  $\gamma = 0,56$  J/m<sup>2</sup> pour de particules d'alumine.

En conclusion, que l'on tienne compte d'une déformation ou non de la particule ou/et de la surface, on remarque que les forces de Van der Waals réduites aux forces de

London - Van der Waals sont toujours proportionnelles à  $d_p$  dans le cas de l'interaction entre deux corps.

### 1.2.1.2. Forces cohésives

Il s'agit là 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 interparticulaires ont pour origine principale les forces de Van der Waals (Visser, 1989) mais leur dépendance est différente en fonction de la taille des particules, du fait que la géométrie de contact entre les corps est modifiée (Phillips, 1980).

■ Considérons le cas de l'interaction entre une particule donnée et une surface composée d'un lit de particules semblables. La force cohésive peut être estimée, soit en traitant le lit comme un continuum et en utilisant alors l'équation ( 1.7 ), soit en additionnant les forces de Van der Waals entre la particule en surface et les particules adjacentes (valeurs discrètes). Dans ce dernier cas, si l'on suppose une configuration tétraédrique des particules, la force résultante exercée par les trois particules adjacentes vaut :

$$F_{c_{p-s}} = 3 \cdot (F_{vdW_{p-p}} \cdot \cos\theta) \approx F_{vdW_{p-s}} \quad (N) \quad (1.11)$$

avec  $\theta$  : angle décrivant la géométrie du tétraèdre.

Le résultat est approximatif car, en fait, les forces de Van der Waals qui agissent sur chaque particule, interagissent, et la résultante n'est donc pas réellement la somme vectorielle des trois forces individuelles. Cependant dans les deux traitements (continuum et valeurs discrètes) et pour une particule dans un lit, la force de cohésion vaut approximativement  $F_{vdW_{p-s}}$  (relation ( 1.6 )).

■ Considérons maintenant le cas de l'interaction entre particules provenant de deux couches du lit. Si l'on assimile ces deux couches à deux surfaces planes parallèles, on obtient la force  $F_{c_{s-s}}$  par unité de surface :

$$F_{c_{s-s}} = \frac{A}{6\pi Z^3} \quad (N/m^2) \quad (1.12)$$

avec  $Z$  : distance entre les deux surfaces planes.

Par contre, lorsque l'on prend en compte les particules elles mêmes, les forces entre particules initialement en contact sont à considérer. La force totale  $F_{c_{p-p}}$  par unité de surface est alors approximée en effectuant la somme des vecteurs et vaut :

$$F_{c_{p-p}} = \frac{A}{24z^2} \cdot \frac{1}{d_p} \quad (\text{N/m}^2) \quad (1.13)$$

Suivant la géométrie que l'on considère, les deux approximations ( 1.11 ) et ( 1.13 ) obtenues pour les forces de cohésion diffèrent donc dans leur dépendance en  $d_p$ . Flechter (1976), quant à lui, effectue des mesures expérimentales de ces forces et obtiendrait pour la cohésion d'un lit de particules des forces indépendantes de  $d_p$ .

Enfin, 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 (cf. 1.3.1.2).

On constate donc que les interactions entre particules provenant d'un même lit ne permettent pas de décrire une dépendance en  $d_p$  aussi simplement que dans le cas de l'interaction entre une particule et une surface. Les forces cohésives qui sont des forces interparticulaires 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  $d_p$ .

### **1.2.1.3. Forces de capillarité**

L'effet de capillarité est du à l'apparition d'un film par condensation capillaire entre la surface et la particule, ce qui a pour effet d'augmenter l'attraction entre les deux corps (Renoux et Boulaud, 1998). Cet effet suppose donc la présence de vapeur (par exemple, de la vapeur d'eau) dans le micro-environnement de contact. Les forces de capillarité proviennent donc de tensions de surface. Elles sont fonction de la taille des particules et de la tension superficielle du film liquide  $T$ . Pour un contact parfaitement lisse entre une sphère et une surface plane et une humidité relative supérieure à 90 %, les forces de capillarité  $F_{\text{Cap}}$  s'écrivent :

$$F_{\text{Cap}} = 2\pi T d_p \quad (\text{N}) \quad (1.14)$$

La tension superficielle de l'eau à 20 °C et 1 atm vaut 0,073 N/m.

Cependant, pour des surfaces plus réalistes, à des humidités relatives plus basses, ces forces dépendent de la courbure des aspérités aux points de contact. Cette courbure varie fortement d'une particule à l'autre. Ainsi, à partir de mesures expérimentales faites à 25 °C, Corn (1961) élabore une corrélation empirique pour les forces d'adhérence qui traduit l'effet de l'humidité relative sur l'adhérence. Cette corrélation valable pour des matériaux durs et des surfaces propres, s'écrit :

$$F_{adh} = 0,063 \cdot d_p (1 + 0,009 \cdot HR) \quad (N) \quad (1.15)$$

avec HR : Humidité relative du milieu (%).

Les conditions favorisant alors l'effet de capillarité sont :

- une humidité relative supérieure à 60-70 % (cf. § 1.3.1.4)
- des surfaces hydrophiles,
- des particules hygroscopiques comme le NaCl.

Lorsque l'une de ces conditions est présente, les forces de capillarité peuvent augmenter de façon importante la force d'adhésion et devenir supérieures aux forces de Van der Waals.

#### **1.2.1.4. Forces électrostatiques**

■ Deux types de forces électrostatiques existent :

- Les forces provenant de l'interaction électrostatique produite par la charge électrique de la particule ou de la surface, appelées forces images ou forces coulombiennes. Le mécanisme de ces forces repose sur l'induction dans la surface d'une charge identique mais de signe opposé à celle de la particule. Ce sont en fait des forces d'influence qui agissent peu lorsqu'il y a contact. De plus, quand la surface est mise à la masse, la charge des particules en contact avec la surface n'est pas constante. En effet, les charges s'écoulent le long de la surface au cours du temps, diminuant ainsi la valeur des forces de Coulomb.

- Les forces de double-couche dues à la différence de potentiel entre les surfaces en contact. Ces forces se développent au moment de la séparation de surfaces de nature différentes, qui se séparent chargées avec des signes opposés. Elles s'écrivent :

$$F_{El} = \frac{Uq}{4z} = \frac{\pi\epsilon U^2}{2z} d_p \quad (N) \quad (1.16)$$

où  $0 < U < 0,5 V$  : différence de potentiel,  
 $q = 2\pi\epsilon U d_p$  : charge portée par la particule,  
 $\epsilon$  : permittivité de l'espace libre.

Lors du détachement d'une particule de la surface, Krupp (1967) estime que les forces électrostatiques peuvent contribuer à augmenter les forces d'adhérence. Mais, en général cette contribution ne devrait pas dépasser la contribution des forces de Van der Waals. En effet, la particule doit être chargée de façon importante pour que les forces électrostatiques puissent être significativement comparées aux forces de Van der Waals.

D'autre part, certains matériaux peuvent porter des charges assez élevées permettant ainsi aux forces électrostatiques de contribuer significativement à la force d'adhérence totale. Il s'agit en général de polymères de faible conductivité ou d'isolants. Bowling (1988) conclut, cependant, que pour des particules inférieures à 50  $\mu m$ , les forces de Van der Waals restent prépondérantes devant les forces électrostatiques.

#### 1.2.1.5. Force de pesanteur

- La force de pesanteur ou gravité s'écrit :

$$F_G = \frac{\pi\rho_p g}{6} d_p^3 \quad (N) \quad (1.17)$$

où  $\rho_p$  : densité de la particule,  
 $g$  : accélération gravitationnelle.

Contrairement aux autres forces d'adhérence, la force de pesanteur est fonction de  $d_p^3$ .

- Dans leurs études théoriques sur l'adhésion, Bowling (1988) et Ranade (1987) entre autre, ont cherché à mesurer quantitativement l'effet de chaque force adhésive. Afin de faciliter la comparaison entre ces différentes forces, nous représentons sur la Figure 1.3 l'ensemble des forces d'adhérence en fonction de la taille des particules sur lesquelles elles agissent. Pour ce faire, nous considérons le cas de particules d'alumine ( $h = 4,68 eV$  et  $\rho_p = 3,9 g/cm^3$ ), poudre que nous utiliserons pour notre étude.

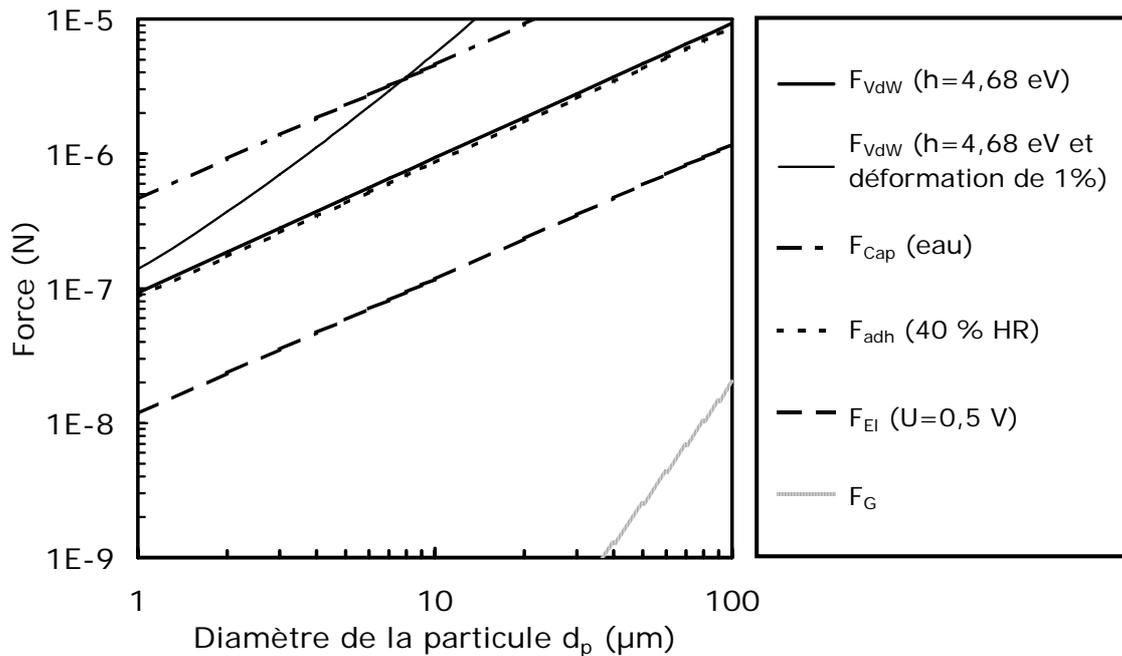


Figure 1.3 – Evolution des forces d'adhérence en fonction de la taille des particules

La Figure 1.3 nous permet d'observer clairement l'influence relative des forces d'adhérence. Ainsi, pour des particules comprises entre 1 et 100  $\mu\text{m}$ , il ressort nettement de ce graphe que les premières forces qui retiennent les particules sur une surface sèche sont les forces de Van der Waals. Dans cet intervalle, elles valent entre  $10^{-7}$  et  $10^{-5}$  N. Dans le cas où plusieurs particules sont en contact, l'apparition des forces cohésives (non représentées ici) est source d'augmentation des forces de Van der Waals, nous l'avons vu.

De plus, si l'on prend en considération les déformations entre surfaces en contact, ces forces vont augmenter considérablement et dépasser les forces de capillarité dans des conditions idéales, dès 8  $\mu\text{m}$  pour une déformation de seulement 1 %. Toutefois, quand seule l'humidité relative du milieu est prise en compte, les forces de capillarité sont nettement moins appréciables devant les forces de Van der Waals. Elles ne dépassent les forces de Van der Waals sans déformation que si l'humidité du milieu est supérieure à environ 60 %.

D'autre part, pour des particules d'alumine, les forces électrostatiques ont des valeurs d'au moins un ordre de grandeur au-dessous de celles des forces de Van der Waals. Cependant, pour certaines conditions liées aux propriétés des particules (par exemple, les matériaux de type polymère), les forces électrostatiques peuvent augmenter fortement la force d'adhérence et même devenir prédominantes pour des particules supérieures à 50  $\mu\text{m}$  (Bowling, 1988).

Quant à la force de pesanteur de la particule, elle vaut à :

$$\begin{aligned} d_p = 1 \mu\text{m}, & \quad F_G = 5 \cdot 10^{-15} \text{ N}, \\ d_p = 10 \mu\text{m}, & \quad F_G = 5 \cdot 10^{-12} \text{ N}, \\ d_p = 100 \mu\text{m}, & \quad F_G = 5 \cdot 10^{-9} \text{ N}. \end{aligned}$$

La force de pesanteur est donc extrêmement faible devant les autres forces d'adhérence : pour des tailles de particules de 10  $\mu\text{m}$ , elle se trouve à quatre ordres de grandeurs au-dessous des forces de Van der Waals. La gravité n'intervient donc pas ou très peu sur l'adhérence des particules de tailles inférieures à 100  $\mu\text{m}$ . Nous pouvons donc bien la négliger. Toutefois, dans certaines conditions bien particulières et pour des particules de diamètre supérieur à environ 50  $\mu\text{m}$ , elle peut commencer à devenir non négligeable devant les autres forces. Au delà de 100  $\mu\text{m}$ , elle n'est plus négligeable et peut même devenir la force majeure de l'adhérence.

### 1.2.2. Forces aérodynamiques

Les principales forces intervenant dans la mise en suspension sont les forces de traînée et de portance. 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 (cf. § 2.2), peuvent être déterminées à partir de la masse volumique du fluide  $\rho$ , de la viscosité cinématique  $\nu$  du fluide, et de la contrainte de cisaillement à la paroi  $\tau_0$ . 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 :

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (1.18)$$

Cette vitesse dont nous reparlerons au chapitre 2, est caractéristique de la vitesse du fluide au sommet de la sous-couche visqueuse, là où les effets visqueux équilibrent les effets non linéaires. Pour une couche limite dynamique en régime turbulent, l'épaisseur de la sous-couche visqueuse est présente en  $z^+ \leq 5$ .  $z^+$  correspond à une distance adimensionnée et s'écrit à partir de la vitesse de frottement  $v_*$  suivant la relation :

$$z_+ = \frac{v_* z}{\nu} \quad (1.19)$$

A partir de  $v_*$ , on définit également un diamètre adimensionnel  $d_{p+}$  selon :

$$d_{p+} = \frac{v_* d_p}{\nu} \quad (1.20)$$

Un autre paramètre sans dimension souvent rencontré est le nombre de Reynolds de la particule  $Re_p$ . Il est donné par :

$$Re_p = \frac{v_p d_p}{2\nu} \quad (1.21)$$

avec  $v_p$  : vitesse relative entre le fluide et la particule à une hauteur  $z$  correspondant au centre de la particule.

Pour une particule immobile sur une surface dans la sous-couche visqueuse, on a :

$$v_p = \frac{\dot{\gamma} d_p}{2} \quad (1.22)$$

avec  $\dot{\gamma} = \frac{\partial v}{\partial z}$  : taux de cisaillement.

Dans la région  $z_+ < 5$ , ce taux de cisaillement vaut :

$$\dot{\gamma} = \frac{v_*^2}{\nu} \quad (1.23)$$

Ainsi, une particule située sur une surface, est soumise à une force résultant principalement de la contrainte de cisaillement si son diamètre adimensionné est plus petit que l'épaisseur adimensionnée de la couche limite, soit  $d_{p+} < 5$ .

### 1.2.2.1. Force de portance

Les descriptions faites de la structure fine de l'écoulement au voisinage d'une surface plane, et notamment dans la sous-couche laminaire en régime turbulent montrent que l'écoulement n'est pas entièrement laminaire (Ryhming, 1991). En effet, des phénomènes périodiques semblables à des mini-tornades ont été observés : les « bursts » (cf. § 1.3.2.1).

La force de portance est associée à ces « bursts » turbulents qui contribuent de façon aléatoire à la mise en suspension d'une particule.

■ Leighton et Acrivos (1985) déterminent une expression de la force de portance  $F_L$  d'une sphère en contact avec une surface plane dans un simple écoulement de cisaillement et pour des petites valeurs du nombre de Reynolds de la particule :

$$F_L = 9,22 \left( \frac{\dot{\gamma} \mu}{4} d_p^2 \right) \left( \frac{\dot{\gamma}}{4\nu} d_p^2 \right) \quad (1.24)$$

$\mu$  : viscosité dynamique du fluide,

Ainsi, dans la région  $z^+ < 5$ , la force moyenne de portance  $\overline{F_L}$  peut s'écrire :

$$\overline{F_L} = 0,58 \rho v^2 (d_{p+})^4 \quad (1.25)$$

■ Suite à leurs observations, Cleaver et Yates (1973) supposent qu'à proximité de la paroi, l'écoulement dans un « burst » se comporte comme un écoulement avec des points de stagnation axi-symétriques, c'est à dire qu'il est assimilé à un courant ascendant. Ainsi, les auteurs considèrent que de petites particules entièrement submergées dans la sous-couche visqueuse (i. e.  $d_{p+} < 1$ ) peuvent être soulevées par une force  $F_L$  qui provient de cet écoulement. A partir de l'expression de la force de portance verticale de Goren (1970) pour une sous couche instable, ils obtiennent alors pour cette force de portance  $F_L$ , la relation :

$$F_L = 0,076 \rho v^2 (d_{p+})^3 \quad (1.26)$$

valable pour  $d_{p+} < 1$ .

■ Dans le cas où l'écoulement est limité par une paroi et où la particule évolue le long de celle-ci, la force de portance peut être assimilée à la force de Saffman (1965). Pour un écoulement de cisaillement linéaire avec un gradient de vitesse proportionnel à  $v_*^2$ , cette force de portance sur une particule s'écrit :

$$F_L = 10,1 \rho v^2 (d_{p+})^3 \quad (1.27)$$

D'après ces deux résultats, Cleaver et Yates supposent alors que la force de portance est toujours proportionnelle à  $(d_{p+})^3$ .

Toutefois, à partir de l'expression de la force de Saffman (relation ( 1.27 )), Hall (1988) obtient expérimentalement une relation de la force moyenne de portance :

$$\bar{F}_L = (20,9 \pm 1,57) \rho v^2 \left( \frac{d_{p+}}{2} \right)^{2,31 \pm 0,02} \quad (1.28)$$

soit

$$\bar{F}_L \approx 4,2 \rho v^2 (d_{p+})^{2,31} \quad (1.29)$$

Ainsi, la différence de puissances et de coefficients observée provient d'une différence dans le choix des tailles de particule. Dans les expériences de Hall, les particules sont plus grandes que l'épaisseur de la sous-couche visqueuse. Les écoulements et la taille des particules couvrent l'intervalle :  $3,6 < d_{p+} < 140$ . De ce fait, elles sont sujettes à d'autres conditions d'écoulement. En utilisant une autre méthode expérimentale, Mollinger *et al.* (1996) obtiennent des résultats proches de ceux de Hall. Ils confirment notamment que la force de portance est proportionnelle à  $(d_{p+})^2$ .

■ De plus, Ziskind *et al.* (1995) ont déterminé la force de portance fluctuante  $f_L$  utilisée par Reeks *et al.* (1988) dans leur modèle (cf. § 1.4.1.2) telle que :

$$F_L = \bar{F}_L + f_L \quad (1.30)$$

Cette force de portance fluctuante  $f_L$  a été séparée en deux termes, l'un correspondant aux oscillations de la vitesse principale de l'écoulement  $f_{L1}$  et l'autre à la vitesse fluctuante normale à la paroi  $f_{L2}$ .

$$f_{L1} = 0,055 (d_{p+})^4 \quad (1.31)$$

soit

$$f_{L2} = 0,02 (d_{p+})^3 \quad (1.32)$$

### 1.2.2.2. Force de traînée

Lorsqu'une particule est en mouvement dans un fluide visqueux en déplacement, une force de résistance aérodynamique au mouvement de la particule apparaît. Pour un écoulement stable, cette force dite de traînée est horizontale et parallèle à la surface. Elle

est déterminée dans le cas d'une sphère par O'Neill (1968) à partir des équations de Navier-Stokes linéarisées :

$$F_D = 6\pi\mu\dot{\gamma} \left( \frac{d_p}{2} \right)^2 f \quad (1.33)$$

avec  $f = 1,7$  : correction de la force de traînée de Stokes.

Ainsi, dans la région  $z^+ < 5$ , ce terme est considéré comme la force de traînée moyenne. Il devient alors :

$$\overline{F_D} = 8,02\rho v^2 (d_p^+)^2 \quad (1.34)$$

Les facteurs qui influent sur la force de traînée sont donc la nature du fluide et son régime d'écoulement, ainsi que le diamètre de la particule.

■ Des mesures expérimentales identiques à celles de Hall (1988) et de Mollinger (1996) n'ont pas été réalisées pour la force de traînée moyenne. Ayant besoin de calculer cette dernière dans leur modèle Rock'n Roll (cf § 1.4.1.3), Reeks et Hall (2001) utilisent alors l'expression de O'Neill (1.33) qu'ils approximent à :

$$\overline{F_D} \approx 8\rho v^2 (d_p^+)^2 \quad (1.35)$$

Comme les structures d'écoulement responsables des forces de portance sont les mêmes que celles qui font apparaître les forces de traînée, il semble raisonnable aux auteurs de supposer que ces deux forces sont corrélées.

### 1.2.3. Analyse sur les moments des forces

Afin de prendre en compte les effets imperceptibles du mouvement de la particule tels que la rotation, le glissement ou bien l'oscillation de la particule avant son détachement de la paroi, certains auteurs se sont attachés aux moments et aux couples des forces citées ci-dessus (Wang, 1990 ; Tsai *et al.*, 1991b ; Ziskind *et al.*, 1995 ; Reeks *et al.*, 2001).

■ O'Neill (1968) exprime la force de traînée à l'aide d'un moment aérodynamique  $M_D$  qui provoque la rotation de la particule dans la direction principale de l'écoulement :

$$M_D = 0,944\pi\mu\dot{\gamma} d_p^3 \quad (1.36)$$

Dans la région  $z^+ < 5$  et d'après la relation ( 1.23 ), il est alors possible d'exprimer ce moment aérodynamique moyen suivant la relation :

$$M_D = 3\rho\frac{v^3}{v_*}(d_p^+)^3 \quad (1.37)$$

■ Nous avons vu au § 1.2.1 que les différents modèles théoriques d'adhérence existants sont basés uniquement sur la force qui s'applique normalement à la surface. Quand les effets d'écoulement s'expriment en terme de moment, il est intéressant de s'attacher aux différentes réactions possibles de surface. Une approche simplifiée consiste à exprimer la réaction de surface du moment aérodynamique en terme de moment de forces d'adhérence sur une surface plane. Ce moment  $M_a$  est défini par le produit de la force d'adhérence agissant au centre de la particule sphérique, et du rayon de cette particule (Wang, 1990) :

$$M_a = F_a \frac{d_p}{2} \quad (1.38)$$

■ Reeks et Hall (2001), quant à eux, prennent en compte la force de traînée et la force de portance pour traduire un effet d'oscillations de la particule autour de points d'aspérité de la surface Q et P sur laquelle elle repose (Figure 1.4) :

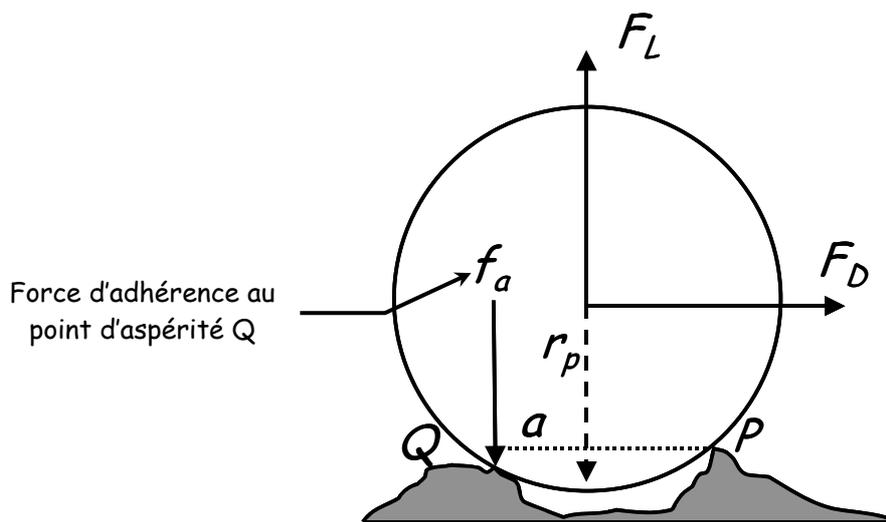


Figure 1.4 – Modèle Rock'n Roll (d'après Reeks et Hall, 2001)

En s'intéressant ainsi aux aspérités de la surface, les auteurs ont une approche plus réaliste de la situation. Ils expriment alors le moment aérodynamique de portée - traînée  $\Gamma$  suivant :

$$\Gamma \approx \frac{a}{2} F_L + r_p F_D \quad (1.39)$$

avec  $a$  : distance entre deux aspérités de la surface.

Ce mouvement de la particule sera décrit plus en détail dans la suite de ce chapitre.

Toutefois, en divisant le moment aérodynamique de portée – traînée par la distance entre deux aspérités de surface, il est possible de calculer les forces résultantes de réentraînement  $F_R$  associées à  $\Gamma$ . Ces forces aérodynamiques sont caractérisées par une valeur moyenne  $\overline{F_R}$  et un écart-type  $\sigma_R$ . Ainsi l'utilisation des relations ( 1.29 ) et ( 1.34 ), et de la valeur de  $\frac{r_p}{a} \approx 100$  basée sur des mesures des forces de réentraînement tangentiel et normal de Hall, permet d'obtenir la formule suivante pour la valeur moyenne  $\overline{F_R}$  :

$$\overline{F_R} = 10,45\rho v^2 \left[ 1 + 300 \left( \frac{d_p}{2} \right)^{-0,31} \right] \left( \frac{d_p}{2} \right)^{2,31} \quad (1.40)$$

Quant à l'écart type de ces forces de réentraînement, des mesures de Hall montrent que le rapport entre l'écart type et la force de portance vaut environ 0,2. En l'absence de données similaires pour les forces de traînée, Reeks et Hall (2001) supposent que le rapport entre l'écart type et la force de traînée est le même que pour la force de portance. Ainsi, il est possible de généraliser ce résultat à  $\sigma_R$  en écrivant :

$$\sigma_R = 0,2\overline{F_R} \quad (1.41)$$

#### 1.2.4. Conclusion

Les différentes études de la littérature sur les forces d'adhérence montrent clairement que les premières forces qui retiennent les particules sur la surface ou les particules entre-elles sont les forces de Van der Waals. Si l'on tient compte des déformations possibles des particules et / ou de la surface, ces forces peuvent même devenir plus importantes du fait d'une augmentation de la surface de contact entre les deux éléments. Malgré tout, les forces de capillarité peuvent contribuer fortement à la force totale d'adhérence notamment à partir d'une humidité relative du milieu supérieure à 60-70 %.

Quant aux forces électrostatiques, leur influence est principalement fonction des propriétés des matériaux qui entrent en jeu. Ainsi, dans certaines conditions, les forces électrostatiques commencent à devenir importantes et peuvent prédominer les forces de Van der Waals quand le diamètre des aérosols dépasse 50  $\mu\text{m}$ . Toutefois, dans le cas de particules d'alumine à constante de Lifshitz - Van der Waals autour de 4 eV, les forces de Van der Waals restent prédominantes. Enfin, entre 1 et 100  $\mu\text{m}$ , la force de pesanteur a très peu d'influence sur la force d'adhérence totale. Son effet reste négligeable pour des particules supérieures à 50  $\mu\text{m}$ . Toutefois, cette force devient prédominante au-delà de 100  $\mu\text{m}$ .

Enfin, on note que le comportement d'une seule particule sur une surface est différent de celui d'un ensemble de particules. En plus des forces d'adhérence, il faut alors prendre en compte les forces auto-adhésives ou cohésives. Le réentraînement sera alors déterminé par l'amplitude relative de ces deux forces selon les divers scénarios.

De façon générale, on remarque que pour des particules comprises entre 1 et 100  $\mu\text{m}$ , les principales forces d'adhérence (forces de Van der Waals, forces cohésives et éventuellement force de capillarité) qui retiennent la particule sur la surface suivent une loi en première puissance de  $d_p$ .

Les principales forces qui contribuent au détachement des particules sont les forces aérodynamiques. Elles sont de deux types : la force de traînée (force horizontale) et la force de portance (force verticale dirigée vers le haut). Elles ont chacune leur importance mais suivant le mécanisme de détachement envisagé, l'une ou l'autre des forces est prépondérante. On remarque, d'autre part qu'elles sont toutes deux proportionnelles à une puissance de  $d_p$ . Ceci suggère donc que pour une vitesse donnée, plus la taille des particules augmente, plus il deviendrait facile de les mettre en suspension. Par ailleurs, ces forces proviennent de l'écoulement, elles suivent donc aussi des lois en puissance de la vitesse de frottement de l'air à la paroi  $v_*$ .

Afin de s'attacher aux mouvements imperceptibles de la particule tels que sa rotation son roulement ou son glissement avant de se mettre en suspension, il faut alors analyser le phénomène en prenant en compte les moments des forces. Ainsi, la combinaison de ces forces n'agissant plus que normalement ou parallèlement à la surface, permet de prendre en considération ces nouveaux mécanismes plus réalistes pour la description.

Enfin, quelle que soit l'action des forces sur les particules, notre analyse met en évidence que de nombreux paramètres sont susceptibles d'influencer la valeur de ces forces. En effet, les forces adhésives sont affectées par la forme et la taille de la particule, ainsi que par le matériau, la rugosité de la surface, la structure du dépôt mais

aussi par l'humidité relative du milieu (Hinds, 1999). Quant aux forces aérodynamiques, on conçoit bien qu'elles soient influencées notamment par les caractéristiques de l'écoulement telles que la vitesse ou bien la turbulence.

Nous nous proposons donc dans la suite de ce chapitre de recenser les paramètres susceptibles de modifier l'action de ces différentes forces et donc, par conséquent le phénomène de mise en suspension.

### ***1.3. Paramètres caractéristiques des forces d'adhérence et aérodynamiques***

Comme nous l'avons vu précédemment, 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 de la poudre, à la surface sur laquelle est déposée la poudre, 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 était de pouvoir classer ces différents facteurs d'après les travaux déjà effectués, ainsi que ceux qui semblent pouvoir influencer la mise en suspension dans le cas plus spécifique d'un tas de poudre déposé sur une surface, en contact avec un écoulement d'air horizontal.

Notre recensement des paramètres, présenté ici sous forme de « catalogue », 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. Nous choisissons de présenter les différents paramètres par type et par ordre d'importance décroissant.

#### **1.3.1. Paramètres des forces d'adhérence**

##### ***1.3.1.1. Paramètres liés à la poudre et aux particules***

###### **■ *Granulométrie de la poudre***

On caractérise la distribution granulométrique d'une poudre suivant une loi log-normale par un diamètre médian  $d_{50}$  et un écart type géométrique de la distribution  $\sigma_g$ .

Comme nous l'avons vu au § 1.2, la dimension des particules est un facteur essentiel de l'adhérence. En effet, l'ensemble des forces adhésives (forces de Van der Waals, forces électrostatiques, forces de capillarité...) dépend, dans leur expression, de cette caractéristique. Ainsi, au sein même de l'adhérence, il y a compétition entre forces et

donc, suivant la taille des particules, certaines forces vont être plus ou moins prédominantes.

Lorsqu'il s'agit de la mise en suspension, la plupart des expériences que nous avons pu recenser dans la littérature, concernent différentes tailles de particules. Ces travaux mettent en évidence une augmentation du réentraînement avec la taille des particules, d'où une diminution de l'adhérence (Nicholson, 1993 ; Phares *et al.*, 2000). Cependant, les études expérimentales existantes sur le réentraînement utilisent généralement des particules submicroniques (Wen et Kasper, 1989 ; Wen *et al.*, 1989 ; Tsai *et al.*, 1991b) ou inférieures à environ 30  $\mu\text{m}$  (Fromentin, 1989 ; Erhart, 1986 ; Braaten *et al.*, 1990 ; Taheri et Bragg, 1992 ; Nicholson, 1993). Quant aux études réalisées dans le domaine du transport éolien (Foucault, 1994), les tailles des particules sont souvent beaucoup plus grandes ( $d_p > 100 \mu\text{m}$ ). Il n'existe donc pas (ou très peu) de travaux effectués sur le réentraînement pour des diamètres de particules compris dans la gamme 40 à 100  $\mu\text{m}$ .

Afin de recouvrir ces deux gammes de dimensions déjà étudiées dans la littérature, nous nous proposons d'utiliser des poudres dont les diamètres sont compris entre quelques microns et environ 100  $\mu\text{m}$ .

#### ■ *Morphologie des particules*

Dans la plupart des études de la littérature, les particules sont assimilées à des sphères. On trouve cependant quelques travaux comparant différentes morphologies de particules vis-à-vis du phénomène d'adhérence. Corn (1961) observe que la force d'adhérence de fibres à bout sphérique est plus grande que celle de fibres à bout différent. La surface de contact des fibres à bout sphérique avec une surface étant plus importante, la force d'adhérence en serait d'autant augmentée. Zimon (1982), quant à lui, étudie l'effet de la forme des particules de diamètre compris en 20 et 40  $\mu\text{m}$ . Comme Corn, il observe que sur une surface considérée lisse, l'adhérence de particules sphériques est plus élevée que l'adhérence de particules de forme irrégulière de taille équivalente. De ce fait, la forme de la particule a un effet sur l'adhérence de la particule sur la surface. Ainsi, cette caractéristique physique rentre d'une part dans les propriétés d'adhérence sur la surface de base, mais aussi dans celles de la cohésion des poudres.

L'influence de ce paramètre ne sera pas étudiée dans notre étude. Cependant, nous avons caractérisé la forme des particules utilisées dans nos expériences.

### ■ *Type de la contamination déposée*

On peut définir deux catégories de structures de dépôt de poudre :

- le dépôt *monocouche* où toutes les particules adhèrent directement à la paroi et sont exposées aux forces d'entraînement de l'écoulement d'air. Ce dépôt peut être *éparse*. Dans ce cas, lorsque les particules sont voisines, des forces cohésives viennent s'ajouter aux forces d'adhérence.

- le dépôt *multicouches* où seule la couche en surface est exposée à l'écoulement ; les particules situées en dessous ne peuvent être mobilisées que si les particules en surface ont été réentraînées. On y distingue les dépôts *plats* et les dépôts en *tas* (amas). Dans ce dernier cas, un certain nombre de particules sont directement en contact avec l'écoulement mais ces particules ne proviennent pas forcément de la même couche.

A notre connaissance, très peu d'études expérimentales traitent de l'influence de ces différents types de dépôts sur la mise en suspension. Seuls Gotoh *et al.* (2001) s'intéressent à des dépôts éparses après avoir traité le cas d'un dépôt monocouche sans particule en contact. Ainsi, ils étudient l'effet du nombre de particules par unité de surface sur la fraction réentraînée. Mais, pour des dépôts comprenant entre 100 et 2000 particules par millimètre carré, ils n'observent aucune différence significative. Cependant, dans les quelques travaux théoriques existants, on constate que plus la structure du dépôt devient complexe, plus les modèles de mise en suspension se compliquent (cf. § 1.4.2). Ceci est dû, entre autre, à l'apparition de paramètres supplémentaires recensés dans ce chapitre, comme la porosité ou l'agglomération des particules quand on passe d'un dépôt monocouche à un dépôt multicouches.

A ce jour, la situation du tas de poudre mettant en jeu des tailles de particules inférieures à 100  $\mu\text{m}$  n'a pas encore été étudiée. Les seules études qui pourraient s'approcher de notre cas sont celles réalisées dans le domaine du transport éolien de particules où il convient de spécifier que les échelles mises en jeu sont d'un tout autre ordre. C'est le cas des études réalisées sur le déplacement des dunes de sables dans le désert par exemple (Dauchot *et al.*, 2001 ; Andreotti *et al.*, 2002).

### ■ *Porosité du lit de particules*

La porosité désigne le taux de vide d'un lit de particules, c'est à dire le rapport entre le volume de vide qui existe entre les particules et le volume total du dépôt.

Friess et Yadigaroglu (1998) traitent de l'influence de la porosité sur le réentraînement d'un dépôt multicouches. En incluant la formation d'agglomérats (voir plus loin dans ce paragraphe), ils élaborent un modèle théorique qui met en évidence que la fraction réentraînée augmente avec la porosité : le nombre croissant de points de contact entre particules diminue les forces d'adhésion entre ces dernières. De ce fait, la structure d'un dépôt poreux serait moins robuste donc plus facile à mettre en suspension. Toutefois, si le modèle de Friess et Yadigaroglu décrit correctement les tendances observées dans les expériences PARESS (Fromentin, 1989) et STORM (Hummel *et al.*, 1998), il sous-estime les valeurs des coefficients de mise en suspension.

#### ■ *Homogénéité du dépôt*

On peut définir l'homogénéité d'un dépôt par le fait que la distribution des forces d'adhérence et de cohésion est homogène dans l'ensemble du dépôt. Chaque couche du dépôt aura alors la même distribution des forces d'adhérence.

L'inhomogénéité d'un dépôt aura donc pour conséquence un effet de dénudation, c'est à dire un réentraînement par plaque de particules. Ce paramètre est difficilement maîtrisable dès lors que nous traitons du dépôt multicouches. A titre d'exemple, Fromentin (1989) dans ses expériences observe une variation du flux de réentraînement fonction du temps qu'il attribue, entre autre, à un éventuel effet de non homogénéité du dépôt. Il suppose que cette dernière est liée à la présence d'impuretés qui modifient les distributions des forces d'adhérence, conduisant ainsi à un réentraînement par agglomérats ou plaques. Le paramètre *homogénéité* peut donc avoir une influence sur le réentraînement.

Dans notre situation où nous travaillons sur des tas de poudre qui seront réalisés manuellement, il semble difficile de pouvoir contrôler et/ou maîtriser correctement l'homogénéité des tas.

#### ■ *Teneur en eau de la poudre*

La teneur en eau de la poudre correspond à la quantité d'eau qu'elle contient. De ce fait, à l'équilibre, ce paramètre est directement relié à l'humidité de l'air ambiant.

Certains auteurs ont travaillé sur des poudres sèches mais aucun n'a étudié de façon spécifique l'influence de ce paramètre sur l'adhérence ou le réentraînement. Or la présence d'eau dans une poudre peut créer des forces de capillarité et donc augmenter l'adhérence. Dans ce cas, ce paramètre a un effet négatif sur le réentraînement.

Par ailleurs, cette augmentation de l'adhérence peut conduire à la formation d'agglomérats qui peuvent être facilement réentraînés, s'ils se situent dans le bon domaine granulométrique par rapport à la vitesse de l'écoulement (cf. dans ce chapitre, § Agglomération des particules). C'est l'explication qu'apporte Fromentin (1989) lorsqu'il mesure un réentraînement légèrement plus fort pour un dépôt de poudre réalisé sous atmosphère humide (entre 85 et 99 % d'humidité relative) plutôt que sous une atmosphère « sèche » (donnée non précisée). Dans ce cas, l'effet est positif sur le réentraînement. Toutefois, Biryukov (1996) observe l'effet inverse (cf. dans ce chapitre, § Agglomération des particules).

Des vérifications expérimentales sont donc nécessaires pour expliquer ces contradictions.

#### ■ *Vieillessement du dépôt*

Les propriétés physiques et chimiques des matériaux utilisés peuvent avoir une influence notamment sur la surface de contact entre les particules et la paroi, donc sur l'adhérence et finalement le réentraînement. Entre autre, le comportement visco-élastique de particules solides peut avoir tendance à déformer la particule avec le temps, modifiant ainsi l'aire de contact de la particule avec la surface. L'augmentation de la déformation induit, dans certains cas, une plus grande surface de contact entre la particule et la paroi. L'adhérence peut alors augmenter d'un ou plusieurs ordres de grandeurs (cf. § 1.2.1.1), ce qui a un effet négatif sur le réentraînement.

DeMejo *et al.* (1989) étudient expérimentalement les types d'écrasement possibles entre des particules et les substrats sur lesquels elles sont déposées suivant leur dureté spécifique et les comparent à des modèles d'adhésion prenant en compte la déformation. D'autres études dans le même domaine existent. On trouve entre autre Rimai *et al.* (1995). Ainsi, l'augmentation de l'aire de contact due à la déformation progressive des matériaux du fait de leur élasticité (Tsai *et al.*, 1991a) est donc une conséquence du vieillissement des matériaux.

Hsieh (1990) prend en compte l'effet du temps sur la déformation de particules submicroniques déposées sur un substrat avant réentraînement. Il constate alors qu'aucune augmentation significative de l'adhérence n'est observée dans ses expériences pour des périodes inférieures à 48 h. Par contre pour des durées plus longues, il observe une augmentation progressive de la force adhérence qu'il attribue à une déformation de la particule ou de la surface.

En règle générale, peu d'études prennent en compte le vieillissement du dépôt.

### ■ *Etat électrostatique*

D'après Renoux et Boulaud (1998), la mise en suspension d'aérosol provoque toujours l'apparition de charges électriques. Dans le cas de particules solides de même nature mais différentes de celle de la paroi, on peut avoir une dissymétrie des charges par classe granulométrique surtout si la poudre ou le récipient est métallique. Mais la charge électrique apparaît lors de la séparation des particules.

L'utilisation de champs électrostatiques est une méthode qui peut être utilisée pour le nettoyage « à sec » de surface contaminée pour des particules de dimension micrométrique. Toutefois, les conditions dans lesquelles la mise en suspension s'effectue, correspondent généralement à des conditions extrêmes (champs fort, humidité nulle...).

Pour exemple, très récemment, Soltani *et al.* (2000) ont pris en compte les effets électrostatiques dans le détachement de particules longues (fibres) dans un écoulement turbulent en présence d'un champ électrique. Ainsi, ils montrent que les forces électrostatiques modifient la mise en suspension uniquement pour des particules portant des charges élevées proches des conditions de saturation.

Dans les conditions auxquelles nous nous intéressons, ce paramètre n'apparaît pas comme avoir un effet important. Ainsi, nous ne l'intégrons pas dans notre étude.

#### **1.3.1.2. *Phénomènes interparticulaires***

### ■ *Agglomération des particules*

Comme nous l'avons vu précédemment, dans le cas d'un dépôt de particules polydispersées ou d'un dépôt multicouches, il convient de s'attacher principalement aux forces de cohésion. En effet, l'adhésion entre particules peut conduire à la formation d'agglomérats. Ces agglomérats correspondant principalement à l'adhésion des petites particules sur de plus grosses, ont donc une taille supérieure aux diamètres des particules qui les constituent. Il est alors possible qu'ils se détachent de la surface si les forces auto-adhésives deviennent supérieures aux autres forces d'adhérence. Dans le cas contraire, ils se désagrègent (phénomène de mise en suspension particule par particule).

Dans leur modèle inspiré du travail expérimental de Fromentin (1989), Friess et Yadigaroglu (1998) prennent en compte la formation d'agglomérats : ils suggèrent que, pour une configuration donnée (humidité relative importante), ces agglomérats peuvent être mis en suspension plus rapidement. Cependant cette hypothèse reste à confirmer expérimentalement. En effet, Biryukov (1996) dans une étude expérimentale sur le nettoyage de surfaces par champ électrique indique que pour un fort taux d'humidité, il

peut y avoir désagglomération des agrégats formés, entraînant une mise en suspension plus faible.

#### ■ *Saltation*

Dans certaines situations, il arrive que les particules retombant sous l'effet de leur poids, se déplacent par petits bonds successifs. Ce phénomène appelé, nous l'avons vu, mécanisme de saltation est généralement associé à des particules relativement grosses de  $d_p > 100 \mu\text{m}$  (Nickling, 1994). Cependant, il peut jouer un rôle non négligeable dans la mise en suspension de particules fines. En effet, les particules en saltation peuvent ricocher sur des particules qui peuvent ainsi être réentraînées par les plus grosses. Dans leurs expériences, Fairchild et Tillery (1982) mesurent cet effet sur des particules sphériques polydispersées de  $d_{50} = 7 \mu\text{m}$ , avec des particules sphériques monodispersées en saltation de 100 à 200  $\mu\text{m}$ . Ils mettent alors en évidence que pour des vitesses de l'ordre de 20 m/s, les particules en saltation augmentent d'environ 1 ordre de grandeur le taux de mise en suspension des particules plus fines constituant la contamination.

Dans notre cas, les tailles de particules ne dépasseront pas 100  $\mu\text{m}$  de diamètre. Il est donc peu probable que le phénomène de saltation intervienne dans nos expériences. Par ailleurs, les dimensions du tas que nous étudions (diamètres de quelques centimètres) ne doivent pas donner lieu à ce genre de mécanisme.

#### **1.3.1.3. Paramètres liés à la surface de dépôt**

##### ■ *Type de la surface*

Peu d'études montrant l'influence de la nature de la surface de dépôt sur l'adhérence ou la mise en suspension, ont été trouvées dans la littérature. Cependant, nombreux sont les travaux qui utilisent différents types de surfaces dans de multiples conditions, rendant ainsi les études difficilement comparables. Les surfaces les plus couramment utilisées, souvent imposées par la technique de mesure employée, sont le verre (Braaten, 1990 ; Phares *et al.*, 2000) et l'acier (Fromentin, 1989 ; (Fairchild et Tillery, 1992). Toutefois, les propriétés physico-chimiques et mécaniques des surfaces dépendent de la nature du matériau qui les composent. Ces propriétés directement liées aux forces d'adhérence, peuvent donc modifier le réentraînement.

En règle générale, pour étudier l'influence de la surface, les auteurs de la littérature s'intéressent plutôt à sa rugosité.

### ■ *Rugosité de la surface*

Un paramètre relatif à l'adhérence des particules sur une surface est la rugosité (où se trouve déposée la particule ou bien même celle de la particule).

La rugosité de surface est une notion relativement diversifiée dans la littérature. On constate en effet, que selon les usages qu'on en fait, la rugosité est définie selon différents critères (Ryhming, 1991). Ainsi, on peut la définir comme la distance entre deux pics d'aspérité successifs alors qu'elle peut être également attribuée à la hauteur des aspérités (Zimon, 1982 ; Hsieh, 1990). Dans le cas de la mise en suspension, on raisonne essentiellement en termes de surface de contact.

En effet, dans le cas où les aspérités de la surface sont inférieures ou égales à la taille de la particule, les protubérances de la surface ont pour conséquence directe de diminuer la surface de contact entre la particule et la surface. Ainsi, comparativement à une surface lisse, la force d'adhérence se trouve fortement diminuée (Ranade, 1987 ; Hinds, 1999) et donc le réentraînement augmenté. Dans le cas contraire, la surface de contact cette fois s'accroît et donc l'adhérence diminue.

D'après Reed (1989), la distribution des aspérités peut être décrite suivant une loi de distribution logarithmique. Ainsi, Hontañón *et al.* (1998) développent un nouveau modèle d'adhésion de particules sur une surface qui tient compte du paramètre rugosité de la surface. Des résultats de calculs montrent par exemple que pour des particules de SnO<sub>2</sub>, la force d'adhérence est 1000 fois plus faible sur une surface de rugosité moyenne de 0,5 µm que sur une surface parfaitement lisse. Le réentraînement en serait donc augmenté. Ces calculs ayant été effectués entre 0,1 et 100 µm, on note que cet écart est indépendant du diamètre des particules.

Enfin, la rugosité d'une surface peut également être à l'origine de la modification des caractéristiques de l'écoulement en proche paroi, notamment lorsqu'elle est supérieure à l'épaisseur de la sous-couche laminaire, (Midoux, 1985 ; Rhyming, 1991). De ce fait, elle peut en modifier le réentraînement.

Cependant, dans le cas d'un tas de poudre où seule une faible quantité de particules est directement en contact avec la surface, on peut supposer que la rugosité ne va avoir aucune influence sur le réentraînement des particules. Toutefois, nous retenons ce paramètre afin que nos résultats puissent s'appliquer à une gamme de rugosité large caractérisant différentes surfaces.

### 1.3.1.4. Paramètres liés au milieu environnant

#### ■ *Durée d'exposition*

Dans leur modèle RRH, Reeks *et al.* (1989) mettent en évidence une décroissance de la mise en suspension où le taux de réentraînement varie en  $1/\Delta t$  avec un fort taux dans la première seconde (cf. § 1.4.1.2). Très récemment, les mêmes auteurs (Reeks *et al.*, 2001) ont développé un nouveau modèle (le plus élaboré à l'heure actuelle) dénommé modèle Rock'n Roll (cf. 1.4.1.3). Dans ce dernier, ils mettent également en évidence une décroissance très rapide du taux de mise en suspension. Mais là, le taux de réentraînement décroît de plusieurs ordres de grandeurs sur cette même seconde. De ce fait, si l'on exprime le réentraînement en terme de fraction, celle-ci n'évolue pratiquement plus au-delà d'une période de temps très courte. Les auteurs estiment cette période à une seconde. Au delà, ils considèrent qu'il n'y a plus d'effet du temps sur le réentraînement : le modèle est dit quasi-statique.

Dans le cas d'un dépôt épars de particules, Gotoh *et al.* (2001) mesurent une fraction réentraînée instantanée plus forte dans la période 0 à 200 ms qu'après 200 ms, confirmant là encore un phénomène en deux temps.

Enfin, cette évolution temporelle très courte de la fraction réentraînée est également observée expérimentalement par Fromentin (1989) dans le cas d'un dépôt multicouches, comme nous le verrons au § 1.4.4.1.

Passée les premières secondes, la durée d'exposition ne devrait donc pas être un paramètre très influant sur le réentraînement. Toutefois, nous le prendrons en considération dans nos expériences afin d'observer si le même effet apparaît dans le cas d'un tas de poudre.

#### ■ *Humidité relative*

Comme de nombreux autres paramètres recensés dans ce mémoire, l'humidité du milieu peut directement influencer l'ordre de grandeur des forces d'adhérence.

Corn (1961) observe expérimentalement que, lorsque l'humidité relative atteint 60 à 70 %, la force d'adhérence entre des particules de verre ( $20 < d_p < 60 \mu\text{m}$ ) et une surface de quartz augmente de façon importante du fait de l'apparition de forces de capillarité. Le réentraînement en serait donc diminué. Au dessous de 60 – 70 % d'humidité relative, cette variation de la force d'adhérence est significativement moins importante. A partir de ces résultats expérimentaux, Hinds (1999) prévoit donc une

augmentation de la force d'adhérence d'environ 40 % pour une humidité relative passant de 40 à 95 % due aux forces d'adhérence supplémentaires de capillarité.

Corn observe également de façon expérimentale, que l'influence de l'humidité relative sur la force d'adhérence, est plus significative pour des grosses particules. Ce serait dû au fait que les petites particules retiennent l'humidité adsorbée à l'interface de contact et ne s'adaptent pas aussi rapidement que les grosses particules aux changements de conditions de l'air ambiant. Cet effet a également été mesuré par Wu *et al.* (1992).

Nous intégrerons ce paramètre dans notre étude. Toutefois, pour des raisons techniques, l'humidité relative du milieu ne sera pas maîtrisée. Elle sera uniquement contrôlée.

#### ■ *Température*

La température peut influencer les forces d'adhérence en modifiant les tensions de surface du film liquide créé par le phénomène d'adsorption, ou les liaisons viscoélastiques entre les aspérités mettant les surfaces des solides (particules – surface) en contact. En effet, les résultats expérimentaux de Kuo et Matijevic (1980) mettent en évidence une modification de la mise en suspension d'hématites  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  fortement chargées à partir d'une surface d'acier quand la température du système augmente de 25 à 80 °C pendant le procédé de désorption. Ces essais ayant été réalisés dans des conditions bien spécifiques, des expériences supplémentaires sont nécessaires afin de comprendre les effets de la température sur le réentraînement.

Nous n'avons pas choisi de traiter ce paramètre dans notre étude. Nous travaillerons dans des conditions de milieu ambiant avec une gamme de variation de température qui reste faible. Toutefois, nous contrôlerons la température afin de pouvoir vérifier un éventuel effet de ce facteur sur le réentraînement.

### 1.3.2. Paramètres des forces aérodynamiques

#### 1.3.2.1. Paramètres liés à l'écoulement d'air

##### ■ Vitesse de l'écoulement

Lorsque l'on analyse les études de la littérature, on s'aperçoit que de nombreux auteurs ont étudié le phénomène de réentraînement pour différentes vitesses d'écoulement (Braaten, 1990 ; Nicholson, 1993).

Comme nous le verrons au § 1.4.4.1, Fromentin (1989) observe dans ses expériences que la décroissance du flux de réentraînement est plus rapide pour des vitesses d'écoulement plus grandes. Ainsi, il met en évidence l'importance de la vitesse dans sa corrélation décrivant le flux réentraîné  $\text{Flux}_R$ .

Assimilant les forces aérodynamiques aux seules forces de traînée, Wu *et al.* (1992) montrent également que pour une même distribution des forces d'adhérence, les forces de traînée augmentent avec la vitesse d'écoulement d'air, ce qui augmente ainsi le réentraînement.

Enfin, si la vitesse est un paramètre influant sur la mise en suspension, il semblerait qu'il existe un seuil de vitesse de réentraînement qui dépend du diamètre des particules et au-dessous duquel aucune mise en suspension n'a lieu.

En effet, inspiré par le travail de Bagnold (1941) concernant les phénomènes d'envol des dunes dans le désert, Phillips (1980) élabore un modèle de réentraînement de particules basé sur le modèle d'équilibre des forces (cf. § 1.4.1.1). Il suggère alors qu'il y a détachement de la particule de la paroi quant le rapport des forces aérodynamiques  $F_{\text{aéro}}$  sur les forces d'adhérence  $F_{\text{adh}}$  dépasse une valeur seuil, cette valeur seuil dépendant de la dimension de la particule. Au-dessous de cette valeur, aucune mise en suspension n'a lieu.

A partir de ses résultats, Phillips représente alors la contrainte de cisaillement critique  $\tau_0$  proportionnelle à cette valeur seuil suivant la relation ( 1.18 ), en fonction du diamètre des particules  $d_p$  (Figure 1.5) :

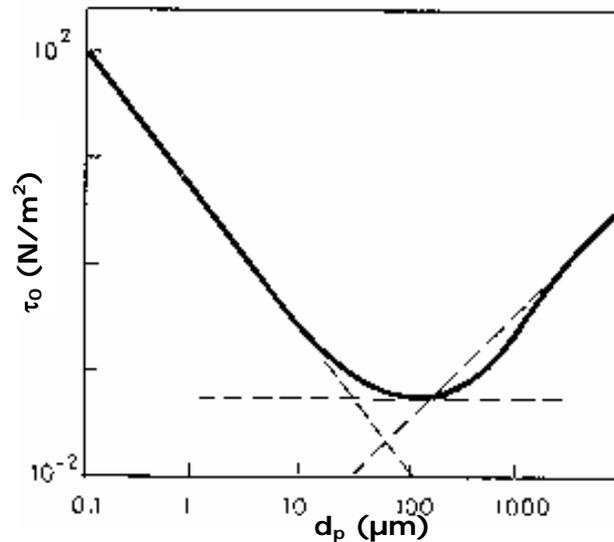


Figure 1.5 - Contrainte de cisaillement de la paroi  $\tau_0$  permettant de réentraîner la particule de diamètre  $d_p$  (Phillips, 1980)

On observe alors qu'il existe une contrainte de cisaillement  $\tau_0$  minimum (et donc une vitesse de frottement critique  $v_*$ ) pour des particules d'environ 100  $\mu\text{m}$  de diamètre. Ce graphe nous indique également qu'à une contrainte  $\tau_0$  donnée, c'est toute une classe granulométrique de particules qui est susceptible de se mettre en suspension.

Le facteur vitesse de l'air est donc un facteur très important, que nous prendrons évidemment en compte dans notre étude expérimentale.

#### ■ *Turbulence : Echelle et intensité*

La turbulence dénote un mouvement dans lequel une fluctuation irrégulière (mélange ou mouvement de remous) est superposée au courant principal. Dans la sous-couche visqueuse d'une couche limite turbulente, des structures cohérentes turbulentes ont été observées (Corino et Brodkey, 1969 ; Hinze, 1975). Illustrées sur la Figure 1.6, ces structures dénommées en anglais « bursts » ou bouffées turbulentes sont semblables à de microscopiques tornades qui créent ainsi des forces de portance instantanées qui peuvent être suffisantes pour détacher les particules des surfaces. Ces « bursts » seraient responsables en partie de la mise en suspension des particules, comme nous l'avons déjà signalé.

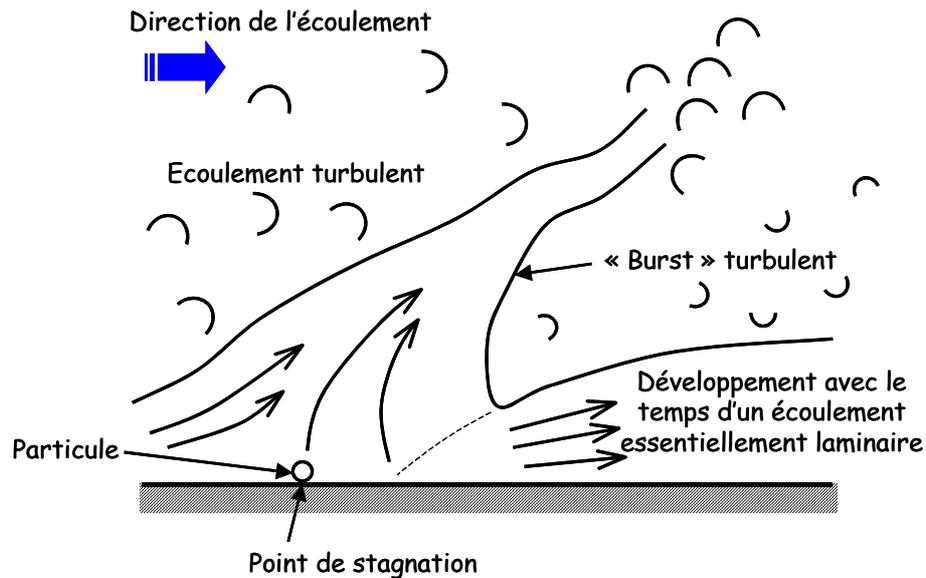


Figure 1.6 - Représentation schématique d'une structure cohérente ou « burst » à proximité d'une paroi (d'après Cleaver et Yates, 1973)

Dans leur modèle d'équilibre des forces, Cleaver et Yates (1973) prennent en compte les distributions temporelles et spatiales des « bursts ». Cette approche leur permet d'introduire l'évolution temporelle de la mise en suspension des particules dans leur modèle théorique.

Généralement, on définit la turbulence par deux grandeurs mesurables qui sont :

- L'*échelle* : elle détermine classiquement une dimension caractéristique des tourbillons dans l'écoulement,
- L'*intensité* : elle caractérise la composante fluctuante de la vitesse instantanée par rapport à la vitesse moyenne.

Dans un écoulement turbulent, la vitesse en un point varie de façon aléatoire en direction et en amplitude. L'écoulement contenant un grand nombre de tourbillons de tailles variées, chaque variable peut donc être représentée par la somme d'une valeur moyenne et d'une fluctuation, comme dans le cas des forces aérodynamiques (Ryhming, 1991). On définit alors la vitesse instantanée  $V(t)$  en un point du fluide selon l'équation :

$$V(t) = V + v(t) \quad (1.42)$$

- où  $V$  : valeur moyenne du module du vecteur vitesse (indépendante du temps),  
 $v(t)$  : composante fluctuante de la vitesse instantanée.

Autrement dit, l'intensité de turbulence  $I$  est définie par le rapport des fluctuations moyennes de la vitesse instantanée à la vitesse moyenne :

$$I = \frac{v(t)}{V} \quad (1.43)$$

Cette grandeur généralement en pourcentage exprime donc l'importance relative des vitesses fluctuantes par rapport à la vitesse moyenne.

La turbulence ne doit pas être ignorée dans le phénomène de mise en suspension, puisqu'elle peut influencer le réentraînement des particules. Dans notre situation, nous adopterons une technique de mesure de vitesse qui permettra de travailler à haute fréquence. Ainsi, nous caractériserons la turbulence par son intensité et effectuerons les mesures en nous plaçant à une fréquence d'acquisition supérieure à la fréquence d'apparition des « bursts ».

#### ■ *Accélération*

L'accélération au démarrage de l'écoulement d'air correspond à la phase transitoire d'établissement de la vitesse.

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'effet de l'accélération sur le réentraînement. Matsusaka *et al.* (1994 ; 1996) prennent en compte ce paramètre dans leur développement théorique pour un dépôt multicouches. S'inspirant alors des travaux de Reed et Hall (1989) et de Wen *et al.* (1989), ils décrivent le flux de réentraînement par la somme de deux flux : l'un correspond à un réentraînement à court terme qui proviendrait de faibles fluctuations dans l'écoulement de cisaillement, et l'autre à un réentraînement à long terme. Ce dernier est attribué à une fluctuation plus importante causée par les « bursts » turbulents. A partir de cette définition du flux, les auteurs montrent que le flux instantané de mise en suspension est approximativement proportionnel à l'accélération. De plus, ils mettent en évidence que, pour un écoulement d'air stable, la décroissance du flux instantané dans le temps est également proportionnelle à l'accélération initiale. Autrement dit, plus l'accélération est grande, plus la décroissance du flux est forte. Les auteurs vérifient expérimentalement ces résultats sur des particules de diamètre  $0,4 \mu\text{m}$  pour des accélérations comprises entre  $0,01 \text{ m/s}^2$  et  $0,6 \text{ m/s}^2$ . Dans leur étude expérimentale qui simule l'émission de particules déposées sur des routes, Tsai et Chiou (1999) observent également une augmentation du flux de mise en suspension lorsque l'accélération du vent augmente entre  $0,1$  et  $1,5 \text{ m/s}^2$ .

L'interprétation de ces résultats en terme de fraction réentraînée n'est pas triviale. Toutefois, on peut dire que l'accélération a un effet positif sur le  $K_R$  dès lors que la phase transitoire (accélération) n'est pas négligeable par rapport à la durée d'exposition du dépôt (réentraînement à court terme). Pour des laps de temps très court, la fraction réentraînée augmenterait donc avec l'accélération. Par contre, pour des durées d'exposition plus longue, cette tendance semble s'atténuer. C'est d'ailleurs ce qu'observe Fromentin (1989) dans ces travaux expérimentaux. Pour des mesures réalisées à des durées d'exposition égales ou supérieures à 2000 s (soit  $\Delta t > 30$  min), l'auteur ne note aucune influence significative de l'accélération sur la mise en suspension entre 0,7 et 5 m/s<sup>2</sup>.

L'effet de l'accélération sur le réentraînement paraît donc complexe. Il semble, cependant, que l'accélération ait une influence sur la fraction réentraînée, tout au moins pour des durées d'exposition relativement courtes. Ces tendances restent toutefois à confirmer. Nous retiendrons donc ce paramètre dans notre étude.

### 1.3.3. Conclusion

Qu'il s'agisse des forces ou bien des paramètres les influant, on s'aperçoit ici qu'un grand nombre de facteurs peuvent avoir un effet plus ou moins important sur l'adhérence et le réentraînement des particules. Or ces paramètres doivent être pris en compte si l'on veut déterminer la valeur d'adhérence existante entre la particule et la surface. Chercher donc, à quantifier de tels mécanismes dans le cas de dépôt multicouches ou d'amas de poudre semble compliqué, voire impossible, si l'on ne connaît pas les effets relatifs de ces facteurs sur la mise en suspension.

Devant la vingtaine de paramètres que nous avons listée ici et d'après les différentes études qui ont été conduites, on conçoit que certains paramètres puissent avoir un rôle essentiel sur le phénomène de réentraînement notamment la granulométrie de la poudre ou bien la vitesse de l'écoulement... Mais dans l'état des connaissances actuelles, il paraît difficile d'évaluer et de classer leurs effets, vu les conditions expérimentales multiples de la littérature qui empêchent bien souvent les analyses et les comparaisons.

Il paraît donc important d'établir une méthodologie expérimentale permettant d'obtenir un classement de ces paramètres. Ceci permettrait de clarifier l'un des points suscitant des questions et des désaccords dans le milieu scientifique de la mise en suspension, à savoir la prépondérance à accorder aux différents facteurs dans les modèles de réentraînement. Ces derniers, divers et variés, ont été élaborés sur la base

de principes physiques. Nous nous proposons de les présenter dans le paragraphe suivant, ainsi que les différentes études expérimentales réalisées afin de les valider.

#### **1.4. Modèles de réentraînement et études expérimentales**

Le réentraînement par écoulement d'air de particules déposées sur une surface a suscité un vif intérêt, notamment ces dix dernières années. En effet, dans la littérature scientifique, des auteurs (Ziskind *et al.*, 1995 ; Witschger, 1999) ont recensé un grand nombre d'études théoriques et expérimentales sur les différents aspects de ce sujet. Ces études diverses, interviennent dans différents domaines comme la sûreté nucléaire, la pollution de l'air, le transport éolien des sédiments, ou encore la contamination de surface.

