UNIVERSITÉ DE LORRAINE

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Institut National de Recherche et de Sécurité
1, rue du Morvan
54500 Vandœuvre-lès-Nancy

Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée
2, avenue de la Forêt de Haye
54500 Vandœuvre-lès-Nancy

Thèse

présentée en vue d'obtenir le titre de

Docteur de l'Université de Lorraine

spécialité

Mécanique et Energétique

Estimation par méthodes inverses des profils d'émission des machines à bois électroportatives

par

Florent CHATA

Soutenue publiquement le 27 novembre 2015 à l'ENSEM devant le jury composé de :

Rapporteurs :

Jérôme IDIER	Directeur de recherche, IRCCyN (Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes), UMR CNRS 6597
Alexis COPPALLE	Professeur, INSA (Institut National des sciences appliquées de Rouen), UMR 6614 CORIA

Examinateurs :

Anne TANIERE	Professeur, Université de Lorraine (Directrice de thèse)
Emmanuel BELUT	Docteur, chargé d'études INRS Vandœuvre-lès-Nancy (Co-directeur)
François-Xavier KELLER	Docteur, chargé d'études INRS Vandœuvre-lès-Nancy (Co-directeur)
Edmund WEISS	Docteur, Manager Standards and Approvals, Festool GmbH
Ali BAHLOUL	Professeur, IRSST (Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail)

Invité :

Denis MAILLET	Professeur, Université de Lorraine

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord l'ensemble des membres du jury qui ont accepté d'évaluer le travail qui a été réalisé au court des trois années de thèses. Je remercie donc Mr.Alexis Coppalle (INSA, Rouen) de m'avoir fait l'honneur de rapporter mon travail et de présider le jury, Mr.Jérôme Idier (IRCCyN, Nantes) d'avoir lui aussi rapporté mon travail, Mr.Ali Bahloul (IRSST, Montréal) membre du jury et d'avoir fait 11500km pour participer à celui-ci, Mr.Edmund Weiss (Festool, Wendlingen) d'être venu d'Allemagne pour examiner le travail de thèse et Mr.Denis Maillet d'avoir accepté de participer au jury en tant qu'invité.

J'exprime aussi ma reconnaissance à Mme.Anne Tanière pour m'avoir donné la chance d'effectuer cette thèse et aussi pour l'avoir supervisée durant ces trois années, Mr.Emmanuel Belut et Mr.François-Xavier Keller pour avoir co-encadrés ce travail. Je remercie ces trois personnes pour leurs implications dans ce travail, pour m'avoir aiguillé durant trois ans ce qui m'a permis de prendre des décisions cohérentes ainsi que d'acquérir des compétences en tout genres. Je les remercie aussi pour leur bonne humeur et leur joie de vivre qui m'ont permis d'effectuer mon travail dans un cadre idyllique et motivant.

Je remercie également toutes les personnes du laboratoire Ingénierie Aéraulique de l'INRS avec qui j'ai partagé d'excellents moments que ça soit dans le travail ou hors de celui-ci. Ma reconnaissance est donc tout naturellement dirigée à Laurence, Francis B, Francis H, Jean-Claude, Roland, Robert, Jean-Raymond, Romain, Sullivan, Gaël.

Je souhaite exprimer toute ma gratitude à Khaoula avec qui j'ai partagé de très bons moments durant ces trois années et qui j'en suis certain m'en fera partager d'autres à l'avenir.

De plus, je remercie toute ma famille d'avoir été présente tout au long de mon travail pour me soutenir et m'avoir accompagné lors de la soutenance finale.

Enfin, voici une liste non-exhaustive de toutes les personnes que j'aimerais remercier pour leurs soutiens techniques ou morale : Jennifer, Patrick, Sandrine, Denis, Marie-Thèrèse, Isabelle, Armelle, François, Eric, Rafik, Boris, Nicolas, Thomas G, Thomas V, Irène... Je m'excuse d'avance pour les différentes personnes que j'aurais pu omettre de citer.

Table des matières

Table des matières **6**

Table des figures **10**

Liste des tableaux **15**

1 Introduction **23**
1.1 Contexte de la thèse 23
1.2 Objectifs 27
1.3 État de l'art des techniques inverses 27
1.3.1 Définition des techniques inverses 27
1.3.2 Littérature existante et applications 28
1.4 Plan du manuscrit 30

2 Physique du transport des aérosols **33**
2.1 Le transport des aérosols : un écoulement multiphasique 33
2.1.1 Généralités 33
2.1.2 Granulométrie des aérosols 33
2.1.3 Mécanismes du transport des aérosols 37
2.1.3.1 Le nombre de Knudsen 37
2.1.3.2 Mouvement Brownien 39
2.1.3.3 Mouvement des particules sous l'effet de la pesanteur 41
2.1.3.4 Thermophorèse, turbophorèse, photophorèse et diffusionphorèse 42
2.1.3.5 Aérosol soumis à un champ électrique 44
2.1.3.6 Coagulation des particules 44
2.1.3.7 Le dépôt de particules 45
2.1.3.8 Autres forces s'appliquant aux particules 49
2.2 Aérosol traité et hypothèses de modélisation 49

2.3 Modélisation du transport et du dépôt des aérosols 50
2.3.1 Phase porteuse (air) 51
2.3.1.1 Modèles existants 51
2.3.1.2 Choix du modèle 52
2.3.2 Phase discrète (particules) 55
2.3.2.1 Modèles existants 55
2.3.2.2 Choix du modèle 55
2.3.3 Résumé des modèles choisis et conditions aux limites du domaine . . . 57

3 Mise en place du banc d'essais 59
3.1 Description générale de la cabine ouverte ventilée 59
3.2 Cas expérimental : système de génération de particules et capteurs d'aérosol . . 61
3.2.1 Système de génération de particules 61
3.2.1.1 Palas RBG-1000 61
3.2.1.2 Machines électroportatives 69
3.2.2 Métrologie des aérosols 70
3.2.2.1 Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM-1405 \ Thermo Scientific) 70
3.2.2.2 Coulter Multisizer 4 72
3.2.2.3 Aerodynamic Particle Sizer (APS-3321 \ TSI) 73
3.2.2.4 Lighthouse (Handheld-3016 \ Worldwide solution) 75
3.2.2.5 DataRam (pDR-1500 \ Thermo Scientific) 76
3.2.2.6 Résumé des différentes métrologies utilisées et de leurs principales caractéristiques 77
3.3 Configurations testées dans l'application de la méthode d'estimation 77

4 Estimation de l'intensité d'une source de particules en régime stationnaire et aide au positionnement des capteurs 81
4.1 Méthode d'estimation et aide au positionnement des capteurs 81
4.1.1 Méthode générale d'estimation 81
4.1.2 Principe de la Décomposition en Valeurs Singulières (SVD) 84
4.1.3 Aide au positionnement des capteurs 84
4.1.4 Résumé de l'application de la méthode 86
4.2 Application de la méthode d'estimation 86
4.2.1 Validation numérique et expérimentale de la méthode d'estimation . . . 86
4.2.1.1 Application numérique de la méthode à la configuration 1 . . 87

4.2.1.2 Application expérimentale de la méthode à la configuration 1 95
4.2.2 Configurations limites d'utilisation de la méthode 100
4.2.2.1 Application de la méthode à la configuration 2 100
4.2.2.2 Application de la méthode à la configuration 3 106
4.2.2.3 Application de la méthode à la configuration 4 110
4.3 Conclusion du chapitre 4 113

5 Estimation de l'intensité d'une source de particules en régime instationnaire 115
5.1 Modèle envisagé 115
5.1.1 Approche convolutive 116
5.1.2 Discrétisation du problème 117
5.1.3 Lien entre régime stationnaire et instationnaire 119
5.1.4 Régularisation de la déconvolution du problème 120
5.1.4.1 Estimation de l'impédance 120
5.1.4.2 Estimation du débit inconnu 124
5.1.4.3 Estimation de la dose globale 125
5.1.5 Résumé : implémentation de la méthode 125
5.2 Application de la méthode d'estimation 126
5.2.1 Validation numérique de la méthode 126
5.2.2 Validation expérimentale de la méthode 134
5.2.3 Conclusion de la validation 140
5.2.4 Étude de l'impact du rapport RSB sur l'estimation 141
5.3 Conclusion du chapitre 5 146

6 Application de la méthode instationnaire aux machines électroportatives 149
6.1 Démarche générale employée 149
6.2 Caractérisation de l'émission des différentes machines durant l'usinage. 153
6.2.1 $1^{ère}$ catégorie de machine : les ponceuses 153
6.2.1.1 Calibration de l'impédance pour les essais sur les ponceuses . 153
6.2.1.2 Estimation des doses émises par les ponceuses 155
6.2.1.3 Analyse des données, critères de discrimination des ponceuses 170
6.2.1.4 Conclusion de l'étude menée sur les ponceuses 172
6.2.2 2^{nd} catégorie de machine : les scies circulaires 172
6.2.2.1 Calibration de l'impédance pour les essais sur les scies circulaires 172
6.2.2.2 Estimation des doses émises par les scies circulaires 174

6.2.2.3 Analyse des données, critères de discrimination des scies circulaires 183
6.2.2.4 Conclusion sur les scies circulaires 184
6.3 Conclusion du chapitre 6 184

7 Conclusion générale et perspectives **187**
7.1 Conclusion générale 187
7.2 Perspectives 190

Bibliographie **193**

8 Annexes **201**
8.1 Annexe 1 : Résumé de la méthode dans le cas stationnaire 202
8.2 Annexe 2 : Résumé de la méthode dans le cas instationnaire (1 source, 1 capteur) 205
8.3 Annexe 3 : Généralisation de la méthode d'estimation du cas instationnaire à « n » sources et « m » capteurs 207

Table des figures

1.1 Fraction déposée dans les différents organes composant l'appareil respiratoire en fonction de la taille des poussières 24
1.2 Représentation de la position des sinus faciaux 24
1.3 Taux d'équipement en aspiration centralisée et taux de raccordement effectif aux machines fixes et portatives 26
1.4 Représentation d'un système réel et d'une modlisation de celui-ci 28
1.5 Schématisation problème direct et problème inverse 28

2.1 Représentation d'un spectre granulométrique différentiel 36
2.2 Coefficient de traînée d'une sphère rigide lisse en fonction du nombre de Reynolds particulaire. D'après Oesterlé [2006] 39
2.3 Illustration d'une trajectoire chaotique de particule soumise uniquement au mouvement Brownien 40
2.4 Schématisation de l'effet de la pesanteur sur une particule 41
2.5 Schématisation du phénomène de photophorèse 43
2.6 Schématisation d'une coagulation par diffusion brownienne 45
2.7 Schématisation des différents phénomènes du dépôt de particules en conduit. D'après Charuau [1982] 46
2.8 Vitesse de dépôt adimensionnée en fonction du temps de relaxation adimensionné . 47
2.9 Classification des écoulements diphasiques en fonction de la fraction volumique des particules. D'après Elghobashi [1994] 50
2.10 Conditions aux limites appliquées aux simulations numériques 58

3.1 Schéma du banc expérimental 60
3.2 Photographies de la cabine expérimentale 60
3.3 Vitesse d'entrée de la cabine suivant X avec et sans toile diffusante 61
3.4 Photographie du générateur Palas RBG 1000 utilisé 62
3.5 Système de génération des particules 62

3.6 Analyse de la granulométrie en nombre de la poudre d'Alumine au Coulter 65
3.7 Analyse de la granulométrie en volume de la poudre d'Alumine au Coulter 65
3.8 Banc d'essai pour la mesure de la granulométrie des poussières de bois 66
3.9 Granulométrie en nombre mesurée par l'APS pour les poussières de bois 67
3.10 Granulométrie en volume mesurée par l'APS pour les poussières de bois 67
3.11 Photographie MEB d'une particule de bois 69
3.12 Photographie d'une ponceuse utilisée 69
3.13 Photographie d'une scie circulaire utilisée 70
3.14 Photographie du TEOM 70
3.15 Schéma du principe de fonctionnement du TEOM 71
3.16 Photographie du Coulter Multisizer 72
3.17 Schéma du principe de fonctionnement du Coulter Multisizer 72
3.18 Photographie de l'APS 73
3.19 Signal généré par les deux faisceaux laser lors du passage d'une particule 73
3.20 Evénement de mesure de l'APS 74
3.21 Photographie de la mesure isocinétique avec l'APS 75
3.22 Photographie d'un lighthouse 75
3.23 DataRam pDR-1500 76
3.24 Présentation de la configuration 1 78
3.25 Présentation de la configuration 2 78
3.26 Présentation de la configuration 3 79
3.27 Présentation de la configuration 4 79
3.28 Présentation de la configuration 5 80

4.1 Localisation des plans d'observations 87
4.2 Concentration en particules calculée par CFD dans la cabine 88
4.3 Disposition des points de mesure virtuels 88
4.4 Concentration calculée par la CFD pour un débit d'injection de $1\,g.s^{-1}$ 89
4.5 Coefficient de transfert pour la configuration 1 90
4.6 Critère de comparaison dans le cas de la configuration 1 92
4.7 Schéma de la position des capteurs et de la source (vue du dessus) 95
4.8 Photos de l'installation des différents éléments pour la configuration 1 95
4.9 Mesure de la concentration de référence par l'APS pour la configuration 1 96
4.10 Concentration mesurée par l'APS en fonction des deux débits à estimer 98
4.11 Coefficient de transfert des 4 sources pour la configuration 2 101
4.12 Critère de comparaison dans le cas de la configuration 2 102

4.13 Concentration calculée par CFD pour les débits à estimer dans la configuration 2 . 103
4.14 Coefficients de transfert des 4 sources distantes 106
4.15 Critère de comparaison pour chaque ensemble de capteurs considérés dans le cas de la configuration 3 107
4.16 Concentration calculée par CFD pour les débits à estimer dans la configuration 3 . 108