Comme nous l'avons dit précédemment, à un niveau local, le réentraînement a lieu en deux étapes :

- la première concerne le détachement de la particule,
- la seconde concerne son envol dans l'écoulement libre.

Ce dernier point a fait l'objet récemment d'un travail théorique sur la trajectoire d'une particule en proche paroi (Ziskind *et al.*, 1998). A partir des équations qui régissent la dynamique d'une particule dans l'écoulement de cisaillement au voisinage de la surface, les auteurs ont analysé la stabilité du mouvement de celle-ci en fonction du taux de cisaillement, de la taille de la particule, de la position (hauteur) par rapport à la paroi et de la vitesse relative de cette particule. Les résultats des calculs montrent que le mouvement instable d'une particule inertielle (c'est à dire le fait qu'elle puisse soit s'éloigner, soit se rapprocher de la paroi) dépend de la distance de la paroi et de sa vitesse. Il est intéressant de noter qu'à l'heure actuelle, ce travail ne fait l'objet d'aucune validation expérimentale.

Quant au détachement de la particule par écoulement d'air, il existe dans la littérature des synthèses récentes à ce sujet (Bultynck, 1998). L'ensemble de ces travaux théoriques concerne exclusivement ce qui se passe à proximité immédiate de la paroi où la particule est déposée, c'est à dire dans la couche limite.

De nombreux modèles ont alors été élaborés afin de mieux appréhender les phénomènes physiques de mise en suspension. Cependant, les premières approches de la mise en suspension (Cleaver et Yates, 1973 ; Reeks *et al.*, 1988 ; Wen et Kasper, 1989) ont été élaborées à partir d'hypothèses souvent simplifiées : une seule particule, une particule sphérique, des particules monodispersées, un dépôt monocouche ou une surface lisse...

Ainsi, lorsque l'on augmente le nombre de couches de particules déposées sur une surface pour obtenir un dépôt multicouches, ou bien que l'on est en présence de particules polydispersées, ces modèles deviennent difficilement applicables. Paw U (1983), Fromentin (1989), plus récemment Biasi *et al.* (2001) et quelques autres auteurs ont alors pris en compte ces conditions supplémentaires dans leur modèle.

Afin donc d'améliorer la compréhension du phénomène physique de réentraînement, plusieurs voies de mécanisme de détachement de la particule de la surface ont été envisagées, reprises et améliorées pour élaborer ces modèles : le détachement par aspiration de la particule dans un tourbillon, le glissement, le roulement ou bien encore l'oscillation de la particule puis son basculement avant d'être réentraînée. Ces différentes études théoriques font l'objet de ce chapitre.

Nous regrouperons sous le terme de *modèles microphysiques* les modèles théoriques décrivant les phénomènes physiques de mise en suspension dans les conditions simples d'une particule, voire d'un dépôt monocouche et éparses de particules déposées sur une surface.

Quant aux approches plus récentes prenant en compte un ensemble de particules déposées en couches, elles porteront le nom de *modèles macrophysiques*.

#### **1.4.1. Modèles microphysiques – Approche théorique sur une particule isolée**

En recherche de base, le besoin de connaissance concerne principalement l'étude du phénomène physique de mise en suspension à proximité immédiate de la surface. En effet, si la connaissance théorique est relativement claire pour le cas d'une particule sphérique isolée sur une surface plane dans un écoulement turbulent, elle nécessite toutefois d'être encore validée par des données expérimentales. Au niveau du détachement des particules, des modèles théoriques ont été développés et améliorés ces dernières années. Ils traitent essentiellement le cas d'une seule particule et sont en général de deux types :

- Le premier est basé sur le concept des « bursts » turbulents et inclut, pour qu'il y ait réentraînement, un équilibre entre les forces d'adhérence et les forces aérodynamiques.

- La seconde approche est basée sur un transfert d'énergie turbulente à la particule et un bilan d'énergie potentielle.

Les particules sur la surface sont sujettes aux contraintes de la sous-couche visqueuse de la couche limite turbulente. Ainsi, les premières études théoriques traitant de la mise en suspension (Corn et Stein, 1965 ; Punjraht et Heldman, 1972) sont basées sur un équilibre des forces statiques agissant sur la particule : la particule est réentraînée si les forces répulsives (assimilées aux forces aérodynamiques) sont supérieures aux forces adhésives qui lui sont appliquées. Ces modèles mettent en évidence que, pour une vitesse d'entraînement donnée, une classe granulométrique de particules est mise en suspension lorsque le rapport des forces dépasse une valeur critique correspondant à un seuil de vitesse de frottement de l'air (Phillips, 1980 - cf. § 1.3.2.1).

Cependant, Corino et Brodley (1969) suivis de Hinze (1975) visualisent dans l'écoulement la présence de bouffées turbulentes dans la région proche de la paroi. L'observation de ces « bursts » permet alors de décrire le mouvement aléatoire du fluide à proximité de la paroi : ces structures cohérentes turbulentes semblables à des mini-tornades pénètrent localement et périodiquement la couche limite créant ainsi des forces de portances instantanées suffisantes pour détacher la particule de la surface (Braaten *et al.*, 1988). Ainsi la sous-couche laminaire est tout sauf stable.

#### **1.4.1.1. Modèles quasi-statiques : Bilan de forces**

A partir de ces nouvelles connaissances, Cleaver et Yates (1973) introduisent la notion de « burst » dans leur modèle d'équilibre des forces. Ils prennent en compte les distributions spatiales et temporelles de ces structures turbulentes et proposent un modèle de mise en suspension qui intègre le caractère statistique de l'écoulement proche de la paroi. Ainsi, la force de portance totale (portance et traînée) n'est plus constante dans le temps mais intermittente : elle fluctue d'une façon aléatoire autour d'une valeur moyenne et peut donc atteindre à certains moments des valeurs élevées.

Zimon (1982), quant à lui, introduit une nouvelle notion statistique relative aux forces d'adhésion : pour un ensemble de particules de même diamètre, déposées sur une surface, les forces d'adhésion suivent une loi de distribution logarithmique. Ceci a été observé expérimentalement par Reed (1989). Cette distribution s'explique principalement par la nature aléatoire de la rugosité d'une surface (forme et taille des aspérités en contact avec les particules déposées). Par la suite, différents auteurs ont intégré cette notion de distribution de force d'adhésion dans leur modèle (Reeks *et al.*, 1988 ; Wen et Kasper, 1989).

Estimant cependant, que l'information sur la forme de la distribution des forces d'adhésion n'est pas disponible, Wen et Kasper (1989) élaborent un modèle cinétique de réentraînement suivant une approche analogue à la désorption moléculaire à partir d'une surface hétérogène. Ils utilisent une constante de taux de premier ordre de la forme

$a(F) = Ae^{-F}$  où  $F$  est une variable sans dimension correspondant au rapport des forces d'adhérence et des forces hydrodynamiques. Afin d'obtenir une solution analytique de la concentration instantanée des particules réentraînées, les auteurs choisissent une distribution initiale constante des forces d'adhésion sur un domaine moins étendu. Ils observent alors une déviation systématique du taux de mise en suspension de la loi en  $1/\Delta t$  à la fin de leurs mesures, qu'ils vérifient expérimentalement (Reeks *et al.*, 1988 ; cf. § 1.4.1.2).

Afin d'améliorer cette approche, Braaten *et al.* (1990) développent un modèle de réentraînement basé sur une simulation de Monte-Carlo qui est capable de reproduire le caractère instable du réentraînement de particules. Ce modèle suppose donc que les forces aérodynamiques décrites suivant une distribution probabiliste, sont appliquées sur la surface dans des « bursts » discrets. La mise en suspension a lieu quand ces forces dépassent les forces adhésives locales décrites selon une distribution lognormale. Ce modèle a donc l'avantage de simuler la mise en suspension en utilisant le concept des bursts et l'approche d'équilibre des forces.

#### **1.4.1.2. Modèles dynamiques : Bilan d'énergie**

Une approche différente du mécanisme de mise en suspension a été développée par Reeks, Reed et Hall (1988). Dans leur modèle, dénommé RRH, il n'y a plus compétition entre les forces aérodynamiques et les forces adhésives pour réentraîner la particule mais accumulation d'énergie par celle-ci. Dans ce cas, la particule est détachée de la surface lorsqu'elle a accumulé suffisamment d'énergie vibrationnelle (par transfert d'énergie turbulente provenant de l'écoulement) pour franchir la barrière de potentiel formée des forces d'adhérence (forces de Van der Waals) et des forces répulsives (forces élastiques). La force de portance aérodynamique est décomposée en une composante moyenne traduisant la forme et la hauteur du puits de potentiel et en une composante fluctuante qui permet à la particule d'osciller dans ce puits.

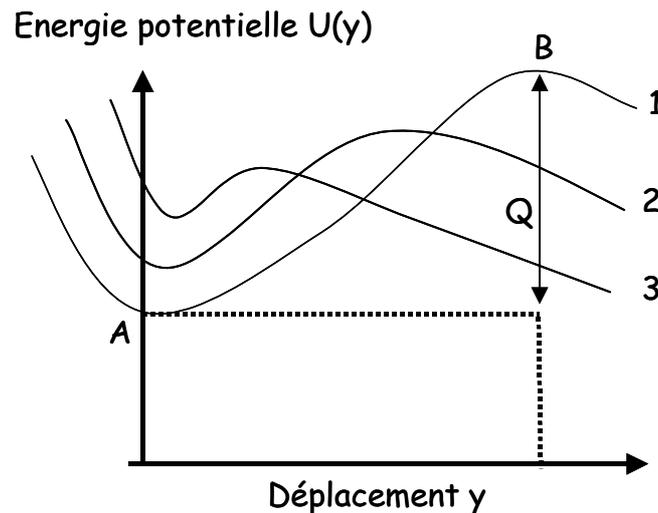


Figure 1.7 – Description du puits de potentiel adhésif pour des forces moyennes de portance croissantes (courbes 1 à 3)

La Figure 1.7 représente une famille de tels potentiels pour différentes forces moyennes de portance croissantes (de 1 à 3). Toutes les courbes correspondent à la forme d'un puits classique. Chacune possède deux points remarquables :

- le point A qui correspond à une position d'équilibre stable où la force adhésive est en équilibre avec la force élastique répulsive et la force de portance moyenne,
- le point B qui correspond à une position d'équilibre instable où la force adhésive est en équilibre avec la force moyenne de portance.

Le fait d'augmenter la force moyenne de portance a pour conséquence de réduire à la fois la largeur du puits de potentiel et la hauteur  $Q$  du puits de potentiel de B par rapport à A. Une particule quittera alors le puits de potentiel (i.e. mise en suspension) quand elle aura reçu suffisamment d'énergie pour s'échapper de la barrière de potentiel B.

Les auteurs déterminent alors la probabilité par unité de temps  $p$  pour qu'une particule soit mise en suspension par rapport à la surface :

$$p = \omega_0 \exp\left(-\frac{Q}{2\overline{PE}}\right) \quad (1.44)$$

avec  $\omega_0$  : fréquence typique de vibration,  
 $Q$  : hauteur de la barrière de potentiel de la surface adhésive,  
 $\overline{PE}$  : énergie potentielle moyenne d'une particule dans le puits.

En prenant en compte une distribution logarithmique des forces d'adhérence, les auteurs décrivent l'évolution du taux de mise en suspension. Ils observent que ce taux peut être séparé en deux régions :

- Une mise en suspension initiale à court terme (inférieure à 1 seconde) pendant lequel le taux est très élevé.
- Une suspension à long terme (durée de l'ordre de  $10^5$  s) où le taux varie en  $1/\Delta t$ .

Cette mise en suspension à long terme avait été attribuée auparavant à un mouvement aléatoire du fluide près de la surface (Corn et Stein, 1965).

Pour expliquer les déviations de la loi en  $1/\Delta t$ , observées par Wen et Kasper (1989) et également par Erhart (1986), Hall (1989) effectue des calculs avec le modèle théorique RRH et montre que le taux de mise en suspension est fortement dépendant de la stabilité de l'écoulement : les calculs effectués pour une particule de  $20 \mu\text{m}$  dans un écoulement ayant une vitesse de frottement  $v_*$  de  $6 \text{ m/s}$  montrent qu'un changement de 1% de la vitesse d'écoulement conduit à une variation du taux de mise en suspension d'un facteur 6.

En 1995, Lazaridis et Drossinos étendent ce modèle en prenant en compte la notion de rugosité de surface : la distribution des forces adhésives s'expliquerait par la nature aléatoire de celle-ci. Plus tard, Lazaridis *et al.* (1998) prennent en considération la rigidité du système dans lequel la particule est non déformable.

Pour expliquer le lien entre les deux types de modèles essentiellement statistiques présentés précédemment, Reeks et Hall (2001) repris ensuite par Biasi *et al.* (2001), associent les modèles basés sur un bilan d'énergie à des modèles dynamiques et les modèles basés sur un équilibre des forces, à des modèles quasi-statiques. En effet, les auteurs considèrent que ces derniers correspondent au cas particulier du modèle dynamique, quand il n'y a aucune accumulation d'énergie à la fréquence de résonance naturelle de vibration particule-surface. Ainsi, lorsque le transfert d'énergie à la particule est nul, la formule du taux constant de mise en suspension est réduite à l'expression associée à l'équilibre des forces.

### **1.4.1.3. Action des moments/couples de forces**

Plus récemment, l'action des moments de forces a été prise en compte dans les développements théoriques. En 1990, Wang examine trois modes possibles de déplacement de la particule lors de sa mise en suspension à partir d'une surface : se soulever (ou se détacher), glisser ou rouler. En utilisant l'équilibre des forces et des moments, il démontre alors qu'il serait plus facile pour la particule de glisser et de rouler que de se soulever pour être directement réentraînée.

Basé sur le même concept que le bilan des forces, Tsai *et al.* (1990, 1991b) proposent un modèle de moments critiques permettant de déterminer les conditions limites de détachement de particules submicroniques sphériques d'une surface lisse de type disque dur d'ordinateur. Ce modèle est basé sur le travail théorique de Tsai *et al.* (1991a) dans lequel l'effet de la déformation plastique sur l'adhésion des particules, a été étudié. En prenant en compte des facteurs supplémentaires tels que la rugosité, d'autres auteurs développent des modèles fondés sur cet équilibre des moments (Adhiwidjaja *et al.*, 2000).

Se référant à l'étude de Wang (1990), Ziskind *et al.* (1995) comparent la valeur des forces d'adhérence et des forces de portance moyennes et fluctuantes dans des études expérimentales de la littérature. Ils constatent que la force de portance n'est pas suffisante pour créer la mise en suspension observée, que ce soit par transfert d'énergie ou simple équilibre des forces. Ils suggèrent alors que la prise en compte du roulement de la particule dans les modèles serait un mécanisme probablement plus réaliste, par lequel les particules pourraient être détachées de la surface.

Selon ce principe, Reeks et Hall (2001) font alors évoluer leur modèle RRH en intégrant le basculement – roulement (Rock'n Roll) de la particule suivant la Figure 1.8 :

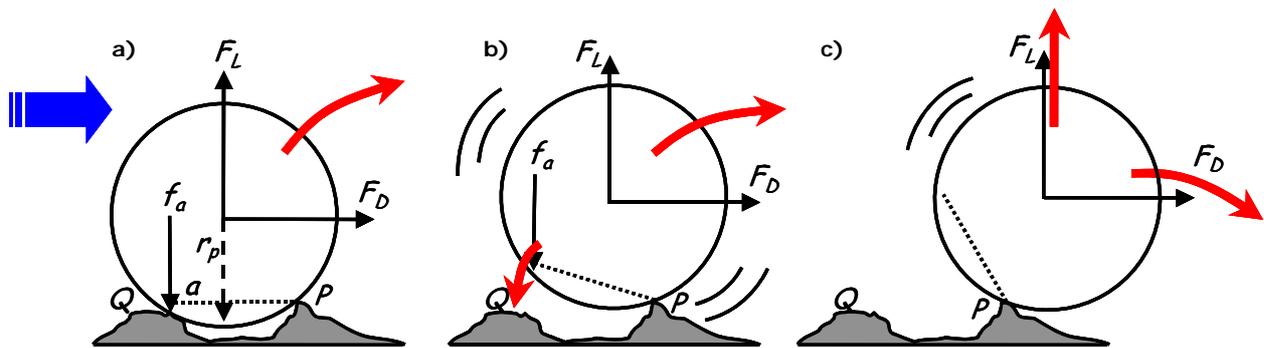


Figure 1.8 – Description du mouvement de basculement / roulement d'une particule sphérique isolée en contact avec deux points d'aspérités P et Q de la surface dans le modèle Rock'n Roll de Reeks et Hall (2001) :

- a) La particule repose sur les deux aspérités de la surface par l'action des forces adhésives.
- b) Oscillations de la particule autour du point P dues au couple traînée - portance  $\Gamma$  qui tend à l'entraîner dans l'écoulement d'air, contrecarré par le couple de forces adhésives qui tend à la maintenir sur la surface.
- c) La particule a accumulé suffisamment d'énergie rotationnelle pour casser le contact avec le point d'aspérité Q. Elle peut alors se soulever (si  $F_L > F_D$  – peu plausible) ou bien se mettre à rouler (si  $F_D > F_L$  – fort probable) après avoir cassé son contact avec P.

Afin de simplifier la compréhension du phénomène, la distribution des aspérités de la surface rugueuse en contact avec la particule est réduite à un modèle à deux dimensions avec deux points d'aspérités P et Q de la surface.

La particule repose sur la surface par contact avec les aspérités P et Q, et est maintenue sur celles-ci grâce aux forces adhésives. Exposée à un écoulement turbulent dans la couche limite, elle est alors soumise à un couple de forces aérodynamiques  $\Gamma$  (Figure 1.8 - a)). Ce couple traînée-portance décrit suivant l'expression ( 1.39 ) n'est donc pas normal à la surface comme l'était la force de portance (seule force aérodynamique) utilisée dans le modèle RRH. Soumise à l'action de ce couple de forces, la particule peut alors se détacher du point d'aspérité Q et ne reposer que sur le point P. Mais tant que le couple de forces aérodynamiques est inférieur au couple des forces adhésives, la particule peut retomber sur le point d'aspérité Q due à l'action des forces adhésives : la particule bascule donc suivant un mouvement de va-et-vient, entre la position d'équilibre de départ (où elle repose sur les points P et Q) et une position instable où elle ne repose que sur l'aspérité P (Figure 1.8 – b)). Ce mouvement d'oscillations de la particule autour des aspérités de contact s'effectue jusqu'à ce que la particule ait accumulé suffisamment d'énergie rotationnelle pour casser le contact avec l'aspérité Q (Figure 1.8 - c)). Si tel est le cas, elle est alors libre de rouler par l'action de la force de traînée  $F_D$ . Elle peut également se soulever de la surface si la force de portance  $F_L$  se suffit à elle-même pour casser le point de contact P. C'est à partir de l'un de ces deux mécanismes (rotation ou soulèvement) que la particule est alors considérée avoir été mise en suspension.

Pour décrire mathématiquement ce modèle, dénommé Rock'n Roll, les auteurs supposent une distribution gaussienne des forces aérodynamiques  $F_R$  et une distribution logarithmique des forces adhésives normalisées  $\varphi(f'_a)$ . Cette dernière s'écrit :

$$\varphi(f'_a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left( \frac{1}{f'_a \ln \sigma'_a} \right) \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{\ln(f'_a / \bar{f}'_a)}{\ln \sigma'_a} \right]^2 \right\} \quad (1.45)$$

avec  $f'_a$  : force adhésive normalisée ( $\frac{f_a}{F_A}$ , cf. relation (1.10)),

$\bar{f}'_a$  : moyenne géométrique des forces adhésives normalisées

$\sigma'_a$  : écart type géométrique de la distribution des forces adhésives,

Les auteurs proposent alors une expression du taux constant de mise en suspension pour des particules sujettes à la force adhésive  $f_a$ ,  $p(f_a)$  :

$$p(f_a) = n_\theta \exp \left[ \frac{-(f_a - \bar{F}_R)^2}{2\sigma_R^2} \right] / \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left[ \frac{f_a - \bar{F}_R}{\sqrt{2}\sigma_R} \right] \right\}, \quad (1.46)$$

avec  $n_\theta = 0,00658 \left( \frac{v_*^2}{v} \right)$  : fréquence caractéristique des forces aérodynamiques,

$f_a = f'_a \cdot F_A$  : force adhésive,

$\bar{F}_R$  : moyenne des forces aérodynamiques,

$\sigma_R$  : écart type de la distribution des forces aérodynamiques.

Reeks et Hall (2001) expriment également la fraction  $K_R$  de particules réentraînées de la surface selon l'expression :

$$K_R = 1 - \int_0^\infty \varphi(f'_a) \cdot \exp[-p(f_a) \cdot \Delta t] df'_a. \quad (1.47)$$

Dans ce modèle, les auteurs mettent en évidence que la force de traînée, par sa forte contribution, joue un rôle plus important sur le réentraînement que la force de portance. En effet, admettant que la distance entre deux aspérités de surface est très petite devant le rayon de la particule ( $a \ll r_p$ ), l'expression du moment aérodynamique  $\Gamma$  décrit à la relation (1.39), met nettement en avant l'importance prépondérante de la force de traînée sur le phénomène de mise en suspension. De plus, des mesures d'adhérence et de réentraînement reportées par les auteurs, indiquent que la contribution d'un

réentraînement de la particule par transfert d'énergie turbulente est très faible. Les oscillations de la particule autour des points d'aspérité de la surface proviennent donc de la présence d'un équilibre quasi-statique entre le couple de forces aérodynamiques et le couple de forces adhésives. Le modèle Rock'n Roll est donc un modèle quasi-statique.

L'approche Rock'n Roll est en bon accord avec le modèle cinétique de Vainshtein *et al.* (1997) qui considère une oscillation de la particule parallèle à la surface (c'est à dire suivant la seule force de traînée) et en contact avec une seule aspérité de la surface. Cette dernière approche correspond au cas du détachement d'une particule sur une surface parfaitement lisse. Suite au modèle de Vainshtein *et al.* et afin de mieux comprendre le mouvement d'oscillations des particules, Ziskind *et al.* (2000) élaborent des modèles linéaires et non linéaires décrivant chacun le cas spécifique du réentraînement de particules dures ou molles, sur des surfaces rugueuses ou lisses. Cependant, leur étude ne permet pas d'établir un modèle global de réentraînement regroupant l'ensemble de ces configurations. Par contre, le modèle Rock'n roll qui met en jeu plusieurs aspérités de contact, est valable pour des surfaces de contact rugueuses mais également pour le cas de surfaces lisses.

Ces quelques modèles très récents qui utilisent l'action des moments plutôt que celle des forces, permettent donc d'améliorer la compréhension du phénomène de réentraînement de particules, ceci qu'il s'agisse d'un processus dynamique (avec accumulation d'énergie) ou bien d'un processus quasi-statique.

La plupart des surfaces dites polies sont en fait rugueuses à l'échelle microscopique. De tous les modèles décrits ici, Biasi *et al.* (2001) estiment que le modèle Rock'n roll semble donc le modèle microscopique le plus approprié pour une comparaison avec les mesures expérimentales de mise en suspension effectuées dans la littérature.

#### **1.4.2. Modèles macrophysiques - Approche théorique sur un ensemble de particules**

Lorsqu'on cherche à étudier les cas plus complexes, mais plus proches de notre situation, de particules déposées en couches superposées, ou d'un dépôt de poudre, on s'aperçoit alors que les études théoriques sont, à ce jour, plus rares.

Il semble que Paw U (1983) soit le premier auteur à avoir fait un traitement mathématique de la mise en suspension d'un dépôt multicouches. Il postule que, pour une vitesse d'air constante, le flux de mise en suspension doit être constant dans le temps puisque le nombre de particules susceptibles de se détacher de la surface est

constant du fait du réapprovisionnement par les couches inférieures. Ce postulat est désormais reconnu comme inexact et a été démontré théoriquement et expérimentalement par Fromentin (1989).

Cherchant à simuler le procédé de mise en suspension de particules sous des conditions représentatives d'un accident de réacteur, Fromentin (1989) a effectué un travail théorique et expérimental assez complet sur la mise en suspension de particules en dépôt multicouches provenant d'un écoulement turbulent. Dans son modèle théorique décrit à la Figure 1.9, Fromentin suppose que le dépôt est constitué d'un ensemble de  $m$  couches superposées contenant  $n$  cubes.

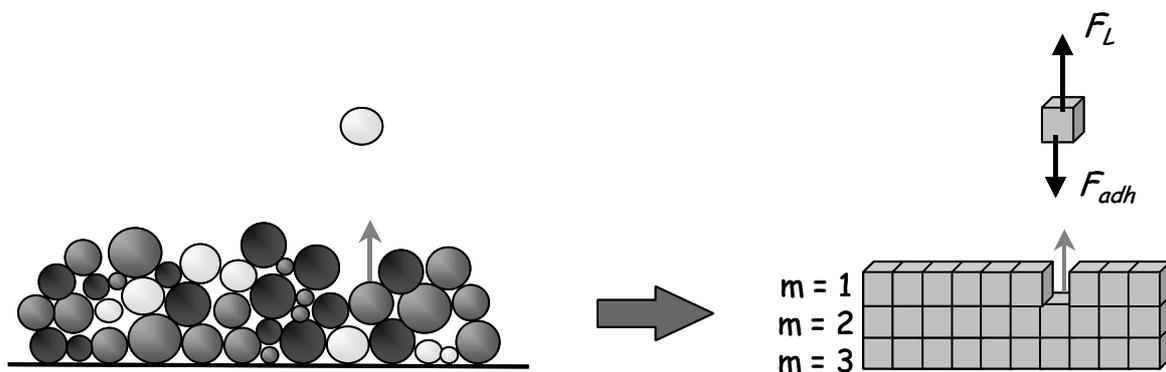


Figure 1.9 – Traitement théorique du réentraînement d'un dépôt multicouches homogène d'après Fromentin (1989)

Dans un premier temps, l'auteur applique de façon aléatoire à chacun des cubes de la surface (i. e. la couche  $m = 1$ ) une force d'adhérence et une force aérodynamique de portance à partir des fonctions de densité de probabilité des forces. Si la force d'adhérence est plus grande que la force de portance, le cube reste dans sa position. Par contre, si la force d'adhérence est inférieure ou égale à la force aérodynamique, le cube est détaché et est remplacé par un cube de la couche inférieure (i. e. la couche  $m = 2$ ), cube qui a une autre force d'adhérence. Pour la seconde itération, la nouvelle « couche » va être formée de  $n - n'$  cubes,  $n'$  correspondant au nombre de cubes réentraînés pendant la première itération. Dans cette optique, la proportion de cubes qui adhèrent fortement, augmente avec les itérations. Si l'on suppose que chaque cube a la même masse, le flux de mise en suspension est proportionnel au nombre de cubes  $n'$  réentraînés par itération : il diminue donc au cours du temps. La durée d'une itération a été choisie de telle façon qu'elle soit proportionnelle au temps écoulé entre deux « bursts » successifs. Elle est donc inversement proportionnelle à la fréquence d'apparition d'un « burst ».

Ce modèle stochastique, dont le calcul est basé sur un algorithme de Monte Carlo, nécessite l'entrée de données empiriques notamment dans les fonctions de distributions

statistiques des forces d'adhérence (loi lognormale) et de portance (loi gaussienne). Il permet de décrire correctement la décroissance du flux de mise en suspension d'un dépôt multicouche pour des vitesses supérieures à 9 m/s. Il s'applique également à un dépôt monocouche : dans ce cas, la simulation obtenue montre que la décroissance de mise en suspension est plus rapide, car lorsqu'une particule se détache, cette dernière n'est pas remplacée.

Plus tard, d'autres auteurs introduisent dans leur modèle basé sur ce principe de renouvellement de la couche en surface par la couche inférieure, des paramètres supplémentaires à prendre en compte dans le réentraînement tels que l'accélération de l'air (Matsusaka *et al.*, 1994 ; Matsusaka et Masuda, 1996) ou bien encore la porosité du lit de particules (Friess et Yadigaroglu, 1998). Ces études théoriques ont été présentées dans le § 1.3 lors de la description de l'influence de ces deux paramètres sur le réentraînement.

#### **1.4.3. Validité des modèles de mise en suspension et études expérimentales**

Dans la littérature scientifique, on trouve un grand nombre d'études expérimentales sur le thème général de la mise en suspension de particules par écoulement d'air. La plupart d'entre elles ont pour but essentiel de vérifier et de valider par l'expérience les différentes théories existantes dans des conditions bien spécifiques (Wen et Kasper, 1989 ; Tsai *et al.*, 1991b ; Matsusaka et Masuda, 1996). D'autres travaux ont été réalisés afin mieux comprendre le phénomène de réentraînement, notamment par l'étude de différents paramètres comme nous l'avons vu au § 1.3.

Devant le grand nombre de travaux existants, il nous est paru indispensable de dresser une liste récapitulative des études expérimentales de mise en suspension recensées dans la littérature (Tableau 1.1). Y sont décrits succinctement les objectifs de ces travaux ainsi que leurs domaines d'étude.

Tableau 1.1 – Liste des différentes études expérimentales de mise en suspension recensées dans la littérature

Auteur	Année	Installation / Technique de mesure	Surface	Dépôt de Particules	$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_g$	Paramètres de l'écoulement	Valeur mesurée	Objectif de l'étude expérimentale et <i>observations</i>
Wright <i>et al.</i>	1984	Tubes circulaires 2,33×7,62 cm	Acier poli	Multicouches de Mg, Zn, TiO <sub>2</sub> , FeO <sub>2</sub>	0,1 à 1	---	Jusqu'à 120 m/s		Etude de l'influence de paramètres sur le réentraînement dans des dépôts multicouches
Braaten <i>et al.</i>	1988	Tunnel à vent 1×1×2,5 m / Système optique	Verre	Monocouche de Lycopodium	28	1,07	V (m/s) = 6,0 ; 7,5 ; 9,0 I < 1 %	Concentration des particules MeS <sup>+</sup> en fonction du temps	Identification des structures cohérentes. 2 événements de MeS <sup>+</sup> : - Ejection-balayage - Macro-balayage
Wen et Kasper	1989	Tubes 1,25 à 25 mm / CNC et LPC	Acier : poli, électropoli, rugueux	Monocouche de Poussière Inconnu Latex	>0,01 >0,2 0,4 à 1	Polyd.	Qv (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /s)= 1,25 1,67 7,5	Concentration des particules MeS <sup>+</sup> en fonction du temps	Validation du modèle cinétique de désorption moléculaire (Wen et Kasper, 1989) à long terme (entre 10 h et 100 h) <i>Observation d'une déviation systématique de la loi en 1/Δt</i>
Wen <i>et al.</i>	1989	Tube 5 mm/ CNC et LPC	Acier pur	Monocouche de Latex	> 0,01	Polyd.	Re = 12400 155000	Concentration des particules MeS <sup>+</sup> en fonction du temps	Validation du modèle de Wen et Kasper (1989) à court terme (< 1 min)
Fromentin	1989	Tunnel PARESS 25×25×350 cm / Pesée gravimétrique	Coupon en acier inoxydable 10×30 cm <sup>2</sup>	Multicouches de SnO <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Sn Si	0,4 2 4 4,3	2,8 2 2	V (m/s) = 5 à 25	Flux de MeS <sup>+</sup> en fonction du temps	Etude de la MeS <sup>+</sup> d'un dépôt multicouches - Elaboration d'une corrélation semi-empirique <i>Observation d'une décroissance du flux de MeS<sup>+</sup> en fonction du temps</i>
Braaten <i>et al.</i>	1990	Tunnel à vent 1×1×2,5 m / Système optique	Verre (plaque microscopique)	Monocouche éparses de Lycopodium	28	1,07	V (m/s) = 6,0 ; 7,5 ; 9,0 I < 1 %	Fraction MeS <sup>+</sup> en fonction du temps	Mesure des forces adhésives - Validation du modèle de MeS basé sur un algorithme de Monté-Carlo (Braaten <i>et al.</i> , 1990)

\* MeS, abréviation pour Mise en Suspension

Auteur	Année	Installation / Technique de mesure	Surface	Dépôt de Particules	$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_g$	Paramètres de l'écoulement	Valeur mesurée	Objectif de l'étude expérimentale et <i>observations</i>
Tsai <i>et al.</i>	1991 (b)	Disque dur d'ordinateur / Calculs	disque de SiO <sub>2</sub> lisse	Monocouche de SiO <sub>2</sub> sphérique et lisse	0,01 à 0,12		V (m/s) = 0,3 à 0,9	Vitesse linéaire critique de MeS*	Validation du modèle de moment critique de MeS* (Tsai <i>et al.</i> , 1991b) <i>Mise en évidence de l'influence de la taille des particules, de l'énergie de surface et des paramètres d'adhésion sur la vitesse critique de détachement des particules</i>
Taheri et Bragg	1992	Injecteur 24×12 mm / Comptage microscopique	Plaque de Verre	Monocouche de Billes de verre	20 35	1,04 1,8	V (m/s) = 5 à 87	Pourcentage de particules MeS* en fonction des vitesses libre et de frottement	Etude de la MeS* et de la vitesse limite de détachement <i>Mise en évidence de la distribution lognormale des forces adhésives</i>
Wu <i>et al.</i>	1992	Soufflerie 1×1×9 m / Microscope et caméra	---	Monocouche de Uranine Polymère Lycopodium Pollen	5 à 42	Monod.	V (m/s) = 4 à 8 1~2 %	Fraction MeS* et fraction de rebond Taux de MeS* en fonction du temps	Phénomène de rebond et de MeS* de particules Description de 2 régimes de MeS* : <1 min, fort taux ; puis taux plus faible <i>Mise en évidence de l'influence de la vitesse d'écoulement, de la taille des particules, de l'humidité et de la rugosité de surface</i>
Fairchild et Tillery	1992	Canal hémisphérique 20×15 cm / Pesée gravimétrique	Acier	Monocouche de sphères en Aluminium	0,8 7,0	2,4 1,6	V (m/s) = 5 à 22	Taux de MeS* Flux vertical de MeS	Effet de particules en saltation (100 à 200 $\mu\text{m}$ ) sur la mise en suspension de particules <10 $\mu\text{m}$ Augmentation de la MeS* avec la taille des particules en saltation
Nicholson	1993	Tunnel à vent 1×1×19,25 m / Sondes isocinétiques et microscope optique	Béton Herbe	Billes de Silice	4,1 9,6 17,5 22,1	0,8 1,9 2,7 3,2	V (m/s) = 3,0 ; 5,0 ; 6,5 3,0 ; 4,5 ; 8,0	Taux de MeS* en fonction du temps	Etude de l'influence de la surface, de la taille des particules, de la vitesse d'air et du type de surface sur la MeS* <i>Variation du taux en 1/At</i>

\* MeS, abréviation pour Mise en Suspension

Auteur	Année	Installation / Technique de mesure	Surface	Dépôt de Particules	$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_g$	Paramètres de l'écoulement	Valeur mesurée	Objectif de l'étude expérimentale et <i>observations</i>
Braaten	1994	Tunnel à vent 0,5×0,5×6 m / Système optique (comptage microscopique)	Verre (plaque microscopique)	Monocouche et éparse de Billes de Ni Lycopodium Billes de verre Pollen	18 28 20 34	Polyd. 1,07 Polyd.	$l < 1 \%$ $V$ (m/s) = 9,6 à 15,1 5,9 à 11,0 13,5 à 19,6 5,4 à 10,9	Fraction MeS* en fonction des forces adhésives et de la vitesse	Etude des caractéristiques de la MeS* de dépôts monocouches <i>Détermination des vitesses d'entraînement en fonction de la vitesse d'écoulement</i>
Foucault	1994	Tunnel 0,5×0,47×5,7m / Captation par sonde et système laser	Acier Poli ou rugueux	Lit naturel de Polystyrène PVC Gel de Silice Billes de verre	80 à 2000 2 à 250 3 à 60 80 à 520	Tend à Monod. Monod. Monod.	$V$ (m/s) = 1 à 25	Vitesse limite d'envol Masse de particules récupérées	Phénomène d'envol et de saltation des particules dans une couche limite turbulente – Validation du modèle d'envol (Foucault, 1994)
Giess <i>et al.</i>	1994 1997	Tunnel aéraulique / Sonde isocinétique	Pelouse de différentes hauteurs	Sphères de Silice	1 ; 5 ; 10 et 20	Monod.	$V$ (m/s) = 3,0 ; 5,0 et à 7,8	Taux de MeS* et fraction cumulative de particules MeS* en fonction du temps	Influence de la rugosité de surface, de la vitesse du vent, de la stabilité de la vitesse et du temps d'exposition sur la MeS* <i>Mise en évidence de la dépendance du taux en fonction du temps</i>
Matsusaka et Masuda	1996	Canal rectangulaire 3×10×400 mm / Méthode électrostatique	---	Fine couche de Fly ash agglomérats	3,0 10-30	2,14	$V$ (m/s) = 10 à 40 Acc (m/s <sup>2</sup> ) = 0,01 à 0,6	Flux de MeS* et Masse MeS* par unité de surface en fonction de la vitesse et du temps	Etude d'un entrainement en écoulement stable et accéléré – Validation du modèle de Matsusaka et Masuda (1996) <i>Mise en évidence de l'influence de l'accélération sur le réentraînement</i>
Hummel <i>et al.</i>	1998	Tunnel à vent circulaire STORM 63 mm×5 m /	Acier de rugosité de 0,8 $\mu\text{m}$	Multicouches de SnO <sub>2</sub>	$d_{ae} =$ 0,8 0,7 0,7	1,8 2,7 2,3	$V$ (m/s) = 58 à 127 89 à 109 78	Taux de MeS* Facteur d'émission	Après une phase de dépôt, étude de la MeS* d'un dépôt multicouches Etude de l'influence de la température et de la vitesse du gaz sur la MeS*
Tsai et Chiou	1999	Tunnel à vent 5×5×20 cm / Aspiration sur filtres – TSI DustTrak	Plaque plate	Poussière de route	< 44	---	$V$ (m/s) = 0 à 15	Vitesse seuil de réentraînement et Entrainement en écoulement accéléré	<i>Mise en évidence de l'influence de l'accélération sur le facteur d'émission</i>

\* MeS, abréviation pour Mise en Suspension

Auteur	Année	Installation / Technique de mesure	Surface	Dépôt de Particules	$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_g$	Paramètres de l'écoulement	Valeur mesurée	Objectif de l'étude expérimentale et <i>observations</i>
Phares <i>et al.</i>	2000	Canal de largeur 1,27 mm / Caméra	Plaque de verre	Sphères de fluorescéine	8,4 à 15 ,7	Monod.	Re inconnu	Efficacité de MeS*	<i>Mise en évidence de l'influence de la taille des particules et des propriétés de la surface sur la MeS</i> Développement d'un modèle cinétique de détachement prenant en compte ces observations
				d'ammonium Polystyrène	6,6 à 13,5	Monod.			
Reeks et Hall	2001	Tunnel 5×0,2×0,02 m / Photographie	Acier poli	Eparses et monocouche			$v_*$ (m/s) =	Fraction MeS*	Comparaison avec les modèles RRH (Reeks <i>et al.</i> , 1989) et Rock'n Roll (Reeks et Hall, 2001) <i>Résultats expérimentaux plus proches du modèle Rock'n roll</i>
				Alumine	12,2 23	1,15 1,17	0,1 à 10	Forces adhésives	
Gotoh <i>et al.</i>	2001	Section rectangulaire 2×40×400 mm / Caméra à échelle microscopique	Plaque de verre	Graphite	13	1,85	$V$ (m/s) = 9,9 à 39,6 Re = 2600 à 10000	Fractions MeS* instantanée et intégrée en fonction de $\Delta t$	Effet du nombre de particules par unité de surface sur la fraction réentrainée
				Particules sphériques de polyéthylène	10-55	Polyd.			

\* MeS, abréviation pour Mise en Suspension

A la vue de ce tableau, trois constats essentiels peuvent être faits :

- Notre tableau montre que l'ensemble des modèles de réentraînement semble bien avoir été validé expérimentalement. Cependant, ces modèles n'ont été vérifiés que sous certaines conditions expérimentales. Ainsi, en dehors de ces domaines d'étude, les modèles peuvent ne plus être en adéquation avec la réalité.

- On constate, d'autre part, que les conditions expérimentales des études sont très disparates. Il est donc bien souvent compliqué de comparer entre eux les résultats des études expérimentales, d'autant plus que les techniques de mesures employées sont variées. Ces multiples conditions expérimentales peuvent être d'ailleurs à l'origine des différences observées entre expériences, et entre expériences et modèles.

- Enfin, un troisième constat est qu'il est difficile d'extraire de ces études des informations en termes de coefficients de mise en suspension qui puissent être directement utilisables dans des analyses de sûreté.

En effet, peu de travaux fournissent les valeurs brutes des coefficients de mise en suspension obtenues expérimentalement. De plus, devant les nombreuses expressions de la mise en suspension (facteur d'émission, fraction, taux ou bien efficacité de réentraînement), le passage d'un coefficient à un autre est indispensable pour toute analyse. Cependant, il nécessite souvent des données supplémentaires qui ne sont pas toujours explicitées dans les publications. Et si tel est le cas, les résultats sont valables uniquement dans des conditions spécifiques. De ce fait, elles ne permettent pas souvent d'être généralisées à un cas plus global.

Par la suite, nous ne présenterons de façon plus détaillée que les études expérimentales et corrélations qui se rapprochent de la situation d'un tas de poudre exposé à un écoulement d'air turbulent, ou bien celles qui semblent intéressantes pour la comparaison avec notre travail. Signalons que la majorité de ces études se rapporte au domaine de la sûreté nucléaire.

#### **1.4.4. Mise en suspension dans le domaine de la sûreté nucléaire**

Dans la littérature scientifique, il existe très peu d'études expérimentales traitant le cas spécifique du léchage de dépôts multicouches. Par rapport à des dépôts éparses ou monocouches de particules, le mécanisme de réentraînement devient plus complexe à

traiter du fait de l'apparition de paramètres supplémentaires (liés en majorité aux forces cohésives comme nous l'avons déjà vu au § 1.2.1.2).

D'autre part, cherchant à obtenir des modèles en adéquation avec leurs (ou des) résultats expérimentaux, certains auteurs ont élaboré des corrélations semi-empiriques. Il s'agit d'équations mathématiques issues de théories et ajustées sur des résultats expérimentaux (Fromentin, 1989 ; Biasi *et al.*, 2001). Ces études particulièrement intéressantes ont été effectuées, pour la plupart, dans le cadre de la simulation d'accidents graves d'un réacteur à eau légère. Dans la suite du texte, nous dénommerons ces conditions d'étude sous l'abréviation LWR SA pour Light Water Reactor following a Severe Accident.

#### **1.4.4.1. Etude expérimentale et corrélation de Fromentin (1989)**

Comme nous l'avons vu précédemment, Fromentin (1989) a cherché à simuler le processus de mise en suspension de particules dans des conditions d'accident grave de réacteur. Il est l'un des seuls auteurs à avoir effectué, en plus de son étude théorique, un travail expérimental sur le réentraînement de particules en dépôt multicouches provenant d'un écoulement turbulent. Cette étude dénommée PARESS s'applique aux écoulements turbulents dont les vitesses d'air sont comprises entre 5 et 25 m/s, et à des dépôts multicouches constitués de particules polydispersées comprises entre environ 0,5 et 5  $\mu\text{m}$ . Ces dépôts multicouches ont été réalisés par sédimentation d'aérosols de  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Sn et Si sur des plaques d'acier dans une enceinte conçue spécifiquement pour cette étude. L'auteur a ensuite pesé ces coupons avant et après leur exposition à l'écoulement d'air. A partir de la différence de masse obtenue, Fromentin détermine une fraction de particules réentraînées, fraction qu'il exprime ensuite en terme de flux moyen pour interpréter ses données. De cette façon, il observe expérimentalement une décroissance du flux moyen en fonction du temps.

A partir de ces résultats expérimentaux, Fromentin établit alors une corrélation de type semi-empirique qui permet de calculer, pour une durée d'exposition à l'écoulement d'air  $\Delta t$  et des conditions de vitesses de frottement de l'air à la surface  $v_*$ , le flux moyen de matière mise en suspension  $\text{Flux}_R$  :

$$\text{Flux}_R(\Delta t, v_*) = 0,0025 \cdot (v_* - 0,29)^3 \cdot \Delta t^{-1,2\sqrt{v_*}} \quad (\text{g/cm}^2\text{s}) \quad (1.48)$$

avec  $\Delta t$  : compris entre 2 et 10 000 s (soit entre 2 s et 2 h 47 min),

$v_*$  : compris entre 0,29 et 1 m/s.

La vitesse de frottement de l'air à la paroi  $v_*$  et la vitesse de l'écoulement libre  $V_\infty$  sont liées dans les conditions expérimentales de l'expérience PARESS par la relation suivante :

$$v_* = 0,053.V_\infty^{9/10} \quad (1.49)$$

avec  $V_\infty$  : vitesse moyenne de l'écoulement d'air dans l'installation.

Il apparaît donc que le flux de mise en suspension est sensiblement proportionnel au cube de la vitesse de l'écoulement d'air et qu'il existe une vitesse critique qui vaut 0,29 m/s, en dessous de laquelle aucune mise en suspension n'a lieu.

La mise en suspension initiale, sur la période 0 à 2 secondes, n'a pas pu être mesurée quantitativement par cette procédure expérimentale. Toutefois, Fromentin observe par photométrie une forte mise en suspension pendant cette période initiale : il l'attribue aux particules qui adhèrent le moins à la surface (ce qui correspond à la queue de la distribution) et qui nécessitent donc moins d'énergie pour être mises en suspension. Il estime ainsi que le flux moyen sur les deux premières secondes vaut :

$$\text{Flux}_R(v_*) = 10 \cdot \text{Flux}_R(\Delta t = 2, v_*) \quad (1.50)$$

Nous représentons sur le graphe de la Figure 1.10, le flux de mise en suspension en fonction du temps pour trois vitesses moyennes d'écoulement d'air (7, 10 et 20 m/s).

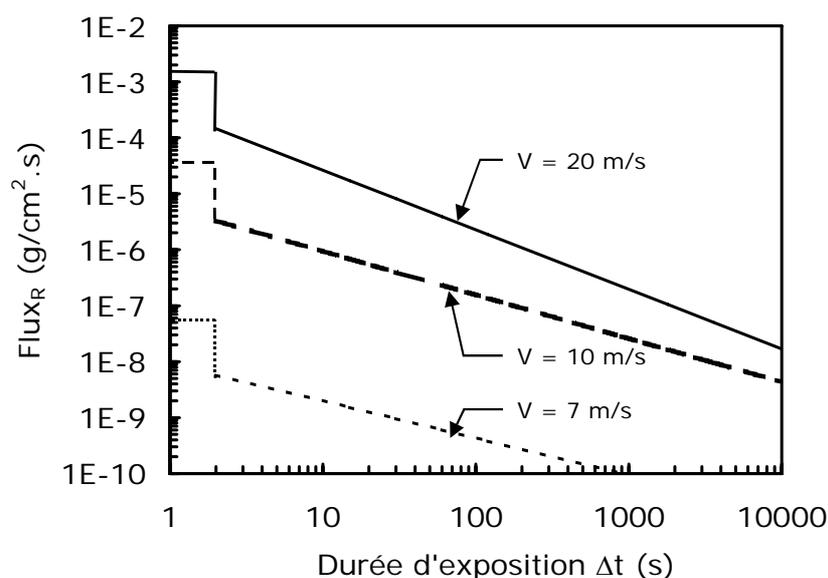


Figure 1.10 – Evolution temporelle du flux de mise en suspension d'un dépôt multicouches obtenu avec la corrélation de Fromentin (1989) pour des vitesses d'écoulement de 7, 10 et 20 m/s

Le calcul de  $\text{Flux}_R$  a été effectué avec les relations ( 1.48 ), ( 1.49 ) et ( 1.50 ). Cette représentation du réentraînement permet d'observer la décroissance temporelle du flux de mise en suspension prédit par Fromentin.

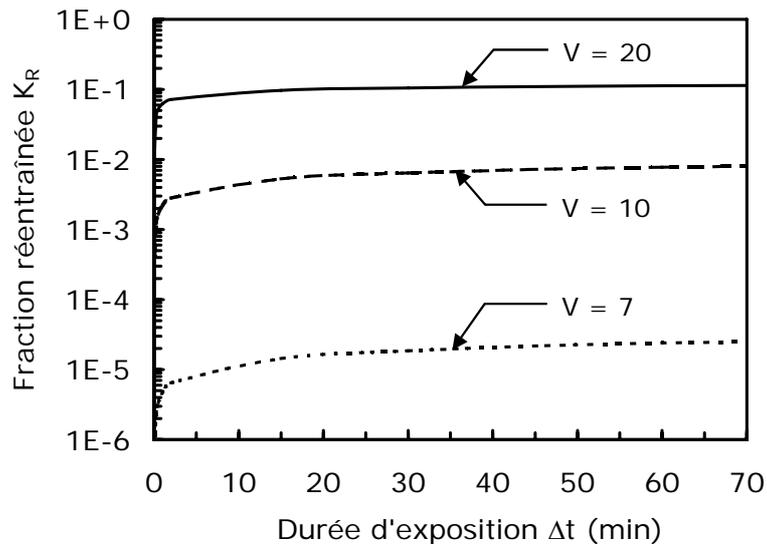
A partir de la corrélation ( 1.48 ) et du résultat ( 1.50 ), il est possible de calculer par intégration la masse totale des particules mises en suspension par unité de surface sur la période donnée :

$$M_R(\Delta t) = 0,0025 (v_* - 0,29)^3 \left( 20.2^{-1,2\sqrt{v_*}} + \left[ \frac{\Delta t^{1 - 1,2\sqrt{v_*}}}{1 - 1,2\sqrt{v_*}} \right]_2^{\Delta t} \right) (\text{g/cm}^2) \quad (1.51)$$

Les relations ( 1.48 ), ( 1.49 ), ( 1.50 ) et ( 1.51 ) sont valables uniquement pour les conditions très spécifiques du programme PARESS à savoir avec :

- des particules insolubles comprises entre 0,4 et 4,3  $\mu\text{m}$ ,
- une humidité pendant la réalisation du dépôt comprise entre 40 et 100 %,
- une masse déposée comprise entre 0,1 et 1  $\text{kg/m}^2$ ,
- un dépôt horizontal multicouches,
- une vitesse d'air  $V$  de l'écoulement libre, comprise entre 6,9 et 25  $\text{m/s}$ .

En supposant une masse initiale de poudre de 5 g (compte tenu de la surface des coupons, nous l'estimons entre 3 et 30 g), nous pouvons exprimer la corrélation de Fromentin en terme de fraction réentraînée  $K_R$ . Nous reportons les résultats de nos calculs sur la Figure 1.11, à savoir les fractions réentraînées en fonction du temps, pour les trois vitesses de la Figure 1.10.



**Figure 1.11 – Evolution temporelle de la fraction mise en suspension d'un dépôt multicouche obtenu à partir de la corrélation de Fromentin (1989) pour des vitesses d'écoulement de 7, 10 et 20 m/s**

Cette représentation du modèle en terme de fraction réentraînée et non en terme de flux comme le fait l'auteur, permet de montrer que la fraction réentraînée évolue relativement peu dès lors que la durée d'exposition dépasse 15 à 20 min. Ceci a pour conséquence que la décroissance temporelle du flux de mise en suspension observée par Fromentin, provient uniquement du fait qu'au-delà de cette durée, seule la période d'exposition change dans le calcul de  $\text{Flux}_R$ . Ainsi, cette décroissance est principalement due à la façon de calculer ce flux qui est un flux moyen (la masse initiale étant celle à  $\Delta t = 0$  s), et non un flux instantané. Cette analyse met clairement en évidence qu'il faut être très prudent quant à l'interprétation que l'on peut faire de l'évolution du flux de mise en suspension au cours du temps.

En comparaison avec notre application qui concernent des poudres polydispersées dont les dimensions des particules sont comprises entre quelques micromètres et environ 100  $\mu\text{m}$ , et des vitesses d'air dans la gamme 0,5 à 10 m/s, le travail de Fromentin ne nous fournit pas des coefficients de mise en suspension directement exploitables. Malgré tout, notre démarche expérimentale présentée dans les chapitres suivants peut être rapprochée de celle de Fromentin.

#### **1.4.4.2. Expériences ORNL et Projet STORM**

Avant l'étude de Fromentin, une seule série d'expériences traitait exclusivement du cas du réentraînement d'aérosols émanant de PWR SA. Il s'agit des essais ORNL (abréviation anglaise pour Oak Ridge National Laboratory) réalisés par Wright *et al.*

(1984, 1994)). Le but de ces travaux était de déterminer l'influence de certains paramètres sur la remise en suspension d'aérosols dans de tels scénarios.

Les expériences ont été réalisées en deux étapes :

- Une *phase de dépôt* dans laquelle les aérosols étaient générés par des torches à plasma, puis déposés dans des tubes d'acier par mécanisme naturel tel que la thermophorèse ou la diffusiophorèse,

- Une *phase de mise en suspension* où les particules déposées étaient exposées à un écoulement d'azote à 25 °C et à une pression de 1 atm.

Chaque échantillon a été pesé avant et après la phase de dépôt. Les différents tubes ont ensuite été exposés à une vitesse d'écoulement fixée afin d'effectuer des mesures de mise en suspension à des périodes d'exposition comprises entre 30 et 600 s. Les mêmes expériences ont été répétées à d'autres vitesses ( $4 \leq V \leq 60$  m/s). Pour ce faire, plusieurs types de particules similaires à celles produites dans des réacteurs ont été utilisés : des particules de manganèse, du zinc, de l'oxyde de titane et de l'oxyde de fer. Toutefois, même si ces essais ont été très bien contrôlés, les particules ont été uniquement caractérisées par leur diamètre aérodynamique médian en masse pendant la phase de mise en suspension. Pour l'analyse, leur conversion en diamètre géométrique est nécessaire. Toutefois, elle impose de connaître la densité des matériaux utilisés. Malheureusement, cette dernière a été seulement mesurée sur les particules d'oxydes de Titane. Afin donc de calculer les diamètres géométriques des autres matériaux, il a donc fallu supposer une distribution log-normale de la taille des particules et faire une estimation de leur densité. Les diamètres géométriques des particules utilisées dans les essais ORNL ne sont donc pas définis de façon précise.

Devant ces données incertaines et l'état des connaissances sur le phénomène de mise en suspension que nous savons, un projet dénommé STORM (abréviations anglaise pour Essais Simplifiés sur les Mécanismes de Réentraînement) a été lancé en 1992 afin d'étudier le comportement d'aérosols dans des composants de réacteurs en cas d'accident grave (Hummel *et al.*, 1998). L'objectif final de ce programme est le développement et la validation de modèles de dépôt et de mise en suspension, théoriques et semi-empiriques afin de les inclure dans des codes de calculs simulant de tels accidents.

Dans ce cadre, l'installation STORM a été réalisée pour permettre d'élaborer une base de données expérimentales fiable qui décrit la mise en suspension de particules dans de tels scénarios. Cette installation similaire au banc des essais ORNL, est constituée

principalement d'un système d'approvisionnement en gaz porteur, d'un système de génération d'aérosols utilisant des torches à plasma, d'un grand récipient de mélange et d'une section d'essai. La différence réside dans le fait qu'elle permet de travailler avec de fortes concentrations d'aérosols solubles et insolubles (typiques de réacteurs), et dans des conditions thermo-hydrauliques représentatives de scénarios LWR SA (température du gaz proche de 300 °C, écoulement du gaz sous forme vapeur non condensable, vitesse du gaz jusqu'à 120 m/s). Comme dans les essais ORNL, les expériences s'effectuent suivant une phase de dépôt et une phase de réentraînement. L'influence de la vitesse d'azote et celle de la température sur les phénomènes de dépôt et de dépôt/mise en suspension, ont été étudiées sur des particules solides de SnO<sub>2</sub> comprises entre 0,1 et 2 µm et des mélanges d'aérosols solide et liquide SnO<sub>2</sub> / CsOH.

Les conditions expérimentales des essais qui incluent la phase de mise en suspension et qui ont été effectués avec les aérosols solides de SnO<sub>2</sub>, sont décrites dans le Tableau 1.1.

Dans le cadre de ce projet STORM, ces expériences servent de base pour améliorer les modèles actuels de mise en suspension introduits dans les codes simulant des LWR SA. Avant chaque expérience définie au préalable, des prédictions étaient effectuées avec les différents codes disponibles. Une fois l'expérience réalisée, certains codes de calculs ont été améliorés en intégrant ces nouveaux résultats ; d'autres ont vu le jour.

Parmi les modèles introduits dans ces codes, on trouve en particulier la description semi-empirique du réentraînement de dépôts multicouches développée par Fromentin (1989). Les résultats de ce dernier sont pris en compte dans plusieurs modules de mise en suspension. Pour exemple, on peut citer le module SOPHAEROS V2.0 dédié à l'analyse du transport des produits de fission dans le circuit primaire d'un LRW SA (Missirlian, 1998 ; Missirlian *et al.*, 1998), ou encore celui du code ECART (Enel Code for Analysis of Radionuclide Transport) utilisé pour la sécurité des transports (Parozzi *et al.*, 1998). Ces deux codes ont la particularité de calculer le taux de mise en suspension grâce à la corrélation semi-empirique de Fromentin.

A la fin du programme, en 1998, une analyse a été effectuée sur l'ensemble des codes testés lors des différents exercices. Il ressort alors que le modèle CEASAR, en cours de développement à l'époque (Hontañón *et al.*, 2000), donne les meilleures prédictions de mise en suspension. A la différence d'autres modèles, il prend en compte le procédé dynamique du réentraînement, même s'il s'appuie sur des estimations (et non des mesures) de paramètres comme la rugosité de surface.

Enfin, les résultats des derniers essais révèlent des imperfections fondamentales dans la méthodologie de plusieurs codes. En effet, certains d'entre eux prédisent un taux

constant de mise en suspension sur toute la période de mesure, alors que le réentraînement observé expérimentalement s'effectue sur une fraction très courte de cette période (en fait cette fraction est si petite qu'elle ne peut pas être mesurée).

#### **1.4.4.3. Etude de Biasi et al. (2001)**

Devant un tel constat, Biasi *et al.* (2001) ont utilisé le modèle Rock'n Roll (d'après eux, ce modèle est le plus simple et le plus réaliste en terme de description du mécanisme de réentraînement, cf. § 1.4.1.3) pour comparer les résultats expérimentaux de STORM obtenus avec des aérosols solides, avec trois autres séries d'expériences réalisées dans des conditions identiques ou différentes :

- les expériences ORNL (Wright *et al.*, 1984),
- les mesures effectuées par Hall (Reeks et Hall, 2001),
- les mesures de Braaten (1994).

D'après les relations ( 1.40 ), ( 1.41 ), ( 1.45 ) et ( 1.46 ), les données d'entrée du modèle Rock'n Roll sont la taille des particules  $d_p$ , la vitesse de frottement de l'air  $v_*$  et les forces d'adhérence caractérisées par une valeur moyenne  $\overline{f'_a}$  et un écart-type géométrique  $\sigma'_a$ .

Une analyse des conditions expérimentales des quatre séries d'expériences permet de mettre en évidence plusieurs points remarquables :

- Les expériences ORNL ont été effectuées rigoureusement dans les mêmes conditions que STORM pour des dépôts multicouches de particules de taille égale ou inférieure au micron. Quant aux deux autres séries de mesures (Hall et Braaten), elles impliquent la mise en suspension d'un dépôt monocouche voire épars de particules, mais de tailles plus importantes comprises entre 10 et 30  $\mu\text{m}$ . Dans tous les cas, les particules sont suffisamment petites pour que la force de pesanteur n'intervienne pas dans les expériences. Ainsi, la mise en suspension est déterminée dans toutes les expériences à partir de l'équilibre des forces adhésives réduites aux forces de Van der Waals, et des forces aérodynamiques.

- Les vitesses de frottement sont connues pour toutes les expériences.

- L'un des paramètres indispensables à l'application du modèle de Biasi est la distribution des forces adhésives. Or des quatre séries d'expériences, seuls Hall et Braaten ont effectué des mesures de ces distributions. Celles de Hall, complétées par des mesures de mise en suspension, ont même permis de valider le modèle Rock'n Roll (cf. § 1.4.1.3). Quant aux expériences STORM, des estimations ont été effectuées pour évaluer l'influence de la rugosité de la surface sur l'adhérence mais elles ne suffisent pas à déterminer des valeurs de distributions de forces avec un bon degré de confiance.

Des quatre séries d'expériences, les essais de Hall et de Braaten sont donc les deux seules à disposer de toutes les données d'entrée du modèle Rock'n Roll.

A partir des résultats des expériences de Hall puis de Braaten, Biasi *et al.* déterminent par ajustement et pour les quatre séries d'expériences (Hall, Braaten, ORNL et STORM) les couples de valeurs  $\overline{f'_a}$  et  $\sigma'_a$  qui s'adaptent au mieux aux résultats expérimentaux de fractions réentraînées. Ils élaborent ensuite des corrélations qui lient respectivement la force d'adhérence moyenne géométrique  $\overline{f'_a}$  et de son écart type géométrique  $\sigma'_a$  au diamètre des particules. Ces corrélations s'écrivent respectivement selon les relations :

$$\overline{f'_a} = 0,016 - 0,0016 d_p^{0,545} \quad (-) \quad (1.52)$$

$$\sigma'_a = 1,8 + 0,0515 d_p^{1,4} \quad (-) \quad (1.53)$$

où  $d_p$  est mesuré en microns.

L'évolution des fonctions  $\overline{f'_a}$  et  $\sigma'_a$  en fonction du diamètre des particules est représentée sur la Figure 1.12 :

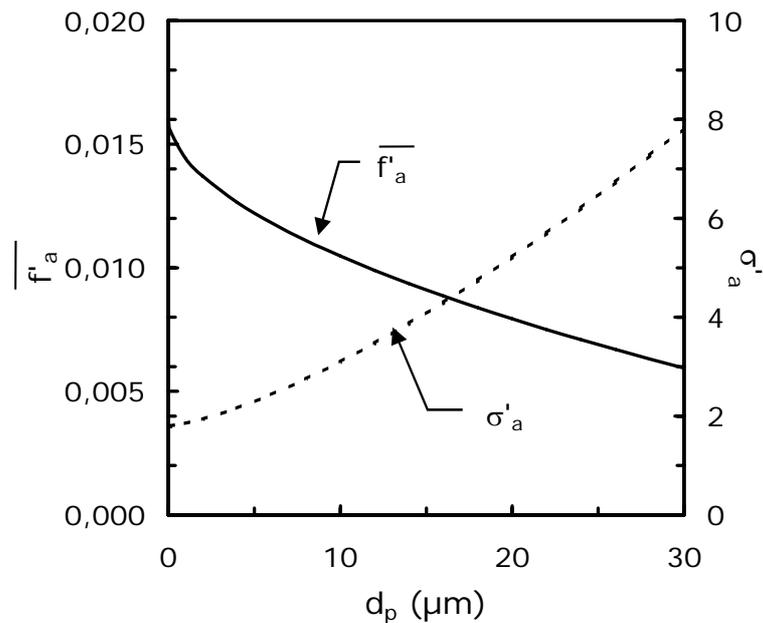


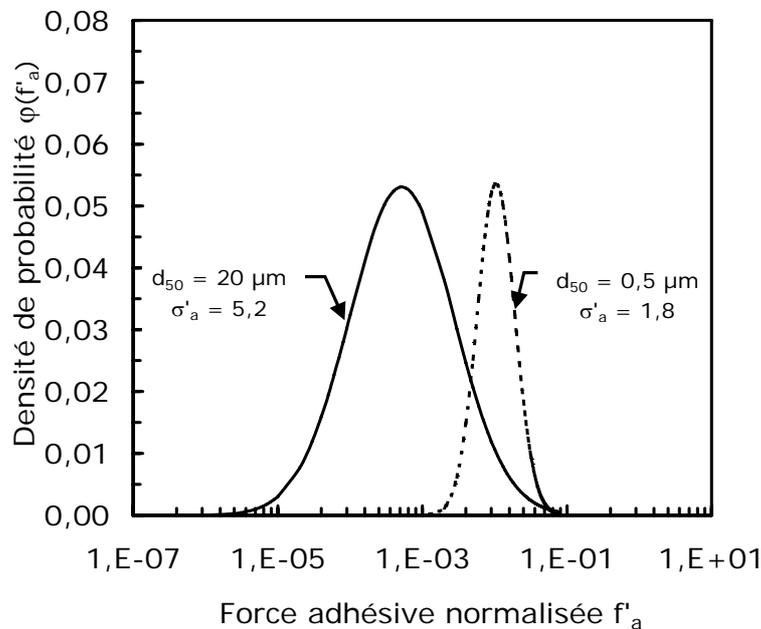
Figure 1.12 – Evolution de  $\overline{f'_a}$  et  $\sigma'_a$  en fonction du diamètre des particules d'après Biasi *et al.* (2001)

L'évolution de ces corrélations en fonction de  $d_p$  apportent plusieurs informations :

- Quel que soit le régime des particules (particules de 10 à 30  $\mu\text{m}$  monodispersées en dépôt monocouche ou particules submicroniques en dépôt multicouches), les valeurs de  $\overline{f'_a}$  sont toutes inférieures à l'unité. Or  $\overline{f'_a}$  correspond à la moyenne des forces normalisées par rapport à la valeur de la force adhésive  $F_a$  (relation ( 1.10 )). Pour un contact parfaitement lisse, l'adhérence est donc plus faible dans les deux régimes de particules que dans le cas d'un contact parfait. Ceci confirme l'influence de la rugosité sur l'adhésion : cette dernière diminue quand le nombre d'aspérités de la surface augmente puisqu'il y a diminution de la surface de contact entre la particule et la surface.