5.1 Représentation de la fonction de Heaviside 117
5.2 Discrétisation d'un signal temporel par des rectangles moyens 118
5.3 Débits programmés dans les simulations numériques pour les phases de calibration et d'estimation 127
5.4 Débit de la source pour la calibration et signal de concentration en sortie correspondant (validation CFD de la méthode) 128
5.5 Valeurs singulières de la matrice de Toeplitz ($\mathbf{M}(S_{cal})$) (validation CFD de la méthode) 128
5.6 Détermination de la troncature α_1 à partir de l'erreur$_{rms}$ et de l'écart type sur la concentration (validation CFD de la méthode) 129
5.7 Impédance idéale estimée (validation CFD de la méthode) 130
5.8 Superposition des courbes d'impédance idéale et de concentration en sortie (validation CFD de la méthode) 131
5.9 Concentration en sortie calculée par CFD dans le cas à estimer (validation CFD de la méthode) 132
5.10 Valeurs singulières de la matrice de Toeplitz ($\mathbf{M}(Z_{\alpha_1}^{estim})$) (validation CFD de la méthode) 132
5.11 Détermination de la troncature α_2 à appliquer lors de la TSVD (validation CFD de la méthode) 133
5.12 Comparaison entre le débit programmé et estimé dans le cas de la CFD pour une configuration idéale non-bruitée (validation CFD de la méthode) 134
5.13 Photographie de l'installation des ventilateurs qui perturbent l'injection des différentes sources 135
5.14 Débit émis par le Palas RBG-1000 et concentration mesurée par l'APS pour la phase de calibration de l'impédance (validation expérimentale de la méthode) 136
5.15 Détermination de la troncature α_1 à appliquer lors de la TSVD (validation expérimentale de la méthode) 137
5.16 Impédance expérimentale obtenue à partir des signaux moyennés sur 20 essais et de la troncature $\alpha_1 = 35$ (validation expérimentale de la méthode) 137

5.17 Débit réellement injecté et concentration correspondante mesurée lors de la 2^{nd} étape de la méthode appliquée au cas expérimental (validation expérimentale de la méthode) . . . 138
5.18 Détermination de la troncature α_2 à appliquer lors de la TSVD (validation expérimentale de la méthode) . . . 139
5.19 Estimation du débit injecté par le Palas RBG-1000 (validation expérimentale de la méthode) . . . 140
5.20 Concentrations de référence calculées dans la CFD pour les différents niveaux de bruit (impact du rapport RSB sur l'estimation) . . . 141
5.21 Détermination de la troncature α_1 pour les différents niveaux de bruitage (impact du rapport RSB sur l'estimation) . . . 142
5.22 Impédances estimées pour les différents niveaux de bruitage (impact du rapport RSB sur l'estimation) . . . 142
5.23 Concentration pour l'étape d'estimation calculée dans la CFD pour les différents niveaux de bruit (impact du rapport RSB sur l'estimation) . . . 143
5.24 Détermination de la troncature α_2 pour les différents niveaux de bruitage (impact du rapport RSB sur l'estimation) . . . 144
5.25 Estimation de la source pour les différents niveaux de bruit (impact du rapport RSB sur l'estimation) . . . 145

6.1 Schéma de l'installation utilisée pour déterminer la masse aspirée . . . 150
6.2 Débit d'injection et concentration résultante pour la phase de calibration lors de l'étude des ponceuses . . . 153
6.3 Détermination de la troncature α_1 lors de la phase de calibration dans l'étude des ponceuses . . . 154
6.4 Détermination de l'impédance pour la phase de calibration dans l'étude des ponceuses 154
6.5 Concentration mesurée durant un cycle d'usinage réalisé par la ponceuse P_1 . . . 155
6.6 Troncature obtenue à partir du principe de Morozov pour l'application à la TSVD lors de la phase d'estimation . . . 156
6.7 Allure temporelle de l'émission lors de l'essai 1 de la ponceuse P_1 à partir de la troncature $\alpha_2^{\sigma^{calibration}}$ . . . 157
6.8 Allure temporelle de l'émission lors de l'essai 1 de la ponceuse P_1 à partir de la troncature Post-pic $\alpha_2^{Post-pic}$ . . . 157
6.9 Résultats complets des estimations sur la ponceuse P_1 pour les 4 derniers essais . . 158
6.10 Dose émise estimée en fonction de l'ordre de troncature pour l'essai 1 de la ponceuse P_1 . . . 159

6.11 Concentration mesurée et débit estimé dans le cas de l'essai 1 la ponceuse P_2 . . . 161
6.12 Concentration mesurée et débit estimé dans le cas de l'essai 1 la ponceuse P_3 . . . 162
6.13 Concentration mesurée et débit estimé dans le cas de l'essai 1 la ponceuse P_4 . . . 164
6.14 Concentration mesurée et débit estimé dans le cas de l'essai 1 la ponceuse P_5 . . . 165
6.15 Concentration mesurée et débit estimé dans le cas de l'essai 1 la ponceuse P_6 . . . 167
6.16 Masse moyenne émise par les ponceuses durant un cycle d'usinage 168
6.17 Masse moyenne aspirée par les ponceuses durant un cycle d'usinage 169
6.18 Critères de discrimination calculés pour chaque ponceuse étudiée 171
6.19 Débit d'injection et concentration résultante dans le cas de référence des scies circulaires 173
6.20 Détermination de la troncature α_1 lors de la phase de calibration dans l'étude des scies circulaires 173
6.21 Détermination de l'impédance pour la phase de calibration dans l'étude des scies circulaires 174
6.22 Concentration mesurée lors d'une opération de sciage de la scie Sc_1 175
6.23 Débit de poussières émis par la scie circulaire Sc_1 lors d'un usinage 176
6.24 Masse émise lors de l'usinage effectué par la scie Sc_1 en fonction de la troncature de l'impédance 176
6.25 Concentration mesurée et débit estimé dans le cas de l'essai 1 de la scie Sc_2 178
6.26 Concentration mesurée et débit estimé dans le cas de l'essai 1 de la scie Sc_3 180
6.27 Concentration mesurée et débit estimé dans le cas de l'essai 1 de la scie Sc_4 181
6.28 Critères de discrimination calculés pour chaque scie étudiée 183

Liste des tableaux

1.1 Liste non exhaustive de la littérature traitant des problèmes inverses en thermique . 29
1.2 Liste non exhaustive de la littérature traitant des problèmes inverses sur l'identification de sources intérieures 30

2.1 Description de différents diamètres de cercle équivalent ou diamètres statistiques . 34
2.2 Description de différents diamètres de sphère équivalente 35
2.3 Facteurs de forme dynamiques en fonction de différents types de particules atmosphériques d'après Renoux and Boulaud [1998] et Hervé-Bazin [2007] 35
2.4 Caractérisation-du-type de milieu de la phase gazeuse 38
2.5 Coefficient de diffusion Brownienne et déplacement quadratique moyen $\bar{x}$ en 3 dimensions pour différentes tailles de particules à $20\,°C$ et $101.3\,kPa$ 41
2.6 Ordre de grandeur de la vitesse terminale de chute pour différents diamètres de particules sous $20\,°C$ et $101.3\,kPa$ 42
2.7 Liste non exhaustive des valeurs des différents coefficients k_1 et ζ en fonction des auteurs pour le calcul de vitesse de dépôt adimensionnée 48
2.8 Valeurs du coefficient k_2 en fonction des auteurs pour le calcul de vitesse de dépôt adimensionnée 48
2.9 Valeurs du coefficient k_3 en fonction des auteurs pour le calcul de vitesse de dépôt adimensionnée 49
2.10 Constantes du modèle $k-\varepsilon\,Standard$ défini par Jones and Launder [1972] 54

3.1 Exemple de débit injecté par le Palas RBG-1000 pour une poudre de masse volumique apparente $1 g.cm^{-3}$ 63
3.2 Principales caractéristiques fournisseur de la poudre d'alumine utilisée 64
3.3 Diamètres moyens arithmétiques des différentes poussières de bois 68
3.4 Principales caractéristiques des capteurs utilisés 77

4.1 Résultats de l'estimation pour deux débits programmés 91
4.2 Coordonnées des capteurs optimaux dans le cas de la configuration 1 92

4.3 Coordonnées des capteurs sélectionnés dans le cas de la configuration 1 93
4.4 Résultats de l'estimation des deux débits pour les 5 capteurs optimaux et les 5 capteurs sélectionnés 93
4.5 Mesure de la concentration moyenne et de l'écart-type de référence pour la configuration 1 97
4.6 Mesures des concentrations moyennes et des écart-types pour les débits A et B de la configuration 1 98
4.7 Calcul des différents rapports des concentrations et débits pour la configuration 1 . 99
4.8 Résultats de l'estimation des débits A et B de la configuration 1 99
4.9 Position des capteurs optimaux pour la configuration 2 102
4.10 Débit à estimer dans le cas d'une injection suivant 4 sources de la configuration 2 . 103
4.11 Résultats de l'estimation des 4 sources pour la configuration 2 104
4.12 Position des capteurs optimaux pour la configuration 3 107
4.13 Résultats des estimations des sources dans la configuration 3 109
4.14 Mesures des concentrations pour les débits C et D dans la configuration 4 110
4.15 Calcul des différents rapports pour les débit C et D pour la configuration 4 111
4.16 Résultats de l'estimation des débits C et D à partir des 5 capteurs pour la configuration 4 111
4.17 Résultats de l'estimation des débits C et D pour la configuration 4 à partir de l'APS uniquement 112

5.1 Doses lors de l'étude de la conservation de la masse pour chaque simulation 126
5.2 Doses programmée et estimée lors de la validation CFD de la méthode 134
5.3 Dose réelle et estimée lors de la validation expérimentale de la méthode 139
5.4 Doses de l'impédance estimée pour les différents niveaux de bruit (impact du rapport RSB sur l'estimation) 143
5.5 Dose de particules émises estimée pour les différents niveaux de bruit (impact du rapport RSB sur l'estimation) 145

6.1 Doses émises par la ponceuse P_1 pour chaque essai en fonction de la troncature considérée 159
6.2 Bilan massique dans le cas des essais sur la ponceuse 1 160
6.3 Doses émises par la ponceuse P_2 161
6.4 Bilan massique dans le cas des essais sur la ponceuse 2 162
6.5 Doses émises par la ponceuse P_3 163
6.6 Bilan massique dans le cas des essais sur la ponceuse 3 163
6.7 Doses émises par la ponceuse P_4 164

6.8 Bilan massique dans le cas des essais sur la ponceuse 4 165
6.9 Doses émises par la ponceuse P_5 166
6.10 Bilan massique dans le cas des essais sur la ponceuse 5 166
6.11 Doses émises par la ponceuse P_6 167
6.12 Bilan massique dans le cas des essais sur la ponceuse 6 167
6.13 Essais supplémentaires pour analyser le bilan massique selon le type d'aspiration . 170
6.14 Résultat de la discrimination des ponceuses 171
6.15 Doses émises par la scie Sc_1 177
6.16 Bilan massique dans le cas des essais sur la scie Sc_1 178
6.17 Doses émises par la scie Sc_2 179
6.18 Bouclage du bilan massique dans le cas des essais sur la scie Sc_2 179
6.19 Doses émises par la scie Sc_3 180
6.20 Bouclage du bilan massique dans le cas des essais sur la scie Sc_3 181
6.21 Doses émises par la scie Sc_4 182
6.22 Bouclage du bilan massique dans le cas des essais sur la scie Sc_4 182
6.23 Résultat de la discrimination des scies 184

Glossaire

SYMBOLES GRECS	DESCRIPTION	UNITÉ
α_1	Ordre de troncature de la TSVD lors de la phase de calibration	-
α_2	Ordre de troncature de la TSVD lors de la phase d'estimation	-
$\alpha_2^{Post-pic}$	Ordre de troncature de la TSVD lors de la phase d'estimation	-
δ	Delta de Kronecker	-
ε	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente	$m^2.s^{-3}$
ε_{estim}	Écart entre le débit estimé et programmé/réel	$\%$
η_f	Viscosité dynamique du fluide	$Pa.s$
Γ^θ	Critère de comparaison normalisé de l'ensemble « θ » de capteurs considérés	-
λ_f	Libre parcours moyen des molécules gaz	m
λ_g	Conductivité thermique du gaz	$W.m^{-1}.K^{-1}$
λ_p	Conductivité thermique de la particule	$W.m^{-1}.K^{-1}$
Λ_{ij}	Coefficient de transfert entre la mesure de concentration au point « i » et le débit source au point « j ».	$s.m^{-3}$
ν_f	Viscosité cinématique du fluide	$m^2.s^{-1}$
ρ_f	Masse volumique du fluide	$kg.m^{-3}$
ρ_p	Masse volumique de la particule	$kg.m^{-3}$
$\sigma^{calibration}$	Écart-type sur la concentration lors de la phase de calibration	$mg.m^{-3}$
$\sigma^{estimation}$	Écart-type sur la concentration lors de la phase d'estimation	$mg.m^{-3}$
$\sigma_{S^{inconnu}}^{estimé}$	Écart-type sur le débit estimé	$mg.s^{-1}$
τ_k	Échelle de temps de Kolmogorov	s
τ_p	Temps de relaxation d'une particule	s
τ_p^+	Temps de relaxation adimensionné d'une particule	-

SYMBOLES LATINS	DESCRIPTION	UNITÉ
C_c	Coefficient de Cunningham	-
C_{cal}	Concentration en particules utilisée dans la phase de calibration de la méthode	$mg.m^{-3}$
$C_{cal}(t)$	Vecteur concentration en particules utilisée dans la phase de calibration de la méthode	$mg.m^{-3}$
C_D	Coefficient de traînée	-
C_i	Concentration en particules au point « i »	$mg.m^{-3}$
$C_{mesurée}$	Concentration en particules utilisée dans la phase d'estimation de la méthode	$mg.m^{-3}$
$C_{mesurée}(t)$	Vecteur concentration en particules utilisée dans la phase d'estimation de la méthode	$mg.m^{-3}$
C_1, C_2 et C_3	Critère de performance des machines électroportatives	-
d_a	Diamètre aérodynamique	m
d_{av}	Diamètre en surface spécifique équivalente	m
d_c	Diamètre de périmètre équivalent	m
d_F	Diamètre de Feret	m
d_M	Diamètre de Martin	m
$\bar{d}_p$	Diamètre arithmétique moyen	m
$d_{reservoir}$	Diamètre réservoir du système de génération	m
d_s	Diamètre en surface de sphère équivalente	m
d_{sk}	Diamètre de Stokes	m
d_{sp}	Diamètre de surface projetée équivalente	m
d_v	Diamètre en volume équivalent	m
dim	Dimension de l'espace	-
D_B	Coefficient de diffusion Brownienne	$m^2.s^{-1}$
$D^{\int}_{S^{inconnu^{estim}}}$	Dose du débit de particules estimée	mg
D^t	Coefficient de diffusion turbulente	$m^2.s^{-1}$
E	Champs électrique	$V.cm^{-1}$
F_p	Force de pesanteur	N
F_r	Force radimétrique	N
F_t	Force de traînée	N
g	Accélération de la pesanteur	$m.s^{-2}$
k	Énergie cinétique turbulente	$m^2.s^{-2}$

SYMBOLES LATINS	DESCRIPTION	UNITÉ
K_B	Constante de Boltzmann	$J.K^{-1}$
Kn	Nombre de Knudsen	-
K_0	Constante d'étalonnage du capteur (TEOM)	$g.s^{-2}$
M	Nombre de points de mesures	-
$\mathbf{M}(...)$	Matrice de Toeplitz du vecteur colonne « ... »	-
$M_{aspirée}$	Masse collectée par le système de captage à la source intégré aux machines	g
$M_{cassette}$	Masse échantillonnée sur la cassette de prélèvement	g
$M_{déposée}$	Masse de bois déposée sur le sol de la cabine	g
$M_{émise}$	Masse émise dans l'atmosphère (dose estimée)lors d'une opération d'usinage	g
$M_{usinée}$	Quantité globale de bois retirée par le procédé d'usinage	g
N	Nombre de sources à estimer	-
P	Pression	kPa
q	Charge électrique de la particule	C
$Q_{aspiration}$	Débit volumique de l'échantillonnage	$m^{-3}.s^{-1}$
Re_p	Nombre de Reynolds particulaire	-
$RSB_{L2}(C)$	Rapport signal sur bruit pour la concentration	-
r_p	Rayon d'une particule	m
Sc_B	Nombre de Schmidt Brownien	-
$S_{injectée}^{Palas}$	Débit massique de particules émis par le système de génération	$mg.s^{-1}$
S_{cal}	Débit massique de la source de particules utilisé dans la phase de calibration de la méthode	$mg.s^{-1}$
$S_{cal}(t)$	Vecteur débit massique de la source de particules utilisé dans la phase de calibration de la méthode	$mg.s^{-1}$
S_j	Débit massique de la source de particules au point « j »	$mg.s^{-1}$
$S^{inconnu}$	Débit massique de la source de particules **à estimer** dans la phase d'estimation de la méthode	$mg.s^{-1}$
$S^{inconnu^{estimé}}$	Débit massique de la source de particules **estimé** dans la phase d'estimation de la méthode	$mg.s^{-1}$
$S^{inconnu^{estimé}}(t)$	Vecteur débit massique de la source de particules **estimé** dans la phase d'estimation de la méthode	$mg.s^{-1}$

SYMBOLES	DESCRIPTION	UNITÉ
S^{prog}	Débit massique de la source de particules **programmé** (CFD) dans la phase d'estimation de la méthode	$mg.s^{-1}$
$S^{réel}$	Débit massique de la source de particules **réel** (expérimental) dans la phase d'estimation de la méthode	$mg.s^{-1}$
t	Temps	s
T	Température	K
U_m	Vitesse moyenne du fluide	$m.s^{-1}$
U_τ	Vitesse de frottement fluide/paroi	$m.s^{-1}$
V_d	Vitesse de dépôt	$m.s^{-1}$
V_{derive}	Vitesse de dérive d'une particule	$m.s^{-1}$
V_{piston}	Vitesse de montée du piston du système de génération	$mm.h^{-1}$
V_r	Vitesse relative d'une particule par rapport au fluide	$m.s^{-1}$
V_t	Vitesse terminale de chute d'une particule	$m.s^{-1}$
V_{th}	Vitesse thermophorétique	$m.s^{-1}$
$V_{prélèvement}$	Volume de prélèvement	m^{-3}
z	Mobilité électrique	$cm^2.V^{-1}.s^{-1}$
$Z^{estim}(t)$	Vecteur impédance entre la concentration et le débit source estimée	$s.m^{-3}$

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte de la thèse

Les travaux réalisés durant ces trois années de doctorat font partie d'une étude plus vaste au sein de l'INRS qui concerne les poussières de bois ainsi que les machines électroportatives (ponceuses, scies circulaires, ...). En France, entre 310 000 et 370 000 travailleurs sont exposés aux poussières de bois (Kauppinen et al. [2006] et enquête SUMER (Arnaudo et al. [2003])). Ces personnes ne travaillent pas toutes dans la filière bois puisque la moitié des personnes exposées appartiennent au secteur du BTP (Bâtiment et Travaux Public (secteur de la construction)). Par conséquent, le nombre de personnes potentiellement concernées par une étude sur l'exposition à ces poussières est très élevé. Les raisons d'effectuer une telle étude sur les poussières de bois ainsi que les outils électroportatifs peuvent se résumer en trois points présentés ci-après :

1. *Pourquoi les poussières de bois ?*

   Elles représentent une réelle préoccupation aujourd'hui dans le domaine sanitaire. En effet, ces poussières sont susceptibles de provoquer des pathologies respiratoires et cutanées. Ces pathologies sont reconnues par le ministère du travail et sont référencées dans le tableau n°47 des maladies professionnelles du régime général de la sécurité sociale (ou tableau n°36 du régime agricole de la sécurité sociale).
   En ce qui concerne les maladies de type respiratoire, celles-ci dépendent de la pénétration des poussières dans le système pulmonaire. La figure 1.1 représente la fraction déposée de poussières dans les différents organes composant l'appareil respiratoire en fonction de la taille de celles-ci. Il est possible de discerner différents types de pathologies.

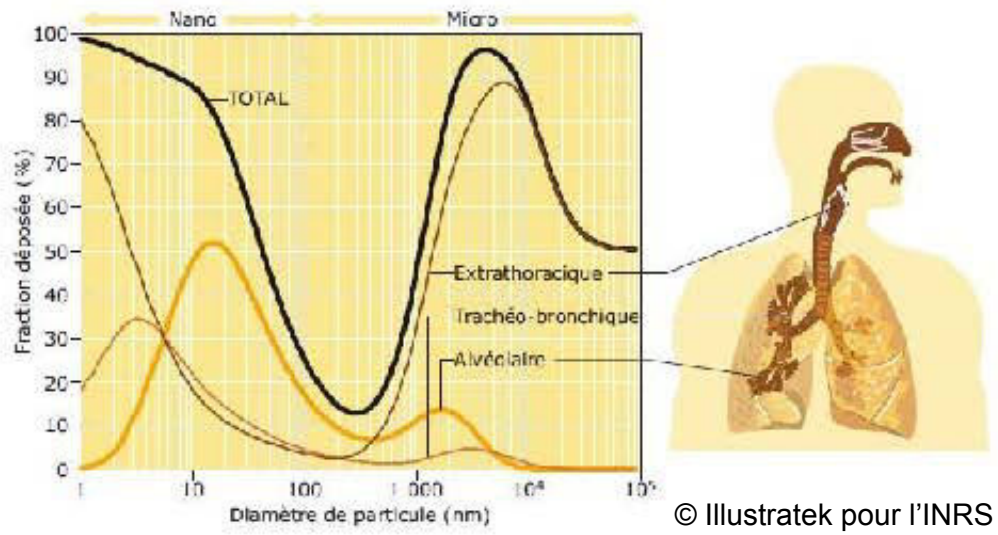


FIGURE 1.1 – Fraction déposée dans les différents organes composant l'appareil respiratoire en fonction de la taille des poussières

a) Au niveau des voies respiratoires supérieures : lorsqu'il y a une exposition répétée à des poussières qui se déposent au niveau des sinus faciaux (figure 1.2), il est possible qu'un cancer naso-sinusiens (cancer de l'ethmoïde) fasse son apparition. Les poussières de bois (quel que que soit le type de bois) sont classées par le CIRC (Centre international de recherche sur le cancer) comme cancérogène du groupe I (cancérogène avéré pour l'homme).

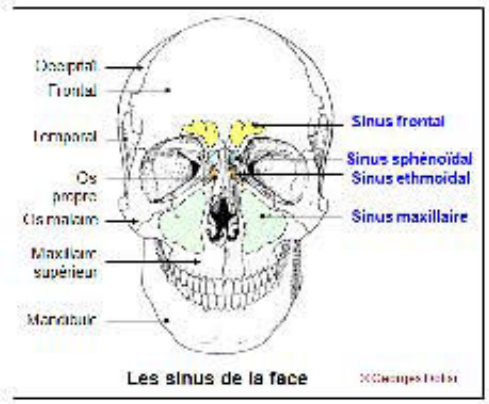


FIGURE 1.2 – Représentation de la position des sinus faciaux

b) Au niveau pulmonaire : lorsque ces poussières sont plus fines, elles peuvent atteindre les poumons en profondeur et y provoquer des lésions définitives graves comme la fibrose pulmonaire.

c) Autres pathologies : elles peuvent aussi bien être au niveau de la peau ou des muqueuses et entraîner des phénomènes de sensibilisations d'origine allergique (eczéma, rhinite ou encore de l'asthme) chez certaines personnes.

De nombreuses études ont mis en évidence l'impact des poussières de bois sur la santé. Par exemple, il est possible de citer celles de Hayes et al. [1986], Enarson and Chan-Yeung [1990], Shamssain [1992], Nylander and Dement [1993], Barcenas et al. [2005] ou encore Straif et al. [2009].

2. *Pourquoi les machines électroportatives ?*

Il a été montré dans plusieurs études que les performances des systèmes de captages peuvent être très variables. Thorpe and Brown [1994] ont montré que l'efficacité des systèmes de captage de différentes ponceuses (ponceuses orbitales, rotatives ou à rubans) dépend de plusieurs paramètres (temps d'usinage, grain de papier ainsi que du type de bois). Ils ont mis en évidence que l'efficacité de captage est dans l'ensemble correcte pour les ponceuses avec une réduction de la concentration en poussières dans le local de quasiment 97%. Toutefois, quelques cas, où le temps de ponçage était élevé, montrent des résultats dégradés (pouvant atteindre un réduction de la concentration en poussières de seulement 55%). Une étude plus récente Fontaine et al. [2010] avait pour objectif d'évaluer les performances des systèmes de captage de trois types de machines à bois portatives (ponceuses, scies circulaires et défonceuses). Les résultats de cette étude valident ceux explicités précédemment. En effet, sur les quatre ponceuses testées, trois d'entre elles présentent des performances satisfaisantes. En revanche, les scies circulaires et les défonceuses sont loin d'être aussi performantes puisque seulement une scie sur huit possède de bonnes capacités de captage et trois défonceuses sur quatre génèrent des niveaux d'empoussièrement trop importants.

3. *État des lieux dans les entreprises et règlementation*

En France, un état des lieux a été effectué en 2008 lors d'une campagne de contrôle sur 3105 entreprises. Les résultats de cette campagne sont disponibles (CALVEZ [2009]) et montrent qu'il y a des lacunes très préoccupantes. En effet, sur toutes les entreprises recensées, moins de 33% d'entre elles, concernées par l'exposition des salariés aux poussières de bois, évaluent cette exposition dans leur document unique (transposition, par écrit, de l'évaluation des risques, imposée à tout employeur par le Code du travail). De

plus, les contrôles d'empoussièrement règlementaires ainsi que la vérification des équipements d'aspiration reste très faiblement appliqués par les entreprises. Egalement, même si la plupart des outils d'usinages fixes sont équipés d'un système de captage des poussières à la source, celui-ci est connecté à un dispositif d'aspiration dans 60% des cas seulement. Finalement, en ce qui concerne les machines électroportatives, moins de 20% de celles-ci possèdent un système de captage et d'aspiration des poussières (figure 1.3). Lors des

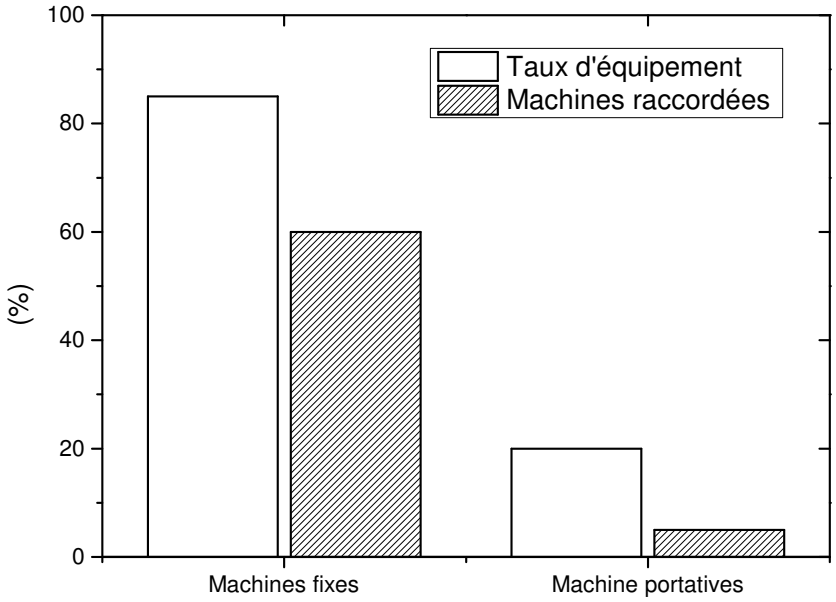


FIGURE 1.3 – Taux d'équipement en aspiration centralisée et taux de raccordement effectif aux machines fixes et portatives

analyses d'exposition qui ont été effectuées, il s'avère que dans plus de 60% des cas, la VLEP (Valeur Limite d'Exposition Professionnelle) est dépassée. D'un point de vue règlementaire, le VLEP contraignante sur 8h de travail est de $1mg.m^{-3}$ (article R. 4412-149 du Code du travail). Le contrôle de cette VLEP doit être effectué par un organisme accrédité au moins 1 fois par an. Lorsqu'un dépassement de la VLEP est observé, il faut que l'entreprise mette en œuvre des mesures de préventions adaptées.