- Par ailleurs, on note que  $\overline{f'_a}$  est une fonction décroissante de  $d_p$ . Pour les petites tailles de particules en dépôt multicouches, l'adhérence normalisée est importante et l'influence de la rugosité moindre par rapport aux grandes particules. Ceci indique donc que l'adhésion a une dépendance en  $d_p$  légèrement plus grande que celle prévue dans la théorie (linéaire). Ainsi et comme on peut le voir également sur la Figure 1.12, l'écart type géométrique caractérisant l'adhésion est plus faible pour les petites particules. A partir des données de Biasi *et al.*, nous avons représenté sur le graphe de la Figure 1.13, les fonctions de densité de probabilité des forces adhésives normalisées (relation ( 1.45 )) pour les deux régimes de particules considérés. Pour ce faire, nous choisissons :

- des particules de 0,5  $\mu\text{m}$  représentatives des particules submicroniques en dépôt multicouches,
- des particules de 20  $\mu\text{m}$  pour le cas des particules plus grandes déposées en monocouche.



**Figure 1.13 - Fonctions de densité de probabilité des forces adhésives normalisées pour des particules de 0,5  $\mu\text{m}$  en dépôt multicouches et de 20  $\mu\text{m}$  en dépôt monocouche**

D'après la Figure 1.13, on observe que :

- la force d'adhérence moyenne est plus faible pour 20  $\mu\text{m}$  que pour 0,5  $\mu\text{m}$ ,
- la distribution des forces adhésives s'étend sur plusieurs ordres de grandeur pour les particules de 20  $\mu\text{m}$ , mais seulement sur un ordre de grandeur pour celles de 0,5  $\mu\text{m}$ .

Afin d'expliquer ces tendances, les auteurs émettent deux hypothèses, toutes deux liées au type de dépôt (mono ou multicouches) :

- Premièrement, les particules dans un lit apparaissent avoir en moyenne une plus grande adhésion. Le modèle ayant été développé pour une particule isolée, cette augmentation apparente de l'adhésion normalisée pour un dépôt multicouches, ne serait qu'un artéfact du modèle. En effet, ce dernier traduit un taux de réentraînement plus faible par une adhérence plus forte, alors que celle-ci serait due au fait que, seule la couche de particules en contact avec l'écoulement d'air est susceptible d'être directement réentraînée (cf. 1.4.2).

- Deuxièmement, dans un lit, chaque particule aura plus de contacts avec les autres particules. Ainsi, du fait de l'augmentation du nombre de contact, l'adhésion moyenne par particule est plus grande et la dispersion plus petite. En effet, l'augmentation du nombre de contacts crée :

- une apparition supplémentaire de forces cohésives qui viennent s'ajouter et donc augmenter les forces d'adhérence, en créant un durcissement des couches de particules,
- une plus grande homogénéité des forces d'adhérence appliquées à chaque particule et donc une diminution de l'écart type de la distribution de ces forces.

Dans le modèle Rock'n Roll, l'augmentation (due aux contacts) du moment des forces adhésives dans un lit, se traduit donc par une diminution de la distance ( $a$ ) entre deux contacts et donc par une augmentation du facteur géométrique ( $r_p/a$ ) par rapport au cas d'un dépôt monocouche ou épars de particules.

Ces corrélations  $\overline{f'_a}$  et  $\sigma'_a$  impliquent cependant un certain nombre d'hypothèses. La plus importante correspond au fait qu'elles intègrent dans la valeur du diamètre de la particule, les différences entre matériaux, morphologies de surface, formes et tailles des particules, utilisés pour les expériences analysées. Ainsi, ces corrélations supposent entre autre qu'à une taille de particule, est attribuée une seule distribution des aspérités de contact avec la surface et également, que toutes les particules ont une forme sphérique. D'autre part, le facteur géométrique ( $r_p/a$ ) dans l'expression du couple traînée - portance (relation ( 1.39 )) a été supposé fixe. Les auteurs estiment donc que les mesures reportées sont insuffisantes pour pouvoir distinguer si le mécanisme de réentraînement est du réellement à un équilibre des moments provoqué par des variations de ( $a$ ), ou bien à des forces adhésives réelles, ou plutôt à un équilibre des forces.

Afin d'établir la validité des corrélations sur  $\overline{f'_a}$  et  $\sigma'_a$  qui ont été développées, Biasi *et al.* comparent les données calculées avec le modèle Rock'n Roll corrélé, aux données expérimentales (STORM, ORNL, Hall et Braaten). Cette comparaison est présentée sur la Figure 1.14.

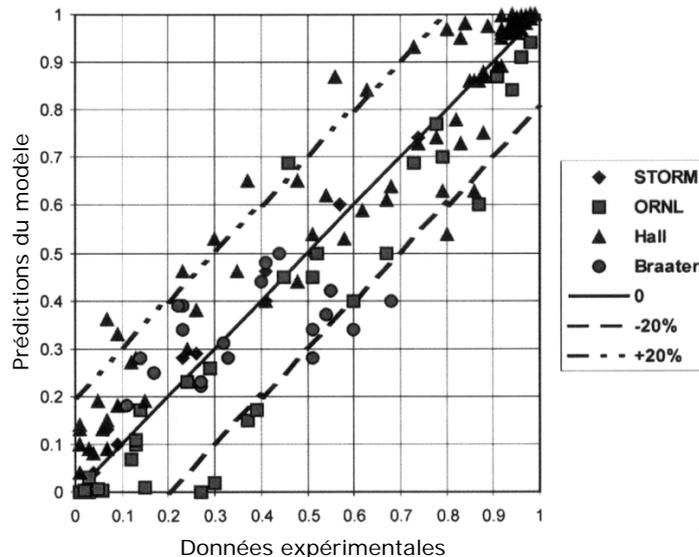


Figure 1.14 - Prédications de la fraction mise en suspension de particules par le modèle Rock'n Roll en fonction des données expérimentales de STORM, ORNL, Hall et Braaten d'après Biasi *et al.* (2001)

On peut voir sur ce graphe, qu'une grande majorité des données se trouve dans l'intervalle  $\pm 20\%$ . Toutefois, on remarque que la plupart des résultats expérimentaux utilisés pour valider le modèle, correspondent à des situations où la mise en suspension est très élevée. En effet les  $K_R$  mesurés sont en grande partie, compris entre  $10^{-1}$  et 1. De plus, cette représentation en échelle linéaire ne nous permet pas d'apprécier les valeurs minimales de  $K_R$ . Par conséquent, on ne connaît pas la capacité du modèle à représenter des situations où les fractions réentraînées sont très faibles, et notamment inférieures à  $10^{-2}$ .

Finalement, les auteurs mettent en évidence que le modèle corréolé qu'ils ont développé a trois points forts. Il s'agit d'un modèle :

- *Simple* : Il ne dépend que de peu de paramètres ( $d_p$  et  $v_x$ ). Par ailleurs, le réentraînement est mieux représenté par un procédé quasi-statique (à partir d'une période estimée de une seconde) que par un phénomène dynamique qui fait intervenir un plus grand nombre de paramètres liés aux propriétés des matériaux et de l'écoulement. De ce fait, le modèle est essentiellement fonction de la distribution des forces adhésives (supposée log-normale) et de la distribution des forces de traînée (supposée gaussienne).

- *Mécaniste* : Ce modèle décrit le phénomène de réentraînement par un mouvement de basculement – roulement de la particule plutôt que par son soulèvement direct. Ce mécanisme physiquement correct est la base du modèle Rock'n Roll.

- *Validé* par rapport à une expérience : En effet, les essais de Hall ont concerné des mesures d'adhérence et de fractions réentraînées permettant à Biasi *et al.* d'élaborer des corrélations de  $\overline{f'_a}$  et  $\sigma'_a$ , et d'ajuster ces dernières, à d'autres expériences (Braaten, STORM et ORNL).

Enfin, le modèle Rock'n Roll corrélé est suffisamment simple pour être facilement incorporable dans les codes de calculs simulant, entre autre, des accidents graves de réacteurs.

#### 1.4.5. Conclusion

Finalement, on s'aperçoit que la mise en suspension par écoulement d'air est un phénomène complexe tant au niveau des théories sur l'adhérence et le détachement de particules d'une surface, que des différents modèles développés dans ce domaine.

Au cours de ces dernières années, les travaux de nombreux auteurs ont permis cependant, une avancée remarquable dans la compréhension du mécanisme de mise en suspension d'une particule. En effet, d'un soulèvement très pragmatique et simpliste de la particule de la surface basé sur un équilibre des forces (modèle quasi-statique) ou une accumulation d'énergie de la particule (modèle dynamique), les auteurs ont su faire évoluer les développements théoriques en s'attachant aux mouvements imperceptibles de la particule avant son envol dans l'écoulement libre. Ainsi en intégrant les moments des forces dans le mécanisme et en combinant les deux concepts de réentraînement (bilan des forces et bilan d'énergie), ils ont pu développer des modèles de mise en suspension qui décrivent plus finement le phénomène. Ces modèles plus réalistes semblent fort prometteurs. Le modèle de Reeks et Hall (2001) avec les corrélations des forces d'adhésion établies par Biasi *et al.* (2001) paraît d'ailleurs être le modèle le plus proche de la réalité, puisque quatre séries d'expériences de la littérature (Braaten, Hall, STORM et ORNL) permettent de le valider pour des dépôts monocouches et multicouches de particules de diamètre compris entre 0,1 et 30  $\mu\text{m}$  déposés sur des surfaces rugueuses.

Cependant, bien que le modèle Rock'n Roll ait été validé pour des dépôts multicouches de particules submicroniques, ce développement théorique n'a pas été vérifié pour des tailles de particules plus importantes. De plus, il a été élaboré pour une particule sphérique isolée sur une surface. Ainsi, il n'intègre pas les forces et paramètres supplémentaires qui apparaissent lorsque les particules sont déposées en couches. Fromentin (1989) a toutefois étudié ces caractéristiques supplémentaires dans le travail

théorique et expérimental qu'il a effectué sur la mise en suspension d'un dépôt multicouches. Confirmé ensuite par d'autres auteurs (dont Biasi *et al.*, 2001), il explique que le réentraînement de tels dépôts s'effectue uniquement sur les particules de la couche supérieure, c'est à dire sur la couche directement en contact avec l'écoulement d'air. Il met alors en évidence que l'évolution temporelle de la fraction réentraînée  $K_R$  augmente pour se stabiliser rapidement, et attribue cette stabilisation de la mise en suspension à un durcissement de la distribution des forces d'adhésion des couches inférieures. L'auteur a vérifié expérimentalement son traitement théorique pour des particules comprises entre 0,4 et 4,3  $\mu\text{m}$  de diamètre, et a développé une corrélation du flux moyen de mise en suspension intégrant l'influence de la vitesse et de la durée d'exposition, et non pas celle de la taille des particules.

Il est important de noter ici que la prise en compte du paramètre temps dans la corrélation de Fromentin est due principalement au fait qu'il décrit le réentraînement par son flux moyen (cf. relation ( 1.3 )). Pour analyser les résultats de la littérature, il est donc essentiel d'homogénéiser l'ensemble des informations en n'exprimant la mise en suspension qu'en terme de fraction réentraînée.

Bien que le modèle Rock'n Roll et la corrélation de Fromentin semblent prometteuses, ils n'ont donc pas été validés pour des tailles de particules supérieures à quelques microns en dépôt multicouches. Ils n'ont pas non plus été vérifiés pour des amas de particules, type tas de poudre. Les seules études traitant de ces formes de tas plus génériques ont été réalisées dans le domaine du transport éolien de sédiments, mais les tailles de particules étudiées sont nettement plus importantes ( $> 250 \mu\text{m}$ ).

Enfin un point essentiel ressort de notre étude bibliographique : il existe un manque évident de connaissance sur les paramètres susceptibles d'influencer la mise en suspension. En effet, des désaccords entre les différentes études apparaissent lorsqu'il s'agit d'attribuer une certaine importance aux divers paramètres influençant le phénomène mais aucun n'a étudié leur influence relative.

De nombreux auteurs ont effectué des études théoriques et expérimentales afin d'apprécier l'influence de paramètres tels que la taille des particules, la vitesse ou bien la durée d'exposition de l'écoulement d'air.

A partir de notre étude bibliographique, il nous est quand même possible de retenir dès à présent pour notre étude :

- des paramètres qui montrent une influence certaine :
  - la vitesse de l'écoulement,
  - la granulométrie,

- des paramètres dont l'influence reste à caractériser plus finement :
  - la durée d'exposition (elle semble avoir une influence très ciblée au début de l'expérience),
  - l'accélération,
  - la porosité du dépôt (d'après Friess et Yadigaroglu (1998)),
  - la rugosité de la surface (prise en compte dans plusieurs modèles)
  
- des paramètres qui ont peu ou pas été étudiés :
  - le dépôt type tas de poudre,
  - la forme des particules,
  - la teneur en eau (directement reliée à la force de capillarité),
  - la turbulence (mise en évidence théoriquement).

Quant aux autres paramètres, ils sont souvent une conséquence d'autres facteurs (la saltation due à la taille des particules, la déformation due au temps d'exposition, à l'humidité relative, à la taille des particules et/ou au dépôt). Nous tenterons autant que possible de les observer voire de les maîtriser.

Toutefois, comme nous l'avons vu dans ce chapitre, les expériences réalisées ont été conduites dans des conditions expérimentales multiples empêchant bien souvent les comparaisons. La plupart des auteurs ont même fait des études généralement ciblées sur un seul paramètre (la vitesse dans certains cas, la granulométrie dans la plupart des expériences).

Dans ces conditions, il est difficile d'évaluer et de classer par ordre d'importance les effets relatifs de ces paramètres sur la mise en suspension. A l'heure actuelle, la littérature existante sur la mise en suspension par écoulement d'air souffre donc d'un manque important de données expérimentales pour résoudre ce problème. Or devant la dizaine de paramètres que nous avons retenue ici, le développement de modèles de réentraînement dans le cas de dépôt multicouches ou amas de poudre pourrait être amélioré si l'on connaissait les effets relatifs de ces facteurs sur la mise en suspension.

C'est pourquoi nous nous proposons de réaliser, dans un premier temps, une étude expérimentale permettant d'apprécier les effets principaux des paramètres sur la mise en suspension d'une contamination particulière par écoulement d'air. Pour cela, nous avons mis au point un dispositif expérimental adapté à nos besoins. Nous allons le décrire dans le chapitre suivant.

## 2. Installation expérimentale BISE Inactive

L'objectif général de ce travail, rappelons-le, est d'étudier le réentraînement par écoulement d'air de particules polydispersées inactives déposées sur une surface en étudiant les paramètres susceptibles d'influencer le phénomène. L'étude en laboratoire d'un tel phénomène requiert donc une installation expérimentale spécifique de type tunnel aéraulique.

Afin que les résultats de cette étude puissent ensuite être utilisés pour des poudres radioactives réelles, des expériences de validation en actif sont prévues dans le cadre d'un Programme d'Intérêt Commun « Aérocontamination » avec COGEMA. Ces expériences spécifiques, conduites avec des poudres d'UO<sub>2</sub>, de PuO<sub>2</sub> et de MOx fourniront des données de comparaison vis à vis de nos résultats acquis avec des poudres inactives. Ainsi, le dimensionnement de l'installation dédiée à nos expériences devait prendre en compte une contrainte importante qui est la « nucléarisation » de la zone d'essai, c'est à dire sa mise en conformité vis à vis des critères de sûreté nucléaire, imposant, notamment, que la veine d'essai soit intégrable dans une boîte à gants.

Notre installation répondant à ces critères est dénommée BISE Inactive (Banc de mise en Suspension par Ecoulement pour l'étude des poudres inactives). Cette installation est localisée au SERAC sur le site de Saclay. Quant à l'installation conçue pour les expériences en actif (qui ne nous concerne pas directement dans le cadre de nos travaux de thèse), elle est appelée BISE Active et se trouve sur le site du CEA de Valduc.

## 2.1. Description

La Figure 2.1 présente le schéma général de notre installation BISE Inactive. Il s'agit d'une veine d'air en circuit ouvert, dont la longueur totale est de l'ordre de 5 mètres. L'air circule par aspiration dans le banc grâce à une pompe à vide située en aval de BISE.

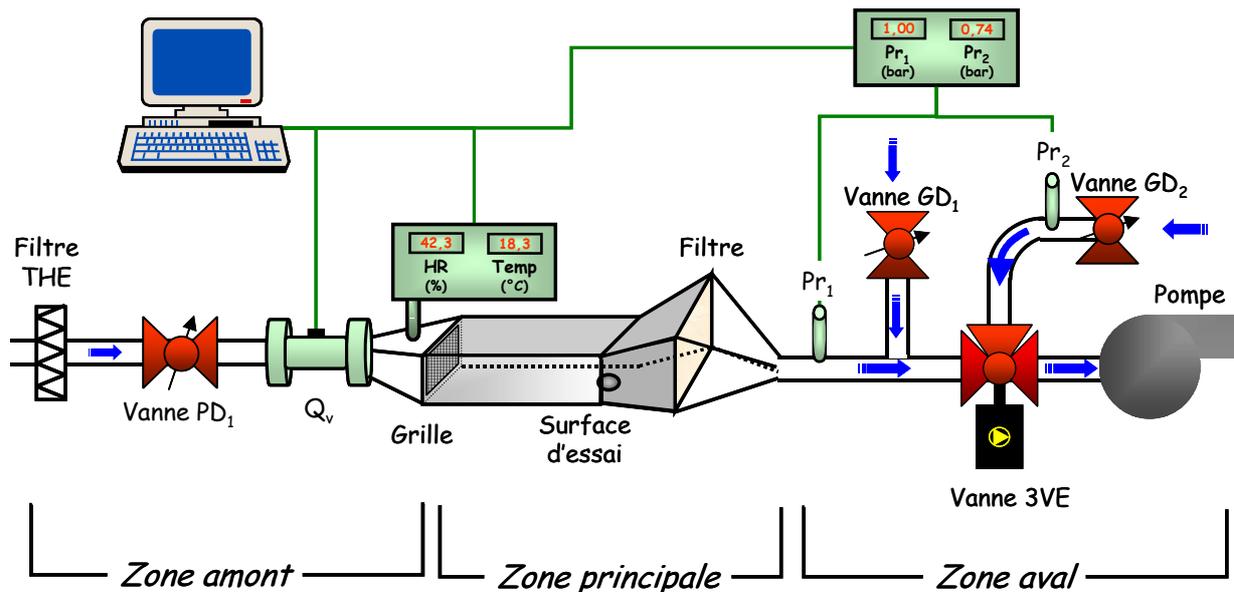


Figure 2.1 - Schéma de l'installation expérimentale BISE Inactive (Banc de mise en Suspension par Ecoulement)

La zone principale de notre installation est composée de deux parties en plexiglas. La première correspond à un conduit parallélépipédique rectangle horizontal de 40 cm de longueur, 12 cm de largeur et 7 cm de hauteur. Ces dimensions ont été déterminées compte tenu du fait, principalement, que le phénomène physique étudié a lieu à proximité immédiate de la surface et que l'installation devait être « nucléarisable ». De plus, la gamme des vitesses d'air recherchée (de 0,5 à 10 m/s) impose de pouvoir disposer à vitesse élevée d'un débit important (de l'ordre de 300 m<sup>3</sup>/h).

Immédiatement en amont du plan de sortie de la section droite parallélépipédique se trouve la surface d'essai sur laquelle sera déposée la poudre test. Nous représentons un schéma de cette zone sur la Figure 2.2.

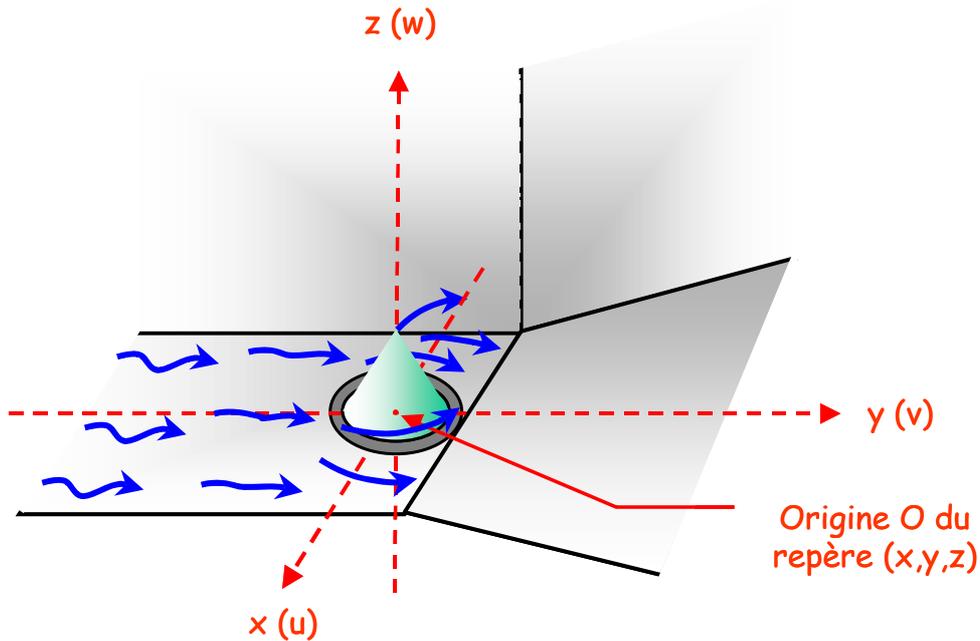


Figure 2.2– Zoom sur le cône de poudre déposé sur la surface d'essai dans BISE Inactive

Cette surface d'essai en aluminium est circulaire (4 cm de diamètre) et amovible. Elle laisse ainsi la possibilité de changer de surface de dépôt (aluminium, acier inox ou autre) ou uniquement de modifier le paramètre de rugosité de celle-ci. Le centre de cette surface d'essai est localisé dans l'axe de direction principale de l'écoulement, au niveau de la base inférieure du conduit. Ce point est pris comme référence géométrique dans l'installation BISE Inactive.

La seconde partie de la zone principale de notre dispositif est de forme trapézoïdale rectangle. Dans le plan de sortie de cette zone est localisé un filtre de prélèvement en position verticale, de 18 cm de hauteur et 22 cm de largeur. La distance entre la surface d'essai et le porte-filtre est de 12 cm. La géométrie divergente de cette partie est imposée par les vitesses d'écoulement envisagées lors des expériences, le type de filtre retenu qui impose des pertes de charge élevées, et la disponibilité des pompes à vide du commerce. La solution technique qui a été envisagée (augmentation de la surface du filtre de prélèvement) n'a pas d'influence sur le phénomène local de mise en suspension. Cette seconde partie a été imposée pour la réalisation des expériences dans BISE Active.

En amont de la zone principale (cf. Figure 2.1, zone amont) se trouve un système de filtration Très Haute Efficacité (THE) qui assure un air propre, sans contamination particulaire parasite, dans le reste du banc. Une vanne de réglage des faibles débits ( $PD_1$ ) est suivie d'un compteur volumétrique à turbine (Schlumberger Fluxi 2100). Ce dernier permet de contrôler le débit volumique  $Q_v$  imposé dans BISE au cours d'une expérience. La mesure au compteur est effectuée à partir de la mesure de la fréquence

de rotation de la turbine. La valeur du débit obtenue permet d'accéder, connaissant la surface de la section de la veine au niveau de la surface d'essai, à la valeur de la vitesse moyenne dans ce plan.

Une grille à maille carrée de 1 mm et d'épaisseur 0,8 mm (« Toile acier inoxydable 304 » de chez Saulas) se trouve localisée en amont de la section droite de la veine parallélépipédique. Cette grille est destinée d'une part à homogénéiser les vitesses d'air sur toute la section de la veine, et d'autre part à induire une turbulence dans le plan de positionnement de la poudre qui soit la plus homogène et isotrope possible.

En aval de la zone principale (cf. Figure 2.1, zone aval) se trouve un dispositif d'ajustement des grands débits. Ce dispositif a été rendu indispensable du fait de l'utilisation d'une pompe à vide à débit non ajustable. Il est composé de deux vannes de réglage identiques dont l'une est positionnée sur la veine principale ( $GD_1$ ) et l'autre sur une veine de dérivation ( $GD_2$ ). Le passage entre les deux veines s'effectue à l'aide d'une vanne électropneumatique 3 voies (3VE) à vitesse d'ouverture réglable. Cette configuration a été choisie pour deux raisons :

- Imposer la même perte de charge aux deux circuits pour une vitesse donnée dans le circuit principal soit  $Pr_1 = Pr_2$ . Ainsi, la pompe à vide est placée dans les mêmes conditions expérimentales lors du passage d'air entre les deux circuits.

- Contrôler l'accélération de l'écoulement au démarrage de l'air dans le circuit principal par le contrôle de la durée d'ouverture de la vanne 3VE.

L'air est véhiculé dans BISE par aspiration, grâce à une pompe à vide à débit non ajustable (Rietschle SMV 500). Les caractéristiques de débit et de perte de charge de cette pompe ont été déterminées, d'une part par les conditions d'essais sur l'écoulement, d'autre part, par la perte de charge du filtre de prélèvement et de l'ensemble du circuit. Le positionnement de la pompe en sortie du circuit permet de ne pas induire une éventuelle turbulence additionnelle dans l'écoulement, mais également de fonctionner en légère dépression. Si cette caractéristique n'est pas importante pour nos expériences en inactif, elle est toutefois indispensable pour le travail en actif. Nous avons effectué des tests d'étanchéité afin de nous assurer qu'aucune contamination extérieure susceptible de modifier le phénomène observé ne pénètre dans le banc.

Le banc BISE est mis à la masse afin d'évacuer les charges potentielles fixées sur ses parois. Enfin, il est équipé d'éléments de mesure et de contrôle de divers paramètres environnementaux (hygrométrie (HR), température (Temp) et pressions ( $Pr_1$  et  $Pr_2$ )) à

l'intérieur de l'installation. L'ensemble des acquisitions s'effectue par l'intermédiaire d'un ordinateur type industriel. Un programme d'acquisition spécifique a été développé au laboratoire sur le logiciel LABVIEW.

L'ensemble des instruments de mesure utilisés dans BISE est répertorié dans le Tableau 2.1.

**Tableau 2.1 – Instruments de mesure utilisés dans BISE Inactive**

Mesure	Instrumentation ou technique	Intervalle de fonctionnement	Précision de l'appareil
Vitesse moyenne $V$ (m/s)	Anémométrie à Fil Chaud Haute Fréquence avec la sonde 55P13 (Dantec)	2 cm/s – 500 m/s	$\pm 0,1$ % sur la mesure
Débit volumique $Q_v$ (m <sup>3</sup> /h)	Débitmètre à turbine Fluxi 2100 (Schlumberger)	20 - 400 m <sup>3</sup> /h	$\pm 2$ % du débit mesuré pour $20 < Q_v < 80$ m <sup>3</sup> /h $\pm 1$ % du débit mesuré pour $80 < Q_v < 400$ m <sup>3</sup> /h
Température de l'air (°C)	Rotronic Hygrometer	0-50 °C	$\pm 0,3$ °C
Humidité relative (%)	F/T-Serie	0-100 %	$\pm 1$ % HR
Pression relative (bar)	Transmetteur Intelligent de Pression PR-53/80251 (Keller)	-1 – 0 bar	$\pm 0,15$ % de l'étendue de mesure
Masse réentraînée (g)	Balance MC210 P (Sartorius)	0 - 210 g	$\pm 20$ $\mu$ g pour $0 < m < 50$ g $\pm 40$ $\mu$ g pour $50 < m < 100$ g $\pm 50$ $\mu$ g pour $100 < m < 210$ g

## **2.2. Performances aérauliques**

Avant de réaliser les expériences permettant l'appréciation des paramètres fondamentaux de mise en suspension d'une contamination particulaire, il est important d'étudier les performances aérauliques de l'installation BISE afin de caractériser la veine d'air. Cette étude consiste à :

- évaluer la stabilité de l'écoulement dans la veine,
- caractériser les champs de vitesse et de turbulence,
- décrire la couche limite dans la veine au niveau de la zone du dépôt de poudre :
  - sans obstacle
  - en présence d'un obstacle simulant un dépôt conique,
- déterminer les vitesses de frottement caractéristiques de l'installation au niveau de la surface de base,
- déterminer la gamme de variation de l'accélération au démarrage de l'écoulement d'air contrôlée grâce à la vanne électropneumatique 3VE.

### **2.2.1. Technique de mesure : l'Anémométrie à Fil Chaud**

Afin d'avoir une mesure locale et précise de la vitesse dans BISE, nous choisissons une technique de mesure intrusive : l'Anémométrie à Fil Chaud Haute Fréquence (Dantec). Notre dispositif de mesure comprend une unité d'anémométrie Haute Fréquence (Streamline) et une soufflerie d'étalonnage des sondes, le tout géré par un ordinateur grâce à un logiciel associé nommé StreamWare. L'ensemble est présenté sur Figure 2.3.



Figure 2.3 – Système d'anémométrie fil chaud Haute Fréquence (Dantec)

### 2.2.1.1. Principe de la mesure

Le principe de l'anémométrie à fil chaud repose sur les échanges de chaleur entre le fil chaud métallique et l'écoulement d'air. Il utilise la dépendance de la résistance électrique par rapport à sa température.

Lorsque le fil de tungstène maintenu à une certaine température, est plongé dans un écoulement de fluide de température plus basse, il se produit un échange de chaleur par convection entre le fil et l'écoulement. Cet échange, fonction notamment de la vitesse du fluide et de l'écart de température entre l'élément chauffé et le fluide, va modifier la température du fil, sa résistance électrique et donc sa tension proportionnellement à la vitesse de l'écoulement.

Du fait de ses grandes gammes de vitesse (0,02 à 500 m/s) et de fréquence (jusqu'à 400 KHz), l'anémométrie à fil chaud permet d'obtenir, au niveau local, la vitesse instantanée et ses fluctuations (donc les intensités de turbulence). Cette méthode est donc bien adaptée à notre étude qui traite le cas d'écoulements turbulents. De plus, elle a l'avantage de ne nécessiter aucun ensemencement dans le banc, contrairement aux méthodes optiques envisagées dans un premier temps.

Toutefois, la mise en place des sondes est particulièrement délicate : les fils tungstène de 5  $\mu\text{m}$  de diamètre et 1,25 mm de long sont très fragiles et doivent être placés minutieusement par rapport à la direction de l'écoulement.

### 2.2.1.2. Sonde utilisée et positionnement dans BISE

Nous fixons arbitrairement un repère orthogonal direct (x,y,z) dans BISE, de la façon suivante :

- Ox : Axe parallèle à la surface et normal à l'écoulement,

- Oy : Axe parallèle à la surface dans le sens de l'écoulement (i.e. y correspond à la composante principale de l'écoulement),
- Oz : Axe vertical normal à la surface.

L'origine O du repère est définie au centre de la section d'essai au niveau de la surface (Figure 2.2).

Pour notre étude, nous utilisons une sonde à un fil ou fil simple (Dantec 55P13). Cette sonde coudée est installée sur un porte-sonde 55H21 qui traverse la surface supérieure de la veine au niveau de la section d'essai. Elle effectue des mesures dans le plan perpendiculaire à la position du fil chaud. Ainsi, dans l'installation BISE, elle permet d'obtenir la composante principale  $v$  suivant  $y$  de la vitesse moyenne de l'écoulement libre  $V$ , la seconde composante  $u$  (suivant  $x$ ) étant considérée comme négligeable (Figure 2.4).

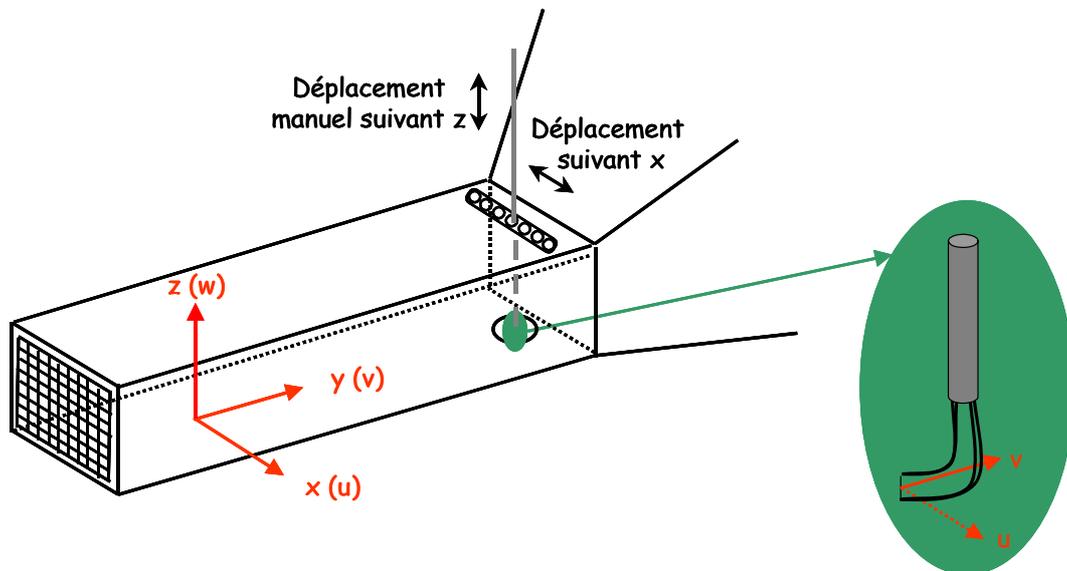


Figure 2.4 – Représentation de BISE instrumentée de l'anémométrie à fil chaud

La vitesse prise comme référence  $V$  dans notre installation est mesurée à l'origine du repère, en sortie et au centre de la veine parallélépipédique soit à  $(0 ; 0 ; 3,5 \text{ cm})$ . Elle est sensiblement identique à la vitesse moyenne  $V_{\infty}$  au centre de la section d'essai. Une sonde de compensation en température (référence 9090P01), est placée en amont de la veine parallélépipédique, dans l'écoulement d'air, afin de minimiser les effets de dérives thermiques du milieu ambiant.

L'étalonnage de la chaîne d'anémométrie est une phase essentielle pour l'obtention de mesures précises. Cet étalonnage est effectué régulièrement au laboratoire avec la soufflerie d'étalonnage Dantec. Lors de la procédure d'étalonnage, il est important de

positionner la sonde à étalonner vis à vis de l'écoulement de la soufflerie, de la même façon qu'elle est utilisée dans la veine d'air à caractériser.

### 2.2.1.3. Fréquence d'acquisition

Afin de pouvoir mesurer correctement la turbulence, il est important de déterminer une fréquence d'acquisition des mesures, qui soit supérieure à l'échelle de temps d'apparition des « bursts ». Rappelons que ces structures turbulentes, similaires à de mini tornades peuvent avoir un rôle dans le phénomène d'envol des particules déposées (cf. § 1.3.2.1). Blackwelder et Haritonidis (1983) donnent une fréquence d'apparition des « bursts »  $f_b$  à l'aide de la relation :

$$f_b = 0,0035 \cdot \frac{v_*^2}{\nu} \quad (2.1)$$

avec  $v_*$  : vitesse de frottement à la paroi,  
 $\nu$  : viscosité cinématique de l'air.

La relation ( 2.1 ) nous impose donc de connaître la vitesse de frottement à la paroi  $v_*$ . Dans BISE le rayon hydraulique de la veine parallélépipédique  $R_H$  vaut  $4,421 \cdot 10^{-2}$  m, et la vitesse moyenne maximale  $V_{max}$  pouvant être atteinte est de 15 m/s (vitesse maximale de l'installation sans filtre). A partir de la relation ( 2.16 ) décrite au § 2.2.4.1, le nombre de Reynolds maximum de l'écoulement atteint dans BISE vaut environ 87 500. Il est alors possible de considérer que la distribution des vitesses dans BISE correspond à une loi de puissance en 1/7 à l'intérieur de la couche limite turbulente (cf. relation ( 2.18)). D'après Schlichting (1979), la vitesse de frottement à la paroi  $v_*$  peut alors se calculer à partir du taux de cisaillement  $\tau_o$  pour un écoulement turbulent circulant à travers un conduit suivant la relation :

$$\tau_o = \rho v_*^2 = 0,0225 \rho V_\infty^{7/4} \left( \frac{\nu}{R_H} \right)^{1/4} \quad (2.2)$$

avec  $\rho$  : masse volumique de l'air,  
 $V_\infty$  : vitesse moyenne de l'écoulement libre,  
 $R_H$  : rayon hydraulique.

Dans les conditions CNTP ( $\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$  et  $\nu = 1,515 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ), la vitesse de frottement de l'air à la paroi devient :

$$v_* = 0,06 \cdot V_\infty^{7/8} \quad (2.3)$$

La relation ( 2.1 ) vaut alors pour BISE :

$$f_b \sim 100 \text{ Hz.}$$

Afin de se situer à une fréquence d'acquisition supérieure à l'apparition des « bursts », nos mesures sont donc effectuées à une fréquence correspondant à  $5 \times f_b$  soit 500 Hz.

D'après la procédure Dantec, 2000 points de mesures suffisent pour obtenir la valeur de la vitesse moyenne. Toutefois, par sécurité, notre choix se porte sur 4000 points par acquisition, et nous réalisons 5 acquisitions à 500 Hz espacées de 4 s. Ces 5 acquisitions sont répétées 3 fois. Les résultats présentés par la suite correspondent ainsi à la moyenne des mesures effectuées.

### 2.2.2. Reproductibilité et stabilité de l'écoulement

Une première série d'expériences consiste à évaluer la reproductibilité des débits obtenus entre deux arrêts de la pompe, la mesure étant effectuée avec le compteur volumétrique. Cette information est importante puisqu'elle concerne la reproductibilité de nos résultats de réentraînement.

Le coefficient de variation mesuré (rapport de l'écart type sur la moyenne des débits) est de l'ordre de 2 % pour des débits supérieurs à 140 m<sup>3</sup>/h, soit à une vitesse moyenne  $V = 5 \text{ m/s}$  dans BISE. Par contre, il atteint 8 % pour des débits d'environ 10 m<sup>3</sup>/h soit 0,5 m/s dans l'installation. Ceci s'explique par le fait que l'on se trouve au-dessous de la gamme d'étalonnage du débitmètre (cf. Tableau 2.1).

On note également une légère chute du débit, de l'ordre de 5 %, au démarrage de l'aspiration d'air par la pompe à vide pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/h. Ceci est dû à la stabilisation de la pompe à vide. Un délai de 15 min après le démarrage de la pompe s'avère donc nécessaire, afin d'obtenir une bonne stabilité de l'écoulement d'air (< à 2 %) au cours des expériences.

### 2.2.3. Champs de vitesse et de turbulence

Des mesures de vitesses effectuées aux positions limites des vannes PD<sub>1</sub> et GD<sub>1</sub> montrent que les vitesses dans BISE varient de 0,1 à environ 15 m/s sans filtre de

prélèvement. Lors de nos expériences, l'introduction d'un filtre de prélèvement dans l'installation va créer une perte de charge supplémentaire à la dépression existante et donc modifier le domaine de variation des vitesses dans l'installation. La gamme de vitesses de BISE dans nos expériences dépend donc de la perte de charge imposée par le type de filtre de prélèvement placé dans l'installation. Une étude préliminaire (Witschger et Alloul-Marmor, 2001) a montré que les filtres à fibre D-350 (Bernard Dumas) semblent bien adaptés à notre étude expérimentale. Ces filtres rectangulaires de dimension  $204 \times 253 \text{ mm}^2$  permettent d'atteindre une vitesse moyenne (recherchée pour notre étude) de 10 m/s dans l'installation. De plus, ils sont peu coûteux. D'autres filtres référencés 95-A chez Bernard Dumas seront également utilisés dans le but unique d'effectuer quelques expériences à des vitesses supérieures à 10 m/s (de l'ordre de 14 m/s).

En plus, les mesures de champs de vitesse et de turbulence dans la veine d'air sont nécessaires afin de nous assurer que le tas de poudre présent sur la surface est exposé uniformément à l'écoulement.

L'exploration de ces champs est effectuée dans le plan  $(y, z)$  à  $x=0$ , par déplacement manuel de la sonde d'anémométrie. Suivant l'axe  $Ox$ , sept presse-étoupes permettant le passage du support de sonde, sont disposés à des distances de 1,4 cm sur la surface haute de BISE soit à  $x = -4,2 ; -2,8 ; -1,4 ; 0 ; 1,4 ; 2,8$  et  $4,2$  cm (Figure 2.4). Suivant  $Oy$ , le déplacement s'effectue manuellement à l'aide d'un pied à coulisse permettant une précision de 0,1 mm. A cette incertitude, s'ajoute l'erreur due à l'intervention manuelle qui est estimée à 0,5 mm. L'erreur maximale de la position de la sonde est donc de 0,6 mm.

La Figure 2.5 montre les champs de vitesse et de turbulence de la veine d'air que nous avons mesurés dans la section  $(x,z)$  de l'installation en  $y = 0$ . Ils ont été effectués pour 3 vitesses d'air prises au centre de la veine à 0,5 ; 5 et 10 m/s. Pour chacun des champs, nous avons fait 42 points de mesures (7 suivant la largeur et 6 suivant la hauteur à  $z = 1 ; 2 ; 3 ; 3,5 ; 4$  et  $5$  cm). Les différentes zones des champs de vitesse expriment le biais en % entre la valeur de la vitesse au point considéré et la valeur de la vitesse moyenne au centre de la section, que nous avons prise en référence. Les champs turbulence, quant à eux, sont représentés en intensité. Pour rappel, l'intensité de turbulence ( 1.43 ) est définie comme le rapport des fluctuations de la vitesse instantanée sur la vitesse moyenne. Elle est calculée comme un coefficient de variation, c'est à dire par le rapport en pourcentage de l'estimation de l'écart type de la vitesse instantanée  $\sigma$  sur la vitesse moyenne au centre de la section d'essai  $V$ , soit :

$$I = \frac{\sigma}{V} \cdot 100 \quad (2.4)$$

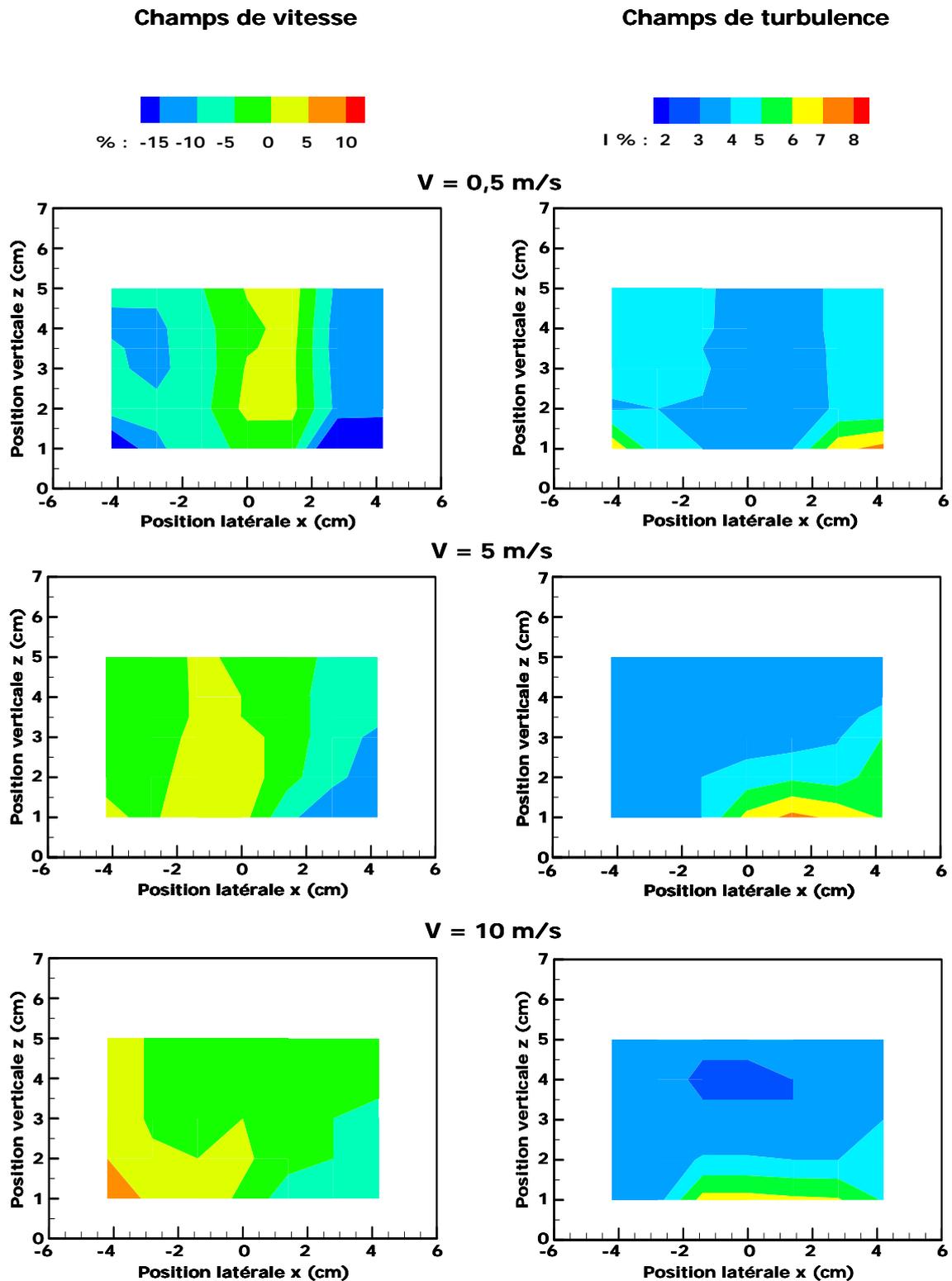


Figure 2.5 – Champs de vitesse (à gauche) et de turbulence (à droite) dans le plan (x,z) en y = 0 exprimés respectivement en biais par rapport à la vitesse moyenne V et en intensité pour 3 vitesses

V = 0,5 ; 5 et 10 m/s

Ces différents graphes nous permettent ainsi de vérifier que les profils de vitesse sont relativement plats suivant la direction  $x$ . Pour les trois vitesses, au centre de la section, on observe que la variation du biais reste comprise dans l'intervalle  $\pm 10\%$ . Nos résultats montrent également que cette uniformité spatiale évolue peu en fonction de la vitesse sur l'ensemble du domaine de variation.

Quant aux champs de turbulence, on note que, quelle que soit la vitesse moyenne imposée dans l'installation, l'intensité de turbulence varie entre 2 et 5 % au centre de la section. Ceci indique donc que l'écoulement est stable au centre de la section d'essai.

Toutefois, des biais plus importants de la vitesse sont observés à l'approche de la paroi. Ils atteignent environ 10 % à 10 m/s et 15 % à 0,5 m/s. On remarque également une légère augmentation de l'intensité de turbulence à  $z = 1$  ( $I \sim 8\%$ ). Ces gradients de vitesse et de turbulence correspondent au profil classique d'évolution de la vitesse à proximité d'une paroi. Ils sont dus aux phénomènes d'adhérence du fluide à la paroi dans la couche limite (viscosité) : les vitesses diminuent à l'approche de la paroi et l'intensité de turbulence augmente. Ils seront étudiés plus en détail au § 2.2.4.

Ces résultats sont importants puisque, comme nous l'avons vu, la vitesse de l'écoulement tout comme la turbulence au voisinage d'un tas de poudre, ont une influence certaine sur le phénomène de réentraînement par écoulement d'air. Ils indiquent que l'écoulement est homogène, uniforme et stable au centre de la veine. De plus, les profils de vitesse dans cette zone évoluent peu sur toute la gamme de variation de l'écoulement d'air dans BISE.

D'autre part, ces résultats montrent la nécessité de s'attacher de façon plus fine à ce qui se passe à proximité de la surface, là où sera déposé le tas de poudre. En effet, les modifications du profil de vitesse et de turbulence, observées dans la couche limite, peuvent avoir des effets non négligeables sur le processus de mise en suspension de la poudre.

#### **2.2.4. Description de la couche limite**

Pour bien caractériser le réentraînement des particules, il est nécessaire de connaître parfaitement le profil de l'écoulement à proximité de la paroi.

##### **2.2.4.1. La couche limite**

Dans le cas de l'écoulement d'un fluide visqueux (dans notre cas, l'air) au voisinage d'une paroi, le phénomène d'adhérence du fluide induit un fort gradient de vitesse à la

paroi. Cette zone, dans laquelle les effets de frottement interne du fluide sont importants, est la couche limite. En dehors de cette couche, le fluide est dit libre.

L'écoulement que l'on trouve essentiellement dans les problèmes de réentraînement de particules ou les problèmes d'érosion éolienne, est turbulent et se développe le long de la surface. Nous considérons donc principalement le cas d'une couche limite turbulente qui se développe sur une plaque plane. Schlichting (1979) et Rhyming (1991) entre autres, donnent des modèles similaires de développement de ce type d'écoulement, relativement bien connus de nos jours.

■ Lorsque la couche limite prend naissance en  $y = 0$ , l'écoulement à l'intérieur de la couche limite se développe dans un premier temps de façon laminaire. Puis après une zone de transition, il devient plus instable pour se transformer en zone turbulente. La transition s'effectue par un accroissement brusque de l'épaisseur de la couche limite et dépend dans le cas d'une plaque plane, de la valeur du nombre de Reynolds local  $Re_y$  avec :

$$Re_y = \frac{V_\infty y}{\nu} \quad (2.5)$$

où  $y$  est la distance à partir de laquelle la couche limite prend naissance et  $V_\infty$  la vitesse moyenne caractéristique de l'écoulement en dehors de la couche limite. La transition s'effectue pour un nombre de Reynolds local de l'ordre de  $10^5$  à  $10^6$  (Ryhmig, 1991).

Lorsque la couche limite turbulente est établie, celle-ci est composée d'une couche interne près de la paroi représentant les 5 à 15 % de l'épaisseur et une zone externe formée des 85 – 95 % restant. Dans le cas du réentraînement, c'est essentiellement la zone interne qui va intervenir sur le détachement des particules. En effet, dans cette région proche de la paroi, l'écoulement va interférer avec le lit de particules.

Dans la zone interne, il a été montré expérimentalement que la distribution des vitesses dans la couche est constituée de trois régions distinctes :

- la sous-couche laminaire, qui est la région la plus proche de la paroi. Elle est uniquement caractérisée par l'effet des contraintes de cisaillement laminaire. Du fait cependant de la nature instable de l'écoulement dans cette zone, le terme de sous-couche visqueuse est plus approprié,

- la zone de transition, zone de raccord entre la sous-couche visqueuse et la zone logarithmique,

- la zone logarithmique qui est la région où l'écoulement est pleinement turbulent.

Le profil est décrit à l'intérieur de chaque région par :

$$v_+ = f(z_+) \quad (2.6)$$

On a alors dans la zone interne :

$$\text{- la sous-couche visqueuse :} \quad v_+ = z_+ \quad \text{pour } 0 < z_+ < 5 \quad (2.7)$$

$$\text{- la zone de transition :} \quad v_+ = 5 \ln(z_+) - 3,05 \quad \text{pour } 5 < z_+ < 30 \quad (2.8)$$

$$\text{- la zone logarithmique :} \quad v_+ = 2,5 \ln(z_+) + 5,5 \quad \text{pour } 30 < z_+ < 500 \quad (2.9)$$

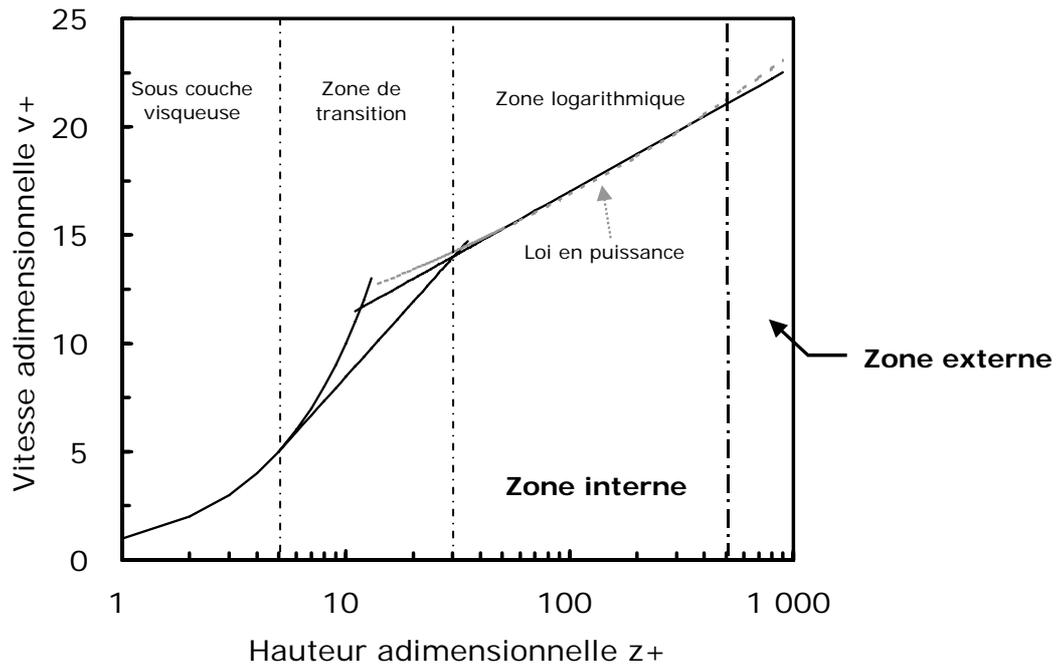
où  $v_+$  est une vitesse adimensionnelle correspondant à la composante axiale de la vitesse suivant la relation ( 2.10 ) :

$$v_+ = \frac{V}{V_*} \quad (2.10)$$

La variable  $z_+$  a été définie précédemment suivant la relation ( 1.19 ). Elle correspond à des positions verticales à partir de la surface.

Au delà de  $z_+ = 500$ , on se trouve dans la zone externe ou encore zone à vitesse déficitaire, fortement liée aux conditions extérieures à la couche limite. Les grandeurs caractéristiques dans cette zone sont la hauteur de la couche limite  $\delta$  et la vitesse extérieure à la couche.

Il s'en suit que la distribution générale des vitesses pour la couche limite turbulente peut être représentée par une seule courbe de  $v_+ = f(z_+)$  liant les différentes zones de la couche limite (Figure 2.6). On a coutume de représenter cet ensemble de courbes en coordonnées semi-logarithmiques, afin de bien distinguer les différentes régions. Toutes ces lois sont valables pour des écoulements sur une paroi lisse.



**Figure 2.6 – Calculs effectués pour la distribution de  $v_+$  en fonction de  $z_+$  dans la zone interne de la couche limite turbulente**

La distribution universelle ainsi décrite est assez complexe mais elle a l'avantage de s'appliquer également à un écoulement en développement. Toutefois, pour certains cas pratiques, il suffit d'employer un profil de vitesse plus approximatif de la forme d'une loi en puissance :

$$\frac{v}{V_\infty} = \left( \frac{z}{\delta} \right)^{1/n} \quad (2.11)$$

où  $\delta$  : épaisseur de la couche limite

$n$  : exposant fonction de la valeur du nombre de Reynolds.

Dans le cas d'une plaque plane,  $n \sim 7$  (Schlichting, 1979). Cette loi en puissance a été suggérée à partir du résultat expérimental suivant :

$$v_+ = 8,74(z_+)^{1/n} \quad (2.12)$$

Cette distribution en loi de puissance observée sur la Figure 2.6, représente bien la zone logarithmique de la loi universelle. Cependant, elle ne permet pas de décrire aussi finement que la loi universelle, le profil des vitesses à proximité immédiate de la paroi dans la sous couche visqueuse.

■ Le frottement à la paroi joue un rôle important dans le développement conduisant à la distribution universelle des vitesses. Déterminé expérimentalement à partir de la pente de la loi logarithmique reformulée en fonction de  $V_\infty$ , le coefficient de frottement  $C_f$  est fonction notamment de la rugosité de la surface et du caractère établi ou non de l'écoulement. En utilisant l'expression de la vitesse de frottement ( 1.18 ), on obtient dans le cas d'une plaque plane :

$$C_f = 2 \frac{\tau_0}{\rho V_\infty^2} = 0,045 \left( \frac{V_\infty \delta}{\nu} \right)^{-1/4} \quad (2.13)$$

■ Une autre caractéristique à prendre en compte, est l'épaisseur de la couche limite  $\delta$ . Elle est généralement définie par la hauteur à la paroi du point où la vitesse est égale à 0,99 de la valeur de  $V_\infty$ . Elle dépend de plusieurs facteurs tels que la viscosité du fluide et le niveau de turbulence.

Dans le cas d'une couche limite laminaire, la distribution des vitesses est parabolique. Pour une plaque plane, son épaisseur est donnée par la solution de Blasius (Ryhming, 1991) :

$$\frac{\delta}{y} = 4,96 Re_y^{-1/2} \quad (2.14)$$

Dans le cas d'une couche limite turbulente, la répartition des vitesses est beaucoup plus aplatie. L'épaisseur de la couche limite turbulente est alors déterminée pour une surface parfaitement lisse par la formule empirique :

$$\frac{\delta}{y} = 0,37 Re_y^{-1/5} \quad \text{avec } 10^5 < Re_y < 10^7 \quad (2.15)$$

■ Si l'on traite le cas d'un conduit parallélépipédique, le régime d'écoulement est décrit par le nombre de Reynolds relatif au diamètre hydraulique  $D_H$  du conduit et à la vitesse au centre de l'écoulement  $V$  suivant l'équation :

$$Re = \frac{V D_H}{\nu} \quad (2.16)$$

avec

$$D_H = \frac{4S}{L} \quad (2.17)$$

où  $S$  : section du conduit,  
 $L$  : périmètre de la section.

Lorsque le nombre de Reynolds dépasse la valeur de 2100, l'écoulement jusque là laminaire tend à devenir turbulent (Midoux, 1985). Toutefois, on observe une zone de transition pour des Reynolds compris entre environ 1500 et 3000.

Dans des conditions turbulentes, la loi en puissance décrit bien le profil des vitesses. Elle s'écrit sous la forme :

$$\frac{v}{V} = \left( \frac{z}{R_H} \right)^{1/n} \quad (2.18)$$

Les valeurs de  $n$  sont alors fonction du nombre de Reynolds du conduit. Indiquons quelques valeurs de  $n$  :

$n$	$Re$
6	$4 \cdot 10^3$
7	$1,1 \cdot 10^5$
10	$2 \cdot 10^6$

Cependant, au voisinage de l'entrée du conduit parallélépipédique, la vitesse  $V$  est dépendante de la composante axiale  $y$  et elle ne décrit pas le profil de vitesses d'un écoulement turbulent. Il faut considérer une longueur d'établissement, qui correspond en fait au développement de la couche limite à l'intérieur du conduit. Si cette longueur est atteinte, on dit que le régime est *établi*, c'est à dire que le profil de vitesse ne dépend plus de la distance à l'entrée du conduit. Contrairement au régime laminaire, la vitesse de l'écoulement en régime turbulent est telle que la couche limite ne peut pas envahir toute la section du conduit. Il y a tout d'abord développement de la couche limite turbulente en un point  $T$ , puis établissement de celle-ci lorsque son épaisseur atteint une valeur proche de  $0,2D_H$ . La longueur d'établissement  $L_e$  ou longueur de développement du profil des vitesses en écoulement turbulent vaut alors :

$$L_e = 0,46D_H Re^{1/4} \quad (2.19)$$

La région centrale présente alors un profil presque plat. Une illustration du développement de la couche limite turbulent est montrée sur la Figure 2.7.

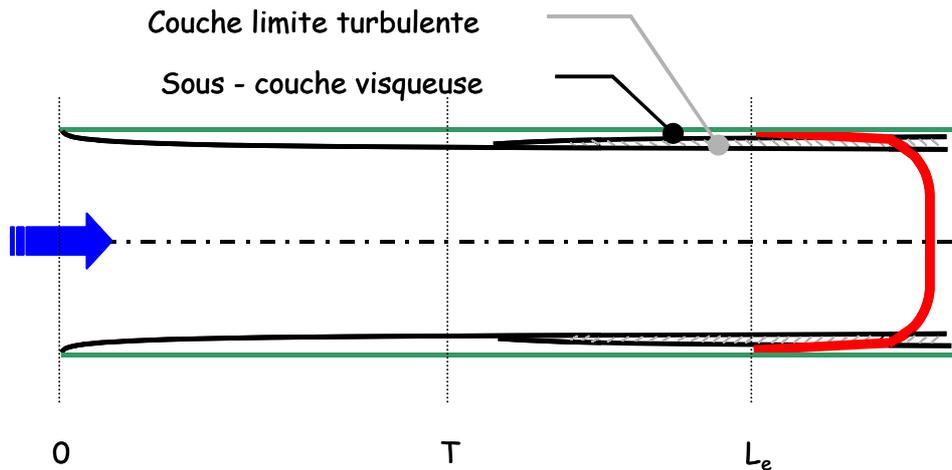


Figure 2.7 - Etablissement du profil de vitesse dans un conduit en écoulement turbulent

Dans notre situation où nous nous intéressons au réentraînement des particules déposées en tas sur une surface, on peut supposer que la couche limite qui va se développer sur la surface, va voir ses caractéristiques se modifier. En effet, le tas de poudre peut être assimilé à une rugosité naturelle de la surface, susceptible de modifier les profils des vitesses en particulier dans la zone interne (Foucault, 1994). Rappelons que la référence en matière de rugosité, utilisée par Nikuradse, est le grain de sable pour des écoulements de tuyaux établis (Midoux, 1985 ; Ryhming, 1991)).

Toutefois, d'un point de vue aéraulique, nous considérons la présence du tas de poudre dans BISE, comme un obstacle introduit dans l'installation. Nous nous limitons uniquement à une description fine de la couche limite dans la veine d'essai sans obstacle, ceci afin de déterminer les singularités de l'installation, à savoir si le régime de l'écoulement est établi ou non, les différentes épaisseurs de couches limites et surtout les vitesses de frottement calculées à partir des vitesses mesurées dans la couche limite. Nous caractérisons donc principalement l'écoulement incident au tas de poudre. Toutefois des mesures en présence d'un obstacle sont également réalisées afin d'observer l'évolution des profils de vitesse dans ces conditions.

#### 2.2.4.2. Mesures expérimentales

■ Nous effectuons des mesures de vitesses à proximité de la surface dans la zone centrale de la section d'essai, au niveau du dépôt de poudre, c'est à dire pour  $x = 0$  et  $y = 0$ . La Figure 2.8 présente les profils verticaux normalisés des vitesses dans BISE, pour les trois valeurs de vitesse au centre de la section  $V = 0,5$  ; 5 et 10 m/s. La sonde d'anémométrie choisie nous permet de nous approcher à 1 mm de la paroi suivant l'axe  $Oz$ , pour décrire la couche limite.  $H$  correspond à la hauteur de la veine parallélépipédique soit 7 cm.

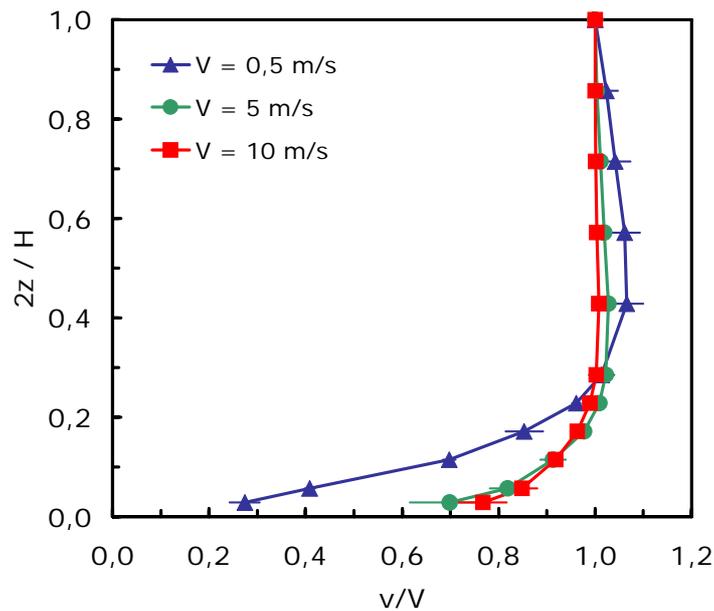


Figure 2.8 – Profils de vitesse à proximité de la surface à  $x = 0$  pour  $V = 0,5$  ; 5 et 10 m/s

Pour les vitesses de 5 et 10 m/s, les profils de vitesses normalisés observés sont relativement plats : l'écoulement semble bien suivre un profil de régime turbulent. Par contre, à 0,5 m/s, on constate que le profil de vitesse est beaucoup plus arrondi. Cela laisse donc supposer dans ce cas, que le profil est plus proche du régime laminaire.

A partir des trois vitesses précédentes, il nous est possible de déterminer certaines caractéristiques de l'écoulement. Nous pouvons calculer notamment le nombre de Reynolds de l'écoulement  $Re$  dans la veine et la longueur d'établissement  $L_e$  du profil des vitesses, tous deux définis respectivement par les relations ( 2.16 ) et ( 2.19 ). Ces données sont regroupées dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 – Caractéristiques de l'écoulement d'air dans BISE pour trois vitesses 0,5 ; 5 et 10 m/s

V (m/s)	Re (-)	$L_e$ (cm)
0,5	2900	-
5	29200	54
10	58400	64

Ce tableau confirme bien nos premières hypothèses évoquées. En effet, on remarque que, pour 5 et 10 m/s, les nombres de Reynolds du conduit sont bien supérieurs à 3000 ( $Re \geq \sim 30000$  et  $\sim 58000$ ). L'écoulement est donc bien turbulent dans cette gamme de vitesses. Toutefois, dans ces configurations, les longueurs nécessaires à l'établissement du régime turbulent dans la veine d'air, valent respectivement 54 et 64 cm. Or

l'installation BISE ne dispose que d'une longueur de 38 cm jusqu'au centre de la surface d'essai, pour permettre à la couche limite de se développer. Par conséquent, le régime turbulent n'est donc pas totalement établi dans BISE ; ce qui explique la raison pour laquelle les profils de vitesse de la Figure 2.8 ne sont pas complètement plats. Outre le fait que ces profils soient dépendants de la distance à l'entrée du conduit, cela ne doit pas avoir d'influence sur nos résultats expérimentaux.

Quant au profil de vitesse à 0,5 m/s, le nombre de Reynolds qui lui est associé dans la veine vaut 2900. L'écoulement se trouve donc dans la zone de transition entre le régime laminaire et le régime turbulent. Le profil de vitesse observé à la Figure 2.8 laisse tout de même penser que le régime est encore bien laminaire. Dans ce cas, la longueur d'établissement du profil parabolique vaut environ 10 m. Là encore, le régime n'est donc pas établi.

■ Nous mesurons également les profils verticaux d'intensité de turbulence (cf relation ( 2.4 )) à proximité de la paroi pour 0,5 ; 5 et 10 m/s au centre de la section. Ils sont présentés sur la Figure 2.9.

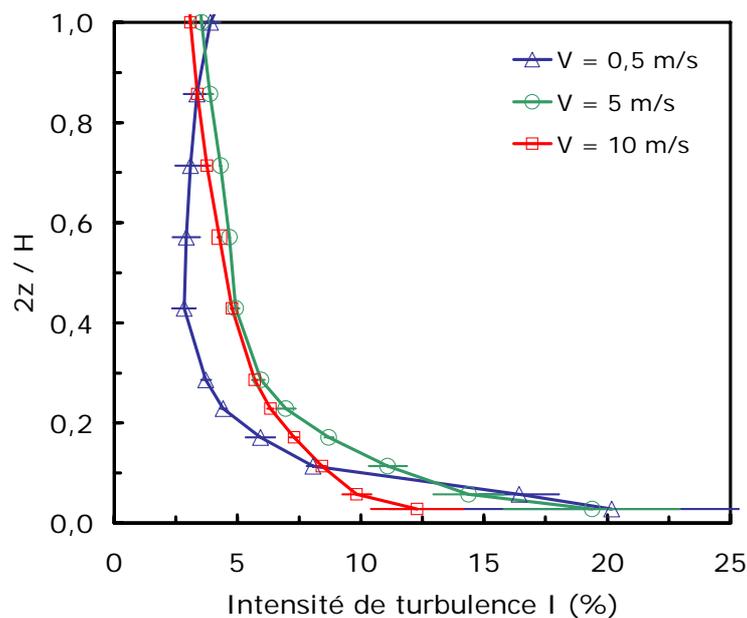


Figure 2.9 – Profils d'intensité de turbulence à proximité de la surface pour  $x = 0$  à  $V = 0,5$  ; 5 et 10 m/s

Les profils montrent que l'intensité de turbulence atteint 10 à 25 % à l'approche de la surface de base, quelle que soit la vitesse moyenne imposée dans l'installation : l'écoulement est donc instable et irrégulier au niveau de la couche limite. Pour des hauteurs supérieures à 1 cm (i. e.  $\frac{2z}{H} \geq 0,3$ ), on retrouve les valeurs des intensités de turbulence (de 2 à 5 %) observées sur les graphes de la Figure 2.5.

■ Afin de caractériser la zone interne de la couche limite, nous traçons également en représentation logarithmique, les profils de vitesse normalisée mesurés à l'anémométrie à fil chaud (Figure 2.10), en fonction des trois vitesses moyennes au centre de l'installation 0,5 ; 5 et 10 m/s. Chaque profil a été effectué deux fois.

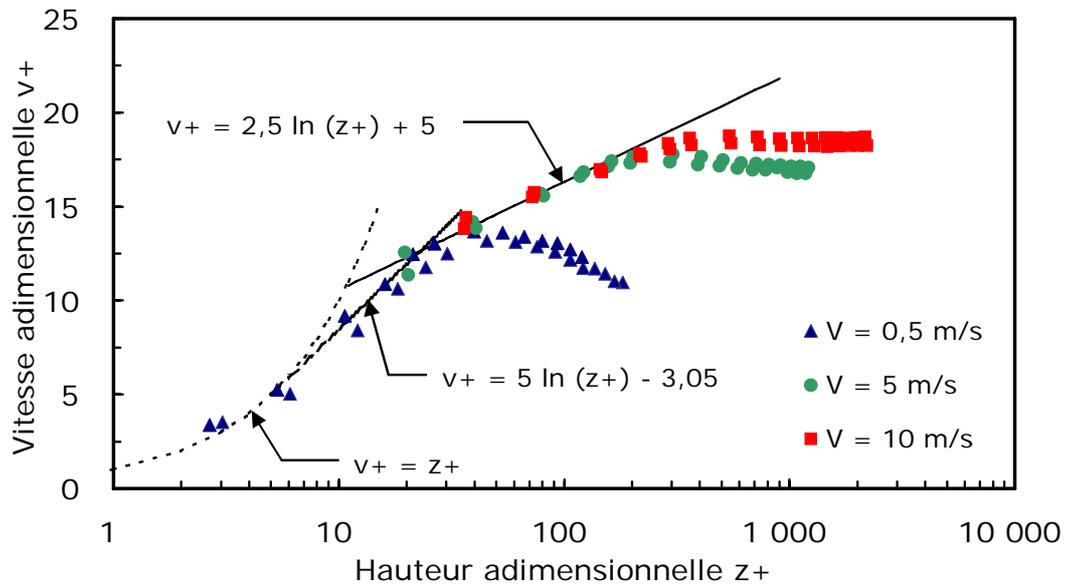


Figure 2.10 – Profils de vitesse normalisée en représentation logarithmique à  $x = 0$  et  $y = 0$  pour différentes vitesses moyennes

On constate que les vitesses mesurées sont en bon accord avec les résultats de la littérature pour une couche limite turbulente de plaque plane.

On y distingue les trois zones de la région interne :

- la sous-couche visqueuse où  $v_+ = z_+$  pour  $0 < z_+ < 5$ ,
- la zone de transition où  $v_+ = 5 \ln(z_+) - 3,05$  pour  $5 < z_+ < 30$ ,
- la zone logarithmique où  $v_+ = 2,5 \ln(z_+) + 5$  pour  $z_+ > 30$ . ( 2.20 )

Toutefois, dans la zone logarithmique, la relation ( 2.20 ) trouvée dans BISE s'ajuste mieux à nos résultats que l'équation ( 2.9 ), valable pour une surface parfaitement lisse. Cette relation diffère dans son second terme (5 au lieu de 5,5). Cette légère différence peut être attribuée à une protrusion (rugosité) provenant soit du bord de la surface d'essai, soit à l'espace (tout petit qu'il soit) entre la surface d'essai et la base de l'installation.

Enfin, on remarque que pour  $z_+ > 200$ , nos mesures effectuées pour les vitesses de 5 et 10 m/s en écoulement fortement turbulent, ne suivent plus la loi logarithmique. Ceci

peut s'expliquer par le fait que seul le profil de vitesse à proximité de la paroi peut être assimilé au cas d'une plaque plane. Ainsi, lorsque l'on se rapproche du centre de la veine, on ne peut plus considérer que l'installation BISE a une géométrie de surface plane (et pour cause...). Une autre explication serait liée au fait que le régime d'écoulement ne serait pas, soit turbulent (notamment pour la vitesse moyenne de 0,5 m/s), soit totalement établi. Ceci justifierait ainsi la « retombée » des mesures effectuées pour les hauteurs adimensionnelles  $z^+$  au centre de la veine.

■ Finalement, pouvant donc assimiler les profils de vitesse à proximité de la surface au cas d'une plaque plane, nous pouvons déterminer les épaisseurs de la couche limite à partir des expressions ( 2.14 ) et ( 2.15 ). Ces épaisseurs, calculées pour la longueur d'établissement spécifique de BISE de 38 cm, sont répertoriées dans le Tableau 2.3 :

**Tableau 2.3 – Valeurs des épaisseurs de couche limite à différentes vitesses**

<b>V</b> <b>(m/s)</b>	<b>Re<sub>y</sub></b> <b>(-)</b>	<b>δ</b> <b>(mm)</b>
0,5	14000	17
5	133400	13
10	255400	12

Ces valeurs d'épaisseur de la couche limite ont leur importance dans le phénomène de réentraînement, puisqu'elles vont notamment déterminer les caractéristiques de l'écoulement à proximité du dépôt de poudre. Ce dernier ne sera pas exposé au même profil de vitesse suivant que sa hauteur sera supérieure ou non à l'épaisseur de la couche limite. Il était donc important de pouvoir caractériser correctement ces valeurs.

#### **2.2.4.3. Vitesse de frottement**

La description de la couche limite nous permet aussi de déterminer les vitesses caractéristiques de frottement  $v_*$  dans BISE. Les résultats de nos mesures effectuées à proximité de la surface indiquent que les profils sont relativement proches de ceux d'une plaque plane. A partir de ces résultats, nous déterminons alors les vitesses caractéristiques  $v_*$  de frottement dans BISE selon deux méthodes.

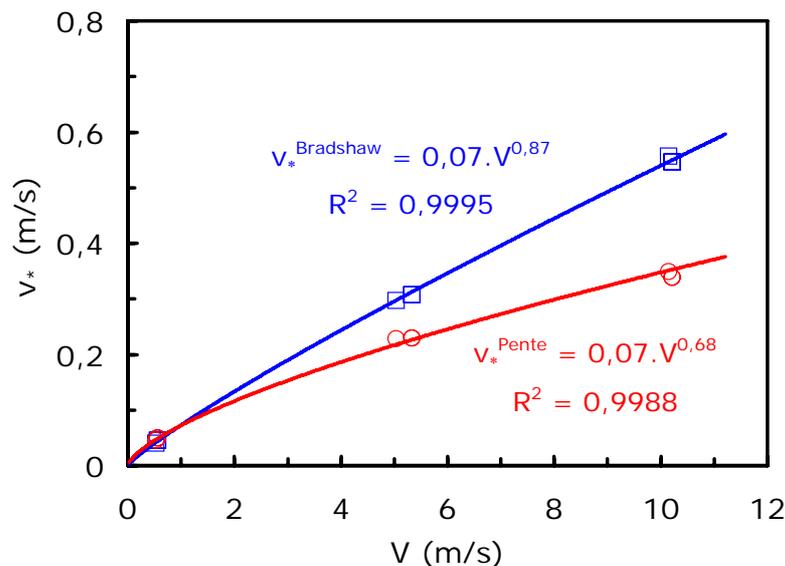
✓ *La méthode de la pente à l'origine :*

Par cette méthode, les vitesses de frottement s'obtiennent à partir du gradient de vitesse pour une mesure de vitesse effectuée à proximité de la paroi.

✓ *La méthode de Bradshaw :*

Cette méthode qui est peu utilisée, est décrite par Leprince *et al.* (1985). Elle consiste à trouver sur le profil de vitesse expérimental, le point correspondant à une valeur fixée de la hauteur adimensionnelle  $z^+$  dans la zone de la couche limite décrite par une loi logarithmique. La vitesse de frottement est alors obtenue graphiquement à partir de la vitesse adimensionnelle  $v^+$  au même point.

La Figure 2.11 montre les vitesses de frottement  $v_*$  obtenues pour la méthode de Bradshaw et la méthode de la pente à l'origine en fonction de la vitesse de référence  $V$  au centre de la section. Pour chacune des deux méthodes, deux séries de mesures ont été réalisées.



**Figure 2.11 - Evolution de la vitesse de frottement à la paroi  $v_*$  en fonction de la vitesse moyenne  $V$  dans l'installation BISE**

On remarque que la méthode de la pente donne une vitesse de frottement inférieure à celle de Bradshaw, l'écart augmentant en fonction de la vitesse moyenne. En effet, pour  $5 < V < 10$  m/s, l'écart obtenu entre les deux méthodes varie entre 20 et 35 %. Nous attribuons ce décalage à la méthode de la pente qui impose que le point utilisé pour calculer la vitesse de frottement soit dans la sous-couche laminaire à  $z^+ < 5$ , ce qui correspond à  $z = 2,2$  mm pour 0,5 m/s et  $z = 0,3$  mm pour 10 m/s. Or, comme nous

l'avons vu précédemment, notre système de positionnement ne nous permet pas de placer la sonde d'anémométrie au-dessous de  $z = 1$  mm. La méthode de Bradshaw, quant à elle, ne nécessite pas de déterminer de façon précise la zone de la loi logarithmique. Des études comparatives (Leprince *et al.*, 1985) mettent en évidence que la méthode de Bradshaw donne des valeurs de vitesse de frottement avec une meilleure précision. Des mesures que nous avons effectuées avec une sonde d'anémométrie de géométrie différente dans BISE, confirment d'ailleurs cette tendance.

Un ajustement sur les points expérimentaux nous permet de déduire des corrélations entre la vitesse de frottement et la vitesse moyenne dans la veine. La corrélation retenue pour l'installation BISE est donc celle que nous avons obtenue avec la méthode de Bradshaw sur les deux séries d'expériences réalisées, à savoir :

$$v_* = 0,07 \cdot V^{0,87} \quad (2.21)$$

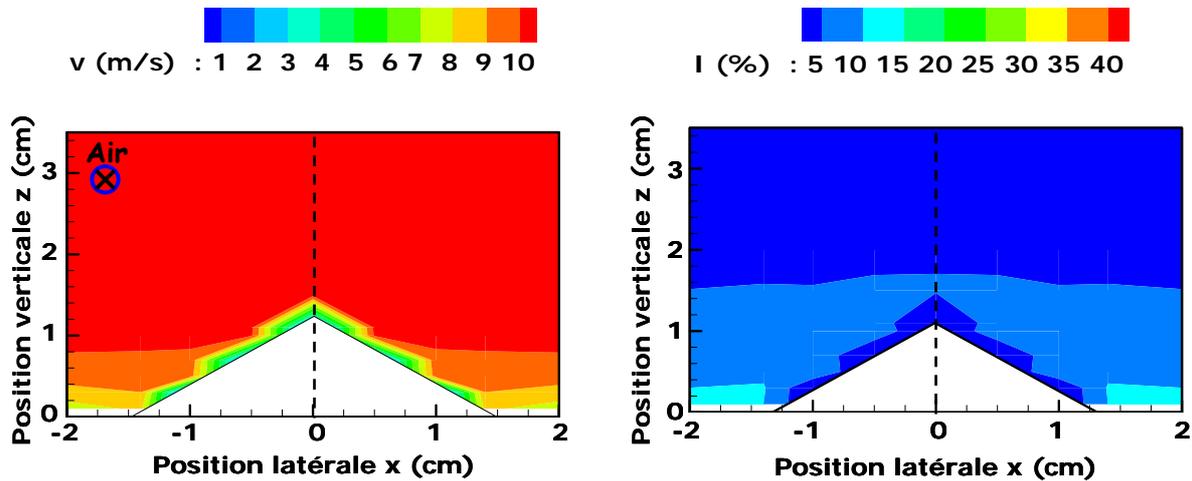
Pour des vitesses variant de 0,5 à 10 m/s, les vitesses de frottement de l'air à la paroi  $v_*$  varient donc de 0,05 à environ 0,6 m/s.

Une comparaison de cette expression de la vitesse de frottement ( 2.21 ) avec la relation ( 2.3 ) calculée de façon théorique peut être faite. En assimilant la vitesse moyenne de l'installation à la vitesse au centre de la veine, on constate que ces deux expressions sont très proches. Cette similarité des expressions confirme le choix que nous avons fait quant à retenir la méthode de Bradshaw (et non celle de la pente) pour déterminer les vitesses de frottement dans l'installation.

#### **2.2.4.4. Couche limite au voisinage d'un obstacle conique**

Bien entendu, l'introduction d'un dépôt de poudre dans l'installation va modifier les caractéristiques de l'écoulement. Afin de pouvoir observer l'évolution du profil de vitesse à proximité du dépôt, nous avons réalisé un moule en aluminium de géométrie et de dimensions identiques au tas de poudre que nous utilisons dans nos expériences (cf. chapitre 3, Tableau 3.5, *Cône H, d*). Celui-ci est alors placé dans l'installation sur la surface d'essai et des mesures de vitesse et de turbulence à l'anémométrie fil chaud sont conduites au voisinage du cône. Nos résultats pour une vitesse moyenne de 10 m/s dans le plan  $(y,z)$  à  $x = 0$  sont présentés sur les graphes de la Figure 2.12. Dans le § 2.2.3, nous avons constaté que les vitesses étaient relativement homogènes dans cette section. Ainsi, suite à quelques essais préliminaires sur l'ensemble de la section, nous réalisons seulement des mesures dans la zone  $-2 \leq x \leq 0$  en déplaçant le cône, et non la sonde

suyant  $x$ . Ceci nous permet d'avoir un plus grand nombre de points de mesures dans cette direction. En effet, les presse-étoupe positionnés dans l'installation (cf. Figure 2.4) imposent des mesures à des distances  $x = 1,4$  cm. Cette méthode nous permet de diminuer cet intervalle à  $x = 0,5$  cm. Nos points expérimentaux sont ensuite reportés par symétrie suivant un axe vertical centré en  $x = 0$ .



La courbe irrégulière observée sur les graphes provient d'un artéfact lié à la représentation. En effet, il n'est pas possible d'interpoler les valeurs entre deux mesures réelles, d'où les pas représentés en « escalier ».

Dans le plan perpendiculaire à l'écoulement d'air, le champ de vitesse à proximité de la paroi et au voisinage de l'obstacle conique, met en évidence qu'une couche limite se développe le long de la surface du cône. Cette couche limite est parallèle à la surface du cône et du fait de la pente, la vitesse de frottement  $v_*$  augmente de la base au sommet du tas. L'intensité de turbulence, quant à elle, est peu modifiée par la présence du cône dans la section  $(x,z)$  : elle est inférieure à 5 % dans la partie centrale de la veine et tend vers 15 % à proximité de la surface de l'installation.

Nous effectuons également des mesures de vitesse et de turbulence pour une vitesse moyenne de 10 m/s avec le cône de simulation dans le plan  $(y,z)$ , c'est à dire dans la direction principale de l'écoulement. Pour ce faire, nous considérons que, sur quelques centimètres, le profil de vitesse n'évolue que très peu. Ainsi et comme précédemment, nos mesures sont effectuées en déplacement le cône suivant l'axe  $y$ , son centre se trouvant en  $x = 0$ . Nos résultats sont représentés en vitesse et en intensité de turbulence sur la Figure 2.13.

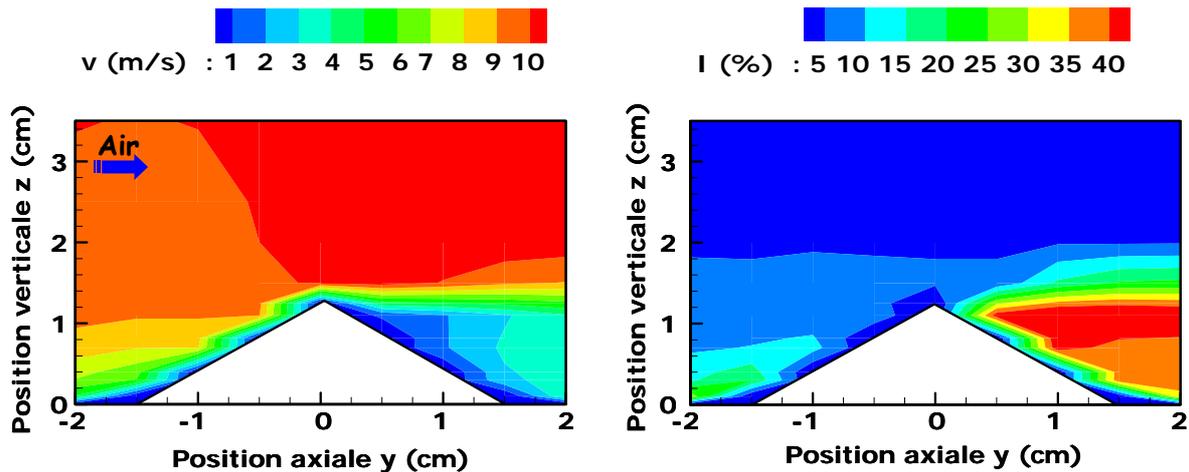


Figure 2.13 – Champs de vitesse (à gauche) et de turbulence (à droite) dans la section  $(y,z)$  à  $x = 0$  à proximité de la surface et en présence d'un obstacle conique pour une vitesse moyenne de 10 m/s

Comme attendu, la présence du cône dans la section  $(y,z)$  modifie de façon non négligeable les caractéristiques de l'écoulement à proximité de la surface. En effet, au centre de la section, on retrouve une vitesse relativement homogène associée à une intensité de turbulence très faible ( $< 5\%$ ). Par contre, au niveau du cône, les propriétés de l'écoulement diffèrent.

Nous sommes alors amenée à décomposer le phénomène, du point de vue aérodynamique, en deux parties :

- en *amont du tas*, c'est à dire sur la face du cône exposée directement à l'écoulement d'air.
- en *aval du tas*, c'est à dire sur la face du cône abritée de l'écoulement d'air.

En amont, on observe comme à la Figure 2.12, qu'une couche limite se développe le long de la surface du moule conique. Toutefois, celle-ci est plus épaisse et une turbulence plus importante lui est associée, puisqu'elle atteint 25 %.

Tout de suite en aval du dépôt, on remarque essentiellement une zone de cisaillement qui prend appui au sommet du cône, et une zone de recirculation d'air. Cette dernière se trouve derrière le cône soumis à l'écoulement et est formée par un gros tourbillon (sillage). Dans cette zone en dépression et abritée du vent, on observe une chute rapide des vitesses (jusqu'à 1 m/s) dès lors que l'on se trouve à une hauteur inférieure à celle du cône, et le taux de turbulence est très important.

Ces différentes observations seront responsables, comme nous le verrons plus tard au chapitre 4, au moins en partie, du réentraînement des particules.

### 2.2.5. Accélération

Notre installation permet enfin de contrôler l'accélération au démarrage de l'écoulement dans le circuit principal grâce à une vanne électropneumatique à vitesse d'ouverture réglable. La rotation de l'électrovanne se fait par l'intermédiaire d'un actionneur pneumatique à double effet air/air (Keystone type 79D-012).

Nos mesures des vitesses de rotation de la vanne montrent que l'accélération est dépendante de la vitesse imposée dans le circuit principal. Les accélérations sont déterminées d'après les courbes d'établissement de la vitesse de l'air dans le circuit principal. Ces dernières sont mesurées par anémométrie à une fréquence d'acquisition de 500 Hz. Pour exemple, la Figure 2.14 présente deux évolutions temporelles de la vitesse au démarrage de l'écoulement d'air dans BISE Inactive, pour une vitesse imposée à 7,5 m/s (soit  $v_* = 0,4$  m/s). L'une est mesurée à l'accélération minimale, soit  $\alpha_{\min} = 0,3$  m/s<sup>2</sup>, l'autre correspond à l'accélération maximale soit  $\alpha_{\max} = 20$  m/s<sup>2</sup>.

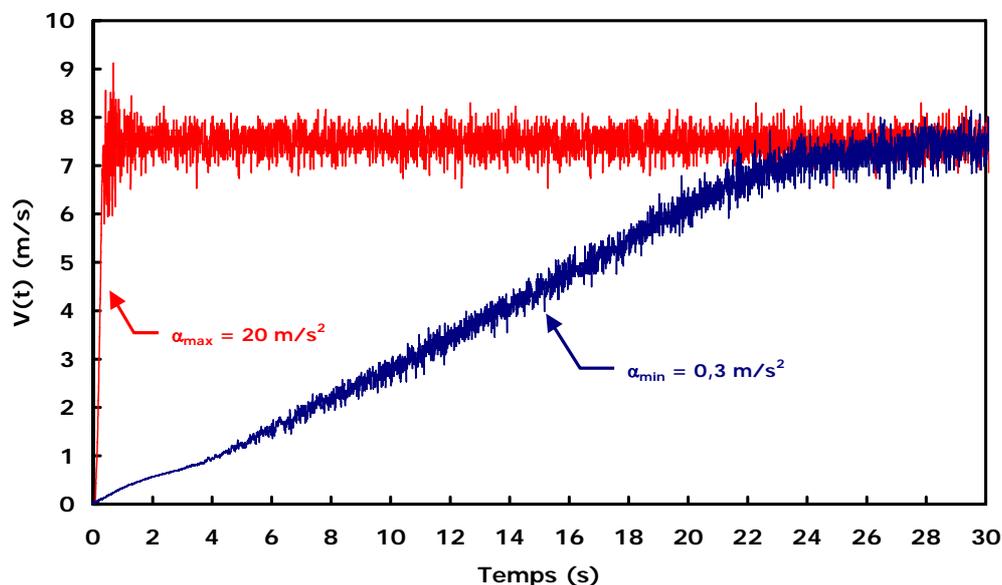


Figure 2.14 – Evolutions temporelles de la vitesse au démarrage de l'écoulement d'air dans BISE Inactive pour une vitesse moyenne imposée à 7,5 m/s

Nous calculons l'accélération à partir de l'analyse de la pente de montée en vitesse. On constate que pour les fortes accélérations, la phase transitoire très rapide génère une fluctuation importante des vitesses instantanées. De ce fait, ces vitesses instantanées

peuvent, sur une période très courte, être significativement plus élevées que la vitesse de l'air visée pour les essais. Nous verrons au § 4.2.3 que ceci peut avoir un effet sur le réentraînement.

Le Tableau 2.4 présente les domaines de variation de l'accélération pour différentes vitesses d'air.

**Tableau 2.4 – Gamme de variation de l'accélération au démarrage de l'écoulement d'air pour différentes vitesses**

<b>V (v*)</b> <b>(m/s)</b>	<b><math>\alpha_{\min}</math></b> <b>(m/s<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\alpha_{\max}</math></b> <b>(m/s<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}}</math></b>
0,5 (0,04)	0,05	2,6	~50
5 (0,28)	0,3	14,2	~50
7,5 (0,40)	0,3	20,0	~70
10 (0,52)	0,5	31,0	~60

On remarque que, pour une vitesse d'air spécifique, l'accélération varie d'un facteur d'environ 50 à 70. D'autre part, les domaines d'accélération se décalent avec la vitesse de stabilisation : pour  $V = 0,5$  m/s, l'accélération  $\alpha$  varie de 0,05 à 2,6 m/s<sup>2</sup> alors qu'elle est comprise entre 0,5 et 31 m/s<sup>2</sup> pour une vitesse de 10 m/s.

### **2.3. Conclusion**

■ Nous disposons donc d'une installation expérimentale au sein de laquelle l'air peut être véhiculé dans une gamme de vitesse comprise entre 0,5 et 15 m/s, et pour laquelle l'accélération au démarrage de l'écoulement est contrôlée. Ce dispositif est équipé également de différents capteurs de mesure permettant le contrôle de paramètres environnementaux tels que température, hygrométrie et pression.

■ Nos mesures aérauliques mettent en évidence que le banc BISE possède une bonne stabilité temporelle et une bonne uniformité spatiale au centre de la section d'essai, dans la zone où sera déposé le dépôt de poudre. L'utilisation de la technique d'anémométrie à fil chaud nous a permis de caractériser, notamment, les profils de vitesse et de turbulence à proximité de la surface. Nos résultats sont en bon accord avec la bibliographie pour une couche limite turbulente de plaque plane. De ces mesures, nous avons pu déterminer les caractéristiques importantes de l'installation à savoir les vitesses de frottement et les épaisseurs de couche limite dans la veine d'air. Ces caractéristiques indispensables de notre étude, pourront donc être utilisées pour déterminer les conditions de réentraînement par écoulement d'air des particules issues du dépôt de poudre.

■ Enfin, nos mesures de vitesse et de turbulence effectuées à proximité d'un obstacle conique simulant un tas de poudre, montrent combien l'ajout d'un obstacle dans la veine est à l'origine de modifications du profil de vitesse à proximité de la surface. Elles laissent également entrevoir que la mise en suspension, fortement dépendante de ce profil modifié, est un phénomène complexe, comme on pouvait le craindre. En effet, ce profil de vitesse devrait lui-même évoluer avec le mouvement des particules réentraînées dans l'écoulement.

### **3. Méthodologie expérimentale**

L'installation BISE évaluée, il nous faut apprécier notre méthode expérimentale. Il s'agit d'une part d'évaluer la technique de mesure choisie et d'autre part, de décrire la méthodologie adoptée.

Pour ce faire, nous commençons par présenter notre principe de mesure expérimentale et en déterminons ses limites tant au niveau de la technique que de la procédure expérimentale.

Devant le nombre de paramètres à étudier, une méthodologie expérimentale rigoureuse est utilisée, en partie, pour nos mesures : il s'agit des plans d'expériences. Nous la présentons donc, et déterminons les domaines expérimentaux des paramètres étudiés.

Comme nous l'avons indiqué au chapitre 1, peu d'études traitant de dépôts de poudre existent dans la littérature. On peut considérer que Fromentin (1989) est l'un des seuls auteurs à avoir effectué un travail théorique et expérimental assez complet sur la mise en suspension de particules en dépôt multicouches exposé à un écoulement turbulent. Il sera donc souvent cité pour référence et comparaison dans les paragraphes à venir, d'autant plus que notre méthode expérimentale est proche de la sienne.

### 3.1. Principe et évaluation des mesures

#### 3.1.1. Principe de la mesure

On définit la quantité de matière particulaire réentraînée comme étant la masse de matière qui aura quitté la surface d'essai pendant l'expérience. Nous devons choisir entre deux principes de mesures qui peuvent être mis en œuvre dans BISE, afin d'évaluer la quantité de particules réentraînées.

La première consiste à déterminer la variation de masse du dépôt de poudre sur la surface d'essai entre le début et la fin de l'expérience. La quantité de matière réentraînée  $\Delta m$  correspond alors à :

$$\Delta m = m_i - m_f \quad (3.1)$$

où  $m_i$  : masse initialement déposée sur la surface d'essai (dans notre cas, elle inclut la masse de la surface d'essai) (g),

$m_f$  : masse finale récupérée sur la surface d'essai (dans notre cas, elle inclut la masse de la surface d'essai) (g).

La seconde méthode consiste à déterminer la masse de poudre transférée sur le filtre de collection (positionné en aval de la surface d'essai par rapport à l'écoulement), ainsi que celle déposée entre la surface d'essai et le filtre au cours de l'expérience. La masse totale réentraînée correspond alors à la somme des deux quantités mesurées soit :

$$\Delta m = m_f + m_D \quad (3.2)$$

où  $m_f$  : masse de poudre transférée sur le filtre (g),

$m_D$  : masse déposée entre la surface d'essai et le filtre (g).

La technique d'analyse que nous envisageons afin de déterminer cette quantité de matière mise en suspension est une méthode gravimétrique fine (balance Sartorius MC 210 P de sensibilité 10  $\mu$ g) qui permet d'obtenir une mesure globale (masse totale) de la masse mise en suspension.

### 3.1.2. Limite de détection

Du fait de la grande variabilité que l'on peut attendre du phénomène de réentraînement, il était important de déterminer les limites expérimentales de notre méthodologie afin de donner un niveau de confiance suffisant à nos résultats.

Une première série d'expériences consiste à définir les limites de détection (LD) de nos méthodes expérimentales. Ces LD sont déterminées à partir de mesures de reproductibilité des pesées, en suivant un protocole équivalent à celui décrit dans la norme expérimentale ISO / CD 15767 (1999). Cette dernière décrit une méthodologie pour la détermination des limites de détections appliquées à la pesée de matière collectée sur des filtres de prélèvement. Les limites obtenues correspondent à la variation de masse au-dessous de laquelle on ne peut pas considérer qu'il y a eu disparition ou récupération de matière.

Pour la première méthode (variation de masse du dépôt sur la surface d'essai), nos mesures de reproductibilité sont effectuées sur un même dépôt et sur des dépôts similaires (i.e., dépôt de même nature et de même masse). Les dépôts sont conditionnés dans une boîte en plexiglas tout au long de l'expérience. Ainsi, notre limite de détection sur la surface d'essai  $LD_{SE}$  inclut la précision de la balance mais aussi les effets des paramètres environnementaux (température, hygrométrie, déplacements du dépôt...). Nous obtenons :

$$LD_{SE} = 0,1 \text{ mg}$$

En terme de fraction mise en suspension, cette valeur correspond à une fraction réentraînée  $K_R$  de  $2 \cdot 10^{-5}$  pour une masse de 5 g initialement déposée sur la surface d'essai.

En ce qui concerne la méthode par récupération de la poudre réentraînée, nous déterminons une limite de détection sur le filtre de collection. Suivant le même procédé, nous effectuons des mesures de reproductibilité intra et inter filtre. La limite de détection obtenue sur le filtre  $LD_F$  est alors de :

$$LD_F = 2,8 \text{ mg}$$

Cette limite est environ 30 fois plus importante que la  $LD_{SE}$  précédemment déterminée. De plus, la  $LD_F$  correspond à une fraction réentraînée  $K_R$  supérieure à  $6 \cdot 10^{-4}$  (pour 5 g de poudre initialement déposée sur la surface d'essai) puisqu'il s'agit

uniquement là de la fraction transférée sur le filtre. Nos expériences préliminaires montrent qu'environ 2/3 des particules réentraînées se déposent entre la surface d'essai et le filtre. Ainsi, cette  $LD_F$  correspond à un  $K_R \geq 2 \cdot 10^{-3}$ .

On peut noter que la valeur élevée de la  $LD_F$  provient essentiellement de la dimension importante du filtre ( $204 \times 253 \text{ mm}^2$ ) et de sa sensibilité par rapport aux conditions environnementales, principalement l'humidité.

La comparaison entre les deux LD nous amène donc dès à présent à écarter la seconde méthode pour les expériences où une mesure globale du réentraînement est recherchée. En effet, nous venons de voir que l'utilisation de la méthode par double pesée de la surface d'essai nous permet d'abaisser la valeur du  $K_R$  limite d'un facteur environ 90. D'autre part, sa facilité de mise en œuvre a pour conséquence une plus grande maîtrise de la méthode et donc une meilleure reproductibilité à long terme.

Si nous comparons notre résultat à ceux de Fromentin (1989) pour des conditions similaires, on s'aperçoit que la  $LD_{SE}$  que nous avons déterminée est tout à fait convenable. En effet, nous évaluons le  $K_R$  limite des travaux de Fromentin à environ  $10^{-4}$  pour une masse initiale de poudre comprise entre 3 et 30 g. Nous gagnons donc au minimum un facteur 50.

Tous nos résultats expérimentaux présentés dans la suite de notre étude sont donc obtenus à partir de la méthode de double pesée de la surface d'essai, que nous dénommons DPS.

Pour les valeurs de mise en suspension très proches de la limite de détection  $LD_{SE}$ , nous décidons arbitrairement que, si  $K_R \leq \frac{LD_{SE}}{2}$ , nous lui attribuons la valeur  $\frac{LD_{SE}}{2}$ . Pour des valeurs de  $K_R > \frac{LD_{SE}}{2}$ , la valeur obtenue de  $K_R$  est conservée.

### 3.1.3. Estimation des incertitudes sur les résultats de mesure

Pour chacun de nos résultats expérimentaux, nous calculons l'incertitude de mesure expérimentale lui correspondant. Pour des raisons que nous justifions au chapitre 4 (grand domaine de variation de  $K_R$ ), cette incertitude est effectuée sur le logarithme décimal de la fraction réentraînée  $K_R$ .

■ Expérimentalement, la fraction réentraînée  $K_R$  décrite par l'équation ( 1.1 ) est déterminée par la relation :

$$K_R = \frac{m_i - m_f}{m_i - m_{SE}} \quad (3.3)$$

où  $m_{SE}$  : masse de la surface d'essai.

Nous pouvons donc estimer la variance sur le calcul du Log  $K_R$  par l'équation :

$$\sigma^2(\text{Log } K_R) = \left( \frac{\partial \text{Log } K_R}{\partial m_i} \right)^2 \sigma^2(m_i) + \left( \frac{\partial \text{Log } K_R}{\partial m_f} \right)^2 \sigma^2(m_f) + \left( \frac{\partial \text{Log } K_R}{\partial m_{SE}} \right)^2 \sigma^2(m_{SE}) \quad (3.4)$$

La surface d'essai ( $m_{SE}$ ), la surface d'essai ajoutée de la masse initiale de poudre ( $m_i$ ) et la surface d'essai avec la poudre finale ( $m_f$ ) sont pesées systématiquement trois fois à chaque expérience. Ainsi la valeur du Log  $K_R$  est déterminée à partir de la moyenne obtenue respectivement sur ces trois éléments. Quant à leurs variances  $\sigma^2(m_{SE})$ ,  $\sigma^2(m_i)$  et  $\sigma^2(m_f)$ , elles correspondent au carré de l'écart-type expérimental obtenu sur les trois pesées, soit respectivement :

$$\sigma^2(m_{SE}) = \frac{n \sum m_{SE}^2 - (\sum m_{SE})^2}{n(n-1)} \quad (3.5)$$

$$\sigma^2(m_i) = \frac{n \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2}{n(n-1)} \quad (3.6)$$

$$\sigma^2(m_f) = \frac{n \sum m_f^2 - (\sum m_f)^2}{n(n-1)} \quad (3.7)$$

avec  $n$  : nombre de pesée répétées (ici  $n = 3$ ).

La variance du Log  $K_R$  ainsi calculée devrait nous donner une bonne estimation des mesures, du fait que les variances  $\sigma^2(m_{SE})$ ,  $\sigma^2(m_i)$  et  $\sigma^2(m_f)$  sont déterminées expérimentalement et non estimées théoriquement d'après les sources d'incertitude (précision de la balance...). Elle représente, en effet, la mesure de la dispersion des valeurs par rapport à la moyenne, le tout élevé au carré. L'écart type sur le Log  $K_R$   $\sigma(\text{Log } K_R)$  sera donc appelé écart type de mesure.

■ Nous exprimerons également un écart type de dispersion de nos résultats expérimentaux sur le Log  $K_R$   $\sigma'(\text{Log } K_R)$  ou écart type expérimental. Cet écart type sera

calculé suivant la relation ( 3.8 ) à partir des n fractions expérimentales obtenues pour des conditions initiales identiques :

$$\sigma'(\text{Log } K_R) = \sqrt{\frac{n \sum \text{Log } K_R^2 - (\sum \text{Log } K_R)^2}{n(n-1)}} \quad (3.8)$$

avec  $v' = n - 1$  : degrés de liberté.

A partir de l'ensemble de ces  $\sigma'(\text{Log } K_R)$ , il nous sera alors possible de calculer un écart type fusionné ou écart type expérimental de dispersion moyen qui prend en compte le nombre d'essais  $\sigma_{\text{exp}}$  :

$$\sigma_{\text{exp}} = \sqrt{\frac{\sum v' \sigma'(\text{Log } K_R)^2}{\sum v'}} \quad (3.9)$$

avec  $v_{\text{exp}} = \sum v'$  : degrés de liberté fusionné.

#### 3.1.4. Evaluation de la procédure de pesée

Une autre série d'expériences nous permet d'évaluer la méthodologie DPS. Pour cela, nous adoptons deux procédures de pesée A et B.

La méthode A consiste à faire des pesées successives sur un même dépôt (le dépôt est donc introduit et retiré de BISE pour être pesé à l'issue de chaque période d'exposition).

La seconde méthode B consiste à réaliser des dépôts supposés identiques qui sont exposés à différentes durées.

La Figure 3.1 montre les résultats que nous avons obtenus en terme d'évolution de la fraction réentraînée moyenne  $\overline{K_R}$ , en fonction de la durée d'exposition  $\Delta t$  pour les deux méthodes. Ces mesures ont été conduites pour une vitesse de 10 m/s et une granulométrie de diamètre médian de 27,3  $\mu\text{m}$ . Les intervalles de confiance à 95 % représentent la dispersion des résultats sur 3 expériences. Afin de comparer nos deux procédures de pesée, nous avons effectué des régressions sur les points expérimentaux

de chaque méthode à l'aide du logiciel LUMIERE<sup>1</sup>. Nos analyses montrent que les régressions de la forme

$$K_R = a_0 + a_1 \text{Log}(\Delta t)$$

représentées en trait plein (méthode A) et en pointillés (méthode B) sur la Figure 3.1, sont celles qui s'ajustent au mieux à nos données.

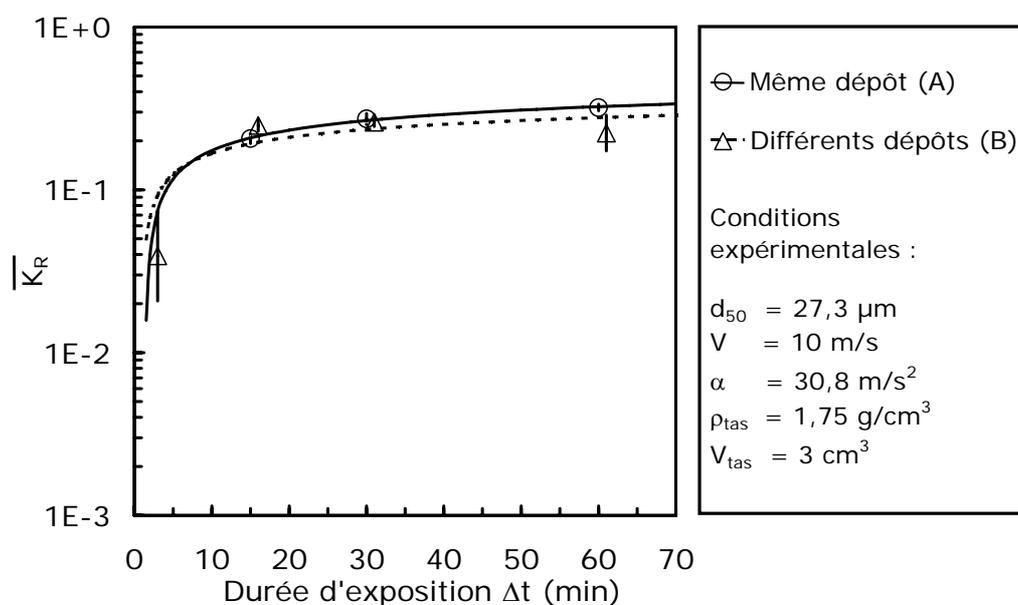


Figure 3.1 – Evolution de la fraction  $K_R$  en fonction de la période d'exposition  $\Delta t$  pour un même dépôt et pour des dépôts différents

Nous effectuons des tests de comparaison (Student) sur les coefficients des deux régressions, afin d'évaluer si les procédures de pesée, ne conduisent pas à des fractions réentraînées  $K_R$  significativement différentes. Nos résultats sont donnés dans le Tableau 3.1 :

Tableau 3.1 – Test de comparaison des régressions de type  $K_R = a_0 + a_1 \log(\Delta t)$  obtenues sur les méthodes A et B

	Méthode A	Méthode B	$t_{obs}$	$t_{0,975} (v')$
$a_0$	-0,0181	0,0249	0,59	2,78 (4)
$\sigma(a_0)$	0,0062	0,0728		
$a_1$	0,1925	0,1419	0,91	2,78 (4)
$\sigma(a_1)$	0,0047	0,0557		

$t_{obs}$ , valeur observée du test de Student,

$t_{0,975}$ , valeur critique du test de Student à 97,5 % de confiance.

<sup>1</sup> Le logiciel LUMIERE est commercialisé par la société S.I.E.R..

Pour les deux coefficients  $a_0$  et  $a_1$ , on a  $t_{\text{obs}} < t_{0,975}$ . Ceci signifie que les coefficients des régressions ne sont pas significativement différents. En d'autres termes, nos expériences donnent des résultats semblables quelle que soit la méthode de mesure utilisée.

Des mesures de  $K_R$  sont également réalisées dans d'autres conditions expérimentales avec les deux procédures de pesées. Les comparaisons sont effectuées sur une durée d'exposition de  $\Delta t = 15$  min à une vitesse de 3 m/s et pour des granulométries de  $d_{50} = 27,3$  et  $58,7 \mu\text{m}$ . Ces derniers résultats permettent de confirmer les mesures précédentes.

Par ailleurs, la Figure 3.1 nous amène à faire plusieurs commentaires :

- Pour une  $\Delta t$  de 60 min, les mesures effectuées sur un même dépôt de poudre (méthode A) sont très légèrement supérieures à celles effectuées sur des dépôts différents (méthode B). Ceci peut s'expliquer par la méthodologie intrusive employée. Le dépôt, pour être pesé, doit subir des mouvements qui peuvent modifier et donc fragiliser sa structure. Cette fragilisation peut avoir pour conséquence une augmentation de la fraction réentraînée par rapport à la méthodologie utilisant des dépôts similaires, ce que nous observons.

- A partir d'environ 15 minutes et quelle que soit la méthodologie expérimentale, la fraction mise en suspension n'évolue pratiquement plus et tend vers une valeur limite. Nous développerons plus longuement ce point au chapitre 4.

- Pour un  $\Delta t$  égal à 2 min, nos conditions expérimentales nous conduisent à confondre nos deux procédures de pesées.

Compte tenu de la méthodologie expérimentale adoptée, basée sur les plans d'expériences (cf. § 3.2.1) et dans la mesure où de nombreux paramètres sont pris en compte lors des expériences, la procédure retenue pour la majorité des expériences consiste à supposer qu'il est possible de reproduire des tas similaires à chaque expérience. Un nouveau dépôt sera donc réalisé pour chacune d'entre elles (méthode B). Pour des raisons pratiques liées à la durée des expériences, seules les expériences étudiant l'effet de la durée d'exposition de l'écoulement sur la fraction réentraînée, seront effectuées avec la méthode A.

### **3.2. Matrice expérimentale**

Compte tenu de la complexité et de la variabilité attendue du phénomène physique que nous étudions, ainsi que du nombre important de paramètres qui peuvent entrer en jeu, nous avons choisi une démarche expérimentale basée sur les « plans d'expériences ». Bien entendu, nous n'allons pas faire une revue exhaustive des plans d'expériences. Nous nous contenterons de poser les bases nécessaires à la compréhension de notre travail.

#### **3.2.1. Les plans d'expériences**

Dans la suite du texte, nous utiliserons indifféremment la terminologie de facteur ou de paramètre pour désigner les éléments pouvant influencer la mise en suspension.

Les plans d'expériences constituent principalement une méthodologie de recherche expérimentale, qui permet d'obtenir les informations les plus fiables possibles en un minimum d'essais (Droesbeke *et al.*, 1997 ; Queffelec, 1999). Le terme « Plan d'Expériences » sera abrégé par PEx.

Dans notre étude où, nous l'avons vu, une vingtaine de paramètres sont susceptibles d'influencer le réentraînement (cf. chapitre 1), il est important de cibler nos expériences en utilisant une méthode rationnelle. Les plans d'expériences proposent une telle démarche : ils aident à exprimer au mieux le problème posé et proposent des stratégies expérimentales (planification d'expériences) optimales en fonction des objectifs fixés, des contraintes imposées et des moyens disponibles.

Par rapport à l'approche traditionnelle et intuitive qui consiste à faire varier un facteur à la fois, la méthodologie PEx a l'avantage de réduire le nombre d'essais, le temps et les coûts, tout en maximisant la quantité d'informations en retour. Toutefois, condition indispensable d'un PEx, les paramètres retenus pour le plan doivent pouvoir varier indépendamment les uns des autres, ceci aux dépens de la réduction de la gamme d'étude de certains facteurs.

Quatre étapes successives sont nécessaires à l'application d'un plan d'expériences.

- Une première étape consiste à définir le problème en s'interrogeant sur les objectifs techniques recherchés et les contraintes matérielles. Les facteurs influençant le

phénomène sont ensuite discriminés, le domaine expérimental étudié et les réponses caractérisant au mieux le phénomène, choisies.

■ Une seconde étape consiste à postuler un modèle mathématique (linéaire avec ou sans interaction, quadratique, etc...) décrivant le phénomène dans le domaine expérimental étudié puis à définir une stratégie expérimentale conditionnant le choix d'outils mathématiques appelés matrices expérimentales (plusieurs matrices d'expériences peuvent être définies, prévoyant ainsi plusieurs démarches possibles).

■ La troisième étape consiste à réaliser les expériences et à analyser les résultats.

■ La quatrième étape consiste à calculer les coefficients du modèle mathématiques et à confronter les résultats « statistiquement significatifs » avec les connaissances (dans notre cas, la physique du phénomène de réentraînement) et intuitions de l'expérimentateur.

Le but de notre étude expérimentale, rappelons-le, est d'apprécier, dans un premier temps, l'influence des paramètres prépondérants du réentraînement par écoulement d'air horizontal turbulent d'un dépôt de poudre polydispersée sur une surface.

Ainsi, avant l'établissement d'un premier plan d'expériences, il est nécessaire de choisir parmi les paramètres influant sur la mise en suspension, ceux que nous allons étudier. Chaque paramètre retenu doit ensuite faire l'objet d'une étude spécifique, afin de déterminer son domaine d'étude dans le cadre du plan d'expériences.

### **3.2.2. Choix des paramètres étudiés**

Notre étude bibliographique effectuée sur la mise en suspension nous a permis de recenser une vingtaine de paramètres susceptibles d'influencer le réentraînement (cf. § 1.3). Devant ce nombre important, nous devons faire des choix quant aux paramètres à retenir. Nous avons tenu compte :

- de l'importance des paramètres, accordée dans la littérature scientifique, par les différents auteurs d'études théoriques et expérimentales (cf. § 1.3),

- des contraintes expérimentales de BISE (gamme de vitesse et d'accélération, paramètres non contrôlables tels que la température et l'hygrométrie relative dans l'installation, ...),

- des contraintes d'indépendance de variation des paramètres pour les plans d'expériences (impossibilité, par exemple, de faire varier indépendamment la forme, la masse volumique et la masse de la poudre),

- des demandes de l'industriel (travail effectué avec un simulant des poudres radioactives  $\text{PuO}_2$ ,  $\text{UO}_2$  et  $\text{MOx}$ , reproduction au mieux des conditions de boîte à gants, conditions environnementales particulières...).

Les paramètres maîtrisables, c'est à dire ceux que nous allons faire varier et que nous retenons pour notre étude, sont au nombre de huit.

■ Quatre paramètres sont liés à la poudre :

- la distribution granulométrique de la poudre que nous caractériserons par son diamètre médian  $d_{50}$ ,

- la masse volumique tassée de la poudre  $\rho_{\text{tas}}$ ,

- les dimensions géométriques du tas de poudre,

- la teneur en eau de la poudre.

■ Un paramètre est lié à la surface de dépôt :

- la rugosité de la surface d'essai  $\text{Rug}_{\text{SE}}$ .

■ Trois paramètres sont liés à l'écoulement et à l'environnement :

- la vitesse de frottement de l'air à la paroi  $v_*$ ,

- l'accélération au démarrage  $\alpha$ ,

- la durée d'exposition  $\Delta t$ .

Deux autres paramètres « non maîtrisables » pour des raisons techniques dues principalement, à la localisation de l'installation, sont mesurés durant les expériences. Il s'agit de :

- la température ambiante  $T^\circ$ ,

- l'hygrométrie relative du milieu HR.

Lors des expériences, la température moyenne mesurée est de  $24 \pm 8^\circ\text{C}$  et l'humidité relative de  $44 \pm 26\%$  HR.

Un intérêt majeur de notre étude est de travailler dans des conditions de simulation de poudre radioactive. Il nous faut donc choisir des poudres simulantes des poudres de  $\text{PuO}_2$ ,  $\text{UO}_2$  et de MOx (mélange de  $\text{PuO}_2$  et de  $\text{UO}_2$ ) pour le réentraînement. Compte tenu des informations fournies par COGEMA, les poudres qui nous retenons pour notre étude sont des poudres d'oxyde d'aluminium  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . En effet, celles-ci présentent certaines propriétés physico-chimiques (distribution granulométrique, morphologie, densité apparente... cf. § 3.2.3.1) proches de celles des poudres  $\text{PuO}_2$ ,  $\text{UO}_2$  et MOx. D'autre part, les poudres d'alumine ont l'avantage de se trouver facilement dans le commerce à différentes granulométries, et sont peu coûteuses. Enfin, les particules d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  peuvent être obtenues sous différentes formes : grains arrondis ou structure à arêtes vives, laissant ainsi la possibilité de faire varier le paramètre « morphologie des particules » dans des études futures. Les alumines que nous utilisons dans notre étude sont commercialisées par la société Durmax.

### 3.2.3. Détermination des domaines expérimentaux

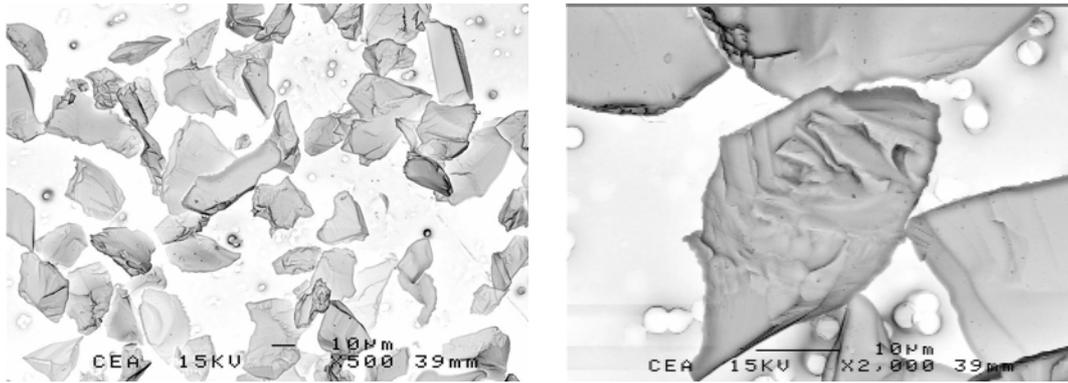
Comme nous l'avons déjà indiqué, l'utilisation des PEx impose aux paramètres choisis de varier indépendamment les uns des autres. Chacun des huit facteurs retenus a donc fait l'objet d'une étude spécifique afin de déterminer leur domaine d'étude dans les conditions de BISE Inactive et pour les plans d'expériences.

#### 3.2.3.1. Paramètres liés à la poudre

##### ■ Distributions granulométriques des poudres d' $\text{Al}_2\text{O}_3$

Nos poudres d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  ont l'avantage d'avoir les propriétés communes suivantes :

- une densité réelle de l'ordre de  $3,9\text{ g/cm}^3$ ,
- une densité apparente comprise entre 1 et  $1,5\text{ g/cm}^3$  (cf. dans ce chapitre, § Masse volumique des poudres),
- une structure des particules en arêtes vives comme le montre les photographies de la Figure 3.2, réalisées sur la poudre SPM 91 au Microscope à Balayage Electronique. La photographie de gauche correspond à un grossissement  $\times 500$ , celle de droite à un grossissement  $\times 2000$ .



**Figure 3.2 – Echantillons d’images de particules d’alumine Duramax (SPM 91) effectués au Microscope à Balayage Electronique**

Des mesures effectuées avec un analyseur de formes (SYSMEX) de la société Malvern nous permettent de déterminer la circularité de ces particules (rapport du périmètre du cercle de la surface équivalente sur le périmètre de la particule considérée). Les particules d’alumine SPM 91 ont ainsi un indice de circularité moyenne de 0,77 avec une dispersion d’environ 20 %. La poudre est donc constituée en faible proportion de particules plutôt allongées.

De plus, plusieurs distributions granulométriques de ces poudres sont disponibles. Cherchant à balayer la gamme de taille de particules de quelques micromètres à environ 100  $\mu\text{m}$ , nous sélectionnons cinq poudres polydispersées. Afin de vérifier que les différentes distributions granulométriques choisies recouvrent bien l’étendue de la gamme souhaitée, nous effectuons des analyses à l’aide d’un Coulter Multisizer IIE.

Pour ce faire, les échantillons de poudre sont mis en suspension, à faible concentration, dans une solution électrolyte + glycérol. On fait alors passer les particules solides à analyser au travers d’un orifice calibré, plongé dans cet électrolyte. Chaque fois qu’une particule pénètre dans l’orifice, elle déplace un volume d’électrolyte égal à son propre volume, ce qui engendre une variation de l’impédance de base proportionnelle au volume déplacé. Il en résulte une impulsion électrique générée par chaque particule passant à travers l’orifice, la hauteur de l’impulsion étant proportionnelle au volume de la particule. On peut ainsi obtenir le diamètre équivalent en volume de cette particule. Par voie de conséquence, le passage aléatoire d’un grand nombre de particules de la solution nous permet de remonter à la distribution granulométrique de l’échantillon, les particules étant rangées par classe granulométrique.

La Figure 3.3 regroupe les cinq distributions granulométriques des poudres d’alumine obtenues en volume (%) en fonction du diamètre équivalent en volume.

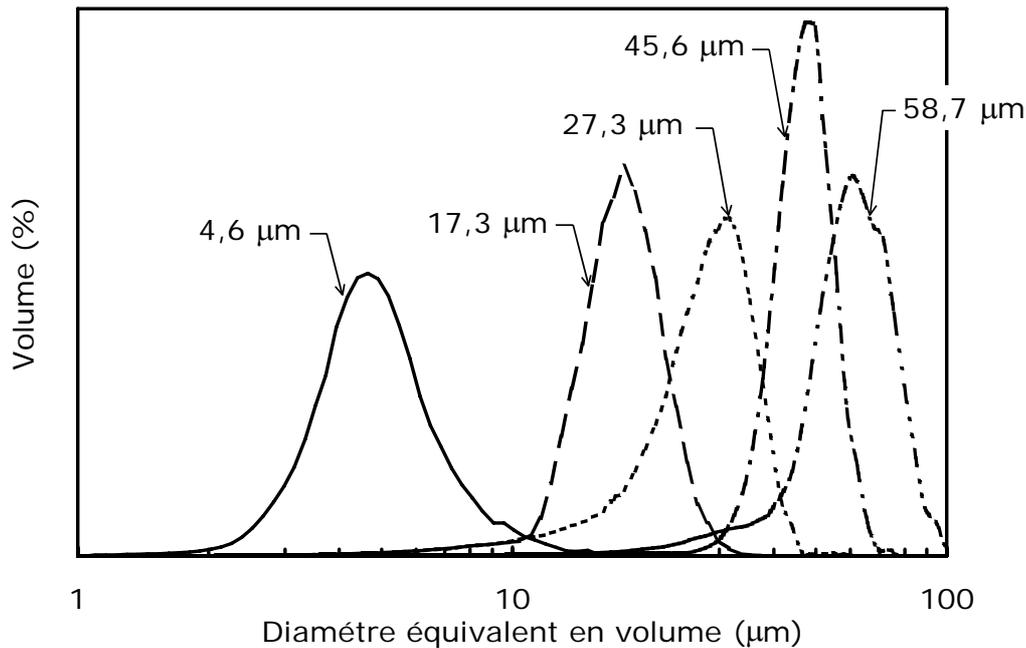


Figure 3.3 - Distributions granulométriques en volume des poudres d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Durmax)

On voit donc que l'utilisation de ces poudres nous permet bien de recouvrir la gamme entre quelques micromètres et 100  $\mu\text{m}$ .

D'autre part, les écarts types géométriques  $\sigma_g$  calculés à partir de ces distributions et reportés dans le Tableau 3.2, ont une valeur en moyenne de  $1,3 \pm 0,1$  : ils sont pratiquement constants quelle que soit la poudre considérée. La répartition en taille des particules autour du diamètre médian  $d_{50}$  est donc proportionnellement la même d'une poudre à l'autre. Nous sommes donc en possession de poudres homogènes en distribution et faiblement dispersées.

Tableau 3.2 – Distributions granulométriques des poudres d' $\text{Al}_2\text{O}_3$

$\text{Al}_2\text{O}_3$	$d_{50}$	$\sigma_g$	0 % <	10 % <	50 % <	90 % <	100 % <
<i>Durmax</i>	( $\mu\text{m}$ )	(-)	( $\mu\text{m}$ )				
<i>SPM 102</i>	<b>4,6</b>	<b>1,4</b>	1,0	3,2	4,6	7,2	22,0
<i>SPM 91</i>	<b>17,3</b>	<b>1,2</b>	2,0	12,8	17,3	22,5	58,0
<i>SPM 84</i>	<b>27,3</b>	<b>1,3</b>	2,0	16,0	27,3	35,6	54,9
<i>SPM 52</i>	<b>45,6</b>	<b>1,2</b>	2,8	36,4	45,6	54,8	73,4
<i>SPM 47</i>	<b>58,7</b>	<b>1,3</b>	4,0	40,6	58,7	75,5	99,6

Pour que ces distributions granulométriques soient correctement représentées lors de nos expériences, il est nécessaire d'homogénéiser la poudre utilisée avant chaque

manipulation. Pour ce faire, avant la prise de l'échantillon, la poudre est homogénéisée à l'aide d'un mélangeur (Turbula T2C) pendant environ 15 min.

#### ■ Teneur en eau des poudres d' $Al_2O_3$

Afin de déterminer la teneur en eau des poudres utilisées, nous utilisons la méthode classique de l'étuve. Ainsi, trois échantillons de chaque alumine étudiée sont pesés puis mis à l'étuve à une température de 180°C. L'évolution de la masse des échantillons est alors suivie au cours du temps. Avant chaque pesée, les échantillons sont sortis de l'étuve et placés dans un dessiccateur, ce qui permet au produit de se refroidir en présence d'air sec.

La Figure 3.4 présente l'évolution temporelle de la masse d'eau évaporée pour les aluminés SPM 102, SPM 84 et SPM 47. Nos résultats sont représentés avec un intervalle de confiance à 95 %. Les données sont reliées par des droites afin de mettre en évidence plus facilement la tendance observée.

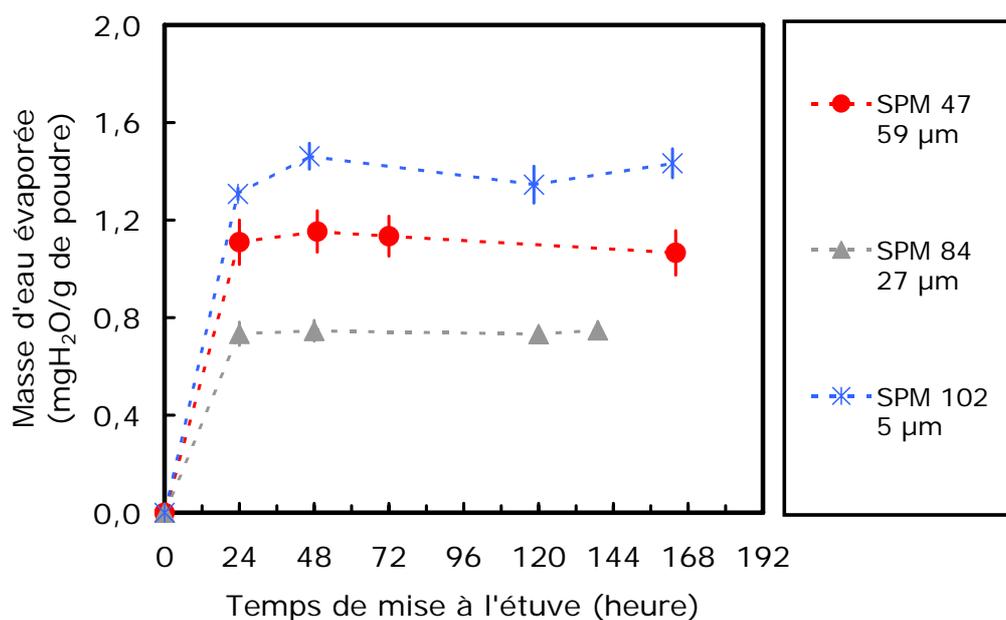


Figure 3.4 - Evolution de la masse d'eau évaporée pour différentes aluminés (Etuve à 180 °C)

On remarque qu'à partir de 24 h de séchage, la masse d'eau évaporée de chaque poudre tend à se stabiliser. Elle ne varie plus qu'avec un coefficient de variation inférieur ou égal à 3 %. On peut donc estimer qu'au bout de 24 h, les poudres ne contiennent plus d'eau et sont sèches. Dans ces conditions, leur teneur en eau est de 0 mgH<sub>2</sub>O par gramme de poudre.