Lorsque l'on regarde les études effectuées à l'étranger, nous pouvons voir que les constats sont sensiblement identiques. En effet, d'après les publications faites dans le domaine (Scheeper et al. [1995], Martin and Zalk [1998], Harper and Muller [2002], Spee et al. [2007]), nous remarquons que les mesures de concentration en poussières (pour différents procédés d'usinage) dépassent très souvent les $1mg.m^{-3}$ de la règlementation française,

pour atteindre dans le cas de l'étude de Chung et al. [2000] des valeurs de l'ordre de $100 mg.m^{-3}$ pour le sciage et le ponçage de bois aggloméré de type MDF (Medium Density Fiber).

Par conséquent, l'accumulation des trois différents points soulevés (dangerosité avérée des poussières de bois, la performance médiocre de captage des systèmes d'aspiration à la source et la règlementation qui évolue sans cesse en diminuant la valeur d'exposition professionnelle) nous montre la nécessité d'accomplir une étude afin que la situation évolue et s'améliore. Pour ce faire, plusieurs objectifs ont été définis dans le cadre de cette thèse.

1.2 Objectifs

Il existe aujourd'hui une règlementation imposant aux entreprises de ne pas exposer leurs travailleurs à une concentration en poussières dépassant un certaine limite. Toutefois, les employeurs ne possèdent aucune indication/recommandation pour initialement investir dans des machines portatives performantes. C'est pourquoi, dans cette thèse, nous souhaitons développer une méthode permettant de caractériser les émissions en poussières de bois (débit, granulométrie) de ces dites machines. La piste qui a été étudiée durant cette thèse est une caractérisation à partir de techniques inverses présentées dans la section suivant cette introduction. A plus long terme, il serait intéressant de déboucher sur un test normalisé permettant d'étiqueter les machines portatives en fonction de leur caractère émissif. Ceci permettrait, de guider le choix des industriels vers les machines les plus performantes et sûres pour leurs employés.

1.3 État de l'art des techniques inverses

L'estimation directe des quantités de poussières émises par une machine est généralement impossible, du fait de la mobilité de l'outil, du caractère agressif des jets d'usinage, et d'une manière générale en raison du risque mécanique qu'aurait à subir tout capteur permettant de réaliser une telle mesure. Dans ce contexte, une mesure indirecte reposant sur des capteurs situés loin de la source de poussières est préférable. Une telle approche repose nécessairement sur une technique dite « inverse ».

1.3.1 Définition des techniques inverses

Il est important dans un premier temps de définir le terme de « modèle ». En effet, les problèmes inverses se basent sur l'inversion de ce modèle. La figure 1.4 représente schéma-

tiquement un système physique (système réel) et son modèle. Un modèle permet de « simu-

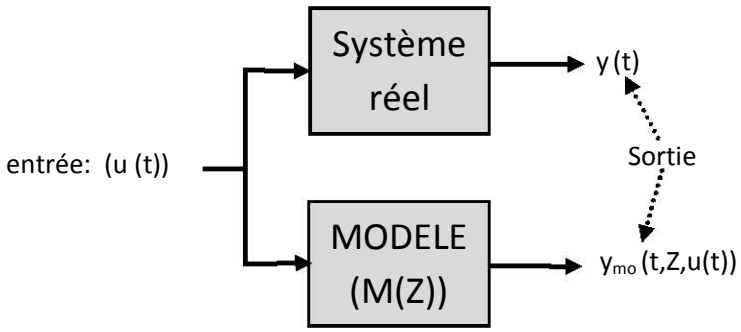


FIGURE 1.4 – Représentation d'un système réel et d'une modlisation de celui-ci

ler » le comportement physique entre l'entrée d'un système ($u(t)$) et sa sortie ($y(t)$). Dans un cas idéal, le système physique ainsi que son modèle doivent répondre de manière identique ($y(t) = y_{mo}(t,Z,u(t))$) où $y_{mo}(t,Z,u(t))$ correspond à la sortie du modèle de paramètre Z et stimulé par une excitation $u(t)$. Il existe deux type de problèmes, la figure 1.5 issue de Maillet et al. [2011] schématise la différence entre un problème dit direct et un problème inverse. En clair,

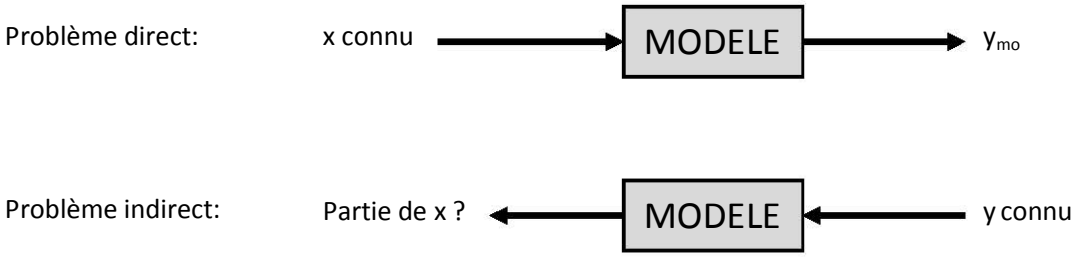


FIGURE 1.5 – Schématisation problème direct et problème inverse

le problème direct est un problème où l'on cherche la sortie du système ($y(t)$) en connaissant l'entrée de celui-ci ($u(t)$). A contrario, un problème inverse cherche à remonter à la cause ($u(t)$) en partant de la conséquence ($y(t)$). Il existe une classification importante entre les problèmes linéaire et non linéaire. De cette classification dépendra la résolution finale du problème. Prenons l'exemple d'un cas ayant deux entrées (u_1 et u_2) et deux réels quelconques (R_1 et R_2), un problème est dit linéaire si et seulement si :

$$y_{mo}(t,Z,[R_1u_1 + R_2u_2]) = R_1 \times y_{mo}(t,Z,u_1) + R_2 \times y_{mo}(t,Z,u_2)$$

Si ces conditions ne sont pas respectées alors, le problème sera non linéaire.

1.3.2 Littérature existante et applications

Il existe, schématiquement, deux familles de recherche dans les problèmes inverses. La première concerne celle qui s'applique à la physique mathématique et la seconde s'applique plutôt

au domaine du traitement statistique des données. Durant cette thèse, nous nous plaçons plutôt dans la première famille.

La littérature présente de nombreux cas d'utilisation de méthodes inverses avec des techniques de résolution ainsi que des domaines d'applications différents. Le premier domaine que nous pouvons citer est celui de la thermique. En effet, une des premières études complète dans ce domaine concerne l'estimation d'un flux de convection libre stationnaire en deux dimensions entre deux plaques parallèles (Moutsoglou [1989]). Beck et al. [1985] ont par ailleurs estimé la température et la distribution spatiale de la densité de flux de chaleur sur un mur à partir de mesures réalisées sur une paroi opposée. Plusieurs problèmes inverses non linéaires sur des cas de convection naturelle ont également été étudiés (Jarny et al. [1991], Alifanov [2012]). La table 1.1 regroupe une liste non exhaustive des publications effectuées dans le cas de problèmes thermiques (sans entrer dans les détails concernant les méthodes utilisées pour la résolution du problème inverse).

DOMAINE D'APPLICATION	IDENTIFICATION	RÉFÉRENCE
Convection naturelle	Densité (spatiale) de flux de chaleur en paroi	Prud'Homme and Hung Nguyen [1997], Park and Chung [1999a,b], Huang and Chen [2000]
Écoulement entre deux plaques avec transfert de chaleur stationnaire ou non	Densité (spatiale) de flux de chaleur en paroi	Huang and Özisik [1992]
	Profil de température instationnaire en paroi	Bokar and Özisik [1995]
	Profil de température stationnaire en paroi	Liu and Ozisik [1996]
	Densité (spatiale et temporelle) de flux en paroi	Machado and Orlande [1997]
	Densité (temporelle) de flux en paroi pour un écoulement avec des fluides non newtonien	Machado and Orlande [1998]

TABLE 1.1 – Liste non exhaustive de la littérature traitant des problèmes inverses en thermique

Les problèmes thermiques font partie d'un des domaines d'application des méthodes inverses. Notre étude se consacre à la caractérisation de sources de pollution non-thermique. Lorsque les emplacements des sources et les taux d'émission des polluants sont connus, il possible de modéliser correctement la dispersion de ceux-ci dans un milieu. Cependant, dans la pratique, les informations concernant les sources sont incomplètes ou encore inconnues et elles doivent être identifiées à partir de mesure de concentration. Ce type d'identification a été traité dans de

PRINCIPE	MÉTHODE D'IDENTIFICATION	RÉFÉRENCE
Inversion des modèles de dispersion de polluants	Quasi-réversibilité	Zhang and Chen [2007b], Liu et al. [2012, 2013]
	Pseudo-réversibilité	Zhang and Chen [2007a]
	Régularisation de Thikonov	Zhang et al. [2013]
	Problème inverse basé sur des probabilités	Liu and Zhai [2009], Zhai et al. [2012]

TABLE 1.2 – Liste non exhaustive de la littérature traitant des problèmes inverses sur l'identification de sources intérieures

nombreux cas de contamination des eaux souterraines (Hwang and Koerner [1983], Atmadja and Bagtzoglou [2001]), de pollution des sols (Zhang et al. [2008], Franco-Uría et al. [2009]) et de transport des polluants dans l'atmosphère (Bady et al. [2009], Zheng and Chen [2010], Annunzio et al. [2012]). En raison des préoccupations grandissantes concernant la sécurité de la qualité de l'air intérieur, la recherche sur l'identification et la caractérisation de sources a connu un intérêt croissant ces dernières années. La table 1.2, résume sommairement différents travaux réalisés dans ce domaine.

Toutes ces applications en rapport avec la qualité de l'air intérieur s'effectuent sur des polluants de type gazeux. Les caractérisations de sources de polluants de type particulaire (estimation du débit source de particules par méthode inverse) ne sont jamais traitées. En effet, les différentes caractérisations réalisées jusqu'à maintenant (à l'image de Chaolong Qi and Gressel [2015] qui déterminent un débit en particules pour un procédé de coupe de fibro-ciment ($g.m^{-1}$)) utilisent la mesure directe réalisée par des capteurs pondérée par le paramètre principal de l'usinage. Nous souhaitons mettre en place une estimation du débit massique ($g.s^{-1}$) à partir d'une méthode inverse qui serait robuste quelle que soit le type d'usinage considéré.

1.4 Plan du manuscrit

Afin de répondre à la problématique qui est posée dans la partie contexte de cette introduction, nous développerons le manuscrit suivant 6 chapitres distincts.

— *Chapitre 2 :*

Le chapitre 2 présente la physique du transport des aérosols et se focalise sur ceux traités. En effet, ce travail de thèse étant basé sur l'estimation de particules émises par des

machines, il semble évident d'étudier la physique qui régit le transport de celles-ci dans un local ;

— *Chapitre 3 :*
Après avoir décrit le transport des particules dans un local ventilé, nous détaillons la cabine ventilée qui est utilisée pour la partie expérimentale de nos travaux ainsi que la métrologie qui est employée pour effectuer l'ensemble de l'étude ;

— *Chapitre 4 :*
Le chapitre présente la première conception du problème d'estimation qui a été développée. Celle-ci se résume à un cas où l'écoulement dans le local est permanent et où la source est stationnaire dans le temps. Tout d'abord, une partie du chapitre est consacrée au développement de la méthode d'un point de vue théorique. Ensuite, la méthode est validée d'un point de vue numérique (simulation CFD) mais aussi de manière expérimentale. Finalement, une étude de la robustesse de la méthode a été effectuée afin d'analyser les limites de celle-ci ;

— *Chapitre 5 :*
Une évolution proposée de la méthode est de l'appliquer à une source instationnaire. Une première partie présente le développement théorique de la méthode, suivie de sa validation. Le chapitre se termine par une étude de la robustesse de la méthode ;

— *Chapitre 6 :*
Ce chapitre a pour but de répondre aux objectifs de la thèse. En effet, il est consacré à l'application directe de la méthode (instationnaire) aux cas d'usinages effectués par des ponceuses ou des scies circulaires. Ce chapitre permettra de discriminer les machines entre elles selon leurs performances de fonctionnement ;

— *Conclusion :*
La conclusion du manuscrit retrace tout le travail accompli durant cette thèse ainsi que les résultats généraux qui ont été obtenus ; Elle permet aussi de mettre en avant les perspectives nombreuses que ce travail met en exergue ;

— *Annexes :*
Des annexes sont ajoutées à ce manuscrit dans le but de résumer les méthodes développées afin de pouvoir les utiliser rapidement et simplement.

Chapitre 2

Physique du transport des aérosols

Ce chapitre est dédié à la description de la physique qui régit le domaine des aérosols. Une présentation générale des aérosols, des propriétés physicochimiques ainsi que des différents mécanismes de transport de ceux-ci est faite. Par la suite, nous présenterons le type d'aérosols qui est considéré dans le cadre de cette étude. La modélisation du transport et du dépôt de l'aérosol étudié est décrite dans la dernière partie du chapitre.