Le Tableau 3.3 indique les teneurs en eau des différentes poudres d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> à l'état ambiant (c'est à dire pour T ~ 20 °C, P = 1 bar et 40 < HR < 50 %) obtenues, entre autres, à partir des résultats de la Figure 3.4 à 24 h. Ces données sont complétées par d'autres mesures effectuées sur les cinq poudres après un temps de séchage de 24 h.

**Tableau 3.3 – Teneur en eau des poudres d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> à l'ambiance**

<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Durmax</i>	Teneur en H <sub>2</sub> O (mgH <sub>2</sub> O/g)	Coefficient de variation (%)	Nombre d'échantillons
<i>SPM 102 – d<sub>50</sub>= 5 μm</i>	1,3	3	3
<i>SPM 91 – d<sub>50</sub>= 17 μm</i>	0,8	10	3
<i>SPM 84 – d<sub>50</sub>= 27 μm</i>	0,8	8	7
<i>SPM 52 – d<sub>50</sub>= 46 μm</i>	1,0	11	12
<i>SPM 47 - d<sub>50</sub>= 59 μm</i>	1,1	7	10

On observe que les teneurs en eau des poudres SPM 102 et SPM 47 sont de l'ordre de 1,2 mgH<sub>2</sub>O/g. Les poudres SPM 91 et SPM 84, quant à elles, ont une teneur en eau légèrement plus faible de 0,8 mgH<sub>2</sub>O/g. Ces légères différences ne devraient pas avoir de conséquence particulière sur les résultats. Toutefois, comme il est difficile, pratiquement, d'obtenir une poudre à teneur en eau intermédiaire (c'est à dire de 0,5 mgH<sub>2</sub>O/g), on gardera à l'esprit les tendances observées pour l'analyse statistique de nos résultats expérimentaux.

Le domaine d'étude de la teneur en eau de ces poudres est donc compris entre 0 et environ 1 mgH<sub>2</sub>O/g de poudre avec un coefficient de variation d'environ 20 % sur les cinq poudres. Toutefois, pour des raisons techniques, seules des expériences aux valeurs extrêmes du domaine seront effectuées.

Dans la mesure où les poudres sèches sont introduites dans l'installation pour les expériences, il est nécessaire d'étudier également l'évolution de la masse de ces poudres sèches laissées à l'air ambiant afin de déterminer leur reprise d'eau. C'est pourquoi, nous laissons à l'air ambiant les échantillons de poudres précédemment séchées à l'étuve. Nous pesons ensuite ces différents échantillons au cours des 24 h suivant le séchage. Les résultats sont présentés sur la Figure 3.5, de la même façon qu'à la Figure 3.4.

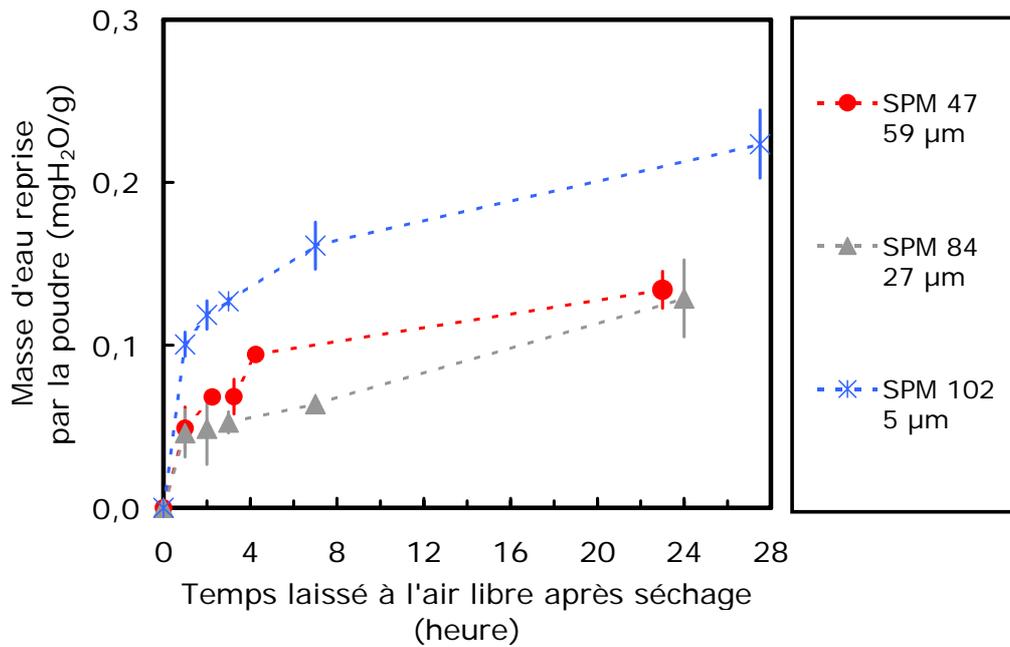


Figure 3.5 – Evolution des poudres sèches laissées à l'air libre en pourcentage d'eau repris

Ce graphique met en évidence que la reprise d'eau des poudres SPM 102, 84 et 47 à l'air ambiant est relativement lente. Au bout de 4 heures, les poudres récupèrent en moyenne environ 0,1 mgH<sub>2</sub>O/g soit 10 % de leur teneur en eau initiale, pour n'atteindre que 15 %, 24 h après. Durant une expérience, le temps d'exposition de la poudre à l'air ambiant est fonction principalement de la durée d'exposition du dépôt de poudre à l'écoulement d'air (cf. § 0). En moyenne pour  $\Delta t = 2$  h, la poudre est exposée à l'air libre pendant 3 heures (prise en compte des temps de réalisation du dépôt et de pesées avant et après expérience). Mais pour des valeurs de  $K_R < 10^{-2}$ , la reprise d'eau de la poudre devra être prise en compte car elle n'est plus négligeable devant la masse de poudre réentraînée. A partir des résultats de la Figure 3.5 et lorsque l'expérience aura été réalisée avec une poudre sèche, une correction d'humidité de la poudre sera donc systématiquement appliquée sur la masse  $m_f$  récupérée sur la surface d'essai après expérience (déduction de la masse d'eau récupérée).

#### ■ Masse volumique tassée des poudres

Tout volume contenant de la poudre est constitué de matière solide et de vide (pores des particules et espaces entre particules (interstices)). Le volume prenant en compte l'ensemble de ces éléments est appelé volume apparent (Norme NF X 11-601, 1979). En diminuant la quantité de vide (interstices) de la poudre, il est alors possible de diminuer son volume. Une méthode simple consiste à rendre plus compacte la poudre en la tassant, ainsi, elle acquiert une porosité plus faible.

Pour une quantité définie de poudre, on parlera donc de « masse volumique apparente » lorsque la poudre sera prise en vrac. Quand elle aura été compactée, on emploiera le terme de « masse volumique tassée ».

Nous déterminons les masses volumiques suivant deux méthodes :

- la méthode dit « éprouvette »,
- la méthode du Powder Tester.

Comme son nom l'indique, la première méthode consiste à déverser les poudres dans une éprouvette au travers d'un entonnoir. Le volume apparent et donc la masse volumique apparente de chaque poudre sont ainsi déterminés. Les volumes tassés sont ensuite obtenus en effectuant des à coups successifs sur chaque échantillon : les particules se réarrangent et occupent alors un volume plus petit. Lorsque le volume tend à se stabiliser, on en déduit le volume tassé, et donc la masse volumique tassée de l'échantillon.

Ces mesures sont ensuite vérifiées avec un Powder Tester (combiné d'analyses pour poudre), commercialisé par la société Hosokawa Micron. Cet appareil, inspiré du travail de Carr (1965), permet de mesurer mécaniquement certaines caractéristiques d'écoulement des poudres, dont leur compressibilité, celle-ci étant définie par le rapport de sa masse volumique apparente sur sa masse volumique tassée. Contrairement aux mesures que nous avons effectuées suivant la méthode éprouvette, ces mesures mécaniques basées sur les mêmes principes, ont l'avantage d'éliminer le paramètre opérateur.

Les différentes masses volumiques apparentes et tassées obtenues expérimentalement et avec le Powder Tester, sur les poudres SPM 102, 91, 84, 52 et 47 sont données dans le Tableau 3.4 :

**Tableau 3.4 – Masses volumiques apparentes et tassées des différentes poudres d'alumine déterminées suivant la méthode éprouvette et avec le Powder Tester**

<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Durmax</i>	Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )		Masse volumique tassée (g/cm <sup>3</sup> )	
	Eprouvette (CV %)	Powder Tester (CV %)	Eprouvette (CV %)	Powder Tester (CV %)
<i>SPM 102 – d<sub>50</sub> = 5 μm</i>	1,0 (-)	0,9 (-)	1,8 (3)	1,7 (-)
<i>SPM 91 – d<sub>50</sub> = 17 μm</i>	1,2 (9)	1,2 (2)	2,0 (3)	1,8 (1)
<i>SPM 84 – d<sub>50</sub> = 27 μm</i>	1,5 (11)	1,4 (1)	2,0 (2)	2,0 (1)
<i>SPM 52 – d<sub>50</sub> = 46 μm</i>	1,6 (5)	1,5 (1)	2,1 (3)	1,9 (1)
<i>SPM 47 – d<sub>50</sub> = 59 μm</i>	1,6 (4)	1,6 (1)	2,0 (-)	2,0 (2)

On observe alors que les deux méthodes de mesures donnent des résultats très proches. La reproductibilité des mesures est tout de même meilleure avec le Powder Tester (Coefficients de Variation de 1 à 3 %) qu'avec la méthode « éprouvette » (CV de 2 à 11 %).

Quelle que soit la méthode, les masses volumiques apparentes de nos cinq poudres varient donc entre 1,0 et 1,5 g/cm<sup>3</sup> ( $\pm 0,1$ ) et les masses volumiques tassées entre 1,8 à 2,0 g/cm<sup>3</sup> ( $\pm 0,1$ ). Dans la mesure où les plans d'expériences imposent de travailler dans la gamme de recouvrement des domaines, l'étendue du domaine d'étude de la masse volumique à retenir pour les PEx est faible : de 1,5 à 1,8 g/cm<sup>3</sup> ( $\pm 0,1$ ).

#### ■ Dimensions géométriques du tas de poudre

Notre étude consiste à traiter le cas d'une forme de tas obtenue suite à un déversement naturel de poudre. Pour ce faire, nous réalisons des simulations de déversement de poudre au travers d'un entonnoir (Figure 3.6).

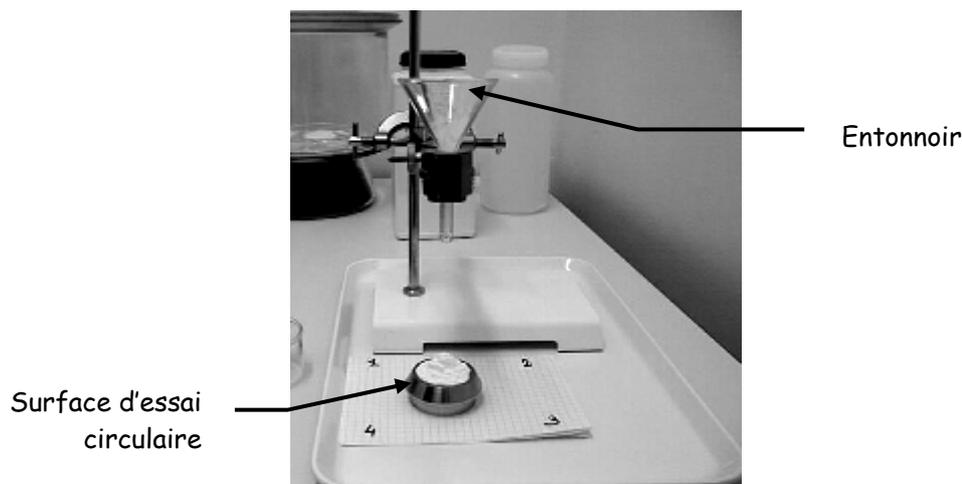


Figure 3.6 – Résultat du déversement naturel de poudre d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> au travers d'un entonnoir

Comme le montre cette photographie, la forme géométrique qui correspond le mieux à la situation est celle du cône.

A partir de plusieurs photos, nous pouvons alors déterminer les dimensions prises « spontanément » par les cônes de poudre d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de  $d_{50} = 27 \mu\text{m}$  (diamètre, hauteur et angle de repos). Suite à ces essais et compte tenu du diamètre de la surface d'essai (4 cm), les dimensions retenues pour les cônes de poudre se rapprochant d'un déversement naturel sont calculées pour un volume constant de 3 cm<sup>3</sup>. Ces dimensions associées au *Cône H, d* figurent dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5 – Dimensions retenues pour les cônes de poudre d'alumine

	Hauteur (mm)	Diamètre (mm)	Angle de repos (deg)
<i>Cône H, d</i>	12,7	30	40
<i>Cône h, D</i>	8,9	36	26

Par la suite, nous réalisons des mesures de l'angle de repos (angle que fait la pente du cône avec l'horizontale) des cinq poudres d'alumine avec le Powder Tester. Pour les poudres de  $27 \leq d_{50} \leq 59 \mu\text{m}$ , cet angle vaut en moyenne 44 degrés avec un coefficient de variation de 3 %. Il est donc relativement proche de la valeur de l'angle de repos que nous avons retenu soit 40 degrés. Toutefois, celui des poudres plus fines de  $d_{50} = 17$  et  $5 \mu\text{m}$ , vaut respectivement 50 et 58 degrés. Ces valeurs plus élevées traduisent une adhésion plus forte (due à une cohésion plus importante) de ces poudres. On peut donc s'attendre à ce qu'elles soient plus difficilement mises en suspension.

Pour nos expériences, nous retenons également un second jeu de dimensions coniques (*cône h, D* dans le Tableau 3.5). Déterminé de façon arbitraire, il a le même volume que le *cône H, d* et un diamètre inférieur à 4 cm (diamètre de la surface d'essai).

Dans un second temps, nous nous sommes intéressée à l'effet de forme du dépôt sur le réentraînement. Ainsi, nous avons fait varier le facteur « forme du tas » de poudre en conservant le même volume. Deux formes sont choisies :

- La première consiste à se rapprocher au mieux des dépôts plats et multicouches de la littérature. Notre choix s'est alors arrêté sur une galette (cylindre d'épaisseur 2,7 mm et de diamètre 38 mm) pour laquelle la forme circulaire s'adapte au mieux à notre surface d'essai, elle-même circulaire.

- La seconde forme a pour but d'observer si la présence d'angles est susceptible de modifier suffisamment les propriétés d'écoulement (par rapport aux formes arrondies) pour en modifier le réentraînement. Ainsi nous retenons une forme d'obélisque de hauteur 7,4 mm et de bases carrées d'arêtes 25 et 15 mm.

Afin de maîtriser au mieux ces quatre formes de tas de poudre, des moules en aluminium sont réalisées dans les dimensions données précédemment. Les photographies ci-dessous montrent le cône H, d, l'obélisque et la galette de poudre après démoulage sur la surface d'essai :



Figure 3.7 – Photographies des différentes formes de tas étudiés : Cône H, d, Obélisque et Galette

Une fois réalisés, ces différents dépôts seront directement introduits dans l'installation pour effectuer une expérience de réentraînement. Ceci nous permettra de négliger une éventuelle déformation des particules du dépôt (vieillessement).

### **3.2.3.2. Paramètre lié à la surface d'essai**

Le paramètre lié à la surface d'essai, retenu, est la rugosité, c'est à dire la hauteur des aspérités de la surface sur laquelle est déposée la poudre.

Nous commençons par choisir le matériau à utiliser pour la fabrication de la surface d'essai. L'idéal étant de se rapprocher des conditions de surface d'une boîte à gants, l'inox nous semble le mieux adapté à la situation. Cependant des pesées successives de l'objet nous amènent à constater que l'inox est magnétique. La balance utilisée, fonctionnant sur un pot magnétique, les valeurs de pesées sont donc fortement faussées. Nous avons donc fait fabriquer nos surfaces d'essai en aluminium, l'inox non magnétique étant très coûteux.

Quatre surfaces d'essai de rugosité différente sont alors fabriquées :

- une surface de rugosité  $1,6 \mu\text{m}$  (correspondant à la rugosité classique d'une boîte à gants),
- une autre est réalisée polimiroir (rugosité proche de  $0 \mu\text{m}$ ),
- les deux autres sont dotées d'une rugosité plus importante à savoir  $6,5$  et  $12,5 \mu\text{m}$ .

### **3.2.3.3. Paramètres liés à l'écoulement d'air**

Les deux paramètres liés à l'écoulement d'air sont la vitesse de l'air que nous caractériserons par sa vitesse de frottement à la paroi  $v_{*}$ , et son accélération au démarrage.

Leurs gammes de variation dans BISE ont été déterminées dans l'étude aéraulique (cf. § 2.2). Pour rappel, la vitesse de frottement de l'air peut varier pour nos expériences de 0,04 à 0,52 m/s (soit une vitesse moyenne comprise entre 0,5 et 10 m/s) et l'accélération de 0,05 à 31 m/s<sup>2</sup>. Cependant, comme il a été montré au § 2.2.5, ces deux paramètres sont dépendants l'un de l'autre. Leur domaine d'étude pour les plans d'expériences doit donc correspondre à leurs intervalles de recoupement.

D'après la littérature (cf. § 1.3), la vitesse est un facteur de réentraînement prépondérant. Il est donc important qu'elle varie sur une grande gamme de variation. De ce fait, nous fixons le domaine d'étude de la vitesse de frottement entre 0,04 et 0,52 m/s (soit entre 0,5 et 10 m/s dans BISE), zone dans laquelle l'écoulement est fortement turbulent ( $3000 < Re < 60000$ ). La gamme d'accélération doit alors être réduite par rapport à sa gamme de variation possible : pour que l'accélération puisse varier dans le même domaine pour les deux vitesses limites,  $\alpha$  ne doit varier qu'entre 0,5 et 2,5 m/s<sup>2</sup> (cf. Tableau 2.4).

#### **3.2.3.4. Durée d'exposition**

Bien que les études récentes de la littérature (cf. chapitre 1) montrent un effet négligeable de ce paramètre sur le réentraînement au-delà des premières secondes, nous avons décidé de retenir ce paramètre afin de vérifier ce phénomène dans le cas d'un tas de poudre.

L'évolution de la fraction réentraînée en fonction du temps (cf. § 3.1.4) montre que les résultats de mesures effectuées pour une durée d'exposition de 2 min ne permettent pas d'obtenir, à priori, une bonne répétabilité des expériences. Durant cette courte période d'exposition, les particules réentraînées sont celles qui sont initialement déposées en surface du dépôt. Or, expérimentalement, on constate qu'il est difficile de maîtriser cet état de surface initial du dépôt de poudre. On attribue donc cette dispersion à la réalisation du dépôt.

De plus, notre installation ne nous permet pas de mesurer des valeurs de réentraînement pour des périodes d'exposition très petites. Ainsi, une durée minimale de 2 min semble bien adaptée à notre étude.

D'autre part, nous avons constaté, sur cette même figure (Figure 3.1), qu'à partir d'une durée d'exposition de 15 min, le réentraînement tend vers une valeur limite. Fromentin (1989) qui a travaillé également dans des conditions de dépôts multicouches, observe, de la même façon, que la masse mise en suspension se stabilise après une

---

période d'exposition de 15 à 20 min, quelles que soient les conditions expérimentales initiales (cf. Figure 1.11 du § 1.4.4.1).

De ce fait, dans un premier temps, l'intervalle 2 min – 60 min nous semble une gamme de variation satisfaisante pour étudier l'influence du paramètre temps sur le réentraînement. Toutefois, des mesures de réentraînement sur une période d'exposition très courte (30 s) seront également réalisées.

### **3.3. Réalisation des expériences**

La réalisation d'une expérience depuis le conditionnement des différents matériels utiles aux essais jusqu'à la pesée de la surface d'essai après l'expérience, peut se découper en trois parties essentielles.

- Il convient tout d'abord de régler manuellement et mesurer par anémométrie les différents paramètres liés à l'écoulement d'air (vitesse, accélération).

- Une seconde étape consiste à réaliser, peser et introduire dans l'installation le cône de poudre (cette étape peut se répéter plusieurs fois si l'on estime que le dépôt n'est pas conforme).

- L'expérience, proprement dite, est alors mise en route. Après avoir été exposée pendant la durée d'exposition  $\Delta t$  imposée par l'expérience, le dépôt de poudre qui est resté sur la surface d'essai est sorti de l'installation puis pesé.

Une expérience de ce type s'étend donc sur une période d'environ 3 heures pour une durée d'exposition de 15 min.

Enfin, et afin d'éviter une erreur potentielle systématique (effet du « temps ») dans l'analyse du plan d'expériences qui serait due, par exemple, au changement de niveau d'un facteur non contrôlé entre deux séries d'expériences (dérive d'un appareil de mesure), les expériences des PEx sont effectuées dans un ordre aléatoire. Ainsi, l'erreur systématique est rendue, elle aussi, aléatoire : l'incertitude des mesures est augmentée, mais elle ne fausse pas le résultat.

## 4. Etude expérimentale sur les paramètres influents

Il nous faut donc, maintenant, étudier expérimentalement l'influence, sur la mise en suspension, des huit paramètres qui sont, rappelons-le, relatifs au dépôt de poudre (distribution granulométrique  $d_{50}$ , masse volumique tassée  $\rho_{\text{tas}}$ , dimensions géométriques du tas Dim. Tas, teneur en eau  $\text{H}_2\text{O}$ ), à la surface (rugosité  $\text{Rug}_{\text{SE}}$ ), à l'écoulement d'air (vitesse de frottement  $v_*$ , accélération  $\alpha$ ) et à la durée d'exposition ( $\Delta t$ ).

Afin de mener à bien notre travail, nous nous proposons de réaliser des expériences de type « global » sur nos poudres d'alumine. Pour ce faire, nous adoptons la méthodologie des plans d'expériences, méthode que nous avons décrite au chapitre 3. Ainsi, différents plans d'expériences sont réalisés selon les besoins recherchés. Leurs analyses statistiques nous permettent dans un premier temps, de mettre en évidence les paramètres dits « primaires » du réentraînement, c'est à dire ceux qui ont le plus d'influence parmi les huit retenus. En fixant alors ces derniers, nous apprécions l'influence des autres paramètres et mettons en évidence les paramètres dits « secondaires ».

Les matrices expérimentales des plans réalisés sont données en Annexe 1 et l'ensemble des résultats expérimentaux (conditions expérimentales et résultats obtenus) en Annexe 2.

#### **4.1. Paramètres primaires**

Cherchant, pour commencer, à déterminer les effets principaux des paramètres retenus sur le réentraînement, les plans d'expériences de type plans de « screening » ou de « criblage » semblent les mieux adaptés à notre besoin. Comme leur nom l'indique, ils permettent de cibler les paramètres prépondérants influençant le phénomène étudié.

##### **4.1.1. Effets principaux**

Compte tenu du nombre de paramètres à faire varier (huit), nous retenons le plan factoriel fractionné de « Plackett et Burman 12.11p », car il permet, en douze expériences, d'apprécier l'influence de onze paramètres au maximum. Toutefois, ce plan nécessite de travailler sur deux niveaux (ou valeurs) des paramètres. Comme on a pu le voir dans le chapitre 3, ces deux niveaux doivent être choisis respectivement aux limites minimales (en variable codée -1) et maximales (en variable codée +1) des gammes de variation des facteurs lorsque ces derniers ne sont pas dépendants les uns des autres. Les expériences du plan de criblage bâti par permutation circulaire à partir d'une première ligne judicieusement choisie (corps de Galois, cf. Annexe 1), sont alors réalisées aux « quatre extrémités » du domaine expérimental.

Les différents domaines expérimentaux des paramètres choisis pour le plan d'expériences 12.11p, sont déterminés dans le but de travailler sur des gammes de variation les plus étendues possibles. De plus, condition indispensable des plans d'expériences, les paramètres sont indépendants les uns des autres dans leur variation sur l'ensemble des domaines étudiés. Leurs gammes de variation que nous retenons pour ce premier plan d'expériences, sont présentées dans le Tableau 4.1

**Tableau 4.1 – Domaines d'étude des 8 paramètres retenus pour le premier plan de criblage de Plackett et Burman (type 12.11p) – Poudre d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Volume de poudre 3 cm<sup>3</sup>**

Paramètres	Domaine d'étude		
	-1	0	1
Diamètre médian des poudres, $d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	5	27	59
Masse volumique tassée de la poudre, $\rho_{\text{tas}}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,5	1,75	2
Teneur en eau de la poudre, H <sub>2</sub> O ( $\text{mgH}_2\text{O}/\text{g}$ )	0	1*	1
Hauteur et diamètre du cône, Dim. Tas (mm)	h = 8,9 D = 36	H = 12,7* d = 30*	H = 12,7 d = 30
Rugosité de la surface d'essai, Rug <sub>SE</sub> ( $\mu\text{m}$ )	polimiroir	1,6*	1,6
Vitesse de frottement de l'air, $v^*$ (V) (m/s)	0,04 (0,5)	0,29 (5)	0,52 (10)
Durée d'exposition, $\Delta t$ (min)	2	15	60
Accélération au démarrage, $\alpha$ ( $\text{m}/\text{s}^2$ )	0,5	1,5	2,5

\*Valeurs pour lesquelles des conditions moyennes n'ont pu être obtenues expérimentalement et ont été mises à la valeur codée 1 arbitrairement.

Chaque expérience n'est effectuée qu'une seule fois. Toutefois, des répétitions sont réalisées au centre du domaine, c'est à dire pour les valeurs moyennes (0) des différentes gammes de variation des paramètres. Ces répétitions au centre permettent d'estimer la dispersion de nos résultats expérimentaux sur l'ensemble du domaine d'étude, sous condition que l'hypothèse d'homoscédaticité soit vraie. Cette hypothèse considère que les écarts types sont constants sur tout le domaine. Pour débiter notre étude expérimentale, nous considérons que ce postulat s'applique dans notre cas.

Une fois les expériences du plan de Plackett et Burman réalisées suivant la matrice expérimentale (cf. Annexe 1), nous effectuons une analyse statistique sur les résultats. Elle nous permet d'apprécier les effets relatifs des paramètres sur la fraction mise en suspension  $K_R$ .

La Figure 4.1 représente l'histogramme des effets de chaque paramètre sur la fraction réentraînée  $K_R$ . Cet histogramme est dénommé « diagramme de Pareto ».

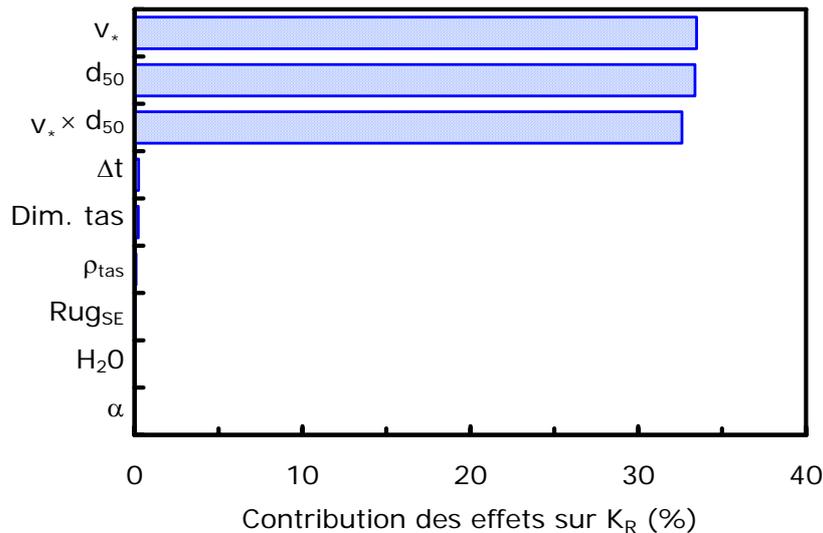


Figure 4.1 – Contribution des effets sur  $K_R$  – Analyse du plan de criblage Plackett et Burman 12.11p

L'analyse des effets montre clairement que :

- la vitesse et la granulométrie ont une contribution très significativement et très supérieure à celle des six autres facteurs que nous avons retenus : leurs effets contribuent chacun à plus de 30% de l'effet global ; ces deux paramètres jouent donc un rôle prépondérant sur le réentraînement,
- les six autres paramètres sont non significatifs sur  $K_R$  dans les conditions expérimentales du plan d'expériences de criblage ; néanmoins, compte tenu de la faible gamme de variation de certains paramètres, il convient d'être prudent quant à leur importance,
- du fait des contributions très faibles des six autres paramètres, une forte interaction entre la vitesse et la granulométrie est mise en évidence ; elle contribue également à environ 30 % de l'effet global sur la fraction réentraînée.

A partir de ces résultats expérimentaux, il nous est alors possible d'élaborer un modèle statistique linéaire (simple outil mathématique) de la fraction réentraînée en fonction de la vitesse et de la granulométrie. Cette modélisation statistique est utilisée uniquement pour apprécier l'évolution du  $K_R$  vis à vis de ces deux facteurs : elle ne permet en aucune manière de calculer une valeur de la fraction réentraînée. Le modèle obtenu, représenté en trois dimensions sur la Figure 4.2, prend en compte l'interaction d'ordre 2 de la vitesse et de la granulométrie. Les résultats de nos expériences sont décrits par des cercles sur la Figure 4.2.

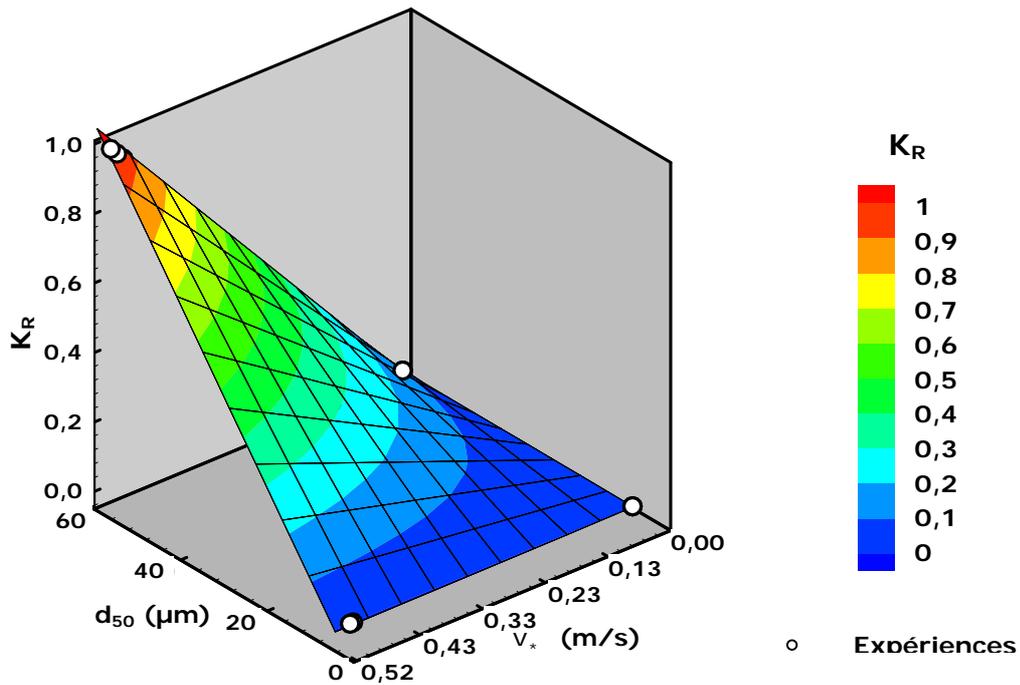


Figure 4.2 –  $K_R(d_{50}, V_x)$  : Modèle statistique obtenu sur les expériences du plan 12.11p

La Figure 4.2 nous montre l'interaction entre les deux paramètres vitesse et granulométrie. On constate que l'effet de la vitesse sur le  $K_R$  diffère suivant la dimension de la poudre. Cet effet est positif, et est d'autant plus important que la granulométrie est élevée.

On peut noter, par ailleurs, que nos expériences effectuées suivant le plan d'expériences 12.11p, se trouvent au quatre coins du domaine expérimental. Le modèle élaboré à partir de ces données ne nous apporte donc pas d'information quant à ce qui peut se passer entre deux niveaux étudiés (linéaire ou non).

Suite à cette première série d'expériences, il nous paraît donc nécessaire d'effectuer une étude spécifique de la vitesse et de la granulométrie sur la fraction réentraînée, afin de décrire plus finement l'évolution du  $K_R$  à l'intérieur du domaine étudié.

#### 4.1.2. Etude spécifique de la vitesse et de la granulométrie

Afin d'étudier uniquement les paramètres vitesse de l'air et granulométrie de la poudre sur la fraction réentraînée, nous fixons les six facteurs non significatifs aux conditions moyennes représentatives des gammes de variation établies précédemment (cf. Tableau 4.1), à savoir :

- la teneur en H<sub>2</sub>O de la poudre : H<sub>2</sub>O ~ 1 mgH<sub>2</sub>O/g,
- les dimensions du cône : H = 12,9 mm et d = 30 mm,
- la masse volumique :  $\rho_{\text{tas}} = 1,75 \text{ g/cm}^3$ ,
- la durée d'exposition :  $\Delta t = 15 \text{ min}$ ,
- l'accélération :  $\alpha = 1,5 \text{ m/s}^2$ ,
- la rugosité de la surface :  $\text{Rug}_{\text{SE}} = 1,6 \text{ }\mu\text{m}$ .

Pour rappel, les domaines d'étude des deux paramètres primaires sont :

- pour la vitesse :  $0,04 \leq v_* \leq 0,52 \text{ m/s}$  ( $0,5 \leq V \leq 10 \text{ m/s}$ ),
- pour la granulométrie :  $5 \leq d_{50} \leq 59 \text{ }\mu\text{m}$ .

#### 4.1.2.1. *Seuil de vitesse de l'air*

Devant l'étendue des domaines d'étude de la vitesse et de la granulométrie, il nous est indispensable d'optimiser le nombre d'essais à réaliser. Pour ce faire, nous commençons par cibler les zones des facteurs à étudier en particulier en effectuant un second plan d'expériences, le plan composite centré 13.2p (cf. Annexe 1). Ce type de plan a l'avantage d'approfondir des plans complets ( $2^n$  avec n le nombre d'expériences) en démarche séquentielle, en faisant varier les paramètres sur un cercle de centre 0 (la valeur moyenne) et de rayon  $\beta = \sqrt[4]{2^{n'}}$  où n' est le nombre de facteurs quantitatifs du plan (ici, n' = 2, soit  $\beta = 1,4$ ).

Afin de visualiser la position des ces expériences sur notre domaine d'étude, nous représentons sur la Figure 4.3, la matrice 13.2p symbolisée par des carrés, en fonction des variables codées des paramètres vitesse et granulométrie. Nous y ajoutons les expériences du plan 12.11p, représentées par des cercles.

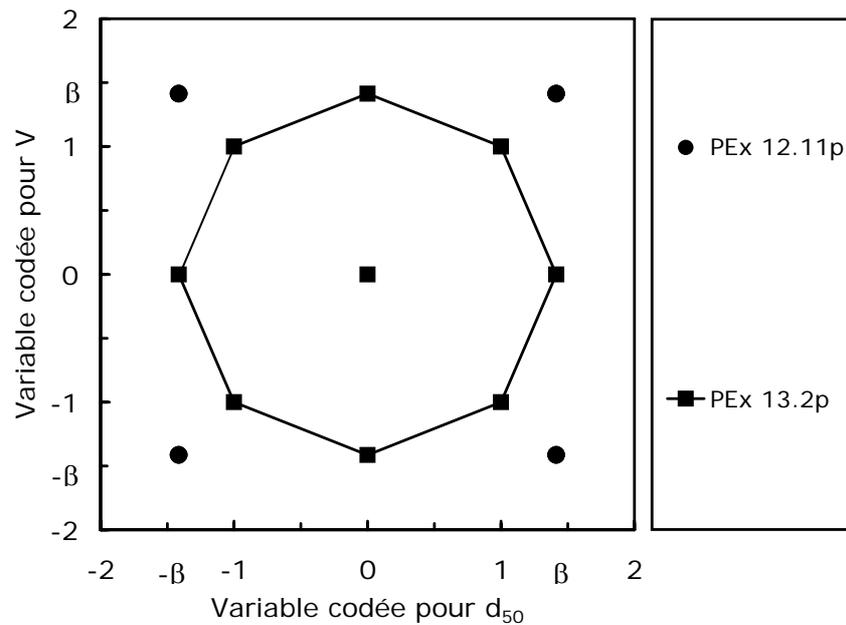


Figure 4.3 – Positionnement des points expérimentaux des matrices 12.11p et 13.2p

Cette figure montre alors que, si l'on attribue judicieusement des valeurs de  $d_{50}$  et de  $V$  (donc  $v_*$ ) aux variables codées, la matrice 13.2p permet de balayer l'ensemble du domaine expérimental. De cette façon, nous pouvons compléter les résultats du plan 12.11p situés aux quatre extrémités du domaine expérimental, et réaliser, en neuf expériences seulement, une étude des deux paramètres primaires sur cinq niveaux.

Ces cinq niveaux de vitesse et de granulométrie retenus pour le plan 13.2p sont donnés dans le Tableau 4.2. Comme expliqué précédemment, nous associons aux valeurs (-1, 0 et 1) du plan 12.11p, les niveaux extrêmes et moyen (- $\beta$ , 0 et  $\beta$ ) du nouveau plan soit (-1,4 ; 0 et 1,4).

Tableau 4.2– Valeurs des granulométries et des vitesses choisies pour l'étude spécifique de ces deux paramètres sur  $K_R$

<i>Niveaux des paramètres</i>	$-\beta$	-1	0	1	$\beta$
$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	5	17	27	46	59
$v_*$ (m/s)	0,04	0,13	0,29	0,45	0,52
( $V$ ) (m/s)	(0,5)	(2)	(5)	(8,5)	(10)

Six expériences sont répétées au centre du domaine (0) et permettent de prendre en compte la dispersion de nos résultats sur l'ensemble du domaine en effectuant, comme auparavant, l'hypothèse d'homoscédaticité.

Grâce à l'utilisation de ces cinq niveaux sur les paramètres, le plan 13.2p permet d'identifier de façon statistique un modèle quadratique de  $K_R$  en fonction de la vitesse et de la granulométrie. Nous le rappelons encore, il ne s'agit là que d'un simple modèle mathématique qui nous permet uniquement d'observer des tendances des paramètres et nullement de prévoir des valeurs de  $K_R$ .

Ce modèle est obtenu à partir de l'analyse effectuée sur l'ensemble des données (exploitation simultanément des résultats expérimentaux des plans 12.11p et 13.2p). Il est présenté à la Figure 4.4 suivant une projection en deux dimensions de  $K_R$  sur le plan  $(d_{50}, v_*)$ . Nous positionnons également sur le graphe les résultats expérimentaux des deux plans.

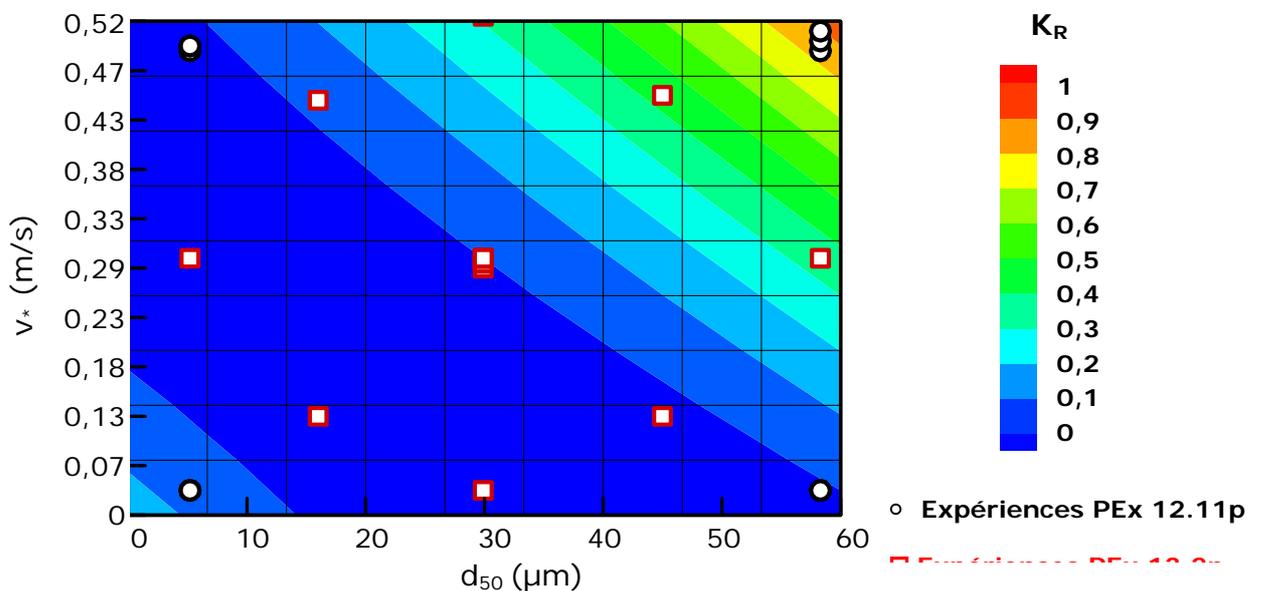


Figure 4.4 – Représentation 2D du modèle quadratique de  $K_R$  en fonction de la granulométrie  $d_{50}$  et de la vitesse  $v_*$ , obtenu à partir des points expérimentaux des plans 12.11p et 13.2p

Cette analyse nous montre que la mise en suspension est un phénomène à seuil. En effet, d'après la Figure 4.4, on observe que :

- A granulométrie constante, le réentrainement n'a lieu qu'à partir d'une certaine vitesse critique correspondant à un seuil de vitesse. En fait, théoriquement, il y a toujours réentrainement (dans l'hypothèse des distributions des forces d'adhérence) mais dans nos expériences, la mise en suspension n'est plus mesurable au-dessous de notre limite de détection.

- Ce seuil de vitesse dépend de la taille des particules. D'après le modèle statistique ajusté sur nos données expérimentales à la Figure 4.4, le réentrainement ne commence

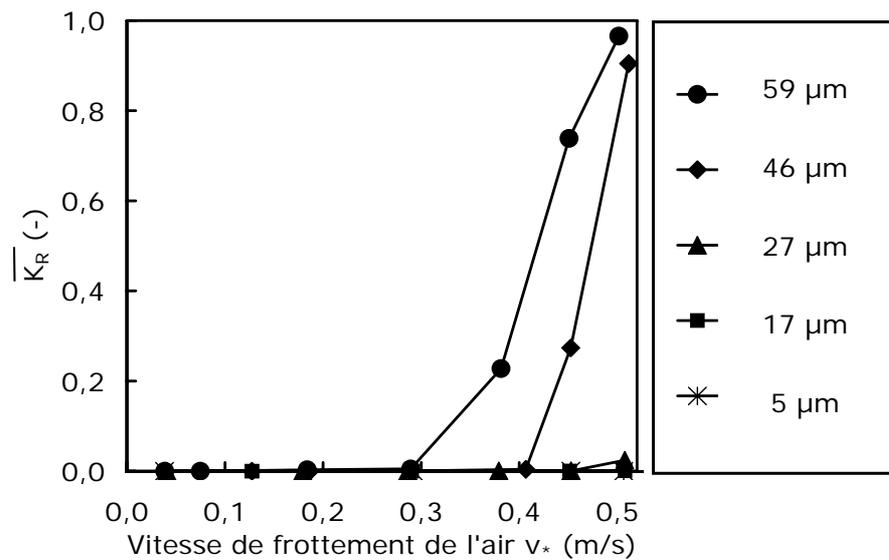
à être détectable qu'à partir d'une vitesse de frottement d'environ 0,38 m/s (soit 7 m/s dans BISE) pour un  $d_{50}$  de 20  $\mu\text{m}$ . Par contre, pour 40  $\mu\text{m}$ , on mesure un réentraînement dès lors que la vitesse atteint 0,21 m/s (soit  $V = 3,5$  m/s). Ainsi, plus la taille des particules augmente, plus le seuil de vitesse diminue. Ce seuil de vitesse est donc inversement proportionnel à la granulométrie de la poudre.

Par ailleurs, on note que pour une poudre de diamètre médian inférieur à environ 5  $\mu\text{m}$  et à faible vitesse, le modèle attribue au  $K_R$  une valeur plus élevée que pour des poudres de tailles supérieures. Ceci peut s'expliquer par le fait que les particules s'agglomèrent entre elles formant ainsi des agrégats de diamètre plus grand qui sont réentraînés. Or le  $d_{50}$  représenté sur le graphe correspond au diamètre médian de la poudre utilisée lors des expériences (cf. § 3.2.3.1) et non à la taille des éventuels agrégats formés qui sont réentraînés. Toutefois, avant de confirmer cette hypothèse, des mesures supplémentaires doivent être réalisées dans ces conditions car l'analyse actuelle ne s'appuie que sur une seule expérience.

#### 4.1.2.2. *Les différentes phases du réentraînement*

L'étude spécifique de l'influence de la vitesse et de la granulométrie s'est poursuivie par la réalisation d'un grand nombre d'expériences complémentaires dans les zones intermédiaires des domaines de variation, là où nous avons encore peu ou pas de données. Ainsi, nous pouvons décrire encore plus finement l'évolution de la fraction réentraînée en fonction de ces deux paramètres. Par ailleurs, le but ultime de notre travail consiste à développer un modèle semi-empirique représentatif du phénomène de mise en suspension. Il nous est donc nécessaire de pouvoir accumuler un plus grand nombre de résultats afin de s'appuyer sur une base de données conséquente.

Intégrant à notre analyse les expériences du plan de Plackett et Burman (on considère que les six paramètres non significatifs ont des effets négligeables sur les résultats expérimentaux), nous avons réalisé au final une centaine d'expériences. Ces données expérimentales correspondent à 27 configurations différentes de  $(v_*, d_{50})$ . La Figure 4.5 présente l'ensemble de nos résultats. Nous y décrivons sur une échelle linéaire les fractions réentraînées moyennes  $\overline{K_R}$  en fonction de la vitesse de l'air pour les cinq distributions granulométriques de poudre d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  choisies. Ces moyennes ont été obtenues sur un nombre d'essais variables (de 2 à 18 points), suivant la configuration expérimentale. Nous n'avons pas représenté sur cette figure les intervalles de confiance sur les moyennes pour des raisons de lisibilité sur le graphe. Toutefois, ce point est vu au § 4.3.



**Figure 4.5 – Evolution de la fraction réentraînée moyenne en fonction de la vitesse de frottement pour différentes granulométries de poudre d'alumine**

Cette figure met clairement en évidence l'effet de seuil précédemment observé. On remarque également que, pour une même vitesse, la fraction réentraînée  $\overline{K}_R$  est d'autant plus importante que la granulométrie est grande. Ce résultat est bien conforme à la physique de l'adhérence dans notre domaine expérimental.

Par ailleurs, la Figure 4.5 montre que l'utilisation d'une échelle linéaire ne nous permet pas de décrire finement le phénomène de mise en suspension, notamment pour les faibles vitesses. Nous avons donc représenté à la Figure 4.6 et à la Figure 4.7 ces mêmes résultats suivant une échelle logarithmique de  $\overline{K}_R$ . Chaque graphe décrit les  $\overline{K}_R$  moyens expérimentaux obtenus pour une même granulométrie, en fonction de la vitesse de frottement de l'air. Nos données expérimentales moyennes, déterminées en moyenne sur trois expériences, sont ici présentées avec leur intervalle de confiance à 95 %.

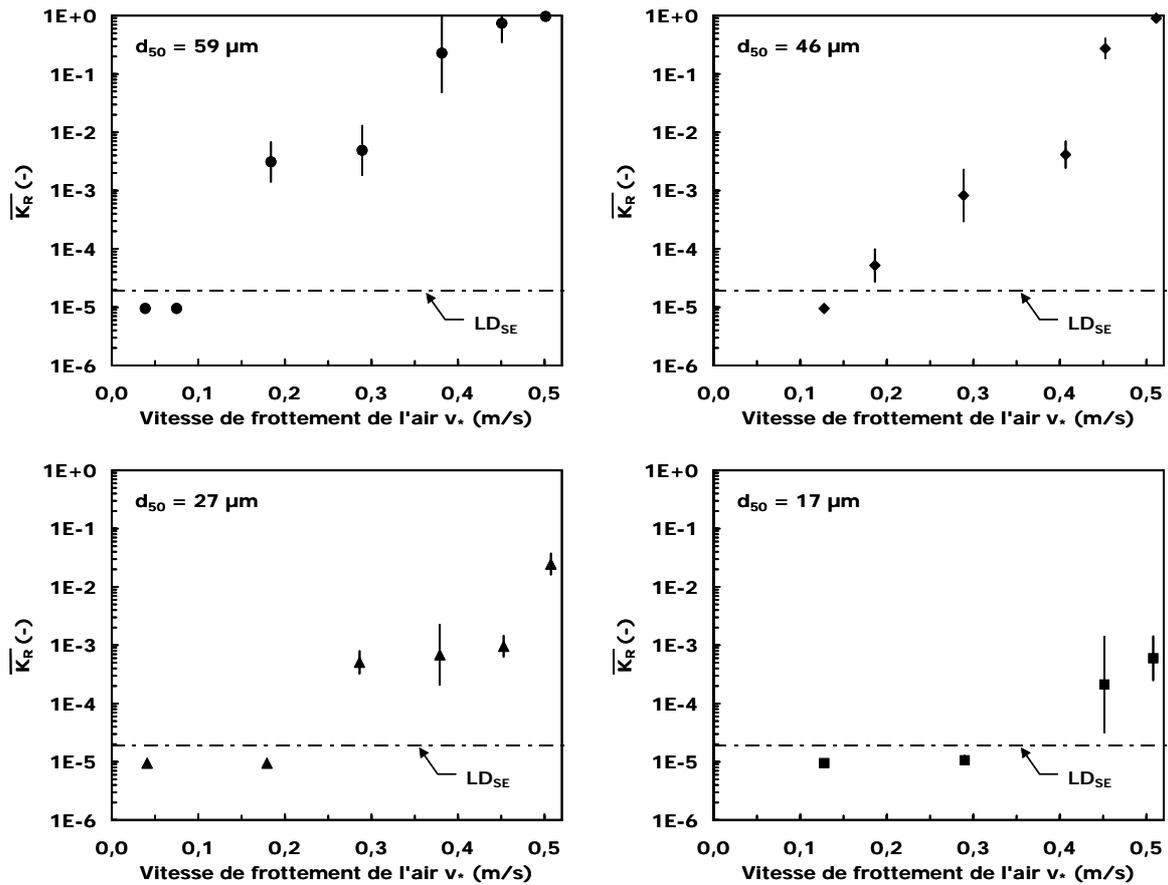


Figure 4.6 - Evolution de la fraction réentraînée en fonction de la vitesse de frottement de l'air  $v_*$  pour les poudres d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  de  $d_{50}$  égal à 17, 27, 46 et 59  $\mu\text{m}$  - Valeurs moyennes présentées avec leur intervalle de confiance à 95 %.

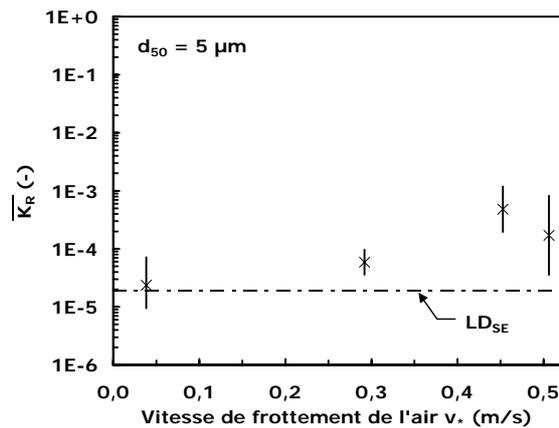


Figure 4.7 – Evolution de la fraction réentraînée en fonction de la vitesse de frottement de l'air  $v_*$  pour la poudre d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  de  $d_{50} = 5 \mu\text{m}$  – Valeurs moyennes présentées avec leur intervalle de confiance à 95 %.

Cette représentation en échelle logarithmique est mieux adaptée pour décrire le réentraînement puisque, comme on peut l'observer sur ces différents graphes, les

valeurs de  $\overline{K_R}$  que nous mesurons couvrent la gamme de  $10^{-5}$  à 1, soit 6 ordres de grandeur. Dans la suite de notre étude, nous effectuerons donc l'analyse de nos résultats sur le Log  $K_R$ .

La limite basse mesurée (droite horizontale en pointillés sur les graphes) correspond à notre limite de détection  $LD_{SE}$ . De ce fait, dès lors que le  $\overline{K_R}$  mesuré devient supérieur à  $LD_{SE}$ , on considère que le seuil de vitesse est franchi. D'après la Figure 4.6, la détermination d'un intervalle de vitesse correspondant à ce seuil, est possible. Toutefois, cet intervalle est spécifique à notre installation et à notre méthode de mesure : le seuil déterminé correspond en fait à une pseudo-vitesse en dessous de laquelle la fraction mise en suspension reste inférieure à notre limite de détection. Ainsi, quelle que soit la taille des particules de la Figure 4.6, aucune mise en suspension n'est mesurée avec notre système pour une vitesse de l'air  $v_* \leq 0,07$  m/s (soit  $V \leq 1$  m/s). Cette dernière augmente toutefois, quand la taille des particules diminue.

L'observation de nos expériences confirmée par les résultats de la Figure 4.6 nous conduit à constater que le réentraînement d'un dépôt conique s'effectue suivant deux phases principales :

- La première concerne les fractions mises en suspension pour lesquelles le  $\overline{K_R}$  reste inférieur à environ  $10^{-3}$  -  $10^{-2}$ . Dans ces conditions, nous attribuons le réentraînement aux particules positionnées sur la surface du dépôt, et qui sont directement exposées à l'écoulement d'air incident. Cette mise en suspension, analogue au cas du réentraînement d'un dépôt multicouches plat, est dite de « surface ». Elle doit donc être indépendante de la forme du dépôt.

- La seconde phase, est associée aux fractions supérieures à environ  $10^{-2}$ . Au delà de cette valeur du  $K_R$ , le dépôt se déforme sous l'action de la vitesse élevée de l'air. Nous en parlerons plus longuement au § 4.4.

Le passage entre ces deux phases s'effectue dans une zone de vitesse relativement bien localisée, fonction de la taille des particules.

Ces différentes phases de mises en suspension sont représentées sur la Figure 4.8 pour le cas du réentraînement d'un dépôt de poudre de  $46 \mu\text{m}$ . Elles sont délimitées par les droites en pointillées. La zone de recoupement entre les phases de « surface » et de « déformation » est attribuée à la zone de transition.

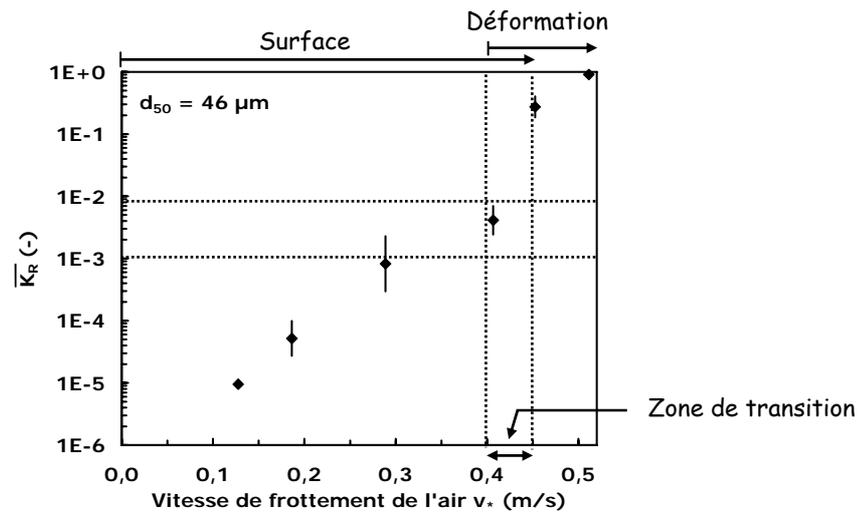


Figure 4.8 – Evolution de la fraction réentraînée moyenne pour des tailles de particules de 46  $\mu\text{m}$  en fonction de la vitesse de frottement de l'air – Mise en évidence de la zone de transition.

Dans nos conditions expérimentales, nous pouvons observer les zones de transition des poudres de diamètres médians compris entre 27 et 59  $\mu\text{m}$ . Pour des tailles de particules inférieures, la fraction maximale atteinte est de l'ordre de  $10^{-3}$  dans le domaine d'étude des vitesses de BISE. Dans ce cas, seule la phase de réentraînement en « surface » a donc eu lieu.

Le Tableau 4.3 présente les limites des vitesses d'air caractérisant les zones de transitions des différentes poudres que nous avons établies à partir de l'analyse de nos résultats.

Tableau 4.3 – Limites des vitesses d'air caractérisant la zone de transition

$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	Vitesse limite (m/s)			
	Basse		Haute	
	$v_*$	$V$	$v_*$	$V$
17	> 0,5	> 10	N.D.*	N.D.*
27	~0,45	~8,5	~0,50	~10
46	~0,40	~7,5	~0,45	~8,5
59	~0,30	~5,0	~0,38	~7,0

\* Non déterminée

Comme on peut le constater sur ce tableau, ces limites sont fonction de la taille des particules réentraînées. On note que la phase de déformation apparaît plutôt pour les tailles de particules importantes.

Les résultats de la Figure 4.7, quant à eux, confirment l'hypothèse que nous avons avancée au § 4.1.2.1 pour la granulométrie égale à 5  $\mu\text{m}$ . Il y a bien formation d'agglomérats qui sont réentraînés avec une vitesse de l'air plus faible que celle attendue pour ce diamètre de particules. En effet, on note que les  $\overline{K_R}$  correspondant à des vitesses supérieures à 0,4 m/s (soit 7,5 m/s dans BISE) sont proches de ceux obtenus pour des granulométries de 17  $\mu\text{m}$ . On peut donc supposer que les agrégats formés doivent avoir des tailles proches de celles des particules de 17  $\mu\text{m}$ . Toutefois, nous n'avons pas vérifié ceci avec les moyens de mesures que nous avons mis en œuvre.

Pour finir, l'analyse des intervalles de confiance de la Figure 4.6 et de la Figure 4.7 montre que la dispersion des valeurs de fractions réentraînées varie selon les conditions initiales des expériences. Dans la suite de notre étude, nous nous attacherons donc à répéter systématiquement trois fois les mêmes essais. L'écart type calculé sur ces trois expériences nous donnera ainsi une estimation de l'écart type réel de dispersion de nos mesures.

## 4.2. Paramètres secondaires et non significatifs

Notre étude précédente a mis en évidence que six paramètres parmi les huit étudiés ont une influence négligeable sur le réentraînement dans les conditions expérimentales choisies. Toutefois, l'influence très marquée de la vitesse et de la granulométrie a pu cacher l'effet de certains de ces facteurs.

Il nous fallait donc conduire de nouvelles séries d'expériences à des valeurs fixées de vitesse et/ou de granulométrie, afin de mettre en évidence si, parmi les six facteurs retenus, il existe des paramètres dits « secondaires » sur le réentraînement.

L'influence de la forme du dépôt est traitée indépendamment des autres paramètres.

### 4.2.1. Démarche et domaine d'étude

Nous adoptons une stratégie expérimentale similaire à celle précédemment employée. Nous commençons par utiliser les plans d'expériences dans le but d'éliminer les paramètres qui n'ont toujours pas (ou très peu) d'influence sur le phénomène. Puis, nous regardons plus finement l'effet des paramètres influents en faisant varier soit la vitesse, soit la granulométrie, et discutons des tendances observées.

Pour commencer cette étude, nous nous plaçons dans des conditions expérimentales de vitesse et de granulométrie pour lesquelles le phénomène de mise en suspension évolue fortement, ceci afin d'avoir un effet mesurable sur le  $\overline{K_r}$ . Suite aux résultats du § 4.1, nous choisissons les valeurs de  $v_* = 0,4$  m/s ( $V = 7,5$  m/s) et  $d_{50} = 46$   $\mu\text{m}$ , correspondant à une zone de transition.

Par ailleurs, le fait de fixer les valeurs des paramètres prépondérants nous permet d'agrandir les gammes de variations des facteurs liés à l'écoulement d'air et à la surface. Ainsi, nous pouvons faire varier l'accélération d'un facteur  $\sim 60$  alors que pour le plan d'expériences 12.11p (cf. Tableau 2.4), celle-ci était contrainte de varier seulement d'un facteur 5 (cf. Tableau 4.1).

Afin d'éviter que les tailles des gammes de variation des paramètres puissent influencer les tendances observées, nous effectuons en parallèle deux plans complets sur deux niveaux. L'un nous permet d'étudier l'effet de paramètres liés à la poudre (teneur en eau et masse volumique tassée) en quatre expériences (PEx 4.2p), l'autre celui des

paramètres liés à l'écoulement d'air et à la surface (accélération de l'écoulement d'air, durée d'exposition et rugosité de la surface d'essai) suivant huit expériences (PEx 8.3p). Nos essais sont réalisés selon des matrices bâties à partir de l'alternance des signes – et + et des produits entre colonnes (cf. Annexe 1). Les domaines des différents paramètres pour les deux plans d'expériences réalisés (4.2p et 8.3p) sont décrits dans le Tableau 4.4.

Tableau 4.4– Valeurs des paramètres retenus pour les plans 4.2p et 8.3p

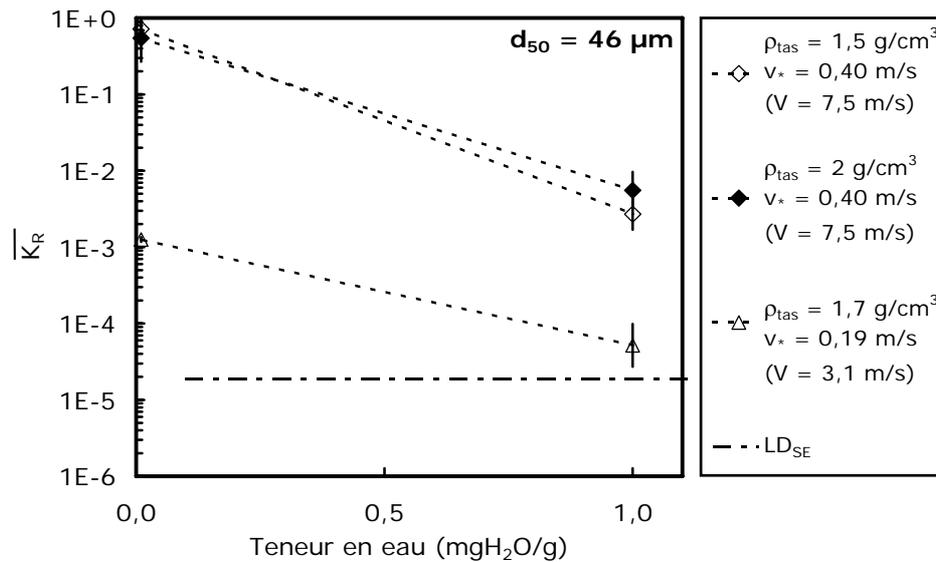
Paramètres	Plan d'expériences		Dimensions
	4.2p	8.3p	
$v_*$ (V)	0,4 (7,5)	0,4 (7,5)	m/s
$d_{50}$	46	46	$\mu\text{m}$
Dim Tas	Cône H, d	Cône H, d	H = 12,9 mm d = 30 mm
H <sub>2</sub> O	0 / 1*	1	mgH <sub>2</sub> O/g
$\rho_{\text{tas}}$	1,5 / 2*	1,75	g/cm <sup>3</sup>
$\alpha$	1,5	0,3 / 20*	m/s <sup>2</sup>
$\Delta t$	15	0,5 / 60*	min
Rug <sub>SE</sub>	1,6	0 / 12,5*	$\mu\text{m}$

\*Valeurs des variables codées –1 / 1

Nous choisissons pour cette étude de répéter chaque expérience trois fois.

#### 4.2.2. Effets de la teneur en eau et de la masse volumique de la poudre

L'ensemble de nos résultats effectués pour étudier les paramètres liés à la poudre, est regroupé sur la Figure 4.9. Sur ce graphe, nous représentons les fractions réentraînées moyennes obtenues en fonction de la teneur en eau de la poudre pour différentes masses volumiques. Chaque  $\overline{K_R}$  correspond à la moyenne de trois expériences. Il est présenté avec son intervalle de confiance à 95 %. Les points expérimentaux à  $V = 7,5$  m/s correspondent aux expériences du plan 4.2p. Les droites en pointillés permettent de visualiser plus facilement les tendances observées.



**Figure 4.9 - Evolution de la fraction réentraînée en fonction de la teneur en eau de la poudre pour différentes masses volumiques tassées et vitesses d'air**

De l'analyse des résultats du plan 4.2p représentés sur ce graphe, nous pouvons faire plusieurs commentaires :

- Contrairement à Friess et Yadigaroglu (1998) (cf. § 1.3.1.1), nous n'observons aucune influence de la masse volumique tassée de la poudre sur le réentraînement. Cela ne signifie pas que cet effet n'existe pas, mais seulement qu'il est trop petit pour être mesurable dans BISE Inactive. Une explication possible pourrait être attribuée à la gamme de variation, très faible, que nous étudions. Toutefois, ce domaine d'étude s'applique à de nombreuses poudres.

- La teneur en eau a un effet significatif et négatif sur la mise en suspension : lorsque la poudre d'alumine de 46  $\mu\text{m}$  contient environ 1  $\text{mgH}_2\text{O/g}$  de poudre (i.e. poudre prise à l'état ambiant), le réentraînement est plus faible que pour une poudre sèche (i.e. 0  $\text{mgH}_2\text{O/g}$ ). Autrement dit, une diminution de la quantité d'eau dans la poudre augmente le réentraînement de particules. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, § 1.3.1.1, ceci s'explique par une diminution des forces d'adhérence due à une diminution des forces de capillarité dans le cas d'une poudre sèche. Ainsi, la mise en suspension correspondant au rapport des forces aérodynamiques sur les forces d'adhérence, en est augmentée. Ces observations contredisent donc les explications avancées par Fromentin (1989) qui suggère que l'augmentation de l'adhérence de dépôts réalisés sous atmosphère humide, peut conduire à la formation d'agglomérats qui peuvent être plus facilement réentraînés (cf. § 1.3.1.1).

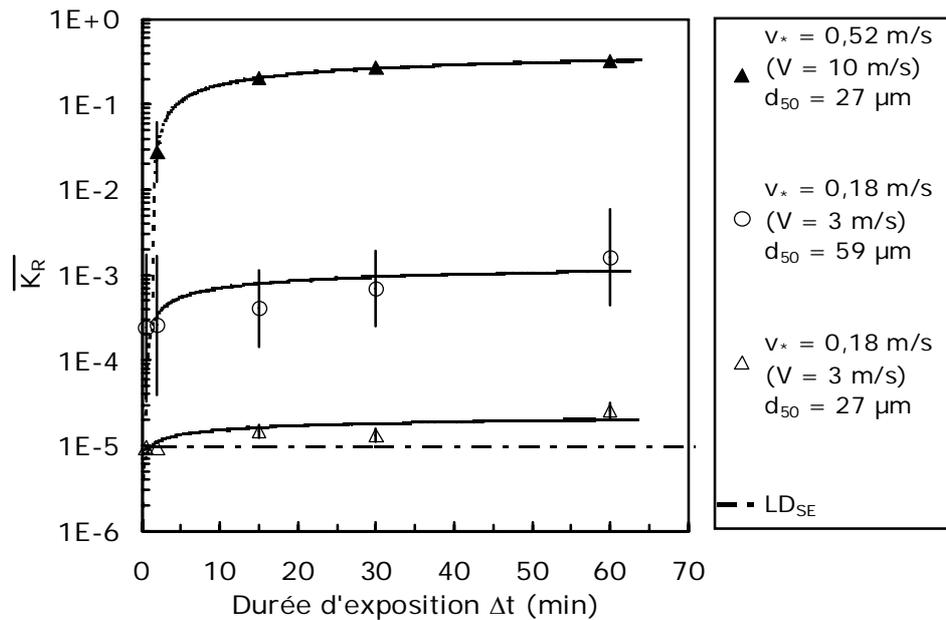
Afin de compléter ces résultats et de confirmer les tendances observées, nous réalisons des mesures supplémentaires à une vitesse d'air plus faible ( $v_* = 0,19$  m/s soit  $V = 3,1$  m/s). Pour ce faire, nous fixons à  $1,7$  g/cm<sup>3</sup> la valeur de la masse volumique de la poudre (valeur moyenne de son domaine de variation). Les fractions réentraînées ainsi obtenues sont ajoutées sur la Figure 4.9 avec leur intervalle de confiance à 95 %.

La comparaison des fractions mises en suspension pour les deux vitesses d'air montre que l'influence de la teneur en eau sur le réentraînement n'a pas un effet linéaire sur la vitesse. En effet, à  $0,4$  m/s ( $V = 7,5$  m/s), la poudre une fois séchée augmente le  $\overline{K_R}$  de plus de deux ordres de grandeur (de  $4,1 \cdot 10^{-3}$ , il atteint  $6,3 \cdot 10^{-1}$ ). Par contre à  $0,19$  m/s ( $V = 3,1$  m/s), cette variation n'est plus que d'un ordre de grandeur (de  $5,2 \cdot 10^{-5}$  à  $1,3 \cdot 10^{-3}$ ). La teneur en eau de la poudre a donc une influence d'autant plus grande sur le réentraînement que la vitesse est grande.

D'après ces résultats, nous pouvons donc avancer l'hypothèse que la teneur en eau a un effet important sur la mise en suspension, dès lors que la zone de transition est atteinte : une faible teneur en eau favoriserait ainsi l'apparition de la déformation du tas.

#### **4.2.3. Effets de la durée d'exposition, de l'accélération et de la rugosité de la surface**

Pour la durée d'exposition, nous avons déjà fait des essais préliminaires lors de l'élaboration des gammes de variation des différents paramètres (cf. § 3.2.3.4). Ces premiers résultats montrent que le phénomène de réentraînement d'un dépôt conique dans les conditions expérimentales spécifiques étudiées, se stabilisent au cours du temps : au bout de 15 min, la fraction mise en suspension n'évolue pratiquement plus. Ces premiers essais sont complétés pour des poudres de  $27$   $\mu$ m et  $59$   $\mu$ m exposés à une vitesse de frottement de  $0,18$  m/s ( $V = 3$  m/s) suivant la méthode A (cf. § 3.1.4). Les fractions réentraînées moyennes obtenues sont présentées sur la Figure 4.10 en fonction de la durée d'exposition. Nous ajoutons les points expérimentaux à  $27$   $\mu$ m et  $0,52$  m/s (soit  $V = 10$  m/s) déjà décrits à la Figure 3.1. Chaque donnée est représentée avec son intervalle de confiance à 95 %. Les lignes en pointillées résultent de régressions linéaires que nous avons effectuées (cf. § 3.1.4).



**Figure 4.10 – Evolution temporelle de la fraction réentraînée pour trois conditions expérimentales du couple vitesse – granulométrie**

Les résultats de la Figure 4.10 mettent en évidence que la fraction réentraînée évolue de façon similaire en fonction du temps, quelles que soient les configurations expérimentales de vitesse et de granulométrie. En effet, si l'on compare les valeurs de  $\overline{K_R}$  obtenues à  $\Delta t = 15$  et  $\Delta t = 2$  min pour ces différentes configurations, on constate que leurs rapports sont tous inférieurs à un ordre de grandeur. Bien que notre méthode de mesure DPS (cf. § 3.1.1) ne nous permette pas de quantifier précisément la fraction de particules mises en suspension dans les premières secondes, ces résultats nous suffisent pour affirmer que la majorité du réentraînement se produit dans une durée inférieure à 2 min. Ils seront confirmés ultérieurement par des séquences photographiques du réentraînement au cours du temps (cf. Figure 4.18). Comme nous l'avons vu au § 1.3.1.4, cette évolution temporelle de la fraction réentraînée est bien en accord avec la littérature.

Les expériences du plan 8.3p pour lesquelles la durée d'exposition, l'accélération et la rugosité de la surface ont été étudiées, sont synthétisées sur la Figure 4.11. Nous y représentons les fractions obtenues suivant ce plan en fonction de l'accélération pour les deux durées d'exposition et les deux rugosités de surface définies au Tableau 4.4. Les fractions mises en suspension correspondent toujours à la moyenne de trois expériences. Elles sont représentées avec leur intervalle de confiance à 95 %. Les lignes en pointillés nous permettent de mieux visualiser les tendances observées.

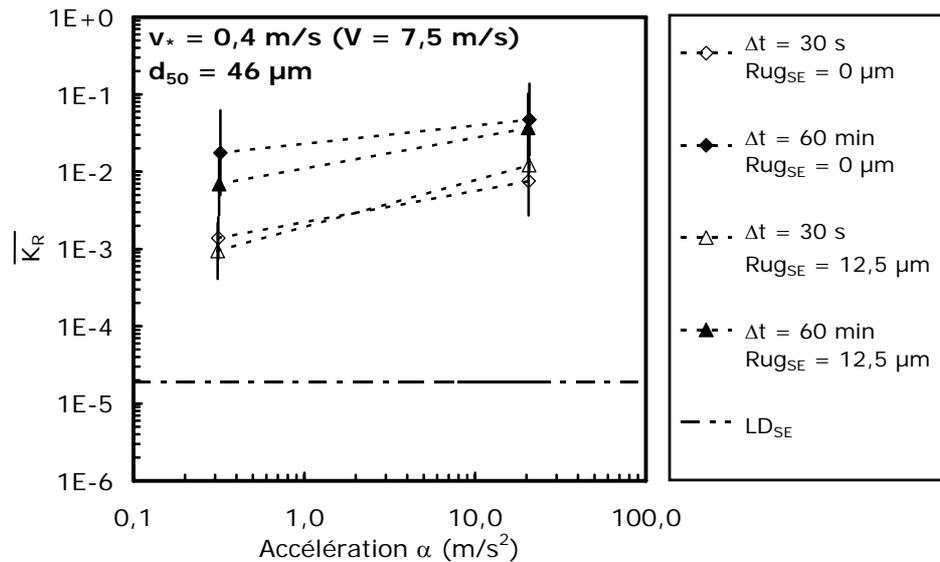


Figure 4.11 – Evolution de la fraction réentraînée en fonction de l'accélération pour différentes durées d'exposition et rugosités de surface – Résultats du plan d'expériences 8.3p

Plusieurs informations ressortent de ce graphique.

- Tout d'abord, les résultats de ce plan d'expériences nous confirment l'effet de la durée d'exposition sur la mise en suspension pour une configuration expérimentale ( $v_*$ ,  $d_{50}$ ) différente des précédentes. En effet, si l'on considère que le  $\overline{K}_R$  évolue très peu entre 15 et 60 min, on distingue qu'un ordre de grandeur sépare les fractions réentraînées à  $\Delta t = 60$  min et  $\Delta t = 30$  s. Cet écart, légèrement plus grand qu'à la Figure 4.10, s'explique par la prise en compte d'un  $\overline{K}_R$  mesuré à  $\Delta t < 2$  min. Il confirme également que la majeure partie du phénomène se manifeste au cours de ces deux minutes.

- D'après la Figure 4.11, on observe un effet positif de l'accélération sur le réentraînement, c'est à dire une augmentation de la fraction réentraînée  $\overline{K}_R$  lorsque l'accélération passe de 0,3 à 20 m/s<sup>2</sup>. Toutefois, nous n'attribuons pas cet effet au paramètre accélération en tant que tel. En effet, si l'on se reporte au graphe de la Figure 2.14 du chapitre 2, on note que l'évolution de la vitesse instantanée pour l'accélération égale à 20 m/s<sup>2</sup> est caractérisée, dans sa phase transitoire, par des vitesses qui dépassent largement la vitesse visée lors de l'essai. Les vitesses instantanées atteignent 9 m/s alors que la vitesse visée est de 7,5 m/s. Par ailleurs, nous notons également, dans cette phase transitoire, des fluctuations relativement importantes, signe de fortes turbulences. Ceci ne s'observe pas pour l'accélération de 0,3 m/s<sup>2</sup> où ces fluctuations restent faibles et la vitesse instantanée n'atteint pas la valeur forte mesurée pour

l'accélération de  $20 \text{ m/s}^2$ . Nous attribuons donc l'augmentation de la valeur  $\overline{K_R}$  à l'apparition de vitesses instantanées fortes pour  $20 \text{ m/s}^2$ . Ces vitesses instantanées ont un effet d'autant plus réel sur la fraction  $\overline{K_R}$  que nous nous situons, pour le réentraînement, dans la zone de transition (cf. Figure 4.8) où la fraction  $\overline{K_R}$  évolue subitement.

Au chapitre 3, nous avons décrit des mesures effectuées sur une poudre d'alumine de  $27 \mu\text{m}$  à  $0,52 \text{ m/s}$  avec une accélération de  $30,8 \text{ m/s}^2$  (cf. § 3.1.4). Nous comparons alors ces fractions réentraînées à celles mesurées dans le § 4.1 pour une accélération de  $1,5 \text{ m/s}^2$ . On constate là encore qu'un facteur 10 sépare les deux fractions réentraînées moyennes : de  $2,5 \cdot 10^{-2}$  à  $1,5 \text{ m/s}^2$ , on obtient  $2,5 \cdot 10^{-1}$  pour une poudre de  $27 \mu\text{m}$  à  $0,52 \text{ m/s}$  et  $30,8 \text{ m/s}^2$ . Ces derniers résultats montrent donc que ce phénomène apparaît sur tout notre domaine de vitesse. Toutefois, la vitesse instantanée maximale atteinte varie d'une accélération à l'autre. Quelques exemples sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau 4.5 - Vitesses instantanées maximales observées pour les fortes accélérations dans BISE**

Vitesse moyenne $V (v_*) \text{ (m/s)}$	Accélération maximale $\alpha_{\text{max}} \text{ (m/s}^2\text{)}$	Vitesse instantanée maximale $V(t) \text{ (m/s)}$
0,5 (0,04)	2,6	0,8
5 (0,28)	14,2	6
7,5 (0,40)	20	9
10 (0,52)	31	14

■ Toujours d'après la Figure 4.11, on observe que le rapport entre la fraction  $\overline{K_R}$  mesurée à  $\alpha = 20 \text{ m/s}^2$  et celle mesurée à  $\alpha = 0,3 \text{ m/s}^2$  est légèrement plus élevée pour une période d'essai égale à 30 s que pour celle égale à 60 min. On attribue cette différence à la durée relative de la phase transitoire par rapport à la durée de l'essai. En effet, pour  $\alpha = 0,3 \text{ m/s}^2$ , la durée de la phase transitoire est d'environ 25 s alors que la durée de l'essai est de 30 s. Le tas de poudre n'a donc pas été exposé durant toute la durée de l'essai à la vitesse visée, soit  $7,5 \text{ m/s}$ . Ceci doit conduire à une fraction  $\overline{K_R}$  plus faible que si ce tas de poudre avait été exposé réellement à la vitesse visée tout au long de l'essai. En première approximation et pour ces configurations particulières, nous proposons que la vitesse à prendre en compte soit égale à la vitesse moyenne  $\overline{V}$  que subit réellement la particule sur la durée de l'essai, soit :

$$\bar{V} = \frac{1}{t_2} \left( \int_0^{t_1} \alpha t dt + \int_{t_1}^{t_2} V dt \right) \quad (4.1)$$

où  $t_1$  est la durée de la rampe d'accélération, soit  $t_1 = \frac{V}{\alpha}$  (s),

$t_2$  est la durée de l'essai, soit  $\Delta t$ .

Dans ces conditions,  $\bar{V}$  est égale à 4,5 m/s.

Nous avons pu observer des résultats similaires pour la poudre de 27  $\mu\text{m}$  à  $v_* = 0,52$  m/s ( $V = 10$  m/s) et à une accélération égale à 0,5 m/s<sup>2</sup>.

■ Enfin, comme nous l'avions prédit au § 1.3.1.3, nos résultats de la Figure 4.11 mettent clairement en évidence que la rugosité de la surface d'essai n'influence pas le réentraînement. En effet, pour que ce paramètre intervienne de façon importante sur la mise en suspension, il faut qu'une majorité des particules du dépôt soient en contact direct avec la surface pour en augmenter l'adhérence. Or dans le cas d'un tas de poudre, seule une très faible proportion des particules de la poudre se trouve dans cette situation. L'hypothèse émise précédemment est donc vérifiée ici.

#### 4.2.4. Influence de la forme du dépôt

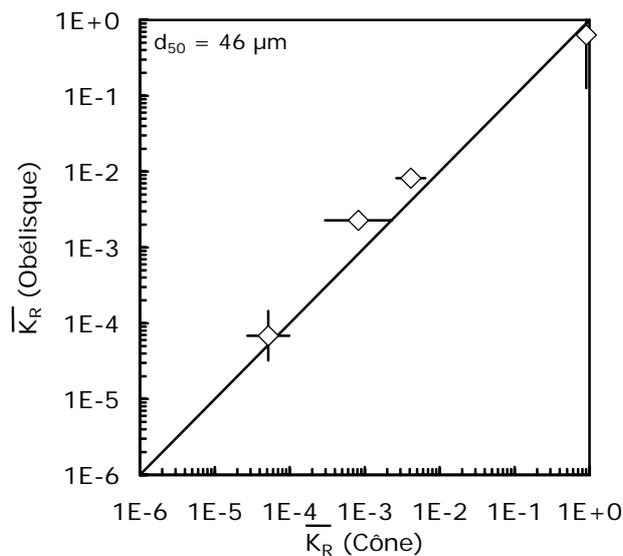
Pour rappel, les premières expériences réalisées suivant le plan 12.11p (cf. § 4.1.1) ont montré que, devant l'influence de la vitesse et de la granulométrie, les dimensions du dépôt conique de poudre n'a pas d'effet significatif sur le réentraînement.

Toutefois, lorsque l'on observe la phénoménologie du réentraînement pour ce type de dépôt (cf. Figure 4.18 et Figure 4.19 du § 4.4), il est possible que la forme du tas intervienne sur le phénomène, notamment lors de la seconde phase de réentraînement. Cette seconde phase apparaît, rappelons-le, sous l'action d'une vitesse élevée et consiste en une déformation du dépôt qui conduit à un  $K_R$  fort. Il nous a donc semblé intéressant d'élargir le domaine d'application de notre travail en étudiant l'effet de forme du dépôt.

Pour ce faire, nous réalisons en plus du cône, deux autres types de dépôt : un obélisque et une galette. La justification de ces formes et leurs dimensions ont été données au § 3.2.3.1. Nous étudions alors l'évolution de la fraction réentraînée pour la poudre de diamètre médian 46  $\mu\text{m}$  en fonction de la vitesse d'air pour ces trois formes. Les valeurs des paramètres non étudiés ici, sont prises égales à leur valeur moyenne du plan 12.11p (cf. Tableau 4.1).

Afin de mettre en évidence une éventuelle influence de la forme du dépôt, nous comparons les séries de données deux à deux. Pour commencer, nous traitons le cas de l'obélisque et du cône.

La Figure 4.12 présente les  $\overline{K_R}$  mesurés pour l'obélisque en fonction de ceux mesurés pour le cône pour différentes vitesses de frottement comprises entre 0,18 et 0,52 m/s ( $3 \leq V \leq 10$  m/s). Chaque fraction réentraînée moyenne a été obtenue sur trois expériences. Elle est représentée avec son intervalle de confiance à 95 %. Nous avons tracé également la première bissectrice.



**Figure 4.12 – Fractions réentraînées moyennes obtenues pour l'obélisque en fonction des fractions réentraînées moyennes obtenues pour le cône pour différentes vitesses d'air ( $0,18 \leq v_* \leq 0,52$  m/s ou  $3 \leq V \leq 10$  m/s) -  $d_{50} = 46 \mu\text{m}$ .**

La représentation de la Figure 4.12 nous permet de relier les deux séries de fractions réentraînées par une relation de la forme  $\text{Log } K_R(\text{Obélisque}) = a_0 + a_1 \text{Log } K_R(\text{Cône})$ . Nous regardons alors statistiquement si les valeurs de  $a_0$  et de  $a_1$  sont significativement différentes des valeurs respectives 0 et 1 (soit de la première bissectrice). Pour ce faire, nous réalisons deux tests :

- Le premier (test de Fisher) est destiné à montrer qu'il existe une relation entre les fractions mesurées pour l'obélisque et celle mesurées le cône. Cette relation existe si

$$f_{\text{obs}} > f_{0,975}$$

avec  $f_{\text{obs}}$  : valeur observée du test de Fisher,

$f_{0,975}$  : valeur critique du test de Fischer à 97,5 % de confiance.

- Le second test (Student) a pour but de mettre en évidence que la relation linéaire qui lie les fractions réentraînées mesurées pour ces deux types de dépôt est bien de la forme  $\text{Log } K_R(\text{Obélisque}) = \text{Log } K_R(\text{Cône})$ . Ceci est vrai si

$$t_{\text{obs}} < t_{0,975}$$

avec  $t_{\text{obs}}$  : valeur observée du test de Student,

$f_{0,975}$  : valeur critique du test de Student à 97,5 % de confiance.

Les résultats de ces tests sont présentés dans le Tableau 4.6. Ce tableau présente aussi les valeurs du coefficient de corrélation  $R^2$ .

**Tableau 4.6 – Tests de comparaison de la régression  $\text{Log } K_R(\text{Obélisque}) = a_0 + a_1 \text{Log } K_R(\text{Cône})$**

$K_R(\text{Obélisque})$ vs $K_R(\text{Cône})$		$t_{\text{obs}}$	$t_{0,975}$ (v')
$a_0$	-0,04	0,25	4,30 (2)
$\sigma(a_0)$	0,23		
$a_1$	0,91	1,58	4,30 (2)
$\sigma(a_1)$	0,08		
$R^2$	0,98	$f_{\text{obs}}$	$f_{0,975}$
		129,93	4,96

L'analyse des données du Tableau 4.6 montre bien que les deux tests sont vérifiés : la relation qui lie les  $K_R$  de l'obélisque avec ceux du cône, n'est significativement pas différente de la première bissectrice tracée sur la Figure 4.12. Ces deux formes n'ont donc pas un effet significatif sur le  $K_R$ .

Nous réalisons ensuite la même analyse entre les fractions réentraînées de la galette avec celles du cône, et avec celles de l'obélisque. La Figure 4.13 présente, sur le graphe de gauche la comparaison des  $K_R$  obtenues pour la galette et pour le cône, et sur le graphe de droite, la comparaison des  $K_R$  obtenues pour l'obélisque et pour la galette.

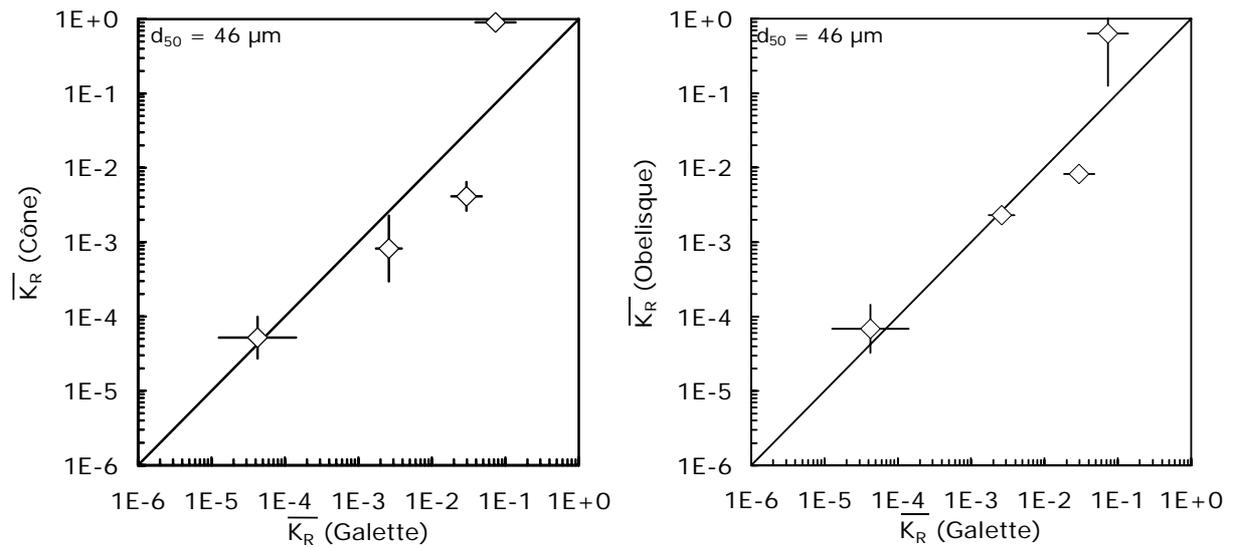


Figure 4.13 – Comparaison des  $K_R$  moyens obtenus pour la galette avec ceux du cône, et des  $K_R$  moyens obtenus pour l’obélisque avec ceux de la galette pour différentes vitesses –  $d_{50} = 46 \mu\text{m}$ .

Les résultats de nos tests statistiques sont regroupés dans le Tableau 4.7.

Tableau 4.7 – Tests de comparaison des régressions  $\text{Log } K_R(\text{Cône}) = a_0 + a_1 \text{Log } K_R(\text{Galette})$  et  $\text{Log } K_R(\text{Obélisque}) = a_0 + a_1 \text{Log } K_R(\text{Galette})$

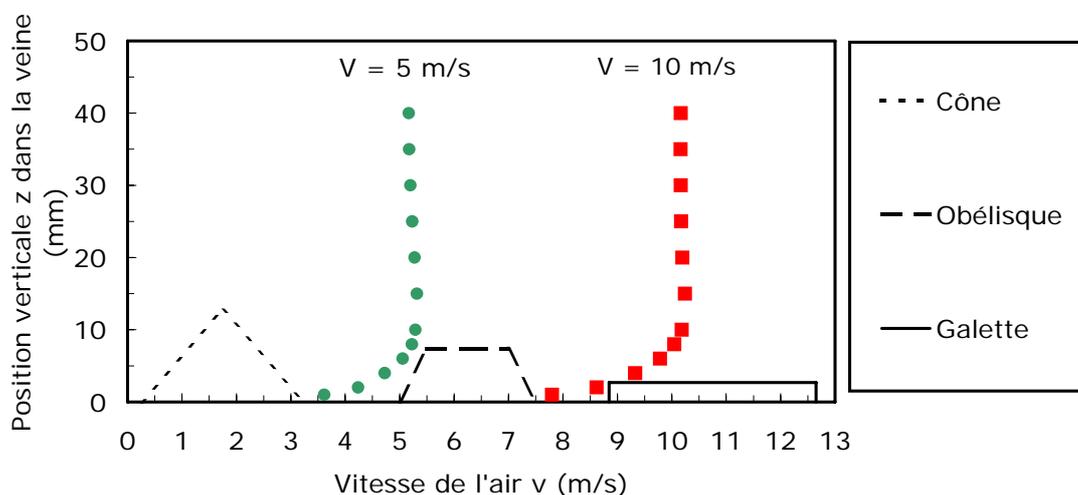
$K_R(\text{Cône})$ vs $K_R(\text{Galette})$		$t_{\text{obs}}$	$t_{0,975} (v')$	$K_R(\text{Obélisque})$ vs $K_R(\text{Galette})$		$t_{\text{obs}}$	$t_{0,975} (v')$
$a_0$	0,17	0,21	4,30 (2)	$a_0$	0,25	0,43	4,30 (2)
$\sigma(a_0)$	0,12			$\sigma(a_0)$	0,82		
$a_1$	1,09	0,30	4,30 (2)	$a_1$	1,05	0,22	4,30 (2)
$\sigma(a_1)$	0,41			$\sigma(a_1)$	0,30		
$R^2$	0,78	$f_{\text{obs}}$	$f_{0,975}$	$R^2$	0,86	$f_{\text{obs}}$	$f_{0,975}$
		7,00	4,96			11,98	4,96

Comme pour l’obélisque et le cône, nous n’observons pas de différence significative sur le  $K_R$ . Cette analyse nous permet de conclure que, compte tenu de la variation de nos mesures, la forme du dépôt n’est pas un paramètre influant sur la mise en suspension.

Toutefois, on remarque sur la Figure 4.13 que les fractions obtenues avec la galette sont plus faibles que celles mesurées pour les deux autres formes, le rapport des  $\overline{K_R}$  étant de l’ordre de 10. Cette différence apparaît uniquement pour des  $\overline{K_R}$  très élevés ( $\sim 10^{-1}$ ) correspondant à des vitesses caractéristiques de la phase de déformation du

dépôt, c'est à dire pour des vitesses  $v_* \geq \sim 0,43$  m/s soit dans BISE de  $V \geq 8$  m/s. Cette déformation, comme nous le verrons au § 4.4, est fonction de la forme initiale.

Afin de comprendre l'origine de cette différence du  $K_R$  à grande vitesse, nous nous sommes intéressée à la vitesse incidente au tas. Pour ce faire, nous traçons sur la Figure 4.14, les deux profils de vitesse verticaux mesurés au § 2.2.3 pour des vitesses moyennes de 5 et 10 m/s (soit  $v_* = 0,28$  et  $0,52$  m/s) et les confrontons aux dimensions des trois formes de dépôts. La Figure 4.14 représente ces deux gradients de vitesse à proximité de la paroi, sur lesquels ont été juxtaposés le cône, l'obélisque et la galette. L'ordonnée  $z$  correspond à la position verticale des différentes vitesses mesurées et à la hauteur réelle du tas dans la veine. Pour des raisons de clarté, les trois formes ne sont pas superposées l'une sur l'autre. Toutefois, chacune d'elles doit être comparée aux deux profils de vitesse.



**Figure 4.14 – Comparaison de deux profils verticaux de vitesse dans la veine ( $V = 5$  et  $10$  m/s) avec les dimensions des trois formes de tas (cône, obélisque et galette)**

Cette représentation montre que l'influence de la forme du dépôt est directement reliée à sa hauteur. En effet, on constate que :

- Le cône comme l'obélisque ont une hauteur relativement voisine de l'épaisseur de la couche limite déterminée au § 2.2.4.2. De ce fait, ils sont, tous deux, exposés à des vitesses proches ou égales à la vitesse moyenne.

- Du fait du gradient de vitesse à proximité de la paroi, la galette, elle, est exposée à une vitesse maximale plus petite que la vitesse moyenne. Entre 5 et 10 m/s, elle vaut environ 80 à 90 % de cette dernière. Il est donc logique que, pour une vitesse qui fait apparaître une déformation du cône et de l'obélisque, la galette ne soit pas (ou peu) déformée.

En conclusion, notre étude montre que la forme du dépôt n'a pas un effet significatif sur le réentraînement. Toutefois, on observe que pour une vitesse qui correspond à l'apparition de la phase de déformation du dépôt, un écart d'environ un ordre de grandeur existe entre les fractions réentraînées de la galette, et celles du cône et de l'obélisque. Une analyse des propriétés de l'écoulement d'air à proximité du dépôt met en évidence que cette différence dépend de sa hauteur.

### **4.3. Analyse globale et dispersion des résultats**

Les résultats obtenus dans le paragraphe précédent nous ont permis d'étudier les six paramètres dont les effets étaient non significatifs devant la vitesse et la granulométrie (paramètres prépondérants) dans les conditions du plan d'expériences 12.11p. Nos expériences ont alors été réalisées dans des domaines de variation plus larges que pour le premier plan d'expériences, mais elles n'ont pas été effectuées sur l'ensemble du domaine expérimental disponible de BISE Inactive : les tendances observées sont donc spécifiques aux gammes étudiées.

A partir de la totalité de nos expériences, nous allons tenter de généraliser les effets relatifs des huit paramètres étudiés à l'ensemble de notre domaine expérimental. Nous caractérisons ensuite la dispersion expérimentale obtenue sur l'ensemble de nos expériences.

#### **4.3.1. Bilan global sur les effets des paramètres étudiés**

Effectuons une régression linéaire multiple sur l'ensemble de nos données expérimentales. L'analyse résultante sur cette base de données constituée de 227 expériences, nous permet alors d'apprécier l'influence relative des huit paramètres étudiés sur le réentraînement et ce, sur l'ensemble du domaine expérimental de BISE Inactive. Le Tableau 4.8 récapitule les différents effets de ces paramètres et présente les domaines d'études pour lesquels ces facteurs ont été étudiés :

Tableau 4.8 – Classement des paramètres et domaines expérimentaux dans BISE Inactive

	PARAMETRES	DOMAINE EXPERIMENTAL
PRIMAIRES	Vitesse de frottement de l'air	0,04 à 0,52 m/s ( $0,5 \leq V \leq 10$ m/s)
	Granulométrie de la poudre d'Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 à 59 $\mu\text{m}$ ( $\sigma_g = 1,3$ )
SECONDAIRES	Teneur en eau de la poudre	0 et 1 mgH <sub>2</sub> O/g
	Accélération de l'air*	0,3 à 31 m/s <sup>2</sup>
NON	Durée d'exposition	30 s à 60 min
SIGNIFICATIFS	Forme du tas	Cône - Obélisque - Galette
	Rugosité de la surface	0 à 12,5 $\mu\text{m}$
	Masse volumique tassée de la poudre	1,5 à 2 g/cm <sup>3</sup>

\* Effet lié au dépassement de la vitesse moyenne

Ainsi, cette analyse nous permet de confirmer l'influence majoritaire des paramètres appelés « primaires », à savoir la vitesse et la granulométrie, ainsi que leur interaction.

Elle nous permet également d'apprécier, sur l'ensemble du domaine expérimental, deux paramètres « secondaires ». Il s'agit de la teneur en eau de la poudre et de l'accélération au démarrage de l'écoulement. Ces deux paramètres ont une influence non négligeable sur la mise en suspension, après l'effet important de la vitesse et de la granulométrie et dans certaines conditions dont nous reparlerons. Nous notons tout de même que :

- La teneur en eau de la poudre contribue de façon négative au réentraînement. Le phénomène augmente avec la diminution de la quantité d'eau dans la poudre.

- A partir d'une certaine accélération, la fraction réentraînée augmente avec celle-ci. En réalité, nous l'avons vu, cette augmentation provient de vitesses instantanées au cours de la rampe d'accélération, qui sont supérieures à la vitesse moyenne. Cet effet particulier de l'accélération est donc spécifique à l'installation BISE Inactive et aux conditions expérimentales imposées.

Enfin, les résultats de notre régression multiple mettent en évidence que quatre paramètres parmi les huit étudiés n'ont pas une influence significative sur le réentraînement. Ces facteurs sont la durée d'exposition, la forme du tas, la rugosité de la surface et la masse volumique de la poudre. Parmi eux, on distingue toutefois deux

paramètres pour lesquels on observe une influence très localisée sur la mise en suspension. Il s'agit de :

- la durée d'exposition dont l'effet s'estompe au-delà de 15 minutes,
- la forme du tas qui n'intervient qu'à partir d'une vitesse caractéristique de déformation du dépôt et ce, sur une gamme de vitesses limitées.

Cependant, devant la très forte influence des paramètres primaires puis secondaires, les effets de la durée d'exposition et de la forme du tas ne sont pas significatifs dans nos conditions expérimentales.

#### 4.3.2. Ecart type sur les résultats

■ Afin d'évaluer l'incertitude de nos mesures liées principalement à la variation engendrée par nos pesées successives, nous calculons l'écart type de mesure  $\sigma(\log K_R)$  obtenu sur chaque essai, à partir de la relation ( 3.4 ). Ces écarts types sont représentés en fonction du  $\log K_R$  sur la Figure 4.15.

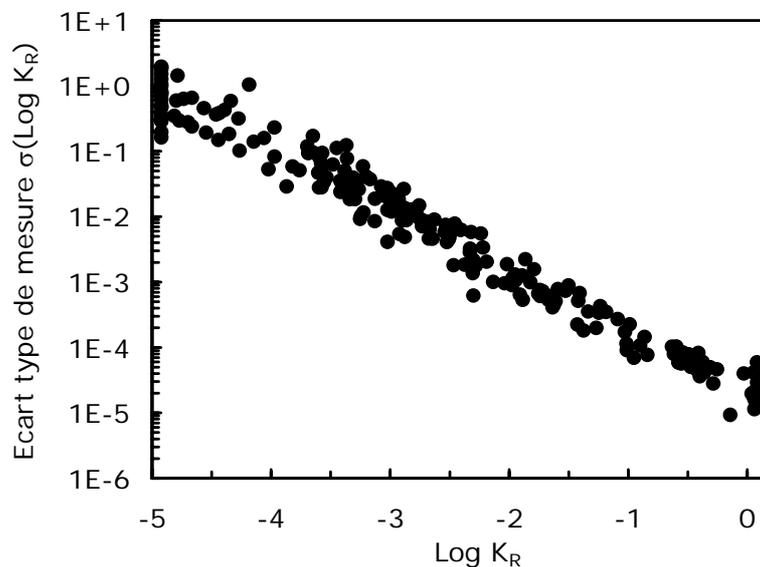
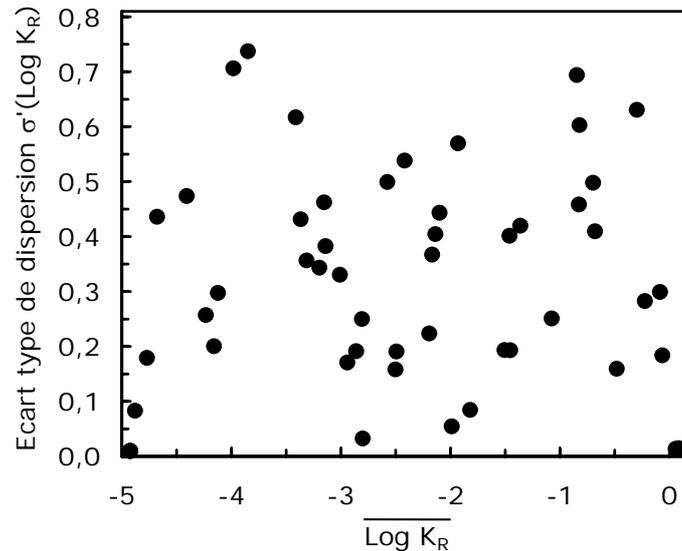


Figure 4.15 - Représentation de l'écart type de mesure en fonction des valeurs du logarithme des fractions réentraînées expérimentales  $K_R$

Les résultats de la Figure 4.15 montrent que plus le coefficient de mise en suspension est grand, plus l'incertitude de mesure est petite.

■ Les 227 essais réalisés se répartissent en 73 configurations expérimentales différentes. Chaque configuration a donc fait l'objet de plusieurs répétitions (entre 1 et 18 fois selon la configuration). Nous calculons pour chacune d'elle un écart type de dispersion expérimentale  $\sigma'(\text{Log } K_R)$ , suivant la relation ( 3.8 ). Ces écarts types sont représentés sur la Figure 4.16 en fonction de leur moyenne.



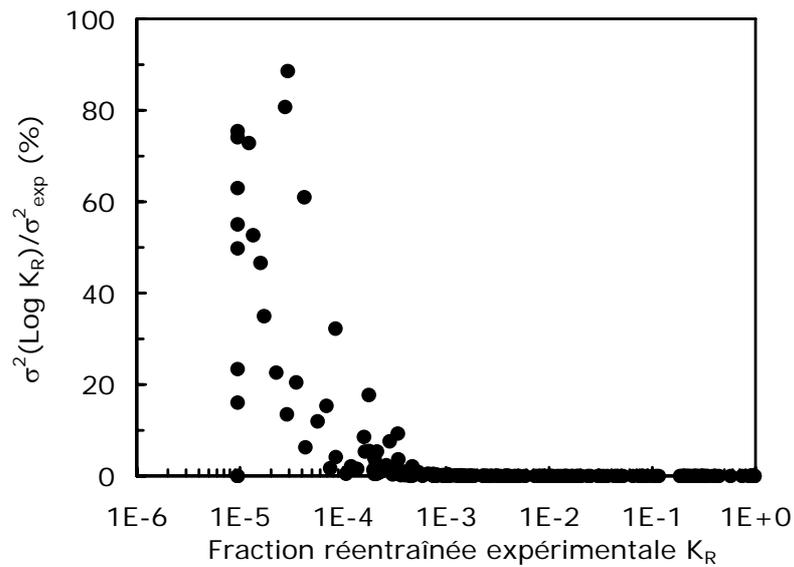
**Figure 4.16 - Représentation de l'écart type de dispersion en fonction des valeurs moyennes du logarithme des fractions réentraînées expérimentales**

La Figure 4.16 montre que l'écart type expérimental observé est aléatoire. On remarque, en effet, que la dispersion des résultats est indépendante de la valeur moyenne du  $K_R$  et donc du phénomène de réentraînement. Toutefois, la typologie des écarts types étant relativement homogène, il nous est possible de déterminer un écart type expérimental moyen  $\sigma_{\text{exp}}$  (relation ( 3.9 )) avec son degré de liberté fusionné à partir de l'ensemble de ces écarts types. On obtient :

$$\sigma_{\text{exp}} = 0,41$$

Cet écart type est connu avec un degré de liberté  $\nu_{\text{exp}} = 154$ .

■ Nous pouvons ensuite comparer les différents écarts types de mesure avec l'écart type expérimental moyen  $\sigma_{\text{exp}}$ . La Figure 4.17 illustre le pourcentage des rapports des variances en fonction du  $K_R$ .



**Figure 4.17 – Rapport en pourcentage entre les variances de mesure et la variance expérimentale moyenne en fonction de la fraction réentraînée expérimentale**

Ce graphe montre que, pour des faibles valeurs de  $K_R$  (proches de la limite de détection), la variance liée à la mesure est très importante devant celle liée à la dispersion.

Toutefois, dès lors que  $K_R \geq 10^{-4}$ , moins de 5 % de la dispersion expérimentale est attribuée à la procédure de pesée. Dans ces conditions, la dispersion des résultats provient en majeure partie du phénomène de réentraînement.

■ Enfin, à partir de l'incertitude relative à  $2\sigma_{\text{exp}}$  sur le  $\text{Log } K_R$ , nous pouvons estimer l'incertitude expérimentale obtenue sur la fraction réentraînée. On a alors :

$$\text{Log } K_R \pm 2 \sigma_{\text{exp}}$$

Ce qui donne pour des valeurs de la fraction réentraînée maximale  $K_{R\text{max}}$  et minimale  $K_{R\text{min}}$  :

$$K_{R\text{max}} = 10^{0,82} \times K_R = 6,60 \times K_R$$

et

$$K_{R\text{min}} = 10^{-0,82} \times K_R = 0,15 \times K_R.$$

Nous majorons ces résultats à :

$$K_{R\text{max}} = 10 \times K_R$$

et

$$K_{R\text{min}} = 0,1 \times K_R.$$

L'incertitude moyenne sur l'ensemble de nos résultats expérimentaux est donc déterminée avec un niveau de confiance à 95 %, à  $\pm 1$  ordre de grandeur. Nous utilisons donc cet intervalle dans l'analyse des données et l'établissement de la corrélation au chapitre 5.

#### **4.4. Phénoménologie du réentraînement**

Suite à l'ensemble de ces résultats, nous nous sommes intéressée à la manière dont sont mises en suspension les particules d'un tas de poudre, afin de comprendre le phénomène de réentraînement. L'objet de ce chapitre n'est pas d'étudier la déformation d'un tas de poudre et d'en décrire sa physique. Ce travail est une étude à part entière (Foucault, 1994 ; Dauchot *et al.*, 2001 ; Andreotti *et al.*, 2002). Nous nous attachons uniquement ici à la phénoménologie de la phase de déformation, phase qui a été mise en évidence au § 4.1.2.2 pour des fractions réentraînées supérieures à environ  $10^{-2}$ , ainsi qu'à son évolution dans le temps.

La majorité de nos expériences a été réalisée sur des dépôts de forme conique, c'est pourquoi nous nous attarderons particulièrement sur la mise en suspension de ce type de tas. Toutefois, nous comparerons brièvement les phénomènes observés avec ceux de dépôts de forme obélisque ou galette qui ont fait l'objet du § 4.2.4.

##### **4.4.1. Déformation de dépôts coniques**

Pour faciliter l'observation du réentraînement, quelques expériences ont été filmées dans BISE avec une caméra numérique SONY (XC-8500 CE).

■ Une première séquence photographique est présentée à la Figure 4.18. Elle montre l'évolution de la mise en suspension d'un cône de poudre en fonction du temps pour une granulométrie de la poudre d'alumine de  $d_{50} = 59 \mu\text{m}$  exposée à une vitesse de frottement  $v_* = 0,52 \text{ m/s}$  soit  $V = 10 \text{ m/s}$ . La séquence a été prise vue de dessus, l'écoulement de l'air venant de la gauche sur la figure. On y distingue la surface d'essai circulaire sur laquelle est déposée la poudre.

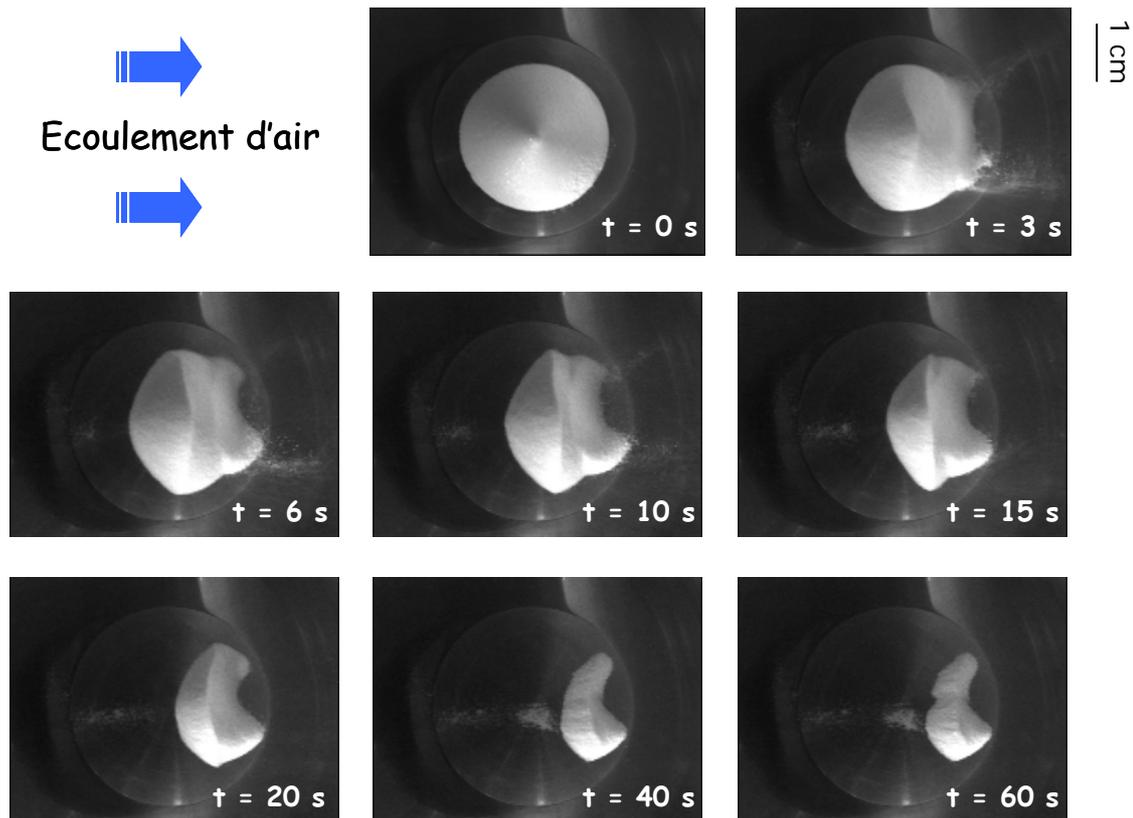


Figure 4.18 - Séquence photographique montrant l'évolution d'un dépôt conique de poudre d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  en fonction du temps ( $d_{50} = 59 \mu\text{m}$  et  $v_* = 0,52 \text{ m/s}$  ( $V = 10 \text{ m/s}$ )) –  $K_R = 9,7 \cdot 10^{-1}$

Cette séquence de photographies montre que, dans ces conditions expérimentales, le réentraînement s'effectue essentiellement sur les quarante premières secondes. Dépassé ce laps de temps, le réentraînement est stable. Ceci confirme bien une des hypothèses avancées au § 4.2.3 : au-delà de quelques dizaines de secondes, on observe expérimentalement que la durée d'exposition n'a plus d'influence sur le phénomène. Ici, pour un  $\Delta t = 2 \text{ min}$ , on obtient un  $K_R = 9,7 \cdot 10^{-1}$ .

Par ailleurs, la Figure 4.18 met en évidence la complexité du phénomène de réentraînement. En effet, associée à l'analyse plus fine de nos résultats, elle permet de confirmer l'hypothèse selon laquelle le réentraînement s'effectue en deux phases concomitantes, dont l'une est régie par une mise en suspension dite de « surface » de façon analogue à un dépôt multicouches qui a lieu dans les premières secondes, et l'autre, qui ne débute qu'au-delà d'une vitesse responsable d'une déformation du tas de poudre (vitesse atteinte après 0,3 s dans le cas de la Figure 4.18). Comme on le voit nettement, cette phase de déformation met en œuvre deux phénomènes de mise en suspension, d'une part un phénomène localisé sur la surface faisant face à l'écoulement d'air incident, d'autre part un phénomène localisé sur la face arrière du tas. Ces résultats sont tout à fait en accord avec les mesures de vitesse que

nous avons effectuées à proximité d'un obstacle conique au § 2.2.4.4. C'est pourquoi nous décomposons le phénomène de réentraînement suivant ce qui se passe en amont et en aval du tas, notre but étant d'identifier l'importance relative de ces deux phénomènes, de par le couple  $(v_*, d_{50})$ .

■ Comme nous l'avons observé à la Figure 2.12 et à la Figure 2.13, en amont du dépôt, il y a développement d'une couche limite le long et parallèlement à la surface du cône : la vitesse incidente de frottement  $v_*$  augmente donc de la base au sommet du tas. En conséquence, la quantité de particules qui sont mobilisées est plus importante en haut du tas qu'à sa base, puisque les particules du haut sont exposées plus rapidement à leur seuil de vitesse. De ce fait, ce phénomène engendre une diminution de la hauteur du tas comme le montrent les photos de la Figure 4.18. Il est donc responsable de la forme que prend la face avant au cours du temps.

Quant aux particules amont qui ne se trouvent pas au sommet du cône, mais dont la vitesse seuil est atteinte, elles sont entraînées par les lignes de courant qui contournent le tas.

On remarque également l'apparition d'un dépôt de particules alignées dans l'axe principal de l'écoulement. Cet alignement apparaît avec la disparition du tas en amont (photos  $t = 6$  s jusqu'à  $t = 60$  s de la Figure 4.18). Deux hypothèses sont envisagées pour expliquer ce phénomène :

- existence d'un point d'arrêt ( $V = 0$  m/s) dans l'axe principal de l'écoulement localisé à la base de la face amont du tas de poudre,

- existence de micro-tourbillons en amont réentraînant les particules.

Cette dernière hypothèse semble toutefois la plus plausible car le champ de turbulence de la Figure 2.13 met en évidence la présence d'une intensité de turbulence de l'ordre de 20 % en bas et en amont du tas ; ce qui laisserait bien supposer la présence de tourbillons à cet endroit.

■ En aval du dépôt, nous avons observé au § 2.2.4.4 l'existence de deux zones particulières. De la même façon, on distingue ici :

- la zone de cisaillement qui s'initie au sommet du cône : on peut imaginer que cette zone de cisaillement engendre de petits tourbillons ; en aval, la formation de ces tourbillons augmenterait alors la vitesse des particules situées au sommet et la

mobilisation des particules à ce niveau deviendrait plus important qu'en amont ; cette hypothèse est réaliste car la photo à  $t = 15$  s de la Figure 4.18 montre que le haut du tas, côté aval, se creuse alors qu'en amont, le tas s'arrondit.

- la zone de recirculation d'air, formée par un gros tourbillon : d'après les différentes photographies de la Figure 4.18, ce tourbillon doit évoluer dans les trois directions de l'espace ; dans cette zone en dépression et à l'abri du vent (les vitesses  $y$  sont pratiquement nulles et la turbulence élevée), on peut imaginer que le détachement des particules est dû à l'aspiration engendrée par le gradient de pression.

On note également à la base du tas, côté aval, deux étalements de particules placés de façon symétrique par rapport à l'axe de direction principale de l'écoulement  $y$ . Deux hypothèses sont avancées quant à leur origine. Ces particules proviendraient :

- d'un phénomène de saltation (déplacement des particules par bonds successifs – cf. § 1.3.1.2) des particules les plus grosses provenant de l'amont,
- d'une déformation due aux tourbillons dans le sillage du tas (glissement des grosses particules côté aval dû à l'envol des plus petites particules entraînées dans le tourbillon).

■ Nous avons également effectué une autre prise de séquences photographiques sur des poudres d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  de diamètre  $d_{50} = 27 \mu\text{m}$  et avec un écoulement d'air à  $v_* = 0,52 \text{ m/s}$  ( $V = 10 \text{ m/s}$ ). Le seul paramètre qui ait changé entre l'expérience de la Figure 4.18 et celle de la Figure 4.19 est la granulométrie, plus petite.

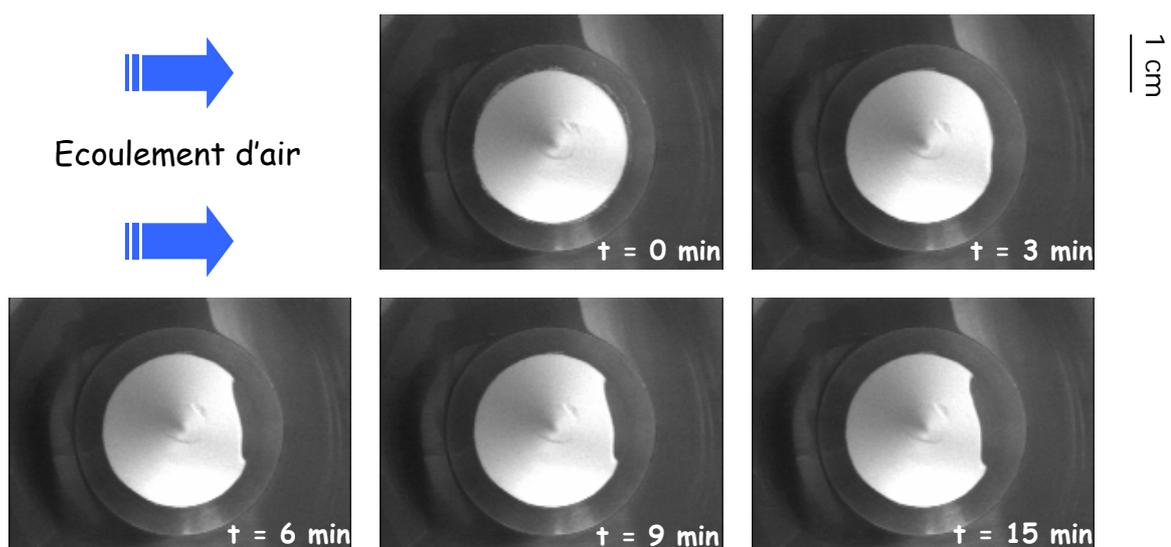


Figure 4.19 – Séquence photographique montrant l'évolution d'un dépôt conique de poudre d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  en fonction du temps ( $d_{50} = 27 \mu\text{m}$  et  $v_* = 0,52 \text{ m/s}$  ( $V = 10 \text{ m/s}$ )) -  $K_R = 4,0 \cdot 10^{-2}$

A la vue de cette série de photos et dans ces conditions expérimentales, on s'aperçoit que le réentraînement (plus faible car alors  $K_R = 4,0 \cdot 10^{-2}$ ) s'opère différemment de celui des expériences à  $d_{50} = 59 \mu\text{m}$  (cf. Figure 4.18) :

- la déformation du dépôt est plus lente : visuellement, la mise en suspension paraît avoir à peine commencé au bout de 3 min. Cependant, la déformation s'observe dès lors que 1 % de la masse initiale de poudre a été réentraînée (soit  $K_R = 10^{-2}$ ). De ce fait, même si, qualitativement, la masse réentraînée paraît augmenter de façon plus importante entre  $t = 3$  min et  $t = 6$  min, cette augmentation ne correspond en réalité, qu'à une variation de moins d'un ordre de grandeur (au bout de 15 min, seule 4 % de la masse initiale a été mise en suspension).

- Seul le phénomène aval existe et diffère de l'expérience de la Figure 4.18 : la zone de recirculation d'air est présente. Par contre, il semble que la zone de cisaillement au sommet du tas n'existe pas, car le sommet ne subit aucune déformation. D'autres expériences réalisées dans les mêmes conditions expérimentales confirment cette hypothèse.

Enfin, bien que les tailles de particules soient plus petites dans notre cas, les phénomènes de mobilisation observés ici se rapprochent fortement des études effectuées dans le domaine du transport éolien de particules (déplacement des dunes dans le désert (Bagnold, 1941), phénomènes d'envol de matière sous l'effet du vent et érosion (Foucault, 1991 ; 1994), simulation de la formation et du déplacement des dunes en laboratoire (Dauchot *et al.*, 2001 ; Andreotti *et al.*, 2002)). On remarque toutefois, que les mécanismes de réentraînement liés notamment aux tailles des particules, sont différents.

#### 4.4.2. Déformation d'autres types de dépôt

A titre de comparaison, nous présentons ici deux expériences que nous avons effectuées sur des poudres d'alumine de  $d_{50} = 46 \mu\text{m}$  à une vitesse de frottement de 0,52 m/s ( $V = 10$  m/s). La première correspond au réentraînement d'un dépôt de forme obélisque et l'autre de forme galette.

Pour référence à cette granulométrie et en présence d'un écoulement d'air de 0,52 m/s, le dépôt conique ne se déforme que par l'aval (cf Figure 4.19). Toutefois, au bout de 15 min, il ne reste qu'un croissant de lune sur la surface, correspondant à un  $K_R \sim 9 \cdot 10^{-1}$ .

■ Comme nous l'avons mesuré au § 4.2.4, la mise en suspension d'un tas de poudre en forme d'obélisque évolue de façon similaire à un cône. Toutefois, la séquence photographique de la Figure 4.20 montre que la déformation d'un obélisque est bien plus complexe que celle d'un cône :

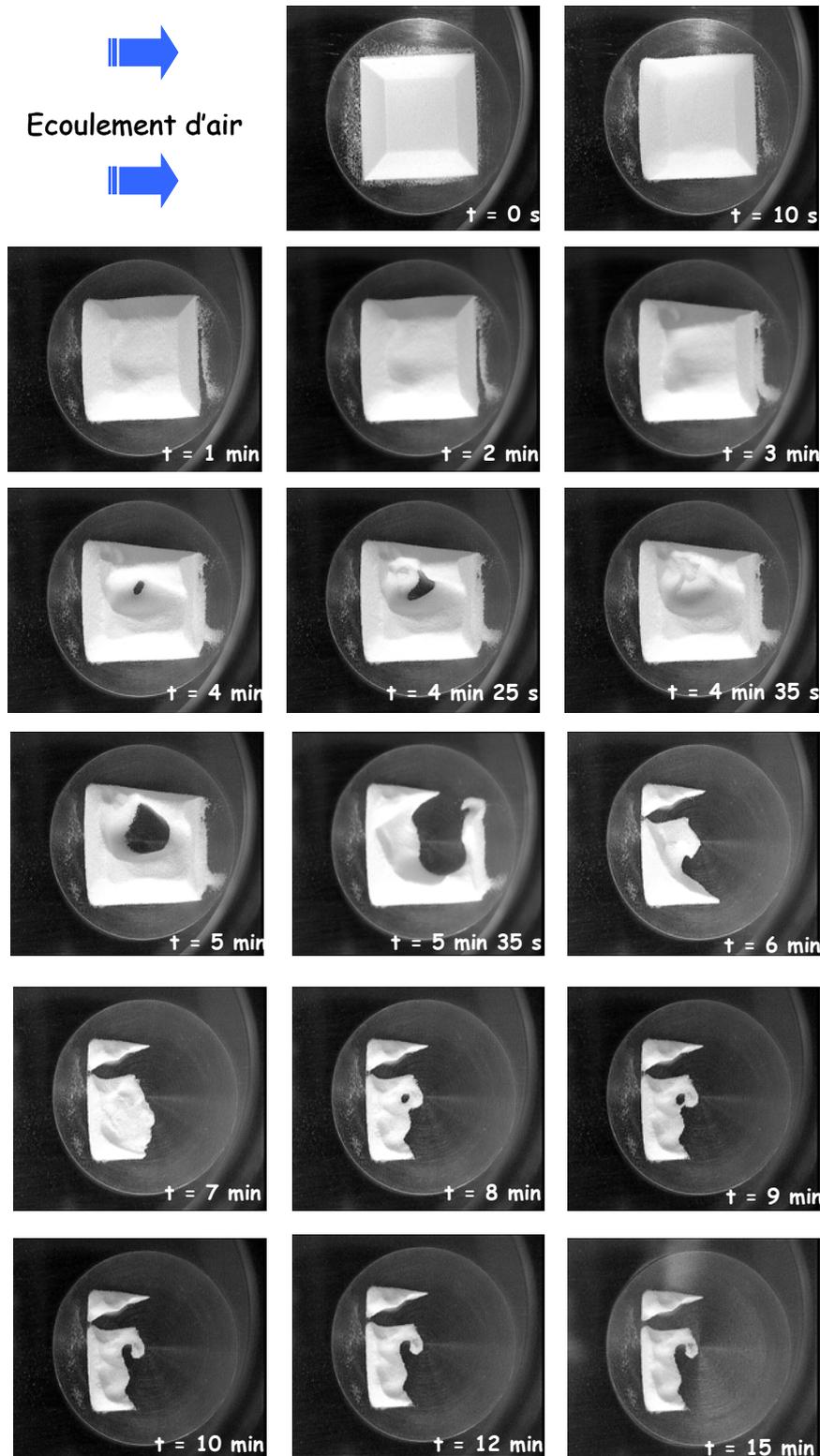


Figure 4.20 – Séquence photographique montrant l'évolution d'un obélisque de poudre d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  en fonction du temps ( $d_{50} = 46 \mu\text{m}$  et  $v_* = 0,52 \text{ m/s}$  ( $V = 10 \text{ m/s}$ )) –  $K_R = 6,3 \cdot 10^{-1}$

D'après ces photographies, la majorité du réentraînement a lieu en aval du dépôt.

On observe la présence d'une zone de cisaillement très importante qui s'initie sur les arêtes amont du dépôt. Les particules localisées sur ces arêtes sont alors réentraînées, engendrant un arrondi de l'obélisque. Le phénomène est d'autant plus marqué que les arêtes de l'obélisque face à l'écoulement « disparaissent » dès les premières secondes (photos  $t = 0$  s et  $t = 10$  s de la Figure 4.20).

De plus, la couche limite qui se développe le long de la surface amont doit subir un décollement en arrivant au niveau de la base haute de l'obélisque ayant pour conséquence la production d'un sillage. On peut donc imaginer que la présence de tourbillons intenses à ce niveau vient alors creuser le tas en son centre et agir comme dans la zone de recirculation pour réentraîner les particules (photos  $t = 4$  à  $t = 5$  min).

Enfin, la zone de recirculation est présente mais son effet est moindre que dans le phénomène précédent. Dans les cinq premières minutes, on observe des amas de particules qui s'accumulent en croissant de lune en aval du tas, comme pour un cône de poudre de  $59 \mu\text{m}$  (cf. Figure 4.19). Dépassée cette période d'exposition, les deux phénomènes finissent par ne former plus qu'un, réentraînant alors la totalité du côté aval du dépôt.

■ La séquence de photographies de la Figure 4.21 présente l'évolution du réentraînement d'un dépôt de poudre de  $d_{50} = 46 \mu\text{m}$  en galette exposé à une vitesse d'air de 10 m/s.

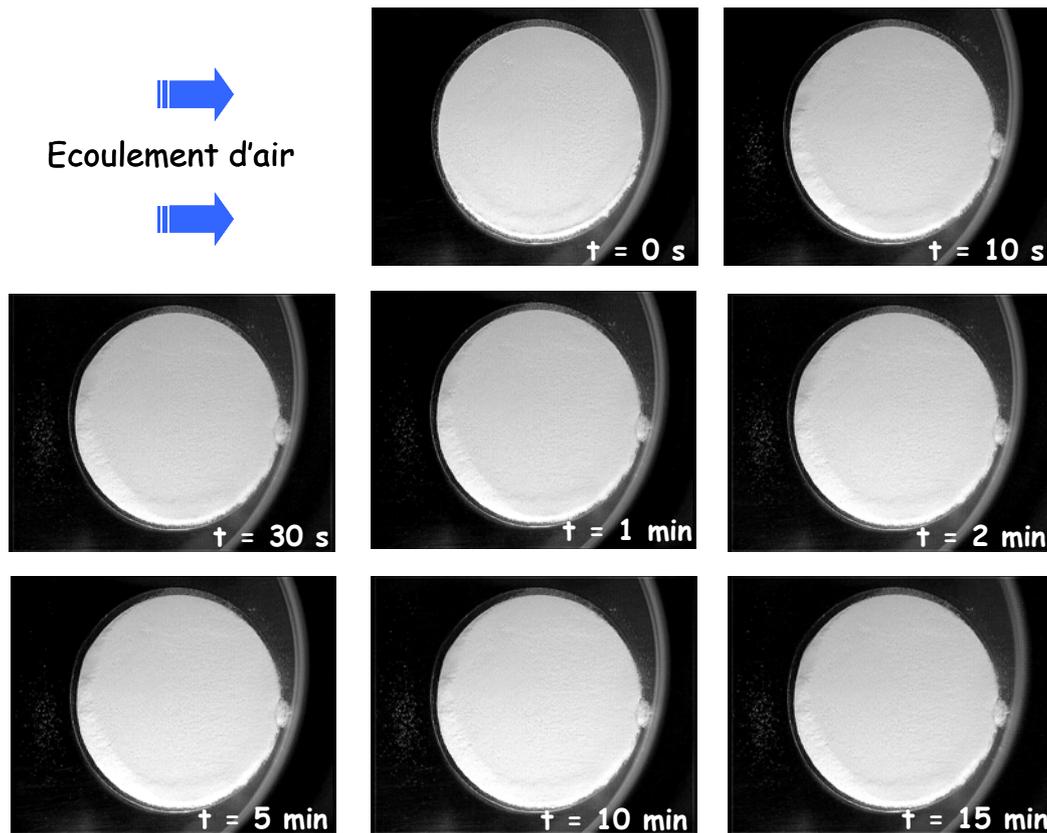


Figure 4.21 – Séquence photographique montrant l'évolution d'une galette de poudre d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  en fonction du temps ( $d_{50} = 46 \mu\text{m}$  et  $v_* = 0,52 \text{ m/s}$  ( $V = 10 \text{ m/s}$ )) –  $K_R = 7,3 \cdot 10^{-2}$

Comme nous l'avons mesuré au § 4.2.4, la mise en suspension de la galette exposée à une vitesse de 10 m/s conduit bien à une fraction réentraînée plus petite que pour les deux formes précédentes au même  $d_{50}$  :  $K_R$  vaut ici  $7,3 \cdot 10^{-2}$  à  $\Delta t = 15 \text{ min}$ . Toutefois, si comparativement aux autres formes étudiées, le réentraînement apparaît nettement plus faible à l'œil, cette fraction mesurée reste dans l'intervalle  $\pm$  un ordre de grandeur correspondant à l'estimation faite de la dispersion de nos résultats (cf. § 4.3.2).