2.1 Le transport des aérosols : un écoulement multiphasique

2.1.1 Généralités

Un aérosol est défini comme étant l'ensemble des suspensions solides ou liquides dans un gaz porteur. Celui-ci peut avoir des origines diverses et variées. Il provient de l'activité humaine (origine anthropique) ou de phénomènes naturels (Renoux and Boulaud [1998]). Dans ces deux cas d'origine, nous pouvons distinguer des aérosols de type primaire et secondaire. Les aérosols primaires sont directement émis sous forme solide (la plupart du temps) dans l'atmosphère alors que les aérosols secondaires résultent d'une transformation de gaz en particules (condensation). Un aérosol se caractérise par la taille des particules qui le constitue. Par conséquent, nous abordons l'aspect granulométrique des aérosols dans la prochaine section.

2.1.2 Granulométrie des aérosols

La granulométrique d'un aérosol peut-être exprimée en nombre, en surface ou encore en masse/volume. Celle-ci se définit à partir d'une dimension caractéristique des particules qui peut-être le diamètre. Lorsque les particules sont sphériques, cela ne pose aucun problème or, dans la nature les particules ne le sont pas. Afin de palier le problème de cette non-sphéricité

SYMBOLE	NOM	PROPRIÈTÉ ÉQUIVALENTE DU **CERCLE** DE MÊME	EXPRESSION
d_{sp}	Diamètre de surface projetée	surface projetée A sur un plan	$A = \frac{\pi}{4} d_{sp}$
d_c	Diamètre de périmètre	périmètre P sur un plan	$P = \pi d_c$

		DIMENSION MESURÉE
d_F	Diamètre de Feret	distance entre deux tangentes sur des côtés opposés
d_M	Diamètre de Martin	longueur moyenne de corde sur la surface projetée

TABLE 2.1 – Description de différents diamètres de cercle équivalent ou diamètres statistiques

des particules, la notion de diamètre équivalent intervient. Il existe trois niveaux de diamètres équivalents qui sont les diamètres de sphère équivalente, de cercle équivalent et les diamètres statistiques. Ces derniers sont plutôt utilisés pour la microscopie. Les tables 2.1 et 2.2 résument les propriétés de différents diamètres ainsi que les relations mathématiques qui les lient avec la particule. Le diamètre qui est principalement utilisé pour la description des mouvements des particules (présentée dans le paragraphe suivant) est le diamètre aérodynamique (il correspond au diamètre de la sphère équivalente de masse volumique $\rho_0 = 1000\,kg.m^{-3}$ et ayant la même vitesse terminale de chute). Ce diamètre permet de décrire le comportement aéraulique des aérosols. Il est possible de mettre en relation le diamètre aérodynamique avec le diamètre équivalent en volume grâce à la relation suivante (Renoux and Boulaud [1998]) :

$$d_a = d_v \sqrt{\left(\frac{\rho_p}{\rho_0 \chi}\right)}, \tag{2.1}$$

où ρ_p est la masse volumique de l'aérosol. Le facteur de forme dynamique χ est un critère permettant de décrire la sphéricité d'une particule. Plus ce facteur est proche de 1 et plus la particule est proche d'une sphère. Il se résume comme étant le rapport entre la force de traînée de la particule non-sphérique sur celle de la particule de diamètre équivalent en volume. Ce rapport conduit à la relation (Renoux and Boulaud [1998]) :

$$\chi = \frac{\rho_p}{\rho_m} \left(\frac{d_v}{d_{sk}}\right)^2, \tag{2.2}$$

où ρ_m est la masse volumique de la particule primaire. d_v et d_{sk} sont respectivement le diamètre équivalent volume et le diamètre de Stokes (table 2.2). La table 2.3 présente différents facteurs de forme en fonction du type de particules rencontrées dans la nature.

SYMBOLE	NOM	PROPRIÈTÉ ÉQUIVALENTE DE LA **SPHÈRE** DE MÊME	EXPRESSION
d_v	Diamètre en volume	volume V	$V = \frac{\pi}{6} d_v^3$
d_s	Diamètre en surface	surface S	$S = \pi d_s^2$
d_{av}	Diamètre en surface spécifique	surface spécifique	$d_{av} = \frac{d_v^3}{d_s^2}$
d_a	Diamètre aérodynamique	vitesse limite de chute V_s et de masse volumique $\rho_0 = 1000 kg.m^{-3}$	$V_s = \frac{\rho_0 C_c(d_a) g}{18 \eta_f} d_a^2$ avec : $C_c(d_a)$ le coefficient de Cunningham pour le diamètre aérodynamique μ_f la viscosité dynamique du fluide
d_{sk}	Diamètre de Stokes	masse volumique et même vitesse limite de chute suivant la loi de Stokes	$d_{sk} = d_v \sqrt{\frac{C_c(d_v)}{C_c(d_{sk})\chi}}$ avec : $C_c(d_v)$ et $C_c(d_{sk})$ les coefficients de Cunningham pour les diamètres d_v et d_{sk} χ le facteur de forme de la particule

TABLE 2.2 – Description de différents diamètres de sphère équivalente

FORME	FACTEUR DE FORME DYNAMIQUE
Sphère	1
Cube	1.08
Poussières	
Bitume	1.05 – 1.11
Quartz	1.36
Sable	1.57
Talc	2.04

TABLE 2.3 – Facteurs de forme dynamiques en fonction de différents types de particules atmosphériques d'après Renoux and Boulaud [1998] et Hervé-Bazin [2007]

Ce facteur est donc un coefficient de correction basé sur la sphéricité d'une particule. Pour la suite, dans ce manuscrit, le diamètre utilisé sera le diamètre aérodynamique. Une fois la

notion de diamètre définie, il est possible d'étudier la distribution granulométrique d'un aérosol, celui-ci étant généralement polydispersé. Il existe deux façons de représenter une distribution granulométrique :

— Représentation différentielle de la granulométrie à l'aide d'un histogramme. Elle consiste à reproduire la proportion qu'apporte un intervalle de diamètres de particules à la distribution globale. Lorsque cet intervalle devient infiniment petit, on tend vers l'apparition d'une courbe continue appelée fonction spectre granulométrique (ou fonction densité de probabilité des diamètres) (figure 2.1). La fonction densité de probabilité peut suivre différentes allures comme par exemple la loi de distribution normale/gaussienne ou lognormale ;

— Représentation cumulée où la proportion de chaque intervalle se rajoute à l'intervalle suivant.

La figure 2.1 représente un spectre granulométrique différentiel d'un aérosol quelconque.

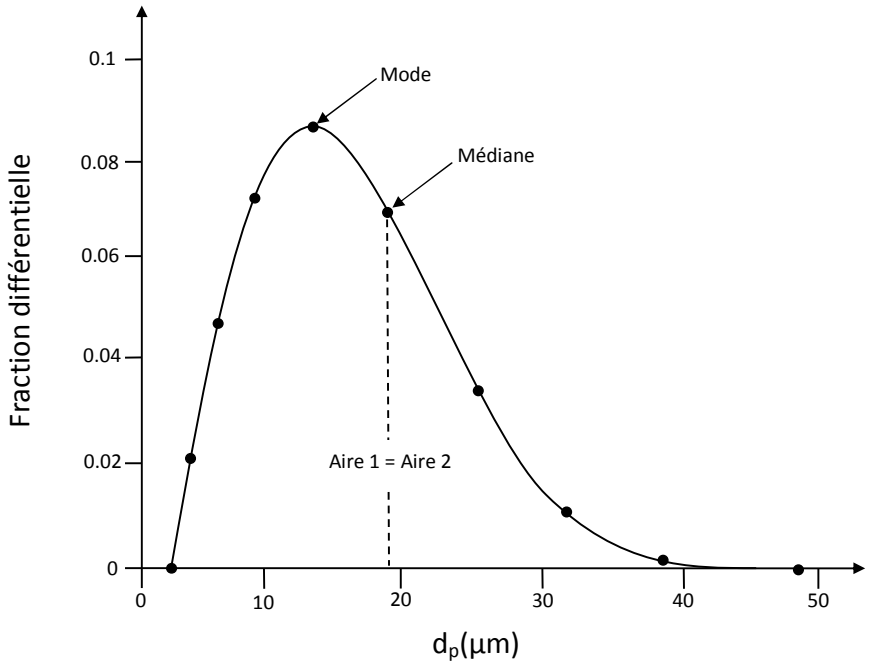


FIGURE 2.1 – Représentation d'un spectre granulométrique différentiel

A partir d'un spectre granulométrique, il est possible de définir différents paramètres caractéristiques de la distribution granulométrique :

— Le mode qui correspond au diamètre le plus représenté selon le spectre ;

— La médiane qui définie le diamètre divisant le spectre en deux parties égales ;

— La moyenne arithmétique en fréquence telle que :

$$\bar{d_p} = \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i}, \tag{2.3}$$

où n_i est le nombre de particules de dimension d_i ;

— L'étendue qui est définie par la différence entre le plus gros diamètre du spectre et le plus petit ;

— L'écart-type de la distribution granulométrique qui est exprimé par :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\left(\sum n_i \left(d_i - \bar{d_p}\right)\right)^2}{\sum n_i}}. \tag{2.4}$$

Après avoir défini la propriété physique qu'est la granulométrie, nous pouvons étudier les différents mécanismes du transport d'un aérosol.

2.1.3 Mécanismes du transport des aérosols

Les mécanismes auxquels sont soumis une particule dépendent en premier lieu de la continuité du fluide (gaz) à l'échelle de la particule. A savoir, si l'écoulement autour de la particule est de nature continue, intermédiaire ou moléculaire. Afin de répondre à cette question, il suffit de calculer le nombre de Knudsen.

2.1.3.1 Le nombre de Knudsen

Le nombre de Knudsen (Kn) est un nombre adimensionnel qui est défini de la manière suivante :

$$Kn = \frac{2\lambda_f}{d_p}, \tag{2.5}$$

où λ_f est le libre parcours moyen d'une molécule de gaz (distance moyenne que parcourt une molécule entre deux impacts successifs) et d_p le diamètre d'une particule. Le libre parcours moyen de l'air est de $68 \times 10^{-9}\,m$ pour une température de $20\,°C$ ($293\,K$) et une pression de $1\,atm$ ($101.3\,kPa$). Or, cette distance peut varier en fonction de cette température et de cette pression. La valeur de λ_f peut donc être modifiée grâce la relation établie par Willeke [1976] :

$$\lambda_f = \lambda_0 \left(\frac{101.3}{P}\right)\left(\frac{T}{293}\right)\left[\frac{\left(1+\frac{110}{293}\right)}{\left(1+\frac{110}{T}\right)}\right], \tag{2.6}$$

où $\lambda_0 = 68 \times 10^{-9}\,m$, P est la pression en kPa et T la température en K . Dans notre cas, la température et la pression ambiante sont de l'ordre des CNTP (Conditions Normales de Température et de Pression). Par conséquent, nous considérons le libre parcours moyen du fluide comme étant égal à $68 \times 10^{-9}\,m$. La table 2.4 décrit la caractérisation de la continuité de notre phase gazeuse à partir du nombre de Knudsen. Ces différents types de milieu permettent de décrire différemment la résistance du milieu gazeux au mouvement de la particule. En fonction

NOMBE DE KNUDSEN	TYPE DE MILIEU
$Kn \ll 1$	milieu « continu » ou de « glissement »
$Kn \approx 1$	milieu « intermédiaire »
$Kn \gg 1$	milieu « moléculaire »

TABLE 2.4 – Caractérisation-du-type de milieu de la phase gazeuse

du régime d'écoulement (laminaire ou turbulent), la résistance du milieu fluide au mouvement de la particule s'exprime différemment. La détermination du régime d'écoulement du fluide autour de la particule se fait à partir du Re_p (nombre de Reynolds particulaire) qui se définit par la relation suivante :

$$Re_p = \frac{\rho_f V_r d_p}{\eta_f} \,, \tag{2.7}$$

où V_r est la vitesse relative de la particule par rapport à celle du fluide, ρ_f la masse volumique du fluide et η_f de la viscosité dynamique du fluide. Cette relation représente le rapport entre la force d'inertie et la force de viscosité. Le régime est dit de Stokes lorsque $Re_p \ll 1$, laminaire pour $Re_p < 20$ et turbulent lorsque $Re_p > 130$ (Oesterlé [2006]).

— *Régime de Stokes :*
La résistance du milieu au mouvement d'une particule (force de traînée F_t) a pour relation la loi de Stokes (1851) :

$$F_t = 6\pi\eta_f r_p V_r \,, \tag{2.8}$$

où r_p est le rayon de la particule. Toutefois, cette relation reste très limitée par ses conditions d'applications. En effet, celles-ci se restreignent à des cas où le nombre de Reynolds particulaire reste faible. Cette relation s'applique avec une erreur inférieur à 1% jusqu'à $Re_p < 0.1$ (Oesterlé [2006]). Lorsque les conditions d'applications ne sont plus valables, il faut revoir la résistance du milieu au mouvement de la particule en faisant apparaitre un facteur correctif appelé coefficient de trainée C_D.

— *Écart avec la loi de Stokes :*
Le milieu gazeux est considéré comme étant incompressible et la principale force entre particules et gaz est la force de traînée. Lorsque $Re_p > 0.1$, la force inertielle ne peut plus être négligée (la formule de Stokes n'est plus valide). Dans ce cas, la force de traînée ne s'exprime plus comme l'équation 2.8 et doit faire intervenir un coefficient de correction (C_D) :

$$F_t = C_D(d_p)\,\frac{\rho_f \pi r_p^2 V_r^2}{2} \,. \tag{2.9}$$

Ce coefficient de traînée (C_D) peut se calculer à l'aide de la corrélation de Schiller and Naumann [1935] jusqu'à des nombres de Reynolds particulaire d'environ 1000 de la façon suivante :

$$C_D = \frac{24}{Re_p}\left(1 + 0.15 Re_p^{0.687}\right). \tag{2.10}$$

La figure 2.2 représente l'évolution du coefficient de traînée en fonction du nombre de Reynolds particulaire (équation 2.7).