Par ailleurs, les photographies de la Figure 4.21 montrent clairement que dans ces conditions et pour cette forme, la phase de déformation a à peine commencé, ce qui confirme l'hypothèse émise au § 4.2.4 quant à la hauteur du dépôt.

De ce fait, on observe uniquement, côté amont, un arrondi du haut de la galette, qui s'effectue dans les premières secondes. Celui-ci est dû à la présence d'un fort cisaillement au niveau des arêtes directement exposées à l'écoulement d'air. Aucun autre phénomène n'apparaît.

■ L'ensemble de ces séquences photographiques montre combien le phénomène de réentraînement d'un tas de poudre est complexe. Suivant les conditions expérimentales initiales et notamment la vitesse, la granulométrie et la forme et/ou

structure du dépôt, on constate qu'il existe plusieurs phénomènes d'envol des particules. Ces dernières se détachent du tas, soit à partir de sa face aval (face abritée de l'air incident), soit à partir de sa face amont (face en regard de l'air incident), soit des deux. De plus, les effets de turbulence diffèrent d'une situation à l'autre, rendant les descriptions du phénomène fort compliquées.

Toutefois, ces observations sont très informatives. Elles nous permettent d'une part, de confirmer que le réentraînement s'effectue en deux phases, et d'autre part de valider l'influence très faible sur la fraction réentraînée de paramètres tels que la durée d'exposition ou la forme du dépôt, compte tenu de la dispersion de nos résultats estimée au § 4.3.2.

***Conclusion***

Désormais, nous avons accumulé suffisamment de données expérimentales pour les confronter aux quelques modèles existants de la littérature. Remarquons toutefois que les multiples conditions expérimentales de la littérature et la complexité du phénomène de réentraînement, nous laissent craindre que les modèles déjà existants ne nous permettront pas de décrire correctement la situation de la mise en suspension de nos tas de poudre. Si cette hypothèse se confirme, le développement d'une corrélation spécifique apparaîtra alors nécessaire.

## **5. Elaboration d'une corrélation semi-empirique**

Maintenant que nous avons mis en place une base de données expérimentales conséquente, nous pouvons envisager de comparer nos données aux modèles récents de la littérature qui s'approchent le plus du réentraînement d'un tas de poudre.

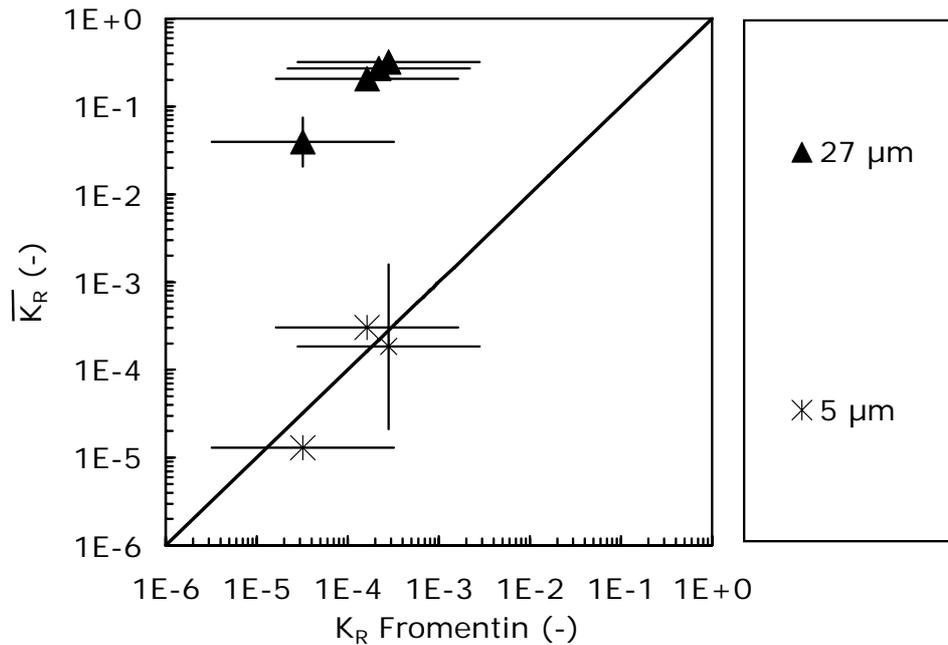
## 5.1. Comparaison avec la littérature

Notre étude bibliographique du chapitre 1 a mis en évidence que deux modèles sont particulièrement intéressants pour entrevoir une comparaison. Il s'agit de la corrélation de Fromentin (1989) et du modèle Rock'n Roll corrélé de Biasi *et al.* (2001). Le premier, élaboré à partir de résultats expérimentaux effectués sur des dépôts multicouches, fait une description macroscopique du phénomène de mise en suspension. Le second est basé sur une description mécaniste du réentraînement d'une particule déposée sur une surface rugueuse (Reeks et Hall, 2001). Ce dernier a été adapté et validé pour quelques essais dont les dépôts étaient monocouches et multicouches. Nous confrontons donc nos données à ces deux modèles.

### 5.1.1. Corrélation de Fromentin (1989)

A partir de ses données expérimentales conduites sur des dépôts multicouches de poudres de diamètre compris entre environ 0,5 et 5  $\mu\text{m}$  et exposés à des vitesses d'air allant de 5 à 25 m/s dans PARESS (soit  $0,23 \leq v_* \leq 1$  m/s), Fromentin (1989) établit un modèle semi-empirique du flux de mise en suspension, fonction de la durée d'exposition  $\Delta t$  et de la vitesse de frottement à la paroi  $v_*$  (cf. § 1.4.4.1, équation ( 1.48 )). Cette corrélation ne s'applique que pour des  $v_* \geq 0,29$  m/s et n'intègre pas l'effet du paramètre taille des particules. Toutefois, nous avons vu que l'évolution de la fraction réentraînée mesurée par Fromentin est similaire à celle obtenue dans BISE (cf. § 3.2.3.4). De plus, l'auteur a bâti sa corrélation sur des mesures effectuées suivant une méthode semblable à la nôtre. De ce fait, à partir de calculs effectués sur la masse réentraînée (relation ( 1.51 )), nous pouvons exprimer cette corrélation en terme de fraction réentraînée (cf. Figure 1.11). Sa confrontation avec nos résultats en est donc d'autant plus intéressante.

La Figure 5.1 présente nos données pour des tailles de particules de diamètre médian de 5 et 27  $\mu\text{m}$  en fonction du  $K_R$  calculé à partir de la corrélation adaptée aux vitesses de frottement mesurées dans BISE pour 10 m/s (cf. § 2.2.4.3). Nos données sont représentées avec leur intervalle de confiance à 95 %. Celles calculées à l'aide du modèle de Fromentin sont présentées avec une incertitude de  $\pm$  un ordre de grandeur. Cet intervalle de confiance est celui défini par Fromentin lui-même.



**Figure 5.1 –Fraction réentraînée moyenne dans BISE ( $V_* = 0,52$  m/s ( $V = 10$  m/s), et  $d_{50} = 5$  et  $27 \mu\text{m}$ ) en fonction de la fraction réentraînée à partir de la corrélation de Fromentin (1989)**

Compte tenu des conditions de validité du modèle, la Figure 5.1 montre que nos résultats semblent en bon accord avec la corrélation de Fromentin pour les petites tailles de particules. Pour les poudres de  $d_{50} = 5 \mu\text{m}$ , nos points expérimentaux compris entre environ  $10^{-5}$  et  $5 \cdot 10^{-4}$ , sont approximativement du même ordre de grandeur que les prévisions du modèle de Fromentin valable pour des particules légèrement plus fines ( $K_R$  compris entre  $5 \cdot 10^{-5}$  et  $5 \cdot 10^{-4}$ ). Toutefois, dans ces conditions expérimentales, nous avons observé que le réentraînement est dû à l'apparition d'agglomérats de tailles plus importantes. Les conditions de Fromentin étant proches des nôtres, il est fort probable que le même phénomène se soit produit lors de ses expériences. Toutefois, Fromentin n'en tient pas compte dans sa corrélation et attribue le flux de mise en suspension calculé aux tailles de particules d'origine.

D'autre part, dès lors que les tailles des particules deviennent supérieures à celles qu'utilise Fromentin, sa corrélation n'est plus valide. En effet, pour une granulométrie  $d_{50} = 27 \mu\text{m}$ , les résultats de la Figure 5.1 mettent en évidence que 2 à 3 ordres de grandeurs séparent nos données expérimentales du modèle. Le fait que la corrélation ne tienne pas compte de l'effet de tailles des particules rend donc ce modèle pas du tout satisfaisant.

De plus, pour une vitesse de frottement d'air inférieure à 0,29 m/s soit 5 m/s dans BISE, notre méthode nous permet de mesurer une fraction réentraînée pour plusieurs tailles de particules. Toutefois, ces résultats ne peuvent pas être déterminés à partir de

la corrélation de Fromentin du fait que l'auteur y a intégré la valeur du seuil de vitesse observé dans PARESS ( $v_* = 0,29$  m/s), valeur qui, comme nous l'avons déjà dit, est fonction de la limite de détection de la technique de mesure employée. Ceci réduit donc encore plus le domaine d'application de la corrélation de Fromentin.

### 5.1.2. Modèle Rock'n Roll corrélé

Le second modèle intéressant à comparer à nos expériences, est basé sur une analyse fine du réentraînement qui prend en compte le « basculement – roulement » (Rock'n Roll) autour d'une aspérité pour décrire le détachement d'une particule d'une surface rugueuse (Reeks et Hall, 2001 ; cf. § 1.4.1.3). Cette approche suggère que le réentraînement est un phénomène quasi-statique, du fait, qu'à partir de la période très courte d'une seconde, la mise en suspension n'évolue pratiquement plus.

Comme nous l'avons vu au chapitre 1, le modèle Rock'n Roll a récemment été appliqué pour l'interprétation de quelques séries de données expérimentales de la littérature. Ainsi, le modèle corrélé obtenu (Biasi *et al.*, 2001) permet de valider ce modèle pour des tailles de particules comprises entre 0,1 et 30  $\mu\text{m}$  et ce, pour deux types de dépôt : monocouche et multicouches. En conséquence, les auteurs suggèrent que le type de dépôt ne doit pas intervenir dans le phénomène de réentraînement.

Par ailleurs, ce modèle impose de connaître, pour son calcul, la vitesse de frottement de l'air dans l'installation mais aussi la taille des particules utilisées. Autrement dit, il tient compte des deux paramètres ressortis prépondérants dans notre étude expérimentale. C'est pourquoi sa comparaison avec notre étude est fort intéressante.

La Figure 5.2 présente les premiers résultats de cette analyse. Elle décrit la fraction réentraînée moyenne  $\overline{K_r}$  en fonction de la vitesse de frottement  $v_*$ . Nous y avons représenté nos résultats expérimentaux moyens obtenus dans BISE Inactive pour les tailles de particules de 17 et 59  $\mu\text{m}$ , leur intervalle de confiance à 95 %, ainsi que les valeurs de fractions mises en suspension calculées avec le modèle corrélé de Biasi *et al.* (2001).

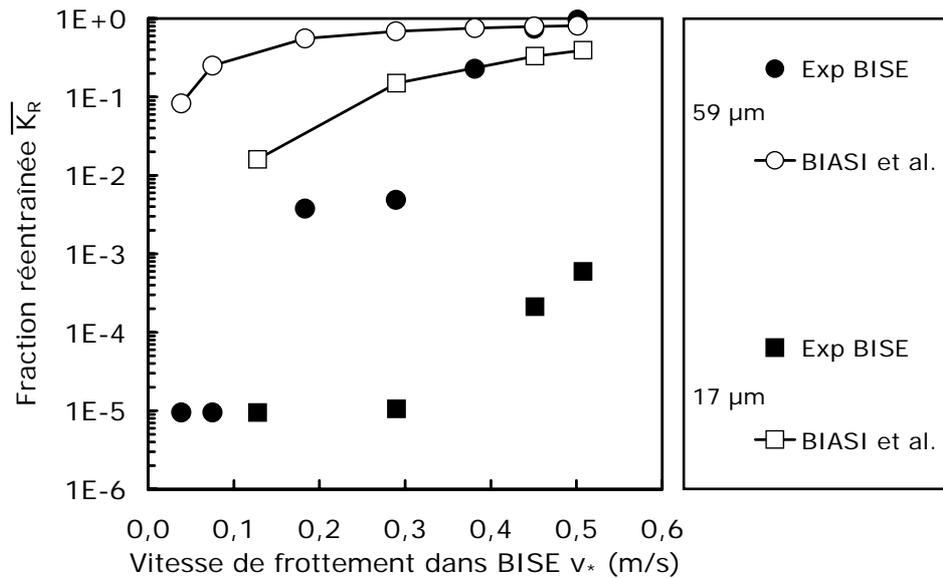


Figure 5.2 – Comparaison des résultats expérimentaux de BISE avec le modèle corrélé de Biasi *et al.* (2001) en fonction de la vitesse de frottement pour des dépôts de poudre de  $d_{50} = 17$  et  $59 \mu\text{m}$

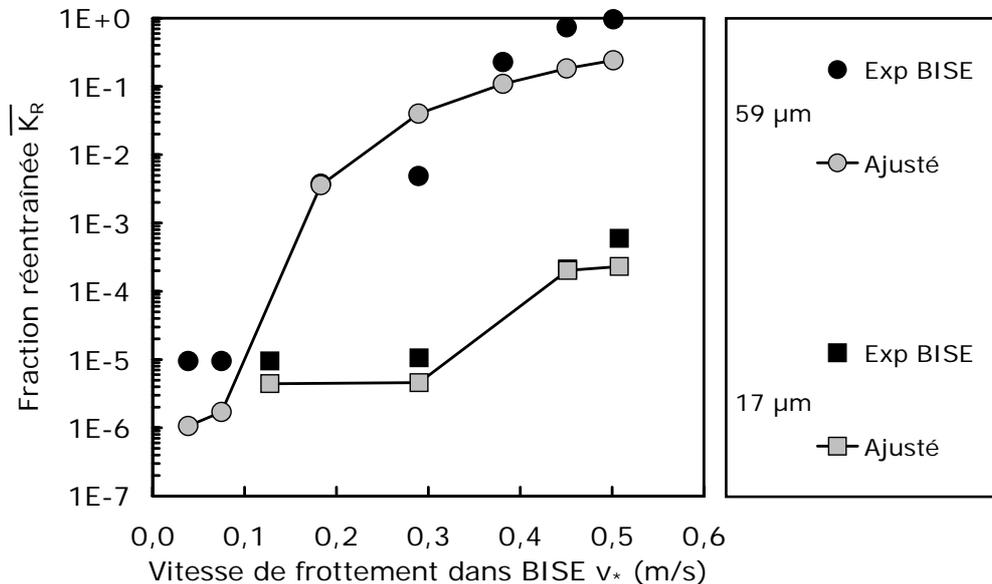
On remarque clairement que le modèle corrélé de Biasi *et al.* n'est pas satisfaisant car il surestime systématiquement nos données. Le biais observé est d'autant plus important que la fraction que nous avons mesurée est plus faible. Ce décalage peut atteindre quatre ordres de grandeur pour les vitesses de frottement les plus faibles. Ceci s'explique par le fait que les corrélations décrivant les distributions des forces d'adhérence ont été établies par les auteurs à partir de données qui ont conduit à des  $K_R$  forts (cf. Figure 1.14). De ce fait, pour des valeurs de  $K_R$  inférieures à  $10^{-1}$ , le modèle corrélé ne décrit pas correctement la mise en suspension dans notre cas.

Afin d'analyser si le modèle Rock'n Roll peut, malgré tout, mieux représenter nos données, nous avons tenté d'élaborer des corrélations de la force d'adhérence moyenne géométrique  $\overline{f'_a}$  et de son écart type géométrique  $\sigma'_a$  ajustées à nos résultats expérimentaux dans BISE. Pour ce faire, nous avons adopté la même démarche que Biasi *et al.*.

L'obtention de ces corrélations s'effectue alors en trois étapes :

1) Pour ces deux séries de données, nous faisons varier les valeurs de  $\overline{f'_a}$  et  $\sigma'_a$  de façon systématique, jusqu'à obtenir un  $K_R$  calculé par le modèle Rock'n Roll le plus proche de nos données. De cette façon, nous obtenons un couple  $(\overline{f'_a}, \sigma'_a)$  pour chaque taille de particules, qui permet au modèle Rock'n Roll de mieux décrire nos expériences. Le modèle Rock'n Roll calculé pour des  $d_{50} = 59 \mu\text{m}$  et  $17 \mu\text{m}$  avec ces nouveaux

couples, est représenté sur la Figure 5.3, en fonction de la vitesse de frottement. A titre de comparaison, nous avons également tracé sur le graphe nos points expérimentaux pour ces deux granulométries.



**Figure 5.3 - Comparaison des résultats expérimentaux de BISE avec le modèle de Biasi ajusté pour des dépôts de poudre de  $d_{50} = 17$  et  $59 \mu\text{m}$**

La Figure 5.3 montre bien que le modèle calculé avec nos couples de valeurs  $(\bar{f}'_a, \sigma'_a)$  s'ajuste mieux à nos points expérimentaux, que le modèle corrélé de Biasi *et al.*, décrit à la Figure 5.2.

2) Nous appliquons alors le même procédé à l'ensemble de nos données. La Figure 5.4 présente les résultats calculés à partir des couples de valeurs  $(\bar{f}'_a, \sigma'_a)$  trouvés pour chaque taille de particules. Elle reprend également les résultats obtenus pour les poudres de 17 et 59  $\mu\text{m}$  de la Figure 5.3. On y observe les valeurs de  $K_R$  calculées avec le modèle de Biasi *et al.* et celles obtenues par ajustement sur nos données, en fonction de la fraction réentraînée moyenne obtenue expérimentalement dans BISE pour les différentes tailles de particules étudiées. Les limites indiquées à  $\pm$  un ordre de grandeur correspondent à celles qui ont été définies au § 4.3.2 du chapitre 4.

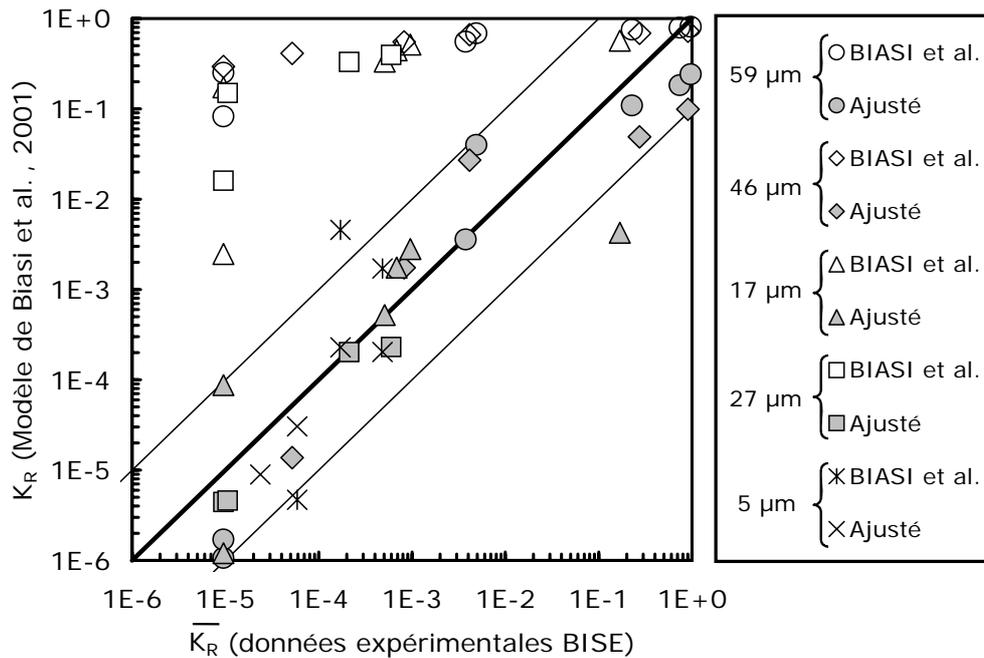


Figure 5.4 - Comparaison des résultats expérimentaux de BISE avec le modèle corrélé de Biasi *et al.* (2001) et l'ajustement de ce modèle effectué sur BISE

Ce graphe confirme les premières tendances observées sur la Figure 5.2 :

- Seules les  $K_R > 10^{-1}$  sont correctement représentés par le modèle de Biasi *et al.*.
- Au-dessous de cette valeur, le modèle surestime nos données jusqu'à quatre ordres de grandeur.

On remarque toutefois que les données expérimentales obtenues pour  $d_{50} = 5 \mu\text{m}$  sont celles pour lesquelles le modèle de Biasi *et al.* s'ajustent le mieux.

Par ailleurs, les résultats des ajustements effectués sur les données de BISE montrent que les fractions réentraînées calculées à partir des cinq couples de valeurs  $(\bar{f}'_a, \sigma'_a)$  trouvés, permettent d'améliorer nettement le modèle Rock'n Roll. Les  $K_R$  ainsi calculés se situent pratiquement tous à  $\pm$  un ordre de grandeur de nos valeurs expérimentales.

3) A partir des cinq couples  $(\bar{f}'_a, \sigma'_a)$  obtenus, nous regardons alors si une corrélation peut être définie en fonction du diamètre des particules. Pour ce faire, nous représentons sur la Figure 5.5 nos valeurs ajustées de  $\bar{f}'_a$  (graphe de gauche) et de  $\sigma'_a$  (graphe de droite) en fonction de la taille des particules. Pour comparaison, nous ajoutons respectivement sur chacun des graphes, les corrélations  $\bar{f}'_a$  et  $\sigma'_a$  de Biasi *et al.* (relations ( 1.52 ) et ( 1.53 )).

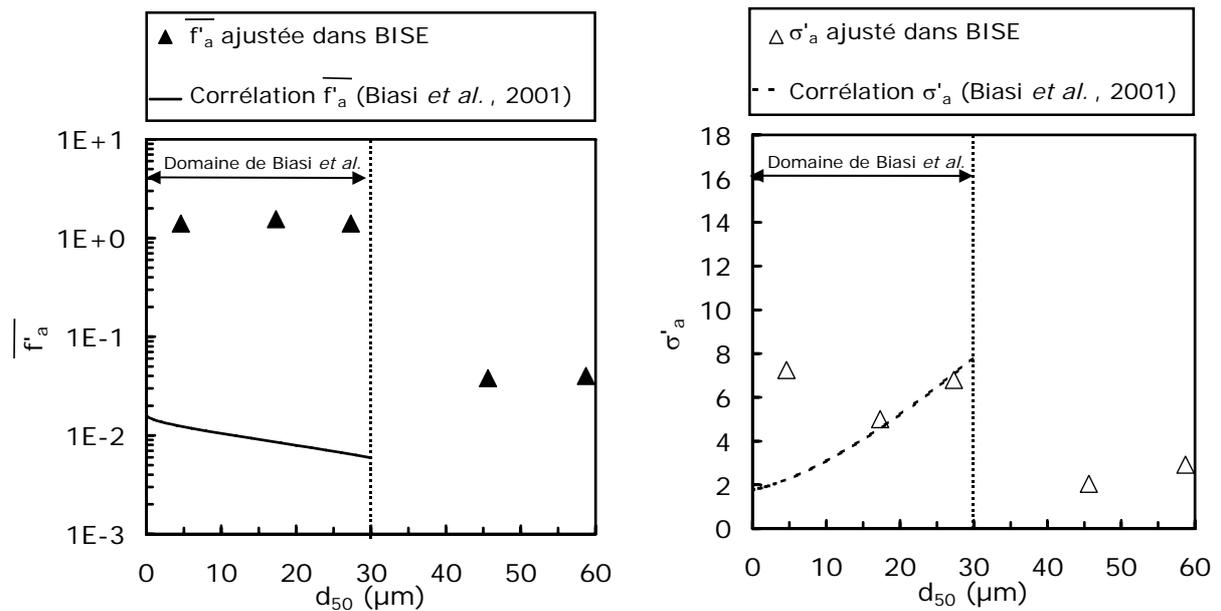


Figure 5.5 – Comparaison des valeurs  $\overline{f'_a}$  et  $\sigma'_a$  ajustées dans BISE avec les corrélations  $\overline{f'_a}$  et  $\sigma'_a$  de Biasi *et al.* (2001) en fonction de la taille des particules

Les graphes de la Figure 5.5 font apparaître que nos valeurs de  $\overline{f'_a}$  et  $\sigma'_a$  sont relativement dispersées. De ce fait, l'ajustement d'une corrélation n'a pas de sens. Il ne nous est donc pas possible d'établir des corrélations caractérisant les forces d'adhérence dans le cas d'un tas de poudre, qui permettent de calculer des fractions réentraînées validant le modèle Rock'n Roll avec nos données.

Par ailleurs, si nous comparons nos valeurs ajustées  $\overline{f'_a}$  à la corrélation de Biasi *et al.*, nous constatons que nos valeurs de  $\overline{f'_a}$  sont supérieures à l'unité dans le domaine de validité du modèle corrélé. Pour rappel,  $\overline{f'_a}$  correspondant à la moyenne des forces normalisées par rapport à la valeur de la force adhésive pour un contact lisse, cela signifie que les forces adhésives sont nettement plus importantes que celles d'un contact lisse. Une explication fort plausible provient du fait de l'apparition de nombreuses forces cohésives dans un dépôt multicouches en tas, par rapport aux forces adhésives d'un dépôt monocouche voire multicouches plat. Toutefois, la connaissance actuelle sur la cohésion à l'intérieur d'un tas de poudre ne nous permet pas d'apporter des hypothèses satisfaisantes pour décrire l'évolution des  $\overline{f'_a}$  et  $\sigma'_a$  déterminées dans BISE, comme Biasi *et al.* le font dans leur étude (cf. § 1.4.4.3).

### 5.1.3. Discussion

La confrontation de nos résultats à un modèle macroscopique (celui de Fromentin) et à un modèle microphysique (celui de Reeks et Hall corrélé par Biasi *et al.*) de la littérature fait ressortir, là encore, toute la complexité du phénomène de réentraînement. Les analyses effectuées montrent les limites des modèles dans leur description actuelle.

Dans la corrélation de Fromentin, un paramètre d'entrée indispensable a été omis : la taille des particules. De ce fait, dès lors que les conditions expérimentales de Fromentin ne sont plus respectées, le modèle n'est plus valide. Pour des tailles de particules plus importantes, le modèle sous estime très largement nos données expérimentales. De plus, ce modèle ne permet pas de prévoir un réentraînement dès lors que la vitesse de frottement est inférieure à 0,29 m/s ( $V = 5$  m/s dans BISE).

Le modèle Rock'n Roll corrélé par Biasi *et al.* (2001), permet de confirmer nombre d'observations mises en évidence dans nos expériences, notamment au niveau de l'influence des paramètres comme la durée d'exposition ou la forme du dépôt. Par ailleurs, si le modèle de Biasi *et al.* ne s'ajuste pas correctement à nos résultats expérimentaux, du fait de la variation de notre phénomène sur six ordres de grandeurs, la démarche de Biasi *et al.* pour élaborer des corrélations de  $\bar{f}'_a$  et  $\sigma'_a$  en fonction de la taille des particules, nous permet d'obtenir, pour chaque taille, un couple de valeurs  $(\bar{f}'_a, \sigma'_a)$  qui permet d'ajuster au mieux le modèle Rock'n Roll à nos résultats. Toutefois, cette démarche ne nous permet pas d'établir des corrélations pour valider le modèle Rock'n Roll dans nos conditions expérimentales. Ce modèle ne s'applique donc pas si simplement à nos données.

Devant de tels résultats, il s'avère donc nécessaire pour nous de développer une corrélation semi-empirique originale, permettant de décrire le réentraînement par écoulement d'air d'un dépôt de poudre.

## 5.2. Recherche d'un modèle adimensionnel

Notre but, ici, est donc d'élaborer un modèle qui allie nos résultats expérimentaux et la physique du réentraînement décrite au chapitre 1. C'est pourquoi, nous parlerons de *corrélation semi-empirique*.

### 5.2.1. Démarche

En vue de l'élaboration de ce modèle, plusieurs constats essentiels ressortent de notre étude expérimentale présentée au chapitre 4 :

- la vitesse de frottement de l'air  $v_*$  et la granulométrie de la poudre décrite par son diamètre médian  $d_{50}$ , sont les deux paramètres fondamentaux de la mise en suspension (cf. Tableau 4.8). Ils doivent donc apparaître dans notre corrélation.

- la fraction réentraînée  $K_R$  est une fonction croissante de  $v_*$  et de  $d_{50}$  (cf. Figure 4.5),

- la fraction réentraînée évolue sur plusieurs ordres de grandeurs dans le domaine expérimental étudié (de  $10^{-6}$  à 1, cf. graphes de la Figure 4.6), justifiant, comme nous l'avons d'ailleurs fait, une analyse des données sur le logarithme de  $K_R$ .

D'autre part, si nous confrontons ces résultats aux théories de la littérature décrites au chapitre 1, nous constatons que :

- Même si nos données sont issues d'une approche macroscopique du phénomène, l'application de nos résultats à une analyse simple du réentraînement, de type bilan des forces (Phillips, 1980 ; cf. § 1.4.1), est possible. Elle nous permet de confirmer la présence d'une vitesse seuil qui diminue quand  $d_{50}$  augmente dans notre gamme de taille des particules étudiée (cf. comparaison de la Figure 1.5 et de la Figure 4.4), mais surtout, elle suggère que l'évolution du  $K_R$  peut être correctement décrite par une fonction en puissance de  $d_{50}$  et de  $v_*$ .

- Enfin, plusieurs paramètres adimensionnels sont couramment utilisés dans le domaine du réentraînement (Ziskind *et al.*, 1995), mais le diamètre  $d_p^+$  (cf. § 1.2.2, relation ( 1.20 )) retient particulièrement notre attention, car il intègre la vitesse de

frottement de l'air et la granulométrie des particules. Par ailleurs, ce nombre sans dimension traduit l'interaction observée entre ces deux paramètres, du fait de leur produit. Appliqué aux diamètres médians qui caractérisent nos poudres, il devient alors :

$$d_{50+} = \frac{d_{50} \cdot v_*}{v} \quad (5.1)$$

En conséquence, l'ensemble de ces données nous conduit à proposer une relation de type :

$$\text{Log } K_R = a_0 + a_1 \text{Log } (d_{50+})$$

Cette fonction peut être obtenue par une régression linéaire sur nos résultats expérimentaux après transformation de  $K_R$  et de  $d_{50+}$  en logarithmes décimaux. De ce fait, cette approche prévoit que la relation qui lie  $K_R$  à  $d_{50}$  et à  $v_*$  est de la forme :

$$K_R = 10^{a_0} (d_{50+})^{a_1}. \quad (5.2)$$

### 5.2.2. Corrélation proposée et domaine de validité

Afin d'être fidèle aux résultats apportés dans notre chapitre 4, les expériences qui ont été effectuées dans les conditions décrites ci-dessous n'ont pas été retenues pour la régression et donc l'élaboration du modèle. Il s'agit :

- Des expériences réalisées sur des poudres de diamètre médian 5  $\mu\text{m}$ . En effet, nous nous sommes aperçus que la mise en suspension obtenue avec ces particules doit être attribuée à la formation d'agglomérats de taille plus importante qui seraient réentraînés (cf. § 4.1.2.2),

- Des essais dont les résultats bruts ont donné des valeurs de  $K_R \leq \frac{LD_{SE}}{2}$  et qui se trouvent au-dessous de leur seuil de vitesse. En réalité, ces valeurs de  $K_R$  peuvent être nettement plus petites. De ce fait, leur prise en compte dans la corrélation pourrait surestimer les  $K_R$  très faibles.

- Des expériences dont la durée d'exposition est inférieure à 2 minutes. Au-dessous de cette période, nous estimons que notre méthode de mesure n'est pas suffisamment fiable (cf. § 3.2.3.4). D'autre part, nous avons constaté que, lorsque des périodes

d'exposition très courtes sont couplées à des accélérations faibles, la phase transitoire n'est pas négligeable devant la durée de l'essai et peut, de ce fait, influencer la valeur de  $K_R$  (cf. § 4.2.3).

D'autre part, nous avons noté que dans la zone entre la phase de réentraînement en surface et la phase de déformation, le phénomène de mise en suspension est difficilement maîtrisable, et un paramètre peu influent pour de très faibles ou très fortes fractions réentraînées peut alors avoir un rôle non négligeable (cf. § 4.1.2.2). C'est le cas des deux paramètres secondaires mis en évidence dans notre étude expérimentale, notamment lorsqu'ils sont égaux à des valeurs limites de leur domaine de variation. De ce fait, nous éliminons également les expériences réalisées avec des fortes accélérations et / ou des poudres sèches dans cette zone dite de transition. A partir de la réunion des intervalles décrits au Tableau 4.3, cette dernière est estimée à  $0,9 \leq d_{50+} \leq 1,5$  sur l'ensemble du domaine expérimental de BISE.

Par conséquent, l'ajustement effectué sur 138 valeurs de fractions expérimentales nous permet de proposer la relation suivante :

$$K_R = 6,4 \cdot 10^{-3} \cdot (d_{50+})^{5,7} \quad (5.3)$$

Comparons la à nos données expérimentales. La Figure 5.6 décrit les fractions réentraînées  $K_R$  obtenues expérimentalement en fonction de celles calculées à l'aide de notre corrélation semi-empirique.

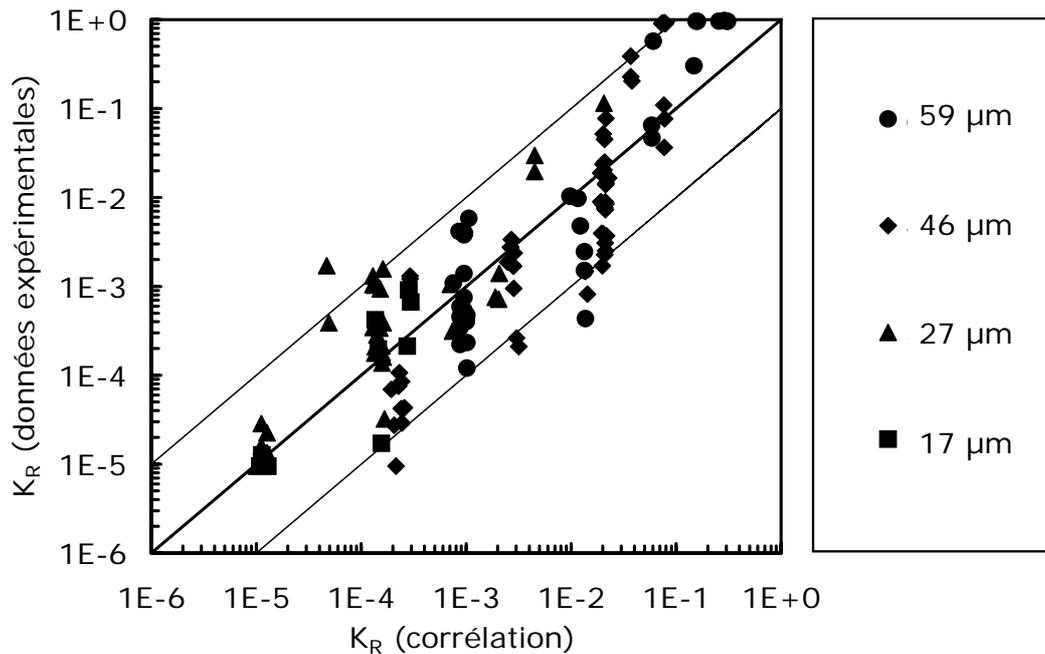


Figure 5.6 – Fractions réentraînées expérimentales en fonction des fractions réentraînées calculées à partir de la corrélation semi-empirique

Les limites indiquées à  $\pm$  un ordre de grandeur ont été définies au § 4.3.2 à partir de l'analyse effectuée sur l'ensemble de nos résultats. Dans ces conditions, 90 % de nos données sont inscrits dans cet intervalle.

Compte tenu de la variabilité du phénomène étudié et du grand domaine de variation du  $K_R$  (dans nos expériences de  $10^{-6}$  à 1), nous pouvons considérer que notre modèle, bien que simple dans sa description, est tout à fait satisfaisant et représente correctement nos résultats expérimentaux.

Cette corrélation semi-empirique, fonction des deux paramètres primaires du réentraînement, est donc valable sur l'ensemble du domaine expérimental de BISE pour :

- des tailles de particules d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  comprises entre 17 et 59  $\mu\text{m}$ ,
- des vitesses de frottement d'air comprises entre 0,07 et 0,52 m/s ( $1 \leq V \leq 10$  m/s),
- des durées d'exposition  $\geq 2$  min.

Toutefois, comme nous l'avons vu précédemment, dans la zone de transition, les valeurs extrêmes des paramètres secondaires (teneur en eau et accélération) ne permettent pas de valider notre corrélation.

Afin de visualiser les écarts observés, des expériences effectuées dans ces conditions sont présentées sur la Figure 5.7. On peut y observer notre corrélation estimée à  $\pm$  un ordre de grandeur en fonction du diamètre adimensionnel, ainsi que les fractions

expérimentales mesurées pour des fortes accélérations ( $30 \text{ m/s}^2$ ) et / ou des poudres sèches dans la zone de transition.

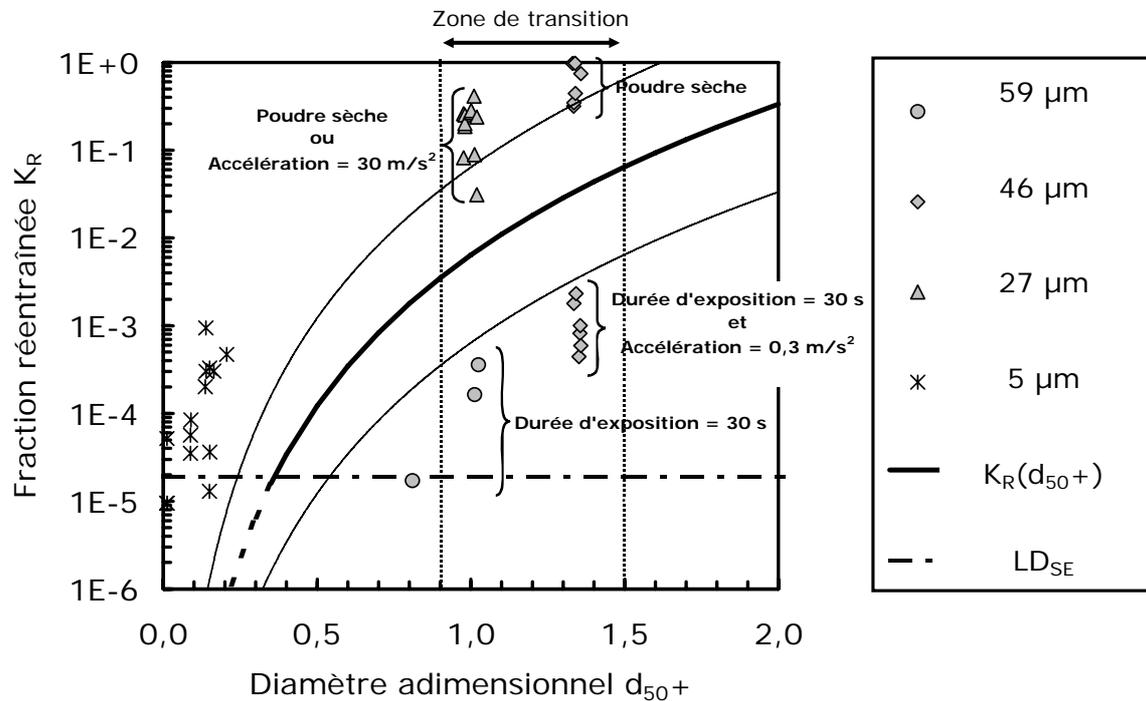


Figure 5.7 – Fraction réentraînée expérimentale en fonction du diamètre adimensionnel pour les conditions limites de la teneur en eau et de l'accélération, et pour des tailles de particules de  $5 \mu\text{m}$  et une durée d'exposition inférieure à 2 min. Corrélation  $K_R(d_{50+})$  suivant l'équation (5.3) et intervalle de confiance à  $\pm$  un ordre de grandeur

Ce graphe met en évidence que dans l'intervalle  $0,9 \leq d_{50+} \leq 1,5$ , notre corrélation sous-estime les résultats expérimentaux pour les fortes accélérations et / ou les poudres sèches. Dans ce domaine d'étude, notre corrélation est donc valable pour des gammes réduites des deux paramètres secondaires, à savoir :

$$\text{H}_2\text{O} > 0 \text{ mgH}_2\text{O/g.}$$

et

$$\alpha \leq 21 \text{ m/s}^2.$$

On rappelle ici que l'effet de l'accélération est spécifique à notre installation : cet effet est lié au dépassement de la vitesse de l'expérience (cf. § 4.2.3). Par conséquent, cette restriction ne devrait pas s'appliquer dans un cas général.

Par ailleurs, nous représentons sur le graphe de la Figure 5.7, les valeurs de  $K_R$  obtenues pour des durées d'exposition inférieures à 2 minutes et / ou couplées avec des faibles accélérations, et pour des poudres de diamètre médian  $5 \mu\text{m}$ . Pour les faibles

durées (couplées ou non avec de faibles accélérations), on s'aperçoit que nos données ne sont pas représentatives du phénomène du fait de notre technique de mesure. Par contre, pour les poudres de 5  $\mu\text{m}$ , la corrélation prédit que leur réentraînement devrait être inférieur à nos mesures d'au moins deux ordres de grandeur, ce qui est bien en accord avec la théorie sur l'adhérence.

En conclusion, dans le cadre d'une approche de type « enveloppe » de la fraction réentraînée, l'évolution de la fraction mise en suspension décrite à la Figure 5.7 nous permet de suggérer qu'au-delà de  $d_{50+} \geq 0,9$ , il faudrait considérer que la fraction réentraînée est totale, i. e.  $K_R = 1$ . En dessous de cette valeur, la corrélation ( 5.3 ) représente correctement la mise en suspension par écoulement d'air d'un dépôt de poudre polydispersée.

### 5.3. Conclusion

Notre comparaison avec les modèles les plus récents de la littérature montre que dans leur description actuelle, ces modèles ne permettent pas de décrire correctement nos données expérimentales de fractions réentraînées. Toutefois, si l'on s'intéresse uniquement à la quantité de matière mise en suspension et non à la taille réelle des particules réentraînées (phénomène d'agglomérats), nos données expérimentales sont en accord avec les modèles de Fromentin (1989) et de Biasi *et al.* (2001), pour les seules tailles de particules de 5  $\mu\text{m}$ .

Afin de pallier ce manque, nous nous sommes donc proposée de développer une corrélation semi-empirique. Cette corrélation décrit la fraction réentraînée par écoulement d'air d'un tas de poudre en fonction du paramètre adimensionnel  $d_{50+}$ . Ce nombre, sans dimension, intègre les deux paramètres primaires mis en évidence dans notre étude, à savoir la vitesse de frottement de l'air et la granulométrie de la poudre. Ce modèle s'écrit sous la forme, rappelons le :

$$K_R = 6,4 \cdot 10^{-3} \cdot (d_{50+})^{5,7}$$

Cette corrélation est valable pour  $0,3 \leq d_{50+} \leq 2,0$  dans les conditions de BISE Inactive, à savoir :

- des tailles de particules d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  :  $17 \leq d_{50} \leq 59 \mu\text{m}$ ,
- des vitesses de frottement de l'air :  $0,07 \leq v_* \leq 0,52 \text{ m/s}$  ( $1 \leq V \leq 10 \text{ m/s}$ ),

- des durées d'exposition :  $\Delta t \geq 2 \text{ min}$ ,
- des teneurs en eau de la poudre :  $0 \leq H_2O \leq 1 \text{ mgH}_2\text{O/g}$ ,
- des accélérations :  $0,3 \leq \alpha \leq 31 \text{ m/s}^2$ .

Toutefois, dans la zone  $0,9 \leq d_{50+} \leq 1,5$ , les paramètres secondaires sont restreints à :

$$H_2O > 0 \text{ mgH}_2\text{O/g} \quad \text{et} \quad \alpha \leq 21 \text{ m/s}^2.$$

L'intervalle de confiance de cette relation est estimé à  $\pm$  un ordre de grandeur.

## Conclusion Générale et Perspectives

■ Notre travail avait pour but d'étudier les paramètres qui régissent le phénomène de mise en suspension ou réentraînement par écoulement d'air horizontal turbulent de particules de poudre polydispersée déposée en tas sur une surface. Rappelons qu'il s'inscrit dans le cadre d'un Programme d'Intérêt Commun entre COGEMA et l'IPSN, dont l'objectif est d'améliorer la connaissance des coefficients de mise en suspension de contamination particulaire radioactive, dans le domaine nucléaire. Ainsi, il doit permettre de contribuer à l'obtention d'estimations plus réalistes (et donc moins enveloppes) des rejets potentiels pour les analyses de la sûreté et de la radioprotection.

■ Pour commencer, nous avons effectué une synthèse bibliographique des travaux très divers existant sur le sujet. Nous avons montré que la mise en suspension est un phénomène complexe tant au niveau des théories sur l'adhérence et sur le détachement des particules d'une surface, que sur les différents modèles développés. Compte tenu de l'étendue du sujet, nous nous sommes focalisée principalement sur une analyse des forces pouvant agir sur les particules afin de dégager les paramètres susceptibles de les influencer, et sur une description des études théoriques et expérimentales ayant abouti principalement à des modèles de réentraînement.

Ainsi, ce bilan nous a permis de recenser une vingtaine de paramètres susceptibles d'influencer les forces d'adhérence et les forces aérodynamiques, que nous explicitons. Ces paramètres sont relatifs à la poudre et aux particules qui la constituent, à la surface d'essai, à l'écoulement d'air, et à la durée d'exposition.

Par ailleurs, nous avons constaté que de nombreuses études expérimentales et théoriques ont été menées sur la mise en suspension notamment dans le cas de dépôts monocouches plus ou moins éparses. Devant la diversité des approches envisagées, ces travaux ont permis de faire une avancée remarquable dans la compréhension du mécanisme de réentraînement. Toutefois, si le concept physique de base est le même que l'on s'intéresse à une particule isolée ou à un ensemble de particules, dans le cas de dépôt en couches superposées, de nombreux effets viennent compliquer à souhait cette physique, rendant alors les études de la littérature plus rares. Toutefois, nous avons retenu deux modèles de réentraînement qui peuvent être comparés à la situation d'un tas de poudre. Le premier, basé sur une approche macroscopique, traite le cas d'un dépôt multicouches (Fromentin, 1989). Le second modèle, très récent, présente une description plus fine du réentraînement (modèle microscopique), et prend en compte le

moment des forces pour décrire le détachement d'une particule par « basculement-roulement » de celle-ci autour d'une aspérité de surface (Biasi *et al.*, 2001).

Enfin, l'analyse des études de la littérature confrontées aux paramètres précédemment recensés, nous a permis de dégager huit paramètres pour lesquels nous nous sommes proposée d'étudier expérimentalement leurs effets sur le réentraînement d'un tas de poudre.

■ Pour réaliser nos expériences, une installation expérimentale spécifique dénommée BISE Inactive (pour Banc de mise en Suspension par Ecoulement) a été conçue et réalisée au laboratoire. Ce dispositif d'environ 5 mètres de long, permet de travailler dans des conditions de vitesses d'air variant entre 0,5 et 10 m/s. Cette installation fonctionne en circuit ouvert et est constituée principalement d'une veine d'air parallélépipédique (libre de tout obstacle) et d'une surface d'essai située en sortie de cette dernière, sur laquelle est déposée la poudre test.

Après une analyse théorique des caractéristiques de l'air en écoulement libre et dans un conduit, nous avons effectué une étude aéraulique sur BISE. Cette étude avait pour but essentiel de caractériser les champs de vitesse et de turbulence de la veine au niveau de la zone du dépôt de poudre, et de déterminer également les vitesses de frottement caractéristiques de l'installation, à partir d'une caractérisation de la couche limite.

■ Nous avons ensuite défini et évalué la méthodologie expérimentale de mesure de la fraction réentraînée, que nous avons mise au point. Une attention particulière a été apportée à la détermination de la limite de notre méthode, incluant les effets des paramètres environnementaux et les différentes manipulations des échantillons de poudres. Nous avons abouti à une limite de détection du coefficient de réentraînement  $K_R$  égale à  $2 \cdot 10^{-5}$  (ceci, pour une masse initiale de 5 g de poudre). Cette valeur peut être considérée comme satisfaisante, comparativement aux quelques études expérimentales disponibles.

Par ailleurs, nous nous sommes proposée de conduire des expériences de type « global » sur des poudres polydispersées, afin de disposer de résultats directement exploitables en terme de coefficient de mise en suspension. Compte tenu du nombre important de paramètres à étudier, nous avons adopté, dans un premier temps, une méthodologie expérimentale basée sur les plans d'expériences. Cette approche décrite au chapitre 3, a l'avantage de réduire le nombre d'expériences à réaliser tout en optimisant les résultats. Nous avons déterminé ainsi les gammes de variation de chacun des paramètres retenus, compte tenu des caractéristiques de nos applications et des contraintes méthodologiques.

■ Le chapitre 4 est dédié à la description de l'ensemble de nos résultats expérimentaux acquis. Les plans d'expériences nous ont permis, tout d'abord, de mettre en évidence les paramètres les plus influents. Ainsi, nous avons montré que la vitesse et la granulométrie ont une contribution très significativement supérieure à celles des six autres facteurs ; ces deux paramètres jouent donc un rôle prépondérant sur le réentraînement. De plus, une forte interaction positive a été mise en évidence entre ces deux paramètres. Ainsi, l'effet de la vitesse sur le  $K_R$  diffère suivant la granulométrie. Par ailleurs, l'étude spécifique de ces deux facteurs nous a révélé que la mise en suspension est un phénomène à seuil : il existe un seuil de vitesse au-dessous duquel la fraction réentraînée est inférieure à notre limite de détection. Dans nos expériences, cette vitesse est d'autant plus forte que la granulométrie de la poudre qui constitue le tas, est plus faible.

Nous avons pu mettre également en évidence des paramètres dits secondaires. Ainsi, nous avons apprécié l'influence de la teneur en eau de la poudre qui contribue de façon négative à la mise en suspension. D'autre part, il est apparu que l'accélération (pour des fortes valeurs) joue aussi un rôle secondaire. Toutefois, nous avons attribué cet effet, non pas à l'accélération elle-même, mais à la forte turbulence et aux vitesses instantanées élevées générées lors de nos essais à forte accélération.

D'autre part, nous avons réalisé des études spécifiques sur la durée d'exposition et la forme du dépôt. Il en ressort que :

- la majeure partie de la mise en suspension du dépôt a lieu dans les premières secondes. Ainsi, au-delà d'une période d'exposition de 15 minutes, la fraction mise en suspension tend à se stabiliser et devient indépendante du temps.

- la fraction réentraînée ne dépend pas de la forme du tas. Toutefois, nous avons constaté que pour des vitesses conduisant à de fortes valeurs de fractions réentraînées, la mise en suspension est fonction, notamment, de la hauteur du dépôt et du gradient de vitesse à proximité de la paroi.

Toutefois, devant les fortes influences des paramètres primaires et secondaires, ces facteurs n'influencent pas de façon significative la mise en suspension. Il en est de même pour la masse volumique tassée de la poudre et de la rugosité de la surface d'essai.

Enfin, des séquences photographiques décrivant la mise en suspension dans BISE nous ont confirmé que le réentraînement d'un dépôt conique s'effectue en deux

phases concomitantes. L'une est régie par une mise en suspension dite de « surface » de façon analogue à un dépôt multicouches, et l'autre ne débute qu'au-delà d'une vitesse responsable d'une déformation du tas de poudre. Lors de cette phase de déformation, deux phénomènes principaux de mise en suspension dépendants des conditions initiales, ont pu être observés : d'une part, un phénomène localisé sur la surface faisant face à l'écoulement d'air, où la mise en suspension est liée à la vitesse de l'air directement incidente à cette surface, d'autre part un phénomène localisé en aval du tas dû à la présence d'une zone de recirculation de l'air (phénomène analogue au sillage). Mais selon les formes du dépôt, ces phénomènes peuvent évoluer, rendant la description physique du réentraînement fort compliquée.

A partir de l'ensemble de nos résultats expérimentaux qui constituent une base de données résultant de 227 expériences, nous avons déterminé notre dispersion expérimentale avec un niveau de confiance à 95 %. Nous l'avons évaluée à  $\pm 1$  ordre de grandeur. Nous avons également montré que, dès lors que la fraction réentraînée expérimentale mesurée est supérieure à environ  $10^{-4}$ , moins de 5 % de la dispersion doit être attribuée à nos mesures. Dans ces conditions, la dispersion des résultats provient essentiellement du phénomène de réentraînement.

■ Dans une dernière partie, nous avons comparé nos données aux deux modèles de la littérature retenus lors de notre synthèse bibliographique. Cette confrontation a montré que ces modèles de réentraînement ne sont pas valides, dans leur description actuelle, pour le cas d'un « tas » de poudre de distribution granulométrique caractérisée par un diamètre médian supérieur à  $5 \mu\text{m}$ . Ainsi, nous avons proposé une corrélation semi-empirique permettant de calculer la fraction réentraînée dans nos conditions expérimentales. Ce modèle, fonction d'un paramètre adimensionnel qui intègre les deux paramètres primaires de la mise en suspension (la vitesse et la granulométrie), est valable dans tout le domaine expérimental de BISE Inactive, excepté dans la zone de transition du réentraînement, où les paramètres secondaires (teneur en eau et accélération) varient sur des domaines plus restreints.

Compte tenu de la variabilité du phénomène étudié et du grand domaine de variation de  $K_R$  (dans nos expériences de  $10^{-6}$  à 1), on peut considérer que notre modèle, bien que simple dans sa description, est tout à fait satisfaisant et représente correctement nos résultats.

■ Notre étude nous conduit à proposer sur le sujet, des axes de recherches pour l'avenir :

- d'une part, il serait pertinent de pouvoir identifier les tailles des particules réellement réentraînées par rapport à leur taille d'origine, et ainsi d'évaluer l'effet de la cohésion des poudres sur le réentraînement,

- d'autre part, il serait intéressant d'élargir le domaine d'application de notre travail en appréciant notamment, l'influence de paramètres non étudiés ici, tels que la forme des particules ou bien la nature de la poudre. Sur ce dernier point, dans le cadre du Programme d'Intérêt Commun « Aérocontamination », une étude utilisant des poudres radioactives réelles ( $\text{PuO}_2$ ,  $\text{UO}_2$  et  $\text{MOx}$ ) a été lancée. Cette étude en actif fournira les données qui serviront à valider nos résultats obtenus en inactif, et permettra également d'extrapoler l'inactif à l'actif avec un niveau de confiance connu. De plus, les techniques d'analyses des produits radioactifs étant nettement plus sensibles que celles mises en œuvre pour les poudres inactives, cette étude devrait permettre d'élargir le domaine d'application de notre corrélation semi-empirique, pour les configurations expérimentales conduisant à des coefficients de mise en suspension très faibles.

La Figure ci-dessous montre le schéma général de l'installation expérimentale BISE Active qui a été spécialement conçue et réalisée. Elle est localisée, depuis fin 2001, dans les locaux de l'IPSN sur le site de Valduc. Cette installation est constituée d'un circuit fermé, implanté au sein de deux boîtes à gants nucléarisées, et intègre la zone principale de notre installation BISE Inactive (cf. Figure 2.1).

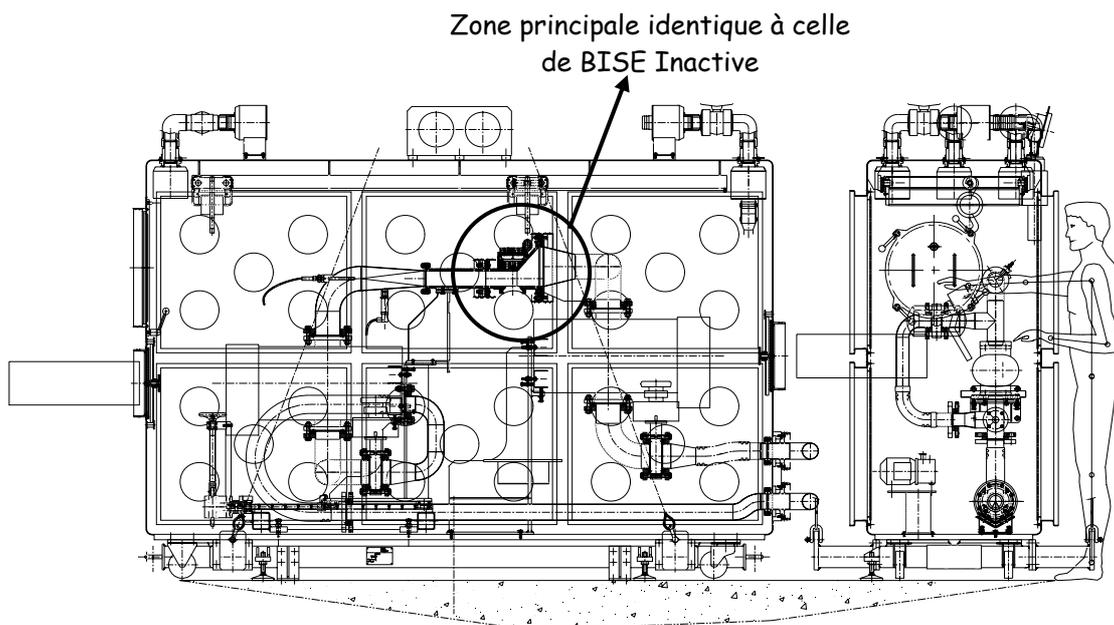


Schéma général de l'installation BISE Active

Finalement, l'ensemble des connaissances acquises, des méthodes développées, et des résultats théoriques et expérimentaux obtenus et décrits au cours de notre travail, devrait permettre d'apporter des éléments utiles pour les spécialistes de la sûreté des installations, ainsi que pour toutes les personnes confrontées à la problématique de la mise en suspension de contamination particulaire par écoulement d'air.

## LISTE DES TRAVAUX ET PRESENTATIONS

### ***Publications dans des revues à Comité de Lecture :***

**Alloul, L., Witschger, O., Ledur, D., Renoux, A., Monnatte, J.** (2000), An experimental facility for powder reentrainment studies. *J. Aerosol Sci.*, **31**, S835-S836.

**Alloul-Marmor, L., Witschger, O., Renoux, A., Monnatte, J.** (2001), Measurement of particle reentrainment from a powder deposit in an horizontal airflow. *J. Aerosol Sci.*, **32**, S933-S934.

**Alloul, L., Witschger, O., Renoux, A., Monnatte, J.** (2001), Réentrainement par écoulement de l'air d'un dépôt de poudre polydispersée. *Salles Propres et Maîtrise de la Contamination, Septembre 2001*, **15**, 56-62.

### ***Congrès Internationaux en langue anglaise :***

**Alloul, L., Witschger, O., Ledur, D., Renoux, A., Monnatte, J.** (2000), An experimental facility for powder reentrainment studies. *EAC'2000, Dublin, 4 au 8 Septembre 2000*.

**Alloul-Marmor, L., Witschger, O., Renoux, A., Monnatte, J.** (2001), Measurement of particle reentrainment from a powder deposit in an horizontal airflow. *EAC'2001, Leipzig, 3 au 7 Septembre 2001*.

### ***Congrès Nationaux en langue française :***

**Alloul, L., Witschger, O., Ledur, D., Renoux, A., Monnatte, J.** (1999), Mise en suspension d'une contamination par écoulement d'air. *Actes du Congrès Français sur les Aérosols CFA'99, ASFERA éditeur, Paris, 8 et 9 Décembre 1999*, 167-172.

**Alloul, L., Witschger, O., Renoux, A., Monnatte, J.** (2000), Réentrainement par écoulement d'air d'un dépôt de poudre polydispersée : premiers résultats. *Actes du Congrès Français sur les Aérosols CFA'2000, ASFERA éditeur, Paris, 6 et 7 Décembre 2000*, 61-67.

**Alloul-Marmor, L., Witschger, O., Renoux, A., Monnatte, J.** (2001), Mesure du réentrainement par écoulement d'air d'un dépôt de poudre polydispersée. *Actes du Congrès Français sur les Aérosols CFA'2001, ASFERA éditeur, Paris, 11 et 12 Décembre 2001, A paraître*.

**Présentations et Rapports Internes CEA / IPSN :**

**Alloul, L.** (1999), Etude des paramètres fondamentaux de mise en suspension d'une contamination particulaire par écoulement de l'air. *Les Journées IPSN de formation par la Recherche, Volume 1 : La sûreté des installations nucléaires, IPSN éditeur, Cadarache, 14 et 15 Décembre 1999.*

**Alloul, L.** (2000), Etude des paramètres fondamentaux de mise en suspension d'une contamination particulaire par écoulement de l'air. *Les Journées IPSN de formation par la Recherche, Volume 3 : La sûreté des installations nucléaires, IPSN éditeur, Paris, 13 et 14 septembre 2000.*

**Alloul-Marmor, L.** (2001), Aérocontamination : Réentraînement par écoulement d'air d'un dépôt de poudre polydispersée. *2<sup>ème</sup> Journée Plans d'Expériences (Plans d'Expériences et Analyse des Données), CEA/DSNQ/MQ éditeur, Saclay, 15 Mars 2001.*

**Alloul-Marmor, L.** (2001), Réentraînement par écoulement d'air d'un dépôt de poudre polydispersée. *Rapport d'avancement, DPEA/SERAC/LPMAC/01-12, Avril 2001.*

**Alloul-Marmor, L.** (2001), Etude des paramètres fondamentaux de mise en suspension d'une contamination particulaire par écoulement de l'air. *Journée IPSN de formation par la Recherche, Volume 1 : La sûreté des installations et des stockage de déchets, IPSN éditeur, Paris, 13 Septembre 2001.*

## Références Bibliographiques

**Adhiwidjaja, I., Matsusaka, S., Tanaka, H., Masuda, H.** (2000), Simultaneous Phenomenon of Particle Deposition and Reentrainment : Effects of Surface Roughness on Deposition Layer of Striped Pattern. *Aerosol Sci. Technol.*, **33**, 323-333.

**Alloul, L., Witschger, O., Ledur, D., Renoux, A., Monnatte, J.** (1999), Mise en suspension d'une contamination par écoulement d'air. *Actes du Congrès Français sur les Aérosols CFA'99*, ASFERA éditeur, 167-172.

**Alloul, L., Witschger, O., Ledur, D., Renoux, A., Monnatte, J.** (2000), An experimental facility for powder reentrainment studies. *J. Aerosol Sci.*, **31**, S835-S836.

**Alloul, L., Witschger, O., Renoux, A., Monnatte, J.** (2000), Réentrainement par écoulement d'air d'un dépôt de poudre polydispersée : premiers résultats. *Actes du Congrès Français sur les Aérosols CFA'2000*, ASFERA éditeur, 61-67.

**Alloul-Marmor, L.** (2001), Réentrainement par écoulement d'air d'un dépôt de poudre polydispersée. *Rapport d'avancement, DPEA/SERAC/LPMAC/01-12*, Avril 2001.

**Alloul-Marmor, L., Witschger, O., Renoux, A., Monnatte, J.** (2001), Measurement of particle reentrainment from a powder deposit in an horizontal airflow. *J. Aerosol Sci.*, **32**, S933-S934.

**Alloul-Marmor, L., Witschger, O., Renoux, A., Monnatte, J.** (2001), Mesure du réentrainement par écoulement d'air d'un dépôt de poudre polydispersée. *Actes du Congrès Français sur les Aérosols CFA'2001*, ASFERA éditeur. A paraître.

**Andreotti, B., Claudin, P., Douady, S.** (2002), Selection of dune shapes and velocities. Part 1 : Dynamics of sand, wind and barchans. *Cond-mat/0201103. Soumis au Eur. Phys. J. B.*

**Bagnold, R. A.** (1941), *The Physics of Blown Sands and Desert Dunes*, London : Methuen, 265 pages.

**Biasi, L., De Los Reyes, A., Reeks, M. W., De Santi, G. F.** (2001), Use a simple model for the interpretation of experimental data on particle resuspension in turbulent flows. *J. Aerosol Sci.*, **32**, 1175-1200.

- Biryukov, S. A.** (1996), Particle resuspension : Time Dependence, Deagglomeration. *J. Aerosol Sci.*, **27**, S415-S416.
- Blackwelder, R. F., Haritonidis, J. F.** (1983), Scaling of the bursting frequency in turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.*, **132**, 87-103.
- Bowling, R. A.** (1988), A theoretical Review of Particles Adhesion. *Particles on Surfaces 1 : Detection, Adhesion, and Removal*. Edité par K. L. Mittal, Plenum Press.
- Braaten, D. A.** (1994), Wind Tunnel Experiments of Large Particle Reentrainment - Deposition and Development of Large Particle Scaling Parameters. *Aerosol Sci. Technol.*, **21**, 157-169.
- Braaten, D. A., Paw U, K. T., Shaw, R. H.** (1988), Coherent structures and particle detachment in boundary layer flows. *J. Aérosol Sci.*, **19**, 1183-1186.
- Braaten, D. A., Paw U, K. T., Shaw, R. H.** (1990), Particle Resuspension in a turbulent boundary Layer - Observed and Modeled. *J. Aerosol Sci.*, **21**, No 5, 613-628.
- Bultynck, H.** (1998), Développement de sondes lasers Doppler miniatures pour la mesure de particules dans des écoulements réels complexes. *Thèse de Doctorat*. Université de Rouen, 20 février 1998.
- Carr R. L.** (1965), Evaluating flow properties of solids. *Chemical Engineering*, January 18, 163-168.
- Cleaver, J. W., Yates, B.** (1973), Mechanism of detachment of colloidal particles from a flat substrate in a turbulent flow. *Journal of colloidal and interface Surface*, **44**, 464-474.
- Corino, E. R., Brodkey, R. S.** (1969), A visual investigation of the wall region in turbulent flow. *J. Fluid. Mech.*, **37**, 1-30.
- Corn, M.** (1961), The adhesion of Solid Particles to Solids Surfaces. *Journal of the Air Pollution Control Association*, **11 (12)**, 566-567.
- Corn, M., Stein, F.** (1965), Re-entrainment of particles from a plane surface. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **26**, 325-336.
- Dauchot, O., Lechénault F., Gasquet, C.** (2001), Barchan Dunes in the lab. *Cond-mat/0108378. Soumis aux Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*.

**DeMejo, L. P., Rimai, D. S., Bowen, R. C.** (1989), Adhesion induced deformations between particles and substrates. *Particles on Surfaces 2 : Detection, Adhesion, and Removal*. Edité par K. L. Mittal, Plenum Press, New York, 49-58.

**Derjaguin, B. V., Muller, V. M., Toporov YU. P.** (1975), Effect of contact deformations of adhesion of particles. *Journal of Colloid and Interface Science*, **53, No 2**, 314-326.

**Droesbeke, J. J., Fine, J., Saporta G.** (1997), Plans d'expériences – Applications à l'entreprise. *Editions Technip*.

**Erhart, D. L.** (1986), Turbulent aerosol deposition and reentrainment, *Doctoral Thesis*. University of California, Berkeley, December 1986.

**Fairchild, C. I., Tillery, M. I.** (1982), Wind tunnel measurements of the resuspension of ideal particles. *Atmospheric Environment*, **16**, 229-238.

**Flechter, B.** (1976), The incipient motion of granular materials. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, **9**, 2471-2478.

**Foucault, J. M.** (1994), Etude théorique et expérimentale des phénomènes d'envol et de saltation de particules dans une couche limite turbulente. *Thèse de doctorat*. Université des Sciences et de Technologies de Lille, 6 octobre 1994.

**Foulquier, L., Bretheau, F.** (1998), Les Installations Nucléaires et l'Environnement – Méthode d'évaluation de l'impact radioécologique et dosimétrique. *Collection IPSN, EDP Sciences*.

**Friess, H., Yadigaroglu, G.** (1998), Inclusion of Structural Parameters in the Modelling of Aerosol Resuspension. *Third OECD Specialist Meeting on Nuclear Aerosols in Reactor Safety*. Cologne, Germany, 15-18 June, 1998.

**Fromentin, A.** (1989), Particle resuspension from a multi-layer deposit by turbulent flow. *Thèse de doctorat*. Paul Scherrer Institut. **PSI-Bericht Nr. 38**, September 1989.

**Giess, P., Goddard, A. J. H., Shaw, G.** (1997), Factors affecting particle resuspension from grass swards. *J. Aerosol Sci.*, **28**, 1331-1349.

**Giess, P., Goddard, A. J. H., Shaw, G., Allen, D.** (1994), Resuspension of monodisperse particles from short grass swards : a wind tunnel study. *J. Aerosol Sci.*, **25**, 843-857.

- Goren, S. L.** (1970), The normal force exerted by creeping flow on a small sphere touching a plane. *J. Fluid Mech.*, **41**, 619-625.
- Gotoh, K., Morooka, H., Nishimura, T.** (2001), Effect of number density of deposited particles on resuspension fraction from sparse particle bed., *J. Aerosol Sci.*, **32**, S559-S560.
- Hall, D.** (1988), Measurements of the mean force on a particle near a boundary in turbulent flow. *J. Fluid Mech.*, **187**, 451-466.
- Hall, D.** (1989), The time dependence of particle resuspension. *J. Aerosol Sci.*, **20**, 907-910.
- Hamaker, H. C.** (1937), The London-van der Waals attraction between spherical particles. *Physica*, **4**, 1057-1072.
- Hinds, W. C.** (1999), Aerosol Technology. Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. *Second Edition, John Wiley & Sons, New York.*
- Hinze, J. O.** (1975), Turbulence. *Second Edition, McGraw-Hill Book Company, New York.*
- Hontañón, E., De los Reyes, A., Capitão, J. A.** (1998), Effect of roughness on particle adhesion to surfaces. *Third OECD Specialist Meeting on Nuclear Aerosols in Reactor Safety.* Cologne, Germany, 15-18 June, 1998.
- Hontañón, E., De los Reyes, A., Capitão, J. A.** (2000), The Ceasar code for aerosol resuspension in turbulent pipe flows. Assessment against the Storm experiments. *J. Aerosol Sci.*, **31**, 1061-1076.
- Hsieh, K. C.** (1990), Studies of particle reentrainment / detachment from flat surface. *Thesis Doctoral.* University of Minnesota, September 1990.
- Hummel, R., Krasenbrink, A., De Santi, G., Areia Capitaó** (1998), Lessons Learnt on Aerosol on Nuclear Aerosols in Reactor Safety. Cologne, Germany, 15-18 June, 1998.
- Israelachvili, J.** (1991), Intermolecular & Surfaces Forces. *Second Edition, Academic press, London.*
- Johnson, K. L., Kendall, K., Roberts, A. D.** (1971), Surface energy and the contact of elastic solids. *Proc. Roy. Soc. A*, **324**, 301-313.

**Krupp, H.** (1967), Particle Adhesion : Theory and Experiment. *Advan. Colloid Interface Sci.*, **1**, 111-239. Deposition / Resuspension in the STORM Project. *Third OECD Specialist Meeting on Nuclear Aerosols in Reactor Safety*. Cologne, Germany, 15-18 June, 1998.

**Kuo, R. J., Matijevic, E.** (1980), Particle Adhesion and Removal in Model Systems, : III. Monodispersed Ferric Oxyde on Steel. *J. Colloid Interface Sci.*, **78**, 407-421.

**Lazaridis, M., Drossinos, Y.** (1995), Resuspension of small particles by turbulent flow. *J. Aerosol Sci.*, **26**, S579-S580.

**Lazaridis, M., Drossinos, Y., Georgopoulos, P. G.** (1998), Turbulent resuspension of small non deformable particles. *J. Colloid Interface Sci.*, **204**, 24-32.

**Leighton, D., Acrivos, A.** (1985), The Lift of Small Sphere Touching a Plane in the Presence of a Simple Shear Flow. *J. appl. Math. Phys.*, **36**, 174-178.

**Leprince, F., Riethmuller, M. L.** (1985), Skin determination by LDV measurements in a viscous sublayer – Analysis of systematic errors. *Technical note 156, Von Karman Institut for Fluid Dynamics*, December 1985.

**Libmann, J.** (1996), Eléments de Sûreté Nucléaire. *Collection IPSN, les Editions de Physique*.

**Matsusaka, S., Masuda, H.** (1996), Particle Reentrainment from a fine powder layer in a Turbulent Air Flow. *Aerosol Sci. Technol.*, **24**, 69-84.

**Matsusaka, S., Masuda, H.** (2001), Adhesive strength distribution of particles deposited on a wall surface. *J. Aerosol Sci.*, **32**, S937-S938.

**Matsusaka, S., Nakamura, Y., Masuda, H.** (1994), Particle Reentrainment from a fine layer by an accelerated flow. *Int. Chemical Engineering*, **34**, 563-569.

**Midoux, N.** (1985), Mécanique et Rhéologie des fluides en génie chimique. *Technique et Documentation (Lavoisier), Paris*.

**Missirlian, M.** (1998), Sophaeros code - Results of blind post-test calculation of STORM Test SR11 (ISP40) - Aerosol Deposition and Resuspension, *Memo Semar 98/20*.

**Missirlian, M., Kissane, M. P., Schmitz, B. M.** (1998), SOPHAEROS V2.0 : Development and Validation Status of the IPSN Reactor Coolant System Code for Fission Product Transport. *Third OECD Specialist Meeting on Nuclear Aerosols in Reactor Safety*. Cologne, Germany, 15-18 June, 1998.

- Mollinger, A.M., Nieuwstadt, F. T. N.** (1996), Measurement of the lift force on a particle fixed to the wall in the viscous sublayer of a fully developed turbulent boundary flows. *J. Fluid Mech.*, **316**, 285-306.
- Nicholson, K. W.** (1988), A review of particle resuspension. *Atmos. Environ.*, **22, No 2**, 2639-2651.
- Nicholson, K. W.** (1993), Wind Tunnel Experiments on the resuspension of particulate material. *Atmospheric Environment*, **27A, No 2**, 181-188.
- Nickling, W. G.** (1994), Aeolian sediment transport and deposition. Sediment Transport and Depositional Process. *Edité par Kenneth Pye, Blackwell Scientific Publications, Oxford*, 293-350.
- Norme ISO/CD 15767** (1999), Workplace Atmospheres – Gravimetric analysis of aerosol collection media.
- Norme NF X 11-601** (1979), Tamisage et Granulométrie – Détermination de l'aire massique ou volumique des poudres par perméabilimétrie – Méthode de Léa et Nurse. Septembre 1979.
- O'Neill, M. E.** (1968), A Sphere in Contact with a Plane Wall in a Slow Linear Shear Flow. *Chem. Engng Sci.*, **23**, 1293-1298.
- Parozzi, F., Biasi, L., Paci, S., Tagliaferri, L.** (1998), Bases for Aerosol Resuspension Modelling in the Light of STORM Experiments. *Third OECD Specialist Meeting on Nuclear Aerosols in Reactor Safety*. Cologne, Germany, 15-18 June, 1998.
- Paw U, K. T.** (1983), A universal model for entrainment process, Précipitation Scavenging, dry deposition and resuspension. *Edité par Pruppacher, H. R., Semonin, H. R., Slinn, W. G. N., Elsevier, New York*, 1111-1120.
- Phares, D. J, Smedley G. T., Flagan, R. C.** (2000), Effect of Particle Size and Material Properties on Aerodynamic Resuspension from Surfaces. *J. Aerosol Sci.*, **31, No 11**, 1335-1353.
- Phillips, M.** (1980), A Force Balance Model for Particle Entrainment into a Fluid Stream. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, **13**, 221-233.
- Punjrath, J. J., Heldman, D. R.** (1972), Mechanisms of small particle re-entrainment from flat surfaces. *J. Aerosol Sci.*, **3**, 429-440.

**Queffelec, B.** (1999), Formation aux plans d'expériences. *Cours de formation intra-CEA de l'INSTN, Société SIER, septembre 1999.*

**Ranade, M. B.** (1987), Adhesion and Removal of Fine Particles on Surfaces. *Aerosol Sci. Technol.*, **7**, 161-176.

**Ranade, M. B., Menon, V. B., Mullins, M. E., Debler, V. L.** (1988), Adhesion and Removal of Particles : Effect of Medium. *Particles on Surfaces 1 : Detection, Adhesion, and Removal. Edité par K. L. Mittal, Plenum Press, New York*, 179-191.

**Reed, J.** (1989), The adhesion of small particles to a surface. *Particles on Surfaces 2 : Detection, Adhesion, and Removal. Edité par K. L. Mittal, Plenum Press, New York*, 3-17.

**Reeks, M. W., Hall, D.** (2001), Kinetic models for particle suspension in turbulent flows : theory and measurement. *J. Aerosol Sci.*, **32**, 1-31.

**Reeks, M. W., Reeds, J., Hall, D.** (1988), On the resuspension of small particles by a turbulent flow. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, **21**, 574-589.

**Renoux, A. et Boulaud, D.** (1998), Les Aérosols. Physique et métrologie. *Edition Lavoisier, Technique et Documentation, Paris.*

**Rimai, D. S., DeMejo, L. P., Bowen, R., Morris, J. D.** (1995), Particles on Surfaces : Adhesion Induced Deformations, *Particles on Surfaces : Detection, Adhesion, and Removal. Edité par K. L. Mittal, Plenum Press, New York*, 1-31.

**Ryhming, I. L.** (1991), Dynamique des fluides. *Edité par Presses polytechniques et universitaires romandes, Seconde édition.*

**Saffman, P. G.** (1965), The lift on a small sphere in a slow shear flow. *J. Fluid Mech.*, **22, No 2**, 385-400.

**Schlichting, H.** (1979), Boundary-Layer Theory. *Septième édition, Mc Graw-Hill, New York.*

**Sehmel, G. A.** (1980), Particle resuspension : a review. *Environmental International*, **4**, 107-127.

**Sehmel, G. A., Lloyd, F. D.** (1974), Resuspension of plutonium at Rocky Flats. *The atmosphere-surface exchange of particulate and gaseous pollutants 1974 symposium. BNWL-SA-5085/CONF-740921-11. Richland, Washington, September 4-6, 1974.*

- Soltani, M., Ahmadi, G., Hart, S. C.** (2000), Electrostatics effects on resuspension of rigid-link fibers in turbulent flows. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **165**, 189-208.
- Taheri, M., Bragg, G. M.** (1992), A Study of Particle Resuspension in a Turbulent Flow Using a Preston Tube. *Aerosol Sci. Technol.*, **16**, 15-20.
- Tsai, C. J.** (1990), Particle phenomena in computer disk drives. *Thesis Doctoral*. Mechanical Engineering Department, University of Minnesota.
- Tsai, C. J., Chiou, S. F.** (1999), Measurement of emission factor of road dust in a wind tunnel. *J. Aerosol Sci.*, **30**, S227-S228.
- Tsai, C. J., Pui, D. Y. H., Liu, B. Y. H.** (1991a), Elastic flattening and particle adhesion. *Aerosol Sci. Technol.*, **15**, 239-255.
- Tsai, C. J., Pui, D. Y. H., Liu, B. Y. H.** (1991b), Particle detachment from disk surfaces of computer disk drives. *J. Aerosol Sci.*, **22**, No 6, 737-746.
- Vainshtein, P., Ziskind, G., Fichman, M., Gutfinger, C.** (1997), Kinetic model of particle resuspension by drag force. *Phys. Rev. Lett.*, **78**, 551-554.
- Visser, J.** (1972), On Hamaker constants : a comparison between Hamaker constants and Lifshitz-Van der Waals constants. *Advan. Colloid Interface Sci.*, **3**, 331-363.
- Visser, J.** (1989), An invited Review – Van der Waals and other cohesive forces affecting powder fluidization. *Powder Technol.*, **58**, 1-10.
- Wang, H.** (1990), Effects of Inceptive Motion on Particle Detachment from Surfaces. *Aerosol Sci. Technol.*, **13**, 386-393.
- Wen, H. Y., Kasper, G.** (1989), On the kinetics of particle reentrainment from surfaces. *J. Aerosol Sci.*, **20**, 483-489.
- Wen, H. Y., Kasper, G., Udischas, R.** (1989), Short and long term particle release from Surfaces under the influence of Gas Flow. *J. Aerosol Sci.*, **20**, No 8, 923-926.
- Witschger, O.** (1999), Mise en suspension de contamination particulaire radioactive – Synthèse bibliographique. *Rapport d'étude SERAC/LPMA/99-13, IPSN/DPEA*.
- Witschger, O., Alloul-Marmor, L.** (2001), Evaluation de la perte de charge de trois types de filtre B. Dumas. *Rapport technique DPEA/SERAC/LPMAC/01-14, IPSN*.

**Wright, A. L.** (1994), Primary System Fission Product Release and transport. A State of the Art Report to the Committee on the Safety of nuclear installations. Rapport *NUREG/CR-6193*.

**Wright, A. L., Pattison, W. L.** (1984), Series-2 Aerosol resuspension test data summary report. *Rapport NUREG/CR-ORNL/TM*.

**Wu , Y. L., Davidson, C. I., Russel, A. G.** (1992), Controlled Wind Tunnel Experiments for Particle bounceoff and Resuspension. *Aerosol Sci. Technol.*, **17**, 245-262.

**Zimon, A. D.** (1982), Adhesion of dust and powder. *Second Edition, Consultants Bureau, New York*.

**Ziskind, G., Fichman, M., Gutfinger, C.** (1995), Resuspension of particulates from surfaces to turbulent flows - Review and analysis. *J. Aerosol Sci.*, **26**, 613-644.

**Ziskind, G., Fichman, M., Gutfinger, C.** (1998), Effect of shear on particle motion near a surface - Application to resuspension. *J. Aerosol Sci.*, **29**, 323-338.

**Ziskind, G., Fichman, M., Gutfinger, C.** (2000), Particle behavior on surfaces subjected to external excitations. *J. Aerosol Sci.*, **31**, 703-719.

## **ANNEXES**

## Annexe 1 : Matrices expérimentales réalisées

Dans les tableaux qui suivent, les valeurs des paramètres sont données en variables codées soient :

- 1 : Valeur minimale,
- 0 : Valeur moyenne,
- 1 : Valeur maximale...

... des gammes de variation définies pour les plans d'expériences effectués.

### ■ PLAN D'EXPERIENCES 12.11p – Matrice de Plackett et Burman

<i>Expérience</i>	$d_{50}$	Forme du tas	$\rho_{tas}$	H <sub>2</sub> O	Rug <sub>SE</sub>	V	$\Delta t$	$\alpha$
12.11p 1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
12.11p 2	1	1	-1	1	1	1	-1	-1
12.11p 3	-1	1	1	-1	1	1	1	-1
12.11p 4	1	-1	1	1	-1	1	1	1
12.11p 5	-1	1	-1	1	1	-1	1	1
12.11p 6	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1
12.11p 7	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
12.11p 8	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
12.11p 9	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1
12.11p 10	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1
12.11p 11	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1
12.11p 12	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1
12.11p 13.1... 13.11	0	0	0	0*	0*	0	0	0

avec  $d_{50}$  : Diamètre médian de la poudre d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> utilisée,

Forme du tas : Dimensions du cône h, D (-1) et H, d (+1) de volume 3 cm<sup>3</sup> en

- Hauteur : h = 8,9 mm et H=12,7 mm,

- Diamètre : D = 36 mm et d = 30 mm,

$\rho_{tas}$  : Masse volumique tassée de la poudre,

---

\* Pour des raisons techniques, condition moyenne prise à 1.

- $H_2O$  : Teneur en  $H_2O$  de la poudre,  
 $Rug_{SE}$  : Rugosité de la surface d'essai,  
 $V$  : Vitesse moyenne de l'écoulement d'air,  
 $\Delta t$  : Durée d'exposition à l'écoulement,  
 $\alpha$  : Accélération de l'air au démarrage de l'écoulement.

■ **PLAN D'EXPERIENCES 13.2p – Matrice composite centrée**

<i>Expérience</i>	$d_{50}$	$V$
13.2p 1	-1	-1
13.2p 2	1	-1
13.2p 3	-1	1
13.2p 4	1	1
13.2p 5	$-\beta^{**}$	0
13.2p 6	$\beta^{**}$	0
13.2p 7	0	$-\beta^{**}$
13.2p 8	0	$\beta^{**}$
13.2p 9.1...9.4	0	0

- avec  $d_{50}$  : Diamètre médian de la poudre d' $Al_2O_3$  utilisée,  
 $V$  : Vitesse moyenne de l'écoulement d'air.

Valeurs expérimentales des 6 paramètres fixés pour ce plan :

- Forme du tas : cône H, d  
 Masse volumique tassée de la poudre :  $\rho_{tas} = 1,75 \text{ g/cm}^3$ ,  
 Teneur en  $H_2O$  de la poudre :  $H_2O = \sim 1 \text{ mgH}_2\text{O/g}$ ,  
 Rugosité de la surface d'essai ( $\mu\text{m}$ ), :  $Rug_{SE} = 1,6 \mu\text{m}$ ,  
 Durée d'exposition à l'écoulement :  $\Delta t = 15 \text{ min}$ ,  
 Accélération de l'air :  $\alpha = 1,5 \text{ m/s}^2$ .

---

\*\*  $\beta = \sqrt[4]{2^{n'}}$  où  $n'$  est le nombre de facteurs quantitatifs (ici  $n' = 2$ )

■ **PLAN D'EXPERIENCES 4.2p ou 2<sup>2</sup> – Plan factoriel complet à 2 niveaux**

<i>Expérience</i>	H <sub>2</sub> O	$\rho_{tas}$
<i>2.2p 1.1...1.3</i>	-1	-1
<i>2.2p 2.1...2.3</i>	-1	1
<i>2.2p 3.1...3.3</i>	1	-1
<i>2.2p 4.1...4.3</i>	1	1

avec H<sub>2</sub>O : Teneur en H<sub>2</sub>O de la poudre,  
 $\rho_{tas}$  : Masse volumique tassée de la poudre.

Valeurs expérimentales des 6 paramètres fixés pour ce plan :

Diamètre médian de la poudre d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> :  $d_{50} = 45,6 \mu\text{m}$ ,  
 Vitesse moyenne de l'écoulement d'air :  $V = 7,5 \text{ m/s}$ ,  
 Forme du tas : cône H, d,  
 Rugosité de la surface d'essai :  $Rug_{SE} = 1,6 \mu\text{m}$ ,  
 Durée d'exposition à l'écoulement :  $\Delta t = 15 \text{ min}$ ,  
 Accélération de l'air :  $\alpha = 1,5 \text{ m/s}^2$ .

■ **PLAN D'EXPERIENCES 8.3p ou 2<sup>3</sup> – Plan factoriel complet à 2 niveaux**

<i>Expérience</i>	$\alpha$	$\Delta t$	$Rug_{SE}$
<i>8.3p 1.1...1.3</i>	-1	-1	-1
<i>8.3p 2.1...2.3</i>	1	-1	-1
<i>8.3p 3.1...3.3</i>	-1	1	-1
<i>8.3p 4.1...4.3</i>	1	1	-1
<i>8.3p 5.1...5.3</i>	-1	-1	1
<i>8.3p 6.1...6.3</i>	1	-1	1
<i>8.3p 7.1...7.3</i>	-1	1	1
<i>8.3p 8.1...8.3</i>	1	1	1

avec  $\alpha$  : Accélération de l'air,  
 $\Delta t$  : Durée d'exposition à l'écoulement,  
 $Rug_{SE}$  : Rugosité de la surface d'essai.

Valeurs expérimentales des 5 paramètres fixés pour ce plan :

Diamètre médian de la poudre d'Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: $d_{50} = 45,6 \mu\text{m}$ ,
Vitesse moyenne de l'écoulement d'air	: $V = 7,5 \text{ m/s}$ ,
Forme du tas	: cône H, d,
Teneur en H <sub>2</sub> O de la poudre	: H <sub>2</sub> O ~ 1mgH <sub>2</sub> O/g,
Masse volumique tassée de la poudre	: $\rho_{\text{tas}} = \text{g/cm}^3$ .

## Annexe 2 : Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux du tableau ci-dessous sont rangés par ordre croissant de granulométrie  $d_{50}$ , puis de vitesse  $V$ .

La codification des expériences est la suivante :

Si l'expérience a été faite lors d'un plan d'expériences (Pour Ex. : 12.11p 1.2) :

- 1) Le plan d'expériences effectué (12.11p...)
- 2) Le numéro de l'expérience dans le plan (... 1...)
- 3) La répétition de l'essai (... .2)

Si l'expérience n'a pas été faite suivant un plan d'expériences (Pour Ex : d60-v1-mtas-t2-1) :

- 1) La granulométrie de l'expérience (d60...)
- 2) La vitesse de l'expérience (...v1...)
- 3) Eventuellement, le type d'étude (...mtas-t2...)
- 4) La répétition de l'essai (...-1)

**Tableau récapitulatif des résultats expérimentaux dans BISE Inactive**

<i>n°</i>	<i>Expérience</i>	$d_{50}$	Forme du tas	$\rho_{tas}$	H <sub>2</sub> O	Rug <sub>SE</sub>	V	$\Delta t$	$\alpha$	$K_R$
1	12.11p 5.1	4,6	Cône H, d	1,5	1,3	1,6	0,5	60,0	2,2	$9,5 \cdot 10^{-6}$ *
2	12.11p 11.1	4,6	Cône H, d	1,7	1,3	0	0,5	2,0	2,0	$9,5 \cdot 10^{-6}$ *
3	12.11p 1.2	4,6	Cône h, D	1,5	0,0	0	0,5	2,0	0,4	$5,2 \cdot 10^{-5}$
4	d5-v5-1	4,6	Cône H, d	1,7	1,3	1,6	5,1	15,0	1,5	$3,5 \cdot 10^{-5}$
5	d5-v5-2	4,6	Cône H, d	1,7	1,3	1,6	5,1	15,0	1,5	$5,7 \cdot 10^{-5}$
6	13.2p 5.2	4,6	Cône H, d	1,7	1,3	1,6	5,2	15,0	1,5	$8,5 \cdot 10^{-5}$
7	d5-v8,5-2	4,6	Cône H, d	1,7	1,3	1,6	8,4	15,0	1,5	$2,0 \cdot 10^{-4}$
8	d5-v8,5-1	4,6	Cône H, d	1,8	1,3	1,6	8,6	15,0	1,5	$9,4 \cdot 10^{-4}$
9	d5-v8,5-3	4,6	Cône H, d	1,7	1,3	1,6	8,6	15,0	1,5	$3,0 \cdot 10^{-4}$
10	12.11p 6.2	4,6	Cône h, D	1,7	0,0	1,6	9,4	2,0	2,3	$1,3 \cdot 10^{-5}$ **
11	12.11p 3.1	4,6	Cône H, d	1,8	0,0	1,6	9,5	60,0	0,5	$3,3 \cdot 10^{-4}$
12	12.11p 7.1	4,6	Cône H, d	1,5	1,3	0	9,5	60,0	0,5	$3,6 \cdot 10^{-5}$
13	d5-v10-1	4,6	Cône H, d	1,7	1,3	1,6	10,5	15,0	1,6	$3,0 \cdot 10^{-4}$

\*  $K_R \text{ mesuré} \leq \frac{LD_{SE}}{2}$  (on lui attribue la valeur  $\frac{LD_{SE}}{2}$ )

\*\*  $\frac{LD_{SE}}{2} < K_R \leq LD_{SE}$

Annexe 2 : Résultats expérimentaux

<i>n°</i>	<i>Expérience</i>	<i>d</i> <sub>50</sub>	Forme du tas	<i>ρ</i> <sub>tas</sub>	H <sub>2</sub> O	Rug <sub>SE</sub>	V	Δ <i>t</i>	α	<i>K</i> <sub>R</sub>
14	<i>d5-v13,5-1</i>	4,6	Cône H, d	1,4	1,3	1,6	13,6	15,0	1,5	<b>4,7.10<sup>-4</sup></b>
15	<i>13.2p 1.2</i>	17,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	2,0	15,0	1,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
16	<i>13.2p 1.1</i>	17,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	2,0	15,0	1,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
17	<i>d16-v5-2</i>	17,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	5,0	15,0	1,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
18	<i>d16-v5-1</i>	17,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	5,1	15,0	1,5	<b>1,3.10<sup>-5**</sup></b>
19	<i>d16-v5-3</i>	17,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	5,2	15,0	1,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
20	<i>13.2p 3.1</i>	17,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	8,4	15,0	1,4	<b>4,2.10<sup>-4</sup></b>
21	<i>d16-v8,5-2</i>	17,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	8,5	15,0	1,5	<b>2,0.10<sup>-4</sup></b>
22	<i>d16-v8,5-1</i>	17,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	8,6	15,3	1,5	<b>1,7.10<sup>-5**</sup></b>
23	<i>d16-v10-2</i>	17,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	9,7	15,0	1,5	<b>2,1.10<sup>-4</sup></b>
24	<i>d16-v10-3</i>	17,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	9,7	15,0	1,5	<b>9,1.10<sup>-4</sup></b>
25	<i>d16-v10-1</i>	17,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	9,8	15,0	1,5	<b>6,7.10<sup>-4</sup></b>
26	<i>13.2p 7.1</i>	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	0,5	15,0	1,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
27	<i>d30-v3-1</i>	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	2,9	15,0	1,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
28	<i>d30-v3-mtas-t0,5-2</i>	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	3,0	0,5	1,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
29	<i>d30-v3-mtas-t2-2</i>	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	3,0	2,0	1,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
30	<i>d30-v3-mtas-t15-2</i>	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	3,0	15,0	1,5	<b>1,6.10<sup>-5**</sup></b>
31	<i>d30-v3-mtas-t30-2</i>	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	3,0	30,0	1,5	<b>1,5.10<sup>-5**</sup></b>
32	<i>d30-v3-mtas-t60-2</i>	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	3,0	60,0	1,5	<b>2,9.10<sup>-5</sup></b>
33	<i>d30-v3-mtas-t0,5-1</i>	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	3,1	0,5	1,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
34	<i>d30-v3-mtas-t2-1</i>	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	3,1	2,0	1,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
35	<i>d30-v3-mtas-t15-1</i>	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	3,1	15,0	1,5	<b>1,3.10<sup>-5**</sup></b>
36	<i>d30-v3-mtas-t30-1</i>	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	3,1	30,0	1,5	<b>1,2.10<sup>-5**</sup></b>
37	<i>d30-v3-mtas-t60-1</i>	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	3,1	60,0	1,5	<b>2,3.10<sup>-5</sup></b>
38	<i>16.4p - 3.1</i>	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	0	4,0	60,0	14,3	<b>1,7.10<sup>-3</sup></b>
39	<i>16.4p - 5.1</i>	27,3	Cône H, d	1,8	0,0	12,5	4,1	60,0	0,5	<b>3,9.10<sup>-4</sup></b>
40	<i>16.4p - 1.1</i>	27,3	Cône H, d	1,7	0,0	0	4,1	0,5	0,5	<b>8,2.10<sup>-4</sup></b>
41	<i>16.4p - 7.1</i>	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	12,5	4,1	0,5	14,2	<b>7,5.10<sup>-4</sup></b>
42	<i>d30-v5-2-t30</i>	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	4,9	30,0	1,5	<b>1,3.10<sup>-3</sup></b>
43	<i>12.11p 13.1</i>	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	4,9	15,0	1,4	<b>1,1.10<sup>-3</sup></b>
44	<i>12.11p 13.2</i>	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	4,9	15,0	1,4	<b>3,4.10<sup>-4</sup></b>
45	<i>12.11p 13.4</i>	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	5,0	15,0	1,2	<b>1,0.10<sup>-3</sup></b>
46	<i>12.11p 13.5</i>	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	5,0	15,0	1,2	<b>1,8.10<sup>-4</sup></b>
47	<i>12.11p 13.8</i>	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	5,0	15,0	1,2	<b>2,1.10<sup>-4</sup></b>
48	<i>12.11p 13.9</i>	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	5,0	15,0	1,0	<b>3,6.10<sup>-4</sup></b>

\* *K*<sub>R</sub> mesuré ≤  $\frac{LD_{SE}}{2}$  (on lui attribue la valeur  $\frac{LD_{SE}}{2}$ )

\*\*  $\frac{LD_{SE}}{2} < K_R \leq LD_{SE}$

Annexe 2 : Résultats expérimentaux

<i>n°</i>	<i>Expérience</i>	<i>d</i> <sub>50</sub>	Forme du tas	<i>ρ</i> <sub>tas</sub>	H <sub>2</sub> O	Rug <sub>SE</sub>	V	Δ <i>t</i>	α	<i>K</i> <sub>R</sub>
49	13.2p d30-v5-t15-1	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	5,0	15,0	1,5	<b>4,2.10<sup>-4</sup></b>
50	12.11p 13.6	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	5,0	15,0	1,3	<b>2,8.10<sup>-4</sup></b>
51	12.11p 13.7	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	5,1	15,0	1,2	<b>3,4.10<sup>-4</sup></b>
52	12.11p 13.11	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	5,1	15,0	1,0	<b>9,4.10<sup>-4</sup></b>
53	13.2p 9.3	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	5,1	15,0	1,5	<b>2,1.10<sup>-4</sup></b>
54	d30-v5-t2-1	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	5,1	2,0	1,5	<b>1,4.10<sup>-4</sup></b>
55	13.2p d30-v5-t15-2	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	5,1	15,0	1,5	<b>1,8.10<sup>-4</sup></b>
56	12.11p 13.10	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	5,1	15,0	1,0	<b>1,6.10<sup>-3</sup></b>
57	13.2p 9.4	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	5,2	15,0	1,5	<b>3,9.10<sup>-4</sup></b>
58	13.2p 9.2	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	5,2	15,0	1,5	<b>1,6.10<sup>-4</sup></b>
59	13.2p 9.1	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	5,2	15,0	1,6	<b>3,2.10<sup>-5</sup></b>
60	d30-v7-2	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	6,9	15,0	1,5	<b>1,1.10<sup>-3</sup></b>
61	d30-v7-1	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	7,0	15,0	1,5	<b>3,1.10<sup>-4</sup></b>
62	d30-v8,5-3	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	8,5	15,0	1,5	<b>7,6.10<sup>-4</sup></b>
63	d30-v8,5-2	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	8,6	15,0	1,5	<b>7,2.10<sup>-4</sup></b>
64	d30-v8,5-1	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	8,6	15,0	1,5	<b>1,4.10<sup>-3</sup></b>
65	difftas-03-1	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	9,5	2,0	28,9	<b>8,2.10<sup>-2</sup></b>
66	difftas-03-2	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	9,5	15,0	28,9	<b>2,6.10<sup>-1</sup></b>
67	difftas-4-1	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	9,5	30,0	29,4	<b>2,5.10<sup>-1</sup></b>
68	difftas-4-2	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	9,5	60,0	29,4	<b>1,9.10<sup>-1</sup></b>
69	difftas-4-2'	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	9,5	60,0	29,4	<b>2,0.10<sup>-1</sup></b>
70	mêmetas-t2-03	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	9,5	2,0	32,2	<b>3,0.10<sup>-2</sup></b>
71	mêmetas-t15-03	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	9,5	15,0	32,2	<b>2,2.10<sup>-1</sup></b>
72	mêmetas-t30-03	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	9,5	30,0	32,2	<b>2,9.10<sup>-1</sup></b>
73	mêmetas-t60-03	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	9,5	60,0	32,2	<b>3,3.10<sup>-1</sup></b>
74	mêmetas-t2-02	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	9,6	2,0	28,2	<b>4,3.10<sup>-2</sup></b>
75	mêmetas-t15-02	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	9,6	15,0	28,2	<b>2,1.10<sup>-1</sup></b>
76	mêmetas-t30-02	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	9,6	30,0	28,2	<b>2,7.10<sup>-1</sup></b>
77	mêmetas-t60-02	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	9,6	60,0	28,2	<b>3,2.10<sup>-1</sup></b>
78	mêmetas-t15-0	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	9,8	2,0	31,7	<b>1,1.10<sup>-2</sup></b>
79	mêmetas-t30-01	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	9,8	15,0	31,7	<b>1,9.10<sup>-1</sup></b>
80	mêmetas-t30-01	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	9,8	30,0	31,7	<b>2,6.10<sup>-1</sup></b>
81	mêmetas-t60-0	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	9,8	60,0	31,7	<b>3,1.10<sup>-1</sup></b>
82	difftas-02-1	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	9,8	30,0	33,7	<b>2,7.10<sup>-1</sup></b>
83	difftas-02-2	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	9,8	60,0	33,7	<b>2,8.10<sup>-1</sup></b>
84	16.4p - 13.1	27,3	Cône H, d	1,8	0,0	12,5	9,9	60,0	14,3	<b>4,1.10<sup>-1</sup></b>
85	16.4p - 9.1	27,3	Cône H, d	1,7	0,0	0	9,9	0,5	14,5	<b>8,9.10<sup>-2</sup></b>
86	16.4p - 15.1	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	12,5	9,9	0,5	0,5	<b>1,7.10<sup>-2</sup></b>
87	difftas-01-1	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	10,0	2,0	31,4	<b>3,1.10<sup>-2</sup></b>
88	difftas-01-2	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	10,0	15,0	31,4	<b>2,4.10<sup>-1</sup></b>

Annexe 2 : Résultats expérimentaux

<i>n°</i>	<i>Expérience</i>	<i>d</i> <sub>50</sub>	Forme du tas	<i>ρ</i> <sub>tas</sub>	H <sub>2</sub> O	Rug <sub>SE</sub>	V	Δ <i>t</i>	α	<i>K</i> <sub>R</sub>
89	13.2p 8.1	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	10,1	15,0	1,6	<b>2,0.10<sup>-2</sup></b>
90	13.2p 8.2	27,3	Cône H, d	1,7	0,8	1,6	10,1	15,0	1,6	<b>3,0.10<sup>-2</sup></b>
91	d30-v13,5-1	27,3	Cône H, d	1,8	0,8	1,6	13,7	15,0	1,5	<b>1,2.10<sup>-1</sup></b>
92	13.2p 2.1	45,6	Cône H, d	1,7	1,0	1,6	2,0	15,0	1,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
93	d45-v2- Gal-1	45,6	Galette	1,8	1,0	1,6	2,0	15,0	1,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
94	d45-v3- Obél-1	45,6	Obélisque	1,8	1,0	1,6	3,0	15,0	1,5	<b>6,9.10<sup>-5</sup></b>
95	d45-v3-3	45,6	Cône H, d	1,7	1,0	1,6	3,0	15,0	1,5	<b>2,7.10<sup>-5</sup></b>
96	d45-v3-Gal-2	45,6	Galette	1,8	1,0	1,6	3,0	15,0	1,6	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
97	d45-v3-Gal-3	45,6	Galette	1,7	1,0	1,6	3,1	15,0	1,5	<b>7,5.10<sup>-5</sup></b>
98	d45-v3-Obél-2	45,6	Obélisque	1,8	1,0	1,6	3,1	15,0	1,5	<b>1,1.10<sup>-4</sup></b>
99	d45-v3-Gal 4	45,6	Galette	1,7	1,0	1,6	3,1	15,0	1,5	<b>4,2.10<sup>-5</sup></b>
100	d45-v3-1	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	1,6	3,1	15,0	1,5	<b>8,5.10<sup>-5</sup></b>
101	d45-v3- Obél-3	45,6	Obélisque	1,8	1,0	1,6	3,1	15,0	1,5	<b>2,9.10<sup>-5</sup></b>
102	d45-v3-2	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	1,6	3,1	15,0	1,7	<b>4,3.10<sup>-5</sup></b>
103	d45-v3-ssH2O-1	45,6	Cône H, d	1,8	0,0	1,6	3,2	15,0	1,3	<b>1,3.10<sup>-3</sup></b>
104	d45-v3-ssH2O-2	45,6	Cône H, d	1,7	0,0	1,6	3,2	15,0	1,6	<b>1,2.10<sup>-3</sup></b>
105	d45-v5-5	45,6	Cône H, d	1,7	1,0	1,6	5,0	15,0	1,5	<b>1,9.10<sup>-3</sup></b>
106	d45-v5-Gal-2	45,6	Galette	1,8	1,0	1,6	5,0	15,0	1,5	<b>2,8.10<sup>-3</sup></b>
107	d45-v5-Obél-1	45,6	Obélisque	1,8	1,0	1,6	5,0	15,0	1,6	<b>2,7.10<sup>-3</sup></b>
108	d45-v5-Gal-1	45,6	Galette	1,7	1,0	1,6	5,0	15,0	1,6	<b>3,4.10<sup>-3</sup></b>
109	d45-v5-Obé-3	45,6	Obélisque	1,7	1,0	1,6	5,1	15,0	1,6	<b>1,8.10<sup>-3</sup></b>
110	d45-v5-Gal-3	45,6	Galette	1,7	1,0	1,6	5,1	15,0	1,5	<b>1,7.10<sup>-3</sup></b>
111	d45-v5-2	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	1,6	5,1	15,0	1,4	<b>9,5.10<sup>-4</sup></b>
112	d45-v5-Obél-2	45,6	Obélisque	1,7	1,0	1,6	5,1	15,0	1,6	<b>2,4.10<sup>-3</sup></b>
113	d45-v5-1	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	1,6	5,1	15,0	1,5	<b>2,6.10<sup>-4</sup></b>
114	d45-v5-3	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	1,6	5,2	15,0	1,5	<b>2,1.10<sup>-4</sup></b>
115	16.4p - 18.1	45,6	Cône H, d	1,7	0,0	6,5	7,0	15,5	6,8	<b>3,1.10<sup>-3</sup></b>
116	16.4p - 20.1	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	6,5	7,0	15,0	6,7	<b>1,5.10<sup>-3</sup></b>
117	16.4p - 19.1	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	6,5	7,0	15,0	7,0	<b>8,2.10<sup>-4</sup></b>
118	16.4p - 17.1	45,6	Cône H, d	1,8	0,0	6,5	7,1	15,0	7,0	<b>1,3.10<sup>-2</sup></b>
119	8.3p 8.3	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	12,5	7,5	60,0	20,4	<b>1,9.10<sup>-2</sup></b>
120	2.2p 1.2	45,6	Cône H, d	1,5	0,0	1,6	7,5	15,0	1,5	<b>9,7.10<sup>-1</sup></b>
121	2.2p 4.3	45,6	Cône H, d	2,0	1,0	1,6	7,5	15,0	1,5	<b>9,0.10<sup>-3</sup></b>
122	2.2p 3.3	45,6	Cône H, d	2,0	0,0	1,6	7,5	15,0	1,5	<b>3,2.10<sup>-1</sup></b>
123	2.2p 4.2	45,6	Cône H, d	2,0	1,0	1,6	7,5	15,0	1,5	<b>4,0.10<sup>-3</sup></b>
124	8.3p 5.1	45,6	Cône H, d	1,7	1,0	12,5	7,5	0,5	0,3	<b>1,8.10<sup>-3</sup></b>
125	2.2p 3.2	45,6	Cône H, d	2,0	0,0	1,6	7,5	15,0	1,5	<b>3,5.10<sup>-1</sup></b>

\* *K*<sub>R</sub> mesuré ≤  $\frac{LD_{SE}}{2}$  (on lui attribue la valeur  $\frac{LD_{SE}}{2}$ )

Annexe 2 : Résultats expérimentaux

<i>n°</i>	<i>Expérience</i>	<i>d</i> <sub>50</sub>	Forme du tas	<i>ρ</i> <sub>tas</sub>	H <sub>2</sub> O	Rug <sub>SE</sub>	V	Δ <i>t</i>	α	<i>K</i> <sub>R</sub>
126	8.3p 2.3	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	0	7,5	0,5	19,7	<b>2,5.10<sup>-3</sup></b>
127	2.2p 2.3	45,6	Cône H, d	1,5	1,0	1,6	7,5	15,3	1,5	<b>1,7.10<sup>-3</sup></b>
128	d45-v7,5-Obél-3	45,6	Obélisque	1,8	1,0	1,6	7,5	15,0	1,5	<b>8,4.10<sup>-3</sup></b>
129	2.2p 3.1	45,6	Cône H, d	2,0	0,0	1,6	7,5	15,0	1,5	<b>9,8.10<sup>-1</sup></b>
130	2.2p 1.3	45,6	Cône H, d	1,5	0,0	1,6	7,5	15,0	1,5	<b>4,4.10<sup>-1</sup></b>
131	d45-v7,5-Gal-1	45,6	Galette	1,7	1,0	1,6	7,5	15,0	1,6	<b>2,4.10<sup>-2</sup></b>
132	8.3p 1.1	45,6	Cône H, d	1,7	1,0	0	7,5	0,5	0,3	<b>2,3.10<sup>-3</sup></b>
133	2.2p 2.2	45,6	Cône H, d	1,5	1,0	1,6	7,5	15,0	1,5	<b>3,9.10<sup>-3</sup></b>
134	8.3p 3.3	45,6	Cône H, d	1,7	1,0	0	7,5	60,3	0,3	<b>5,2.10<sup>-2</sup></b>
135	8.3p 2.1	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	0	7,6	0,5	20,5	<b>5,1.10<sup>-3</sup></b>
136	8.3p 6.1	45,6	Cône H, d	1,7	1,0	12,5	7,6	0,5	21,4	<b>1,0.10<sup>-2</sup></b>
137	d45-v7,5-Gal-2	45,6	Galette	1,8	1,0	1,6	7,6	15,0	1,4	<b>2,0.10<sup>-2</sup></b>
138	-d45-v7,5-Gal 3	45,6	Galette	1,8	1,0	1,6	7,6	15,0	1,4	<b>4,5.10<sup>-2</sup></b>
139	8.3p 3.1	45,6	Cône H, d	1,7	1,0	0	7,6	60,0	0,3	<b>7,6.10<sup>-3</sup></b>
140	8.3p 4.2	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	0	7,6	60,0	21,4	<b>1,0.10<sup>-1</sup></b>
141	8.3p 3.6	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	0	7,6	60,0	0,3	<b>2,3.10<sup>-3</sup></b>
142	8.3p 4.1	45,6	Cône H, d	1,7	1,0	0	7,6	60,0	20,6	<b>2,5.10<sup>-2</sup></b>
143	8.3p 6.2	45,6	Cône H, d	1,7	1,0	12,5	7,6	0,5	20,6	<b>1,2.10<sup>-2</sup></b>
144	8.3p 6.3	45,6	Cône H, d	1,7	1,0	12,5	7,6	0,5	20,0	<b>1,4.10<sup>-2</sup></b>
145	8.3p 5.3	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	12,5	7,6	0,5	0,3	<b>4,4.10<sup>-4</sup></b>
146	8.3p 7.3	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	12,5	7,6	60,0	0,3	<b>3,1.10<sup>-3</sup></b>
147	8.3p 7.2	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	12,5	7,6	60,0	0,3	<b>3,7.10<sup>-3</sup></b>
148	d45-v7,5-Obél-2	45,6	Obélisque	1,8	1,0	1,6	7,6	15,0	1,5	<b>8,9.10<sup>-3</sup></b>
149	d45-v7,5-Obél-1	45,6	Obélisque	1,8	1,0	1,6	7,6	15,0	1,5	<b>7,3.10<sup>-3</sup></b>
150	8.3p 7.1	45,6	Cône H, d	1,7	1,0	12,5	7,6	60,0	0,3	<b>1,4.10<sup>-2</sup></b>
151	8.3p 1.2	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	0	7,6	0,5	0,3	<b>8,2.10<sup>-4</sup></b>
152	8.3p 2.2	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	0	7,6	0,5	21,5	<b>1,5.10<sup>-2</sup></b>
153	2.2p 2.1	45,6	Cône H, d	1,5	1,0	1,6	7,6	15,0	1,5	<b>2,5.10<sup>-3</sup></b>
154	8.3p 1.3	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	0	7,6	0,5	0,3	<b>1,0.10<sup>-3</sup></b>
155	8.3p 8.1	45,6	Cône H, d	1,7	1,0	12,5	7,6	60,0	20,8	<b>7,7.10<sup>-2</sup></b>
156	8.3p 8.2	45,6	Cône H, d	1,7	1,0	12,5	7,6	60,0	20,1	<b>1,4.10<sup>-2</sup></b>
157	8.3p 3.2	45,6	Cône H, d	1,7	1,0	0	7,6	60,0	0,3	<b>8,5.10<sup>-3</sup></b>
158	2.2p 1.1	45,6	Cône H, d	1,5	0,0	1,6	7,6	15,0	1,5	<b>7,4.10<sup>-1</sup></b>
159	8.3p 5.2	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	12,5	7,7	0,5	0,3	<b>5,9.10<sup>-4</sup></b>
160	2.2p 4.1	45,6	Cône H, d	2,1	1,0	1,6	7,7	15,0	1,5	<b>3,7.10<sup>-3</sup></b>
161	8.3p 4.3	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	0	7,7	60,0	20,3	<b>1,7.10<sup>-2</sup></b>
162	13.2p 4.1	45,6	Cône H, d	1,7	1,0	1,6	8,5	15,0	1,5	<b>3,9.10<sup>-1</sup></b>
163	d45-v8,5-1	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	1,6	8,5	15,0	1,5	<b>2,3.10<sup>-1</sup></b>
164	d45-v8,5-2	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	1,6	8,6	15,0	1,5	<b>2,0.10<sup>-1</sup></b>
165	d45-v10-3	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	1,6	9,8	15,0	1,5	<b>9,1.10<sup>-1</sup></b>

Annexe 2 : Résultats expérimentaux

<i>n°</i>	<i>Expérience</i>	<i>d</i> <sub>50</sub>	Forme du tas	<i>ρ</i> <sub>tas</sub>	H <sub>2</sub> O	Rug <sub>SE</sub>	V	Δ <i>t</i>	α	<i>K</i> <sub>R</sub>
166	<i>d45-v10-2</i>	45,6	Cône H, d	1,7	1,0	1,6	9,8	15,0	1,5	<b>9,0.10<sup>-1</sup></b>
167	<i>d45-v10-Gal-1</i>	45,6	Galette	1,7	1,0	1,6	9,9	15,0	1,5	<b>1,1.10<sup>-1</sup></b>
168	<i>d45-v10-Gal-3</i>	45,6	Galette	1,7	1,0	1,6	9,9	15,0	1,4	<b>3,7.10<sup>-2</sup></b>
169	<i>d45-v10-Obél-4</i>	45,6	Obélisque	1,8	1,0	1,6	9,9	15,0	1,4	<b>9,2.10<sup>-1</sup></b>
170	<i>d45-v10-Obél-1</i>	45,6	Obélisque	1,8	1,0	1,6	9,9	15,0	1,5	<b>7,7.10<sup>-2</sup></b>
171	<i>d45-v10-1</i>	45,6	Cône H, d	1,8	1,0	1,6	9,9	15,0	1,5	<b>9,0.10<sup>-1</sup></b>
172	<i>d45-v10-Obél-2</i>	45,6	Obélisque	1,8	1,0	1,6	9,9	15,0	1,5	<b>9,0.10<sup>-1</sup></b>
173	<i>d45-v10-Gal-2</i>	45,6	Galette	1,8	1,0	1,6	10,0	15,0	1,5	<b>7,4.10<sup>-2</sup></b>
174	<i>12.11p 12.1</i>	58,7	Cône h, D	2,0	1,1	1,6	0,5	2,0	0,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
175	<i>12.11p 8.1</i>	58,7	Cône h, D	1,5	0,0	1,6	0,5	60,0	2,3	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
176	<i>12.11p 10.1</i>	58,7	Cône H, d	2,0	0,0	0	0,5	60,0	0,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
177	<i>d60-v1-mtas-t2-1</i>	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	1,1	2,0	1,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
178	<i>d60-v1-mtas-t15-1</i>	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	1,1	15,0	1,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
179	<i>d60-v1-mtas-t30-1</i>	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	1,1	30,0	1,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
180	<i>d60-v1-mtas-t60-1</i>	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	1,1	60,0	1,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
181	<i>d60-v1-mtas-t120-1</i>	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	1,1	120,0	1,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
182	<i>d60-v1-mtas-t17h-1</i>	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	1,1	1020,0	1,5	<b>9,5.10<sup>-6*</sup></b>
183	<i>d60-v3-4</i>	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	2,9	15,0	1,5	<b>1,1.10<sup>-3</sup></b>
184	<i>d60-v3-5</i>	58,7	Cône H, d	1,7	1,1	1,6	3,0	15,0	1,5	<b>4,2.10<sup>-3</sup></b>
185	<i>d60-v3-mtas-t0,5-2</i>	58,7	Cône H, d	1,7	1,1	1,6	3,0	0,5	1,5	<b>2,0.10<sup>-4</sup></b>
186	<i>d60-v3-mtas-t2-2</i>	58,7	Cône H, d	1,7	1,1	1,6	3,0	2,0	1,5	<b>2,2.10<sup>-4</sup></b>
187	<i>d60-v3-mtas-t17-2</i>	58,7	Cône H, d	1,7	1,1	1,6	3,0	17,0	1,5	<b>3,4.10<sup>-4</sup></b>
188	<i>d60-v3-mtas-t30-2</i>	58,7	Cône H, d	1,7	1,1	1,6	3,0	30,0	1,5	<b>4,5.10<sup>-4</sup></b>
189	<i>d60-v3-mtas-t60-2</i>	58,7	Cône H, d	1,7	1,1	1,6	3,0	60,0	1,5	<b>5,9.10<sup>-4</sup></b>
190	<i>d60-v3-mtas-t0,5-3</i>	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	3,1	0,5	1,5	<b>5,0.10<sup>-4</sup></b>
191	<i>d60-v3-mtas-t2-3</i>	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	3,1	2,0	1,5	<b>5,4.10<sup>-4</sup></b>
192	<i>d60-v3-mtas-t15-3</i>	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	3,1	15,0	1,5	<b>7,5.10<sup>-4</sup></b>
193	<i>d60-v3-mtas-t30-3</i>	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	3,1	30,0	1,5	<b>1,4.10<sup>-3</sup></b>
194	<i>d60-v3-mtas-t60-3</i>	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	3,1	60,0	1,5	<b>3,8.10<sup>-3</sup></b>
195	<i>d60-v3-2</i>	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	3,1	15,0	1,5	<b>4,0.10<sup>-3</sup></b>
196	<i>d60-v3-t15-0</i>	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	3,1	15,0	1,5	<b>4,0.10<sup>-4</sup></b>
197	<i>d60-v3-mtas-t1,5-1'</i>	58,7	Cône H, d	1,7	1,1	1,6	3,1	1,5	1,5	<b>2,2.10<sup>-5</sup></b>
198	<i>d60-v3-mtas-t15-1'</i>	58,7	Cône H, d	1,7	1,1	1,6	3,1	15,0	1,5	<b>1,2.10<sup>-4</sup></b>
199	<i>d60-v3-mtas-t30-1'</i>	58,7	Cône H, d	1,7	1,1	1,6	3,1	30,0	1,5	<b>2,3.10<sup>-4</sup></b>
200	<i>d60-v3-mtas-t60-1'</i>	58,7	Cône H, d	1,7	1,1	1,6	3,1	60,0	1,5	<b>4,7.10<sup>-4</sup></b>
201	<i>d60-v3-mtas-t0,5-1'</i>	58,7	Cône H, d	1,7	1,1	1,6	3,1	0,5	1,5	<b>1,7.10<sup>-5**</sup></b>
202	<i>d60-v3-3</i>	58,7	Cône H, d	1,7	1,1	1,6	3,1	15,0	1,5	<b>5,8.10<sup>-3</sup></b>

\* *K*<sub>R</sub> mesuré ≤  $\frac{LD_{SE}}{2}$  (on lui attribue la valeur  $\frac{LD_{SE}}{2}$ )

<i>n°</i>	<i>Expérience</i>	<i>d</i> <sub>50</sub>	Forme du tas	$\rho_{\text{tas}}$	H <sub>2</sub> O	Rug <sub>SE</sub>	V	$\Delta t$	$\alpha$	$K_R$
203	16.4p - 6.1	58,7	Cône H, d	1,8	0,0	12,5	4,0	0,5	14,3	$1,6 \cdot 10^{-4}$
204	16.4p - 4.1	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	0	4,1	0,5	0,5	$3,6 \cdot 10^{-4}$
205	16.4p - 6.2'	58,7	Cône H, d	1,9	0,0	1,6	4,1	0,5	15,0	$1,8 \cdot 10^{-2}$
206	16.4p - 6.3'	58,7	Cône H, d	1,9	0,0	1,6	4,1	0,5	15,0	$3,3 \cdot 10^{-2}$
207	16.4p - 2.1	58,7	Cône H, d	1,7	0,0	0	4,2	60,0	14,3	$4,6 \cdot 10^{-3}$
208	d60-v5-t15-1	58,7	Cône H, d	1,7	1,1	1,6	4,9	15,0	1,4	$1,0 \cdot 10^{-2}$
209	d60-v5-2	58,7	Cône H, d	1,7	1,1	1,6	5,1	15,0	1,5	$9,8 \cdot 10^{-3}$
210	d60-v5-1	58,7	Cône H, d	1,7	1,1	1,6	5,1	15,0	1,5	$4,8 \cdot 10^{-3}$
211	13.2p 6.2	58,7	Cône H, d	1,7	1,1	1,6	5,2	15,0	1,4	$1,5 \cdot 10^{-3}$
212	13.2p 6.3	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	5,2	15,0	1,4	$2,5 \cdot 10^{-3}$
213	13.2p 6.1	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	5,2	15,0	1,5	$4,3 \cdot 10^{-4}$
214	d60-v7-3	58,7	Cône H, d	1,7	1,1	1,6	7,0	15,0	1,5	$6,5 \cdot 10^{-2}$
215	d60-v7-2	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	7,0	15,0	1,5	$4,6 \cdot 10^{-2}$
216	d60-v7-1	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	7,0	15,0	1,6	$5,7 \cdot 10^{-1}$
217	d60-v8,5-3	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	8,4	15,0	1,4	$3,0 \cdot 10^{-1}$
218	d60-v8,5-1	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	8,5	15,0	1,5	$9,6 \cdot 10^{-1}$
219	d60-v8,5-2	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	1,6	8,6	15,0	1,5	$9,5 \cdot 10^{-1}$
220	12.11p 9.1	58,7	Cône H, d	1,5	0,0	0	9,4	2,0	2,4	$9,6 \cdot 10^{-1}$
221	12.11p 2.1	58,7	Cône H, d	1,5	1,1	1,6	9,6	2,0	0,5	$9,8 \cdot 10^{-1}$
222	16.4p - 10.1	58,7	Cône H, d	1,8	0,0	0	9,8	60,0	0,3	$9,6 \cdot 10^{-1}$
223	12.11p 4.1	58,7	Cône h, D	2,0	1,1	0	9,8	60,0	2,7	$9,6 \cdot 10^{-1}$
224	16.4p - 12.1	58,7	Cône H, d	1,8	1,1	0	9,9	0,5	14,5	$2,2 \cdot 10^{-1}$
225	16.4p - 16.1	58,7	Cône H, d	1,7	1,1	12,5	9,9	0,5	14,5	$9,6 \cdot 10^{-1}$
226	16.4p - 14.1	58,7	Cône H, d	1,8	0,0	12,5	10,0	0,5	0,5	$8,6 \cdot 10^{-1}$
227	d60-v13,5-1	58,7	Cône H, d	1,7	1,1	1,6	13,5	15,0	1,5	$9,7 \cdot 10^{-1}$

avec  $d_{50}$  : Diamètre médian de la poudre d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> utilisée ( $\mu\text{m}$ ),

Forme du tas : Dimensions du cône h, D et H, d de volume 3 cm<sup>3</sup> en

- Hauteur : h = 8,9 mm et H=12,7 mm,

- Diamètre : D = 36 mm et d = 30 mm,

Dimensions de la galette de volume 3 cm<sup>3</sup> en

- Hauteur : 2,7 mm,

- Diamètre : 38 mm,

Dimensions de l'obélisque de volume 3 cm<sup>3</sup> en

- Hauteur : 7,3 mm,

- Arêtes bases : 25 et 15 mm,

$\rho_{\text{tas}}$  : Masse volumique tassée de la poudre (g/cm<sup>3</sup>),

H<sub>2</sub>O : Teneur en H<sub>2</sub>O de la poudre (mgH<sub>2</sub>O/g),

Rug<sub>SE</sub> : Rugosité de la surface d'essai ( $\mu\text{m}$ ),

V	: Vitesse moyenne de l'écoulement (m/s),
$\Delta t$	: Durée d'exposition à l'écoulement (min),
$\alpha$	: Accélération de l'air au démarrage de l'écoulement (m/s <sup>2</sup> ),
$K_R$	: Fraction réentraînée (sans dimension).

La vitesse de frottement de l'air  $v_*$  se calcule à partir de la vitesse moyenne V selon la relation  $v_* = 0,07.V^{0,87}$  (cf. § 2.2.4.3)

Les expériences ont été réalisées à des températures de  $24 \pm 8^\circ\text{C}$  et à des humidités relatives de  $44 \pm 26\%$  HR.

## RESUME

Le réentraînement de particules par écoulement d'air est un sujet complexe qui intervient dans de nombreux domaines liés à des procédés industriels ou bien encore ayant des applications environnementales. L'objectif de notre travail de thèse est l'amélioration de la connaissance sur la phénoménologie de particules issues d'un « tas » de poudre exposé à un écoulement d'air turbulent.

Pour commencer, nous effectuons une étude bibliographique sur le réentraînement de particules par écoulement d'air. Nous y décrivons les forces et paramètres qui interviennent dans le phénomène, ainsi que les études théoriques et expérimentales existantes sur le sujet. De ce bilan des connaissances, nous retenons, pour nos expériences, huit paramètres relatifs au dépôt de poudre, aux particules, à la surface d'essai, à l'écoulement d'air et au milieu ambiant. Afin d'étudier les effets de ces facteurs sur le réentraînement d'un « tas » de poudre constituée de particules de diamètre médian compris entre 5 et 60  $\mu\text{m}$ , nous réalisons une installation originale qui permet de travailler pour des vitesses d'air comprises entre 0,5 et 10 m/s. Une fois notre méthodologie expérimentale évaluée, nous présentons et discutons nos résultats expérimentaux obtenus notamment sur la base de plans d'expériences. Nous proposons un classement relatif des paramètres étudiés vis à vis de la mise en suspension, et validons notre méthodologie sur l'ensemble de nos données. Enfin, nous développons une corrélation semi-empirique qui permet de calculer la fraction réentraînée d'un tas de poudre, en fonction d'un paramètre adimensionnel qui intègre les deux paramètres primaires du réentraînement qui sont la granulométrie de la poudre et la vitesse de frottement de l'air.

Ainsi, notre travail apporte des éléments utiles pour les spécialistes de la sûreté des installations nucléaires, et plus globalement pour tous ceux qui sont confrontés à la problématique du réentraînement par écoulement d'air de particules déposées sur une surface.

## Mots clés

Mise en suspension – Réentraînement - Ecoulement d'air horizontal turbulent – Contamination particulaire - Poudre polydispersée – Dépôt multicouches – Tas - Aérosol - Corrélation semi-empirique - Plan d'expériences - Fraction réentraînée

## ABSTRACT

Resuspension of particulates from a powder deposit to a turbulent airflow is important in many fields like nuclear safety, environmental air pollution, sediment transport by wind or surface contamination in semiconductor operations. The objective of our work is to contribute to the understanding and quantification of the main factors that govern the particle reentrainment from a pile deposit exposed to a turbulent airflow.

Therefore, a review and analysis has been conducted about this subject. We describe forces and parameters, which operate in the reentrainment, and numerous theoretical and experimental studies, which cover different aspects of the phenomena. Then, a program of experiments has been carried out in which the reentrainment of polydisperse powder of different sizes (mean diameter in the range from 5 to 60  $\mu\text{m}$ ) from a powder deposit exposed to an horizontal airflow (air velocity in the range 0,5 to 10 m/s) has been studied. After the evaluation of our experimental methodology, the influence of eight factors on the reentrainment has been investigated using the designs of experiments. These parameters are related to the deposit, the powder particles, the surface, the airflow and the environment. Results from this study are discussed. Then, we propose a relative classification of these parameters about the resuspension. Finally, a semi-empirical formula which describes the reentrained fraction as a function of a dimensionless particle diameter which depends on the two relevant factors of réentraînement (the particle size distribution and the air friction velocity), is proposed.

It is hoped that our work will be of interest to all engineers in charge of safety analysis in the nuclear industry, and more, to all people involved in the particle reentrainment by airflow.

## Keywords

Resuspension – Reentrainment - Horizontal turbulent airflow - Particulate contamination - Polydisperse powder - Multilayer deposit – Pile deposit – Aerosol - Semi-empirical correlation - Design of experiments - Reentrained fraction