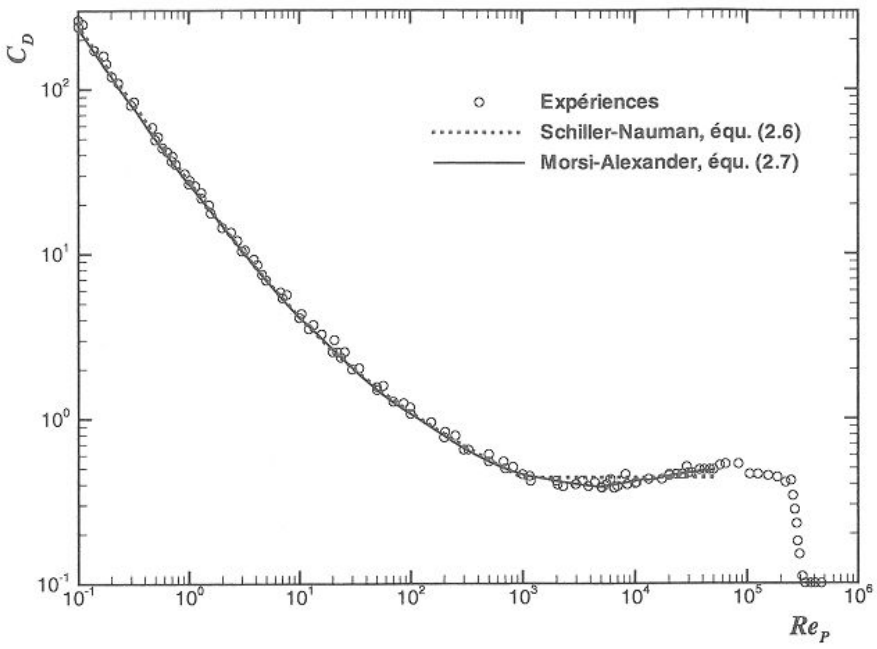


FIGURE 2.2 – Coefficient de traînée d'une sphère rigide lisse en fonction du nombre de Reynolds particulaire. D'après Oesterlé [2006]

Après avoir caractérisé l'écoulement du fluide porteur, il faut analyser les différents mécanismes qui régissent le transport des aérosols. Dans ces mécanismes, nous pouvons distinguer, entre autres, les diffusions Brownienne et turbulente, la sédimentation, le phénomène de thermophorèse ainsi que les phénomènes liés au dépôt de particules sur une paroi. Nous allons dans la suite de cette section détailler ces mécanismes.

2.1.3.2 Mouvement Brownien

Le mouvement Brownien (aussi appelé mouvement de Wiener) caractérise une trajectoire chaotique d'une particule sous l'action des molécules de gaz. La figure 2.3 est une illustration d'une trajectoire dite Brownienne.

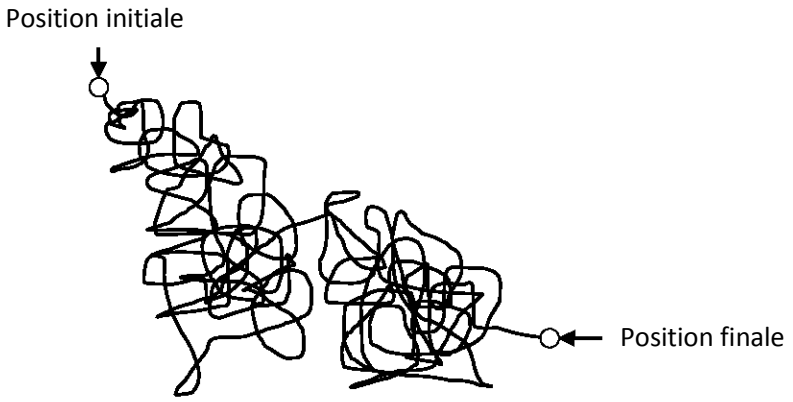


FIGURE 2.3 – Illustration d'une trajectoire chaotique de particule soumise uniquement au mouvement Brownien

La trajectoire est définie par la collision entre les molécules de gaz (soumises à l'agitation thermique) et la particule. Lorsqu'une collision a lieu, la particule prend une direction rectiligne jusqu'à la prochaine collision. Afin de caractériser le mouvement Brownien, c'est la moyenne quadratique $\sqrt{\bar{x}^2}$ du déplacement qui est proportionnel au temps qui est utilisé.

$$\bar{x}^2 = 2\, dim\, D_B\, t, \tag{2.11}$$

avec dim la dimension du mouvement (linéaire, plan ou spatial), D_B la diffusion Brownienne et t le temps. La diffusion Brownienne est définie de la manière suivante :

$$D_B = \frac{K_B\, T\, C_c(d_p)}{3\,\pi\,\eta_f\, d_p}, \tag{2.12}$$

où K_B est la constante de Boltzmann ($K_B = 1.38 \times 10^{-23}\, J.K^{-1}$), T la température en K, $C_c(d_p)$ le coefficient de Cunningham pour une particule de diamètre d_p. Le coefficient de Cunningham est directement dépendant du nombre de Knudsen et s'applique essentiellement dans le cas de petites particules (Par exemple, $C_c = 1.01$ dans le cas d'une particule de diamètre $10\mu m$, $C_c = 1.16$ pour $d_p = 1\mu m$ et $C_c = 22$ lorsque le diamètre atteint $0.01\mu m$). On remarque d'après les relations 2.11 et 2.12 que la distance parcourue par une particule sous l'effet du mouvement Brownien est proportionnelle à la température et inversement proportionnelle au diamètre de la particule. La table 2.5 présente le déplacement quadratique d'une particule ainsi que le coefficient de diffusion Brownien en fonction du diamètre de la particule. La diffusion Brownienne est un phénomène qui a son importance dans le cas où les particules sont de petites tailles puisque le déplacement quadratique devient de plus en plus faible lorsque les particules atteignent l'ordre du micromètre. Par conséquent, il est possible de négliger ce phénomène devant d'autres qui seront dominant pour des diamètres de particules plus élevés.

DIAMÈTRE AÉRODYNAMIQUE DE LA PARTICULE d_p (μm)	COEFFICIENT DE DIFFUSION BROWNIEN D_B ($m^2.s^{-1}$)	DÉPLACEMENT QUADRATIQUE MOYEN $\sqrt{\bar{x^2}}$ (m) POUR $1\,s$
0.001	5.14×10^{-6}	5.6×10^{-3}
0.01	5.24×10^{-8}	5.6×10^{-4}
0.1	6.75×10^{-10}	6.4×10^{-5}
1	2.77×10^{-11}	1.3×10^{-5}
10	2.38×10^{-12}	3.8×10^{-6}

TABLE 2.5 – Coefficient de diffusion Brownienne et déplacement quadratique moyen $\bar{x}$ en 3 dimensions pour différentes tailles de particules à $20\,°C$ et $101.3\,kPa$

2.1.3.3 Mouvement des particules sous l'effet de la pesanteur

Les particules sont soumises à la force d'attraction gravitationnelle (figure 2.4). Cet effet est plus communément appelé sédimentation.

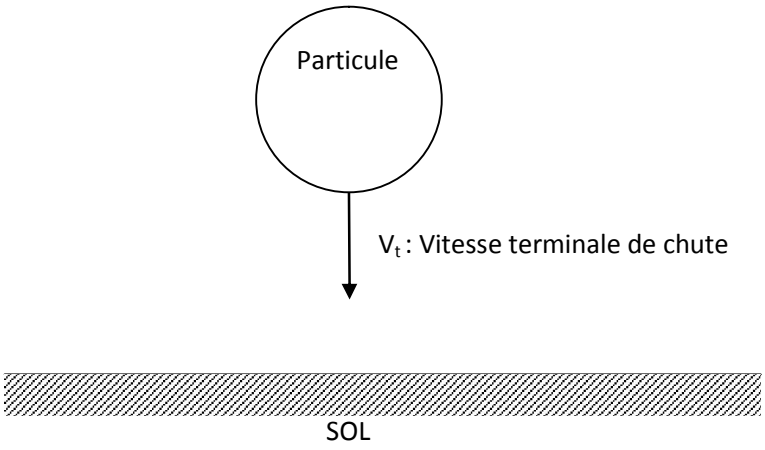


FIGURE 2.4 – Schématisation de l'effet de la pesanteur sur une particule

La force de pesanteur qui s'applique à une particule sphérique est la suivante :

$$F_p = \frac{4}{3}\pi r_p^3 \rho_p g, \tag{2.13}$$

où g est l'accélération de la pesanteur ($g = 9.81\,m.s^{-2}$). La vitesse terminale de chute dépend du régime d'écoulement du milieu fluide.

— *Régime de Stokes :*

Lorsque la particule est soumise au régime de Stokes, la vitesse terminale de chute est

déterminée par l'égalité entre l'équation 2.8 et 2.13. Cette égalité aboutit à :

$$V_t = \frac{4\,r_p^2\,\rho_p\,C_c(d_p)}{18\,\eta_f}\,g. \tag{2.14}$$

— *Écart avec le régime de Stokes :*
Lorsque l'on s'écarte de la loi de Stokes. La vitesse terminale de chute devient donc avec $\rho_p \gg \rho_f$:

$$V_t = \frac{16\,r_p^2\,\rho_p\,C_c(d_p)}{3\,\eta_f\,C_D(d_p)\,Re_p(d_p)}\,g. \tag{2.15}$$

La table 2.6 représente quelques valeurs de la vitesse terminale de chute pour des particules sphériques de différents diamètres ayant une masse volumique $\rho_p = 1000\,kg.m^{-3}$ dans l'air ($\rho_f = 1.225\,kg.m^{-3}$) à $20\,°C$ et $101.3\,kPa$. D'après cette table, nous constatons très nettement

DIAMÈTRE AÉRODYNAMIQUE DE LA PARTICULE d_p (μm)	VITESSE TERMINALE DE CHUTE V_t ($m.s^{-1}$)
0.01	7×10^{-8}
0.1	8.8×10^{-7}
1	3.5×10^{-5}
10	3.1×10^{-3}
100	0.25

TABLE 2.6 – Ordre de grandeur de la vitesse terminale de chute pour différents diamètres de particules sous $20\,°C$ et $101.3\,kPa$

que la vitesse de sédimentation évolue à l'inverse de la diffusion Brownienne. En effet, plus la particule est de diamètre élevé, plus la vitesse de sédimentation est grande.

Les aérosols peuvent être aussi soumis à des phénomènes de migration comme la thermophorèse, turbophorèse, photophorèse et diffusionphorèse. Ces quatre processus sont définis dans la section suivante.

2.1.3.4 Thermophorèse, turbophorèse, photophorèse et diffusionphorèse

1. *Thermophorèse :*
   Lorsque le milieu gaz où se trouve l'aérosol est confronté à une différence de température, les particules ont tendance à se déplacer des zones chaudes vers les zones froides. D'une façon générale, on peut décrire la vitesse thermophorétique comme suit (Sippola and

Nazaroff [2002]) :

$$V_{th} = -\frac{C_c(d_p)\,\nu_f\,H}{T}\nabla T \text{ avec } H = \frac{2.34\left(\frac{\lambda_g}{\lambda_p}+2.18\,Kn\right)}{(1+3.42\,Kn)\left(1+2\left(\frac{\lambda_g}{\lambda_p}\right)+4.36\,Kn\right)}, \qquad (2.16)$$

où λ_g et λ_p sont les conductivités thermiques du gaz porteur et des particules. On remarque d'après l'équation 2.16 le signe « - » qui indique que la force appliquée est bien en sens inverse du gradient de température et que la migration s'effectue de la zone chaude vers la zone froide.

2. *Turbophorèse :*
   Le mécanisme de ce phénomène est basé sur le gradient de l'agitation de l'écoulement. Reeks [1983] a défini la turbophorèse comme étant une migration de la zone la plus agitée vers la zone la moins agitée.

3. *Photophorèse :*
   Ce phénomène (d'origine radiométrique) est visible lorsqu'un rayon lumineux arrive sur des particules. L'action de ce rayon provoque une distribution non uniforme de la température sur la surface de la particule et donne naissance à une force. Cette force est due à la différence de pression qui est créée par l'agitation plus intense des molécules de gaz du coté chaud de la particule que du coté froid (figure 2.5).

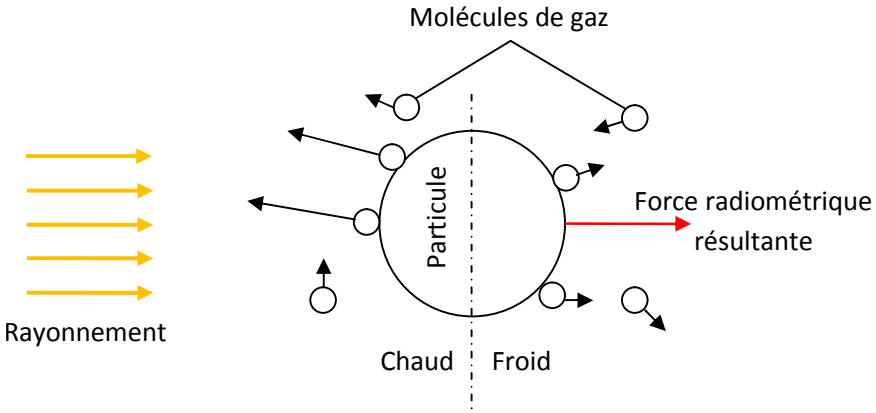


FIGURE 2.5 – Schématisation du phénomène de photophorèse

La force radiométrique est définie (Rubinowicz [1920]) dans le cas où $Kn \gg 1$ par :

$$F_r = \frac{\pi}{24}\,\alpha_T\,\frac{d_p^2}{T}\,P\,\Delta T, \qquad (2.17)$$

où α_T est le coefficient d'accommodation thermique, ΔT la différence de température entre la face chaude et la face froide et P la pression au sein du milieu gaz. Lorsque

$Kn \ll 1$ la force radiométrique s'exprime de la façon suivante :

$$F_r = -\frac{3}{2}\pi\eta_f^2\frac{R_g}{M}\frac{\Delta T}{P}, \tag{2.18}$$

avec M la masse molaire du gaz composant le fluide porteur et R_g la constante molaire des gaz parfaits.

4. *Diffusionphorèse :*
   La diffusionphorèse est un mécanisme de migration de particules dû à l'action des gradients de concentration des différents constituants du mélange (par exemple dans le cas où il y a une inhomogénéité de la concentration en vapeur d'eau dans le mélange).

2.1.3.5 Aérosol soumis à un champ électrique

Les aérosols peuvent être soumis dans certains cas à des champs électriques. Une vitesse de dérive V_{derive} de la particule proportionnelle au champ électrique E peut-être définie telle que :

$$V_{derive} = zE\,, \tag{2.19}$$

où z est le coefficient de proportionnalité plus communément appelé mobilité électrique en $cm^2.V^{-1}.s^{-1}$. La mobilité électrique s'écrit de la manière suivante :

$$z = \frac{qD_B}{K_B T}, \tag{2.20}$$

avec q est la charge électrique de la particule en Coulomb (C). La charge électrique est égale au produit du nombre de charges (p) de la particule par la charge élémentaire ($e = 1.6 \times 10^{-19} C$). La vitesse de dérive dépend directement de la diffusion Brownienne qui elle augmente lorsque le diamètre de particule diminue (§ 2.1.3.2). Par conséquent, la vitesse de dérive est inversement proportionnelle au diamètre de la particule.

2.1.3.6 Coagulation des particules

La coagulation décrit un phénomène où deux particules entrent en collision et n'en forment plus qu'une seule. On peut distinguer la coagulation due uniquement à la diffusion Brownienne et celle ayant lieu dans un régime turbulent (coagulation par diffusion turbulente et coagulation turbulente inertielle).

— *Coagulation par diffusion Brownienne :*
  Cette coagulation schématisée sur la figure 2.6 se produit essentiellement lorsque le milieu gaz est très fortement concentré en particules et que la diffusivité des particules est élevée.

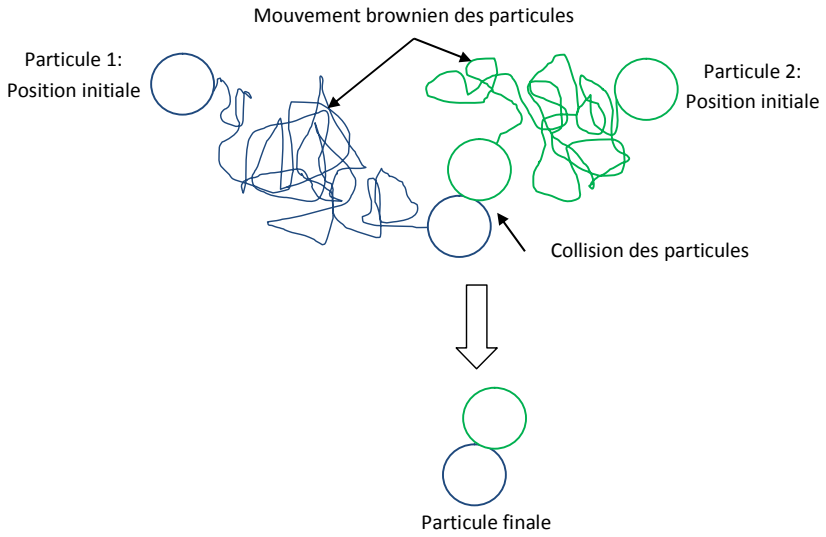


FIGURE 2.6 – Schématisation d'une coagulation par diffusion brownienne

— *Coagulation en régime turbulent :*
Ce type de coagulation peut-être dû à l'agitation turbulente, lorsque les particules présentent des inerties différentes. Lorsque deux tourbillons sont proches alors, les particules qui sont entrainées par ceux-ci peuvent entrer en collision. Cette collision arrive lorsque deux particules ont des tailles différentes et donc un temps de relaxation aérodynamique (τ_p) différent. Le temps de relaxation d'une particule correspond au temps au bout duquel la particule atteint la vitesse du fluide porteur. Ce temps de relaxation se calcule à partir de la relation suivante :

$$\tau_p = \frac{4\, r_p^2\, C_c(d_p)\, \rho_p}{18 \eta_f} \,. \tag{2.21}$$

Toutefois, il est important de signaler que chaque collision ne se termine pas par un phénomène de coagulation. Borgne et al. [1987] ont mis en place un coefficient d'efficacité de collision qui tient compte de cela.

2.1.3.7 Le dépôt de particules

Le dépôt sur des parois est un mécanisme important lors du transport d'un aérosol. Il existe différentes causes de dépôt :

— Diffusion brownienne ;
— Sédimentation ;
— Impaction sous l'effet de force centrifuge ;
— Précipitation thermique ;

— Précipitation électrique ;
— Diffusion turbulente.

Ces différents phénomènes ont été grandement étudiés sur des conduites cylindriques. La figure 2.7 issue de Charuau [1982] représente les différents phénomènes du dépôt pouvant être rencontrés.

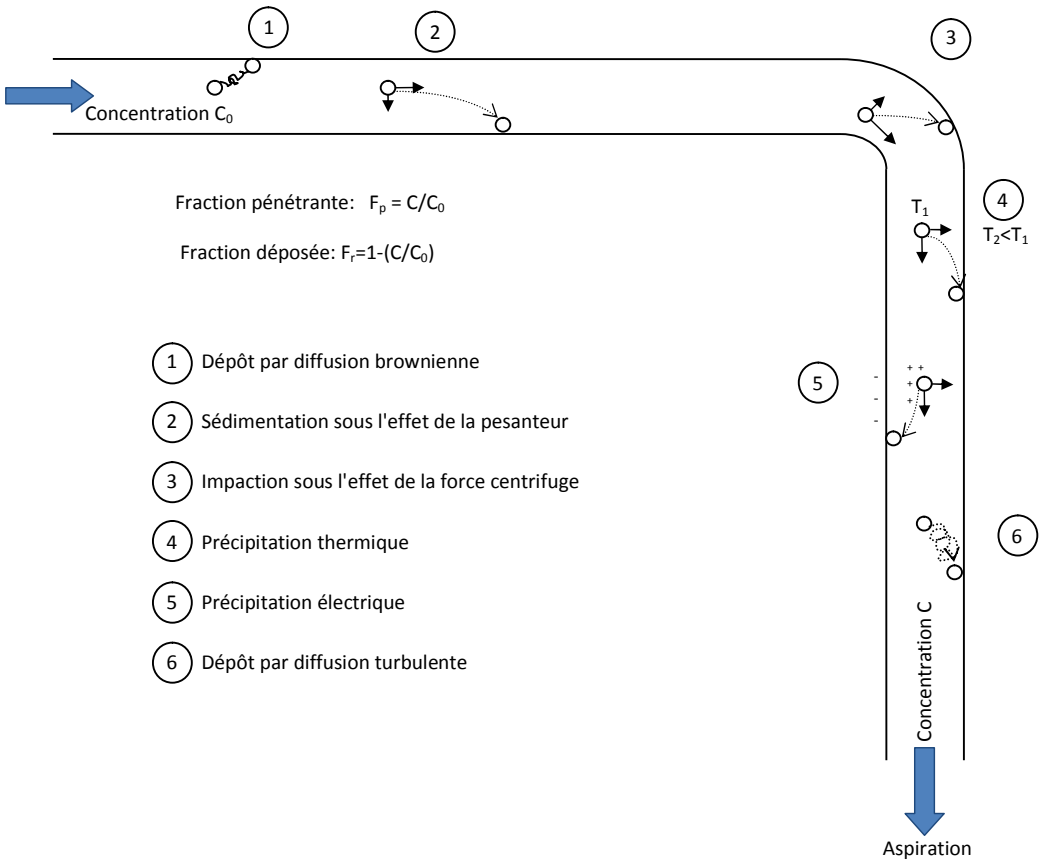


FIGURE 2.7 – Schématisation des différents phénomènes du dépôt de particules en conduit. D'après Charuau [1982]

Dans la littérature, il existe de nombreuses études traitant du dépôt de particules en paroi (Friedlander and Johnstone [1957], Wells and Chamberlain [1967], Sehmel [1968, 1970], Liu and Agarwal [1974], El-Shobokshy [1983]...). A partir des travaux réalisés par Sippola and Nazaroff [2002] et Nerisson [2009], il s'avère qu'il existe trois régimes différents de dépôt. La manière de catégoriser ces régimes se base sur le temps de relaxation adimensionné des

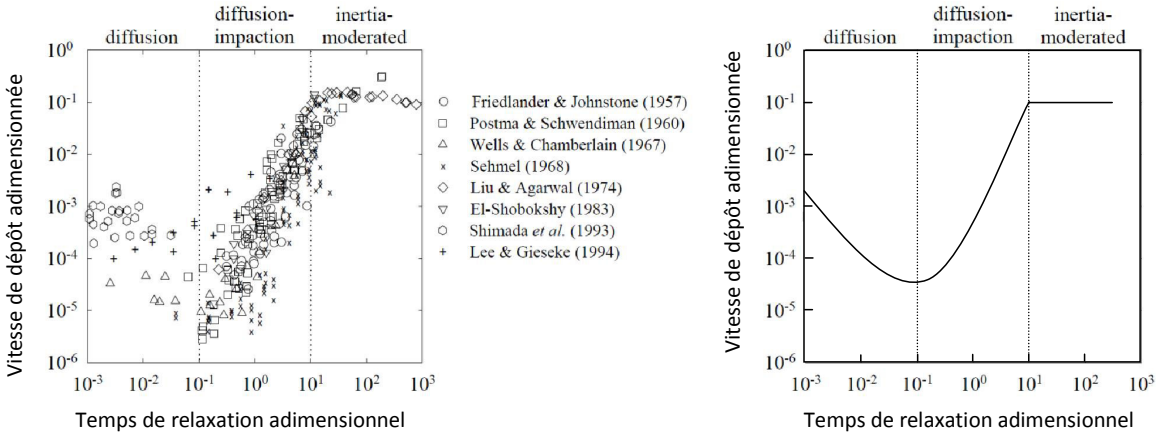
particules τ_p^+ qui s'exprime comme suit :

$$\tau_p^+ = \frac{\tau_p \left(U_\tau\right)^2}{\nu_f} \text{ avec } U_\tau = U_m \sqrt{\frac{f}{2}}, \tag{2.22}$$

avec U_τ la vitesse de frottement entre le fluide et la paroi. U_m est la vitesse moyenne du fluide dans le conduit et f le facteur de frottement. La vitesse de dépôt V_d correspond au rapport entre le flux de particules déposées par unité de surface et de temps divisé par la concentration en particules au sein même du fluide. Cette vitesse est adimensionnée par la vitesse de frottement entre le fluide et la paroi telle que :

$$V_d^+ = \frac{V_d}{U_\tau}. \tag{2.23}$$

La figure 2.8a représente des points expérimentaux de la vitesse de dépôt adimensionnée en fonction du temps de relaxation adimensionné et la figure 2.8b est le modèle empirique de Fan and Ahmadi [1993].



(a) Points expérimentaux obtenus par différents auteurs

(b) Modèle empirique de dépôt de Fan and Ahmadi [1993]

FIGURE 2.8 – Vitesse de dépôt adimensionnée en fonction du temps de relaxation adimensionné

La distinction entre les différents régimes se fait de la manière suivante :

1. *Régime de diffusion lorsque* $\tau_p^+ < 0.1$ *:*
   Dans ce régime, c'est la diffusion brownienne en sous couche visqueuse qui est prépondérante dans le mécanisme de dépôt. La vitesse de dépôt adimensionnée la plus courante est définie telle que :
   $$V_d^+ = k_1 \left(Sc_B\right)^\zeta \text{ avec } Sc_B = \frac{\nu_f}{D_B}, \tag{2.24}$$
   où k_1 et ζ sont des constantes définies par les différents auteurs (table 2.7). Sc_B est le nombre de Schmidt Brownien.

Auteurs	k_1	ζ
Cleaver and Yates [1975]	0.084	$-2/3$
Friedlander [1977]	0.059	$-2/3$
Wood [1981]	0.045	$-2/3$
Davies [1983]	0.075	$-2/3$
Papavergos and Hedley [1984]	0.07	$-2/3$

TABLE 2.7 – Liste non exhaustive des valeurs des différents coefficients k_1 et ζ en fonction des auteurs pour le calcul de vitesse de dépôt adimensionnée

2. *Régime de diffusion-impaction lorsque* $0.1 < \tau_p^+ < 10$ *:*
   Dans ce régime le dépôt est dû à la contribution conjointe de la diffusion et de l'inertie des particules. La vitesse de dépôt adimensionnée peut s'exprimer sous la forme :

$$V_d^+ = k_2 \left(\tau_p^+\right)^2, \tag{2.25}$$

   avec k_2 une constante. La table 2.8 résume quelques valeurs de k_2.

Auteurs	k_2
Kneen and Strauss [1969]	3.79×10^{-4}
Liu and Agarwal [1974]	6×10^{-4}
Wood [1981]	4.5×10^{-4}
Papavergos and Hedley [1984]	3.5×10^{-4}

TABLE 2.8 – Valeurs du coefficient k_2 en fonction des auteurs pour le calcul de vitesse de dépôt adimensionnée

3. *Régime inertiel lorsque* $\tau_p^+ > 10$ *:*
   Dans ce régime, le dépôt des particules est principalement dû à l'impaction. Ce phénomène apparait lorsque les particules ne peuvent pas suivre les changements brusques de direction du flux d'air et se déposent donc au niveau de la paroi. La vitesse de dépôt adimensionnée s'écrit sous une forme très simple :

$$V_d^+ = k_3, \tag{2.26}$$

   où k_3 est une constante. La table 2.9 décrit quelques valeurs déterminées de manière empirique de k_3.

Auteurs	k_3
Wood [1981]	0.13
Davies [1983]	0.30
Papavergos and Hedley [1984]	0.18
Fan and Ahmadi [1993]	0.14

TABLE 2.9 – Valeurs du coefficient k_3 en fonction des auteurs pour le calcul de vitesse de dépôt adimensionnée

2.1.3.8 Autres forces s'appliquant aux particules

Il existe d'autre forces qui peuvent s'appliquer à une particule dans un écoulement. Par exemple, la force de portance, de masse ajoutée, de Basset, de Coriolis... Nous ne développerons pas toutes ces forces puisqu'elles ne sont pas considerées pour la suite du travail présenté dans ce manuscrit.

2.2 Aérosol traité et hypothèses de modélisation

L'aérosol considéré dans cette étude est une suspension de poussières de bois qui est émise par des machines portatives (ponceuses, scies circulaires...). Généralement, les poussières mises en suspension dans l'air par les ponceuses sont de l'ordre de quelques μm (Thorpe and Brown [1994], Chung et al. [2000]). Dans le chapitre 3, nous présenterons les granulométries de poussières de bois que nous avons usinées et utilisées pour les essais expérimentaux.

Afin de modéliser l'écoulement de notre aérosol, nous effectuons un certain nombre d'hypothèses qui permettront de ne pas prendre en compte certains phénomènes physiques présentés dans la section 2.1.3. Les hypothèses ainsi formulées sont les suivantes :

1. L'aérosol considéré est constitué de particules solides. Par conséquent tout phénomène lié à des gouttes peut être écarté de la modélisation ;
2. Les particules sont au minimum de l'ordre du μm, par conséquent le nombre de Knudsen maximum est de $Kn \approx 0.136$. Nous allons donc nous placer dans un milieu dit « continu » ;
3. Les particules étudiées atteignent une taille maximale de quelques μm et peuvent donc être considérées comme étant peu inertielles ;
4. La concentration en particules dans le milieu fluide est faible (fraction volumique $< 10^{-6}$). En conséquence, l'impact que pourrait avoir l'écoulement des particules sur celui du fluide est grandement limité comme le montre la figure 2.9. Elle représente le rapport $\frac{\tau_p}{\tau_k}$, i.e. l'importance du temps de relaxation de la particule (τ_p) par rapport à la plus petite échelle de la turbulence (τ_k : échelle de temps de Kolmogorov) du fluide porteur ;

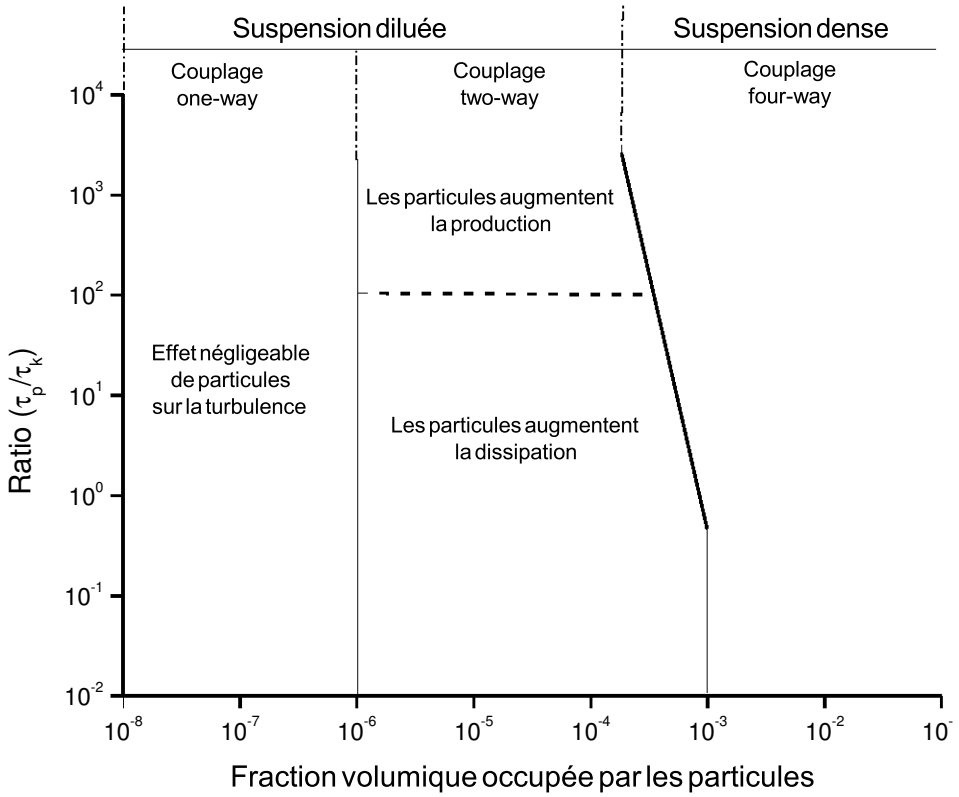


FIGURE 2.9 – Classification des écoulements diphasiques en fonction de la fraction volumique des particules. D'après Elghobashi [1994]

5. Les conditions ambiantes : la température, la composition du fluide ainsi que l'illumination sont homogènes. Par conséquent, les particules ne sont pas soumises aux mécanismes de thermophorèse, diffusionphorèse et photophorèse ;

6. Les forces dues à un probable champ électrique existant dans le domaine sont négligées ;

En résumé, l'écoulement des particules se fait à partir de l'écoulement principal du gaz porteur (phénomène d'advection/diffusion) et elles sont soumises aux forces de pesanteur (sédimentation) et de traînée.

2.3 Modélisation du transport et du dépôt des aérosols

Dans cette section, nous allons détailler quelques modèles existants (pour la phase gazeuse et particulaire) et justifier le choix de certains d'entre eux pour notre étude.

2.3.1 Phase porteuse (air)

2.3.1.1 Modèles existants

En régle générale, trois approches sont considérées dans la résolution d'un écoulement d'air qui correspondent à différents niveaux de modélisation.

1. *L'approche DNS (Direct Numerical Simulation) :*
   Cette approche est appliquée à des cas où toutes les structures tourbillonnaires sont explicitement calculées en résolvant directement les équations de Navier-Stokes sur l'ensemble du spectre d'énergie de Richardson-Kolmogorov sans ajout de modèle de turbulence. La DNS nécessite la mise en place d'un maillage de la géométrie simulée très fin où la plus grosse maille de calcul reste plus petite que n'importe quelle structure tourbillonnaire. Ce qui implique que cette approche est très consommatrice en ressources et en temps, donc son application se limite généralement à des domaines aux dimensions modestes (d'autant plus modeste que le nombre de Reynolds du domaine est élevé).

2. *L'approche LES (Large Eddy Simulation) :*
   La LES est un modèle mathématique pour la turbulence initialement proposé par Smagorinsky [1963] pour simuler les courants d'air atmosphériques. L'opération principale dans la simulation des grandes échelles est le filtrage passe-bas. Cette opération est appliquée sur les équations de Navier-Stokes pour éliminer les petites échelles de la solution. Cela permet de réduire le coût de calcul de la simulation (grandement inférieur à la DNS). Les équations régissant sont ainsi transformées, et la solution est un champ de vitesse filtrée.

3. *L'approche RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) :*
   La troisième approche présentée est la moins coûteuse en ressources et en temps de calcul par rapport aux précédentes. Cette approche se base sur la résolution des équations moyennées de Navier-Stokes. Ce qui donne accès aux valeurs moyennes de l'écoulement (vitesse moyenne, pression moyenne,...). La méthode RANS est la plus économe en ressources et très majoritairement utilisée pour les applications industrielles. En effet, cette méthode est très souvent appliquée aux cas de locaux ventilés comme les travaux réalisés par Holmberg and Li [1998], Chen et al. [2006] ou Lai et al. [2008] peuvent le montrer. Cette approche associe donc la rapidité de calcul, une très bonne qualité des modèles de turbulence, et des résultats assez fin.

2.3.1.2 Choix du modèle

Dans notre cas, la connaissance de l'écoulement moyen est suffisante. Par conséquent, nous avons opté pour l'utilisation de l'approche RANS. D'un point de vue général, les équations locales instantanées de conservation de masse et de quantité de mouvement d'un écoulement fluide s'écrivent de la façon suivant :

— Conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \,. \tag{2.27}$$

— Conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial \rho_f u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_f u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho_f g_i \,, \tag{2.28}$$

où u_i sont les composantes de la vitesse du fluide et g_i les composantes de l'accélération de la pesanteur. Le tenseur des contraintes visqueuses τ_{ij} , est défini par :

$$\tau_{ij} = \mu_f \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \,, \tag{2.29}$$

avec μ la viscosité cinématique et δ_{ij} est le delta de Kronecker qui se définit tel que :

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 \text{ si } & i = j \\ 0 \text{ si } & i \neq j \end{cases} . \tag{2.30}$$

A partir des équations instantanées de masse (équation 2.27) et de quantité de mouvement (équation 2.28), nous pouvons obtenir les équations aux grandeurs moyennes de la phase gazeuse. Chacune des variables (vitesse, pression) locales instantanées f peut alors être décomposée en une valeur moyenne $\overline{f}$ et une valeur fluctuante $\tilde{f}$ tel que :

$$f = \overline{f} + \tilde{f} \text{ avec } \overline{\tilde{f}} = 0. \tag{2.31}$$

Nous nous plaçons dans un cas où le gaz est considéré comme incompressible et isotherme. Le bilan moyenné de masse peut donc finalement s'écrire :

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \,. \tag{2.32}$$

Le bilan moyenné de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\rho_f \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial \overline{x_j}} \right) = -\frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{\tau_{ij}}}{\partial x_j} - \rho_f \frac{\partial \overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j}}{\partial x_j} \,. \tag{2.33}$$

Ces équations aux grandeurs moyennes de la phase gazeuse font apparaître une nouvelle inconnue provenant de la non linéarité des équations de Navier-Stokes, le tenseur de Reynolds $\rho_f \overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j}$. La fermeture de l'équation de quantité de mouvement moyenne nécessite donc la

connaissance de ces contraintes turbulentes. Les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente et du taux de dissipation turbulente sont développées pour répondre au problème de la fermeture du système. Nous utilisons un modèle à deux équations où l'on considère que la viscosité turbulente dépend des deux paramètres représentatifs du phénomène. Le modèle $k-\varepsilon$ (k étant l'énergie cinétique turbulente et ε le taux de dissipation de la turbulence) choisi a l'avantage d'être très répandu dans le cas de simulations d'écoulement dans des locaux. Cette fermeture consiste à relier les tensions de Reynolds $\rho_f \overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j}$ aux principales inconnues que sont les vitesses moyennes $\overline{u_i}$. Boussinesq [1877] fut le premier à introduire le concept de viscosité turbulente en proposant une analogie avec la loi de Newton pour les contraintes de l'agitation moléculaire tel que :

$$\rho_f \overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j} = -\nu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho_f k \delta_{ij} \,, \tag{2.34}$$

où ν_t est la viscosité turbulente cinématique. La nouvelle inconnue qu'est la viscosité turbulente est définie dans un premier temps par Jones and Launder [1972] telle que :

$$\nu_t = C_\mu \frac{\overline{k}^2}{\varepsilon} \,, \tag{2.35}$$

où C_μ est une constante définie ultérieurement et ε est défini par :

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial \tilde{u}_i \partial \tilde{u}_i}{\partial x_j \partial x_j}} \,. \tag{2.36}$$

Il est possible d'écrire deux équations supplémentaires pour le transport de k et de ε de la manière suivante :

$$\frac{\partial \overline{k}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \overline{k}}{\partial x_j} = -\overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu + C_{\sigma k} \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \,, \tag{2.37}$$

et

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = -C_{\varepsilon 1} \overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j} S_{ij} \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu + C_{\sigma \varepsilon} \nu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \,, \tag{2.38}$$

avec S_{ij} le taux de déformation du champ moyen

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \,. \tag{2.39}$$

Dans ces deux nouvelles équations, 5 constantes d'ajustement font leur apparition : C_μ, $C_{\sigma k}$, $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$et $C_{\sigma \varepsilon}$. C_μ est utilisé pour l'écriture de la viscosité tourbillonnaire, $C_{\sigma k}$ pour le terme de diffusion turbulente de l'énergie cinétique turbulente et $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$,$C_{\sigma \varepsilon}$ caractérisent l'équation de transport de la dissipation. La détermination de celles-ci peut se faire de deux façons différentes :

— en utilisant des conditions théoriques (cascade de Kolmogorov) ;

— en comparant les termes exacts calculés avec des données expérimentales.

Toutefois, les constantes les plus utilisées dans le modèle $k-\varepsilon$ *Standard* (table 2.10) sont celles définies par Jones and Launder [1972]. Une évolution importante du modèle $k-\varepsilon$ *Standard*

C_μ	$C_{\sigma k}$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\sigma \varepsilon}$
0.09	1	1.44	1.92	0.77

TABLE 2.10 – Constantes du modèle $k-\varepsilon$ *Standard* défini par Jones and Launder [1972]

est issue d'une analyse par des techniques de renormalisation (RNG : ReNormalization Group) (Yakhot et al. [1992]). Par rapport au modèle standard initial, les équations de transport de k et de ε du modèle $k-\varepsilon$ *RNG* sont similaires. Deux évolutions importantes ont été incluses. La première porte sur la notion de viscosité effective μ_{eff} et la seconde fait intervenir un terme supplémentaire $C^*_{\varepsilon 2}$ dans l'équation de transport de ε. La constante $C^*_{\varepsilon 2}$ correspond à la somme de la constante $C_{\varepsilon 2}$ du modèle standard avec un terme écrit en fonction du taux de déformation moyen. Ce terme supplémentaire permet de moduler la destruction de ε donc la valeur locale de celui-ci et finalement la valeur de l'énergie cinétique turbulente est fonction des taux de déformation moyen. Ce terme fait que le modèle $k-\varepsilon$ *RNG* simule mieux certains écoulements. Notamment ceux présentant localement de forts taux de déformation ou des courbures importantes des lignes de courant. La viscosité effective permet, quant à elle, de relier la valeur de la viscosité tourbillonnaire ν_t au nombre de Reynolds turbulent local. L'ajustement du transport turbulent en fonction du nombre de Reynolds permet une meilleure prise en compte des écoulements à faible Reynolds et une meilleure prise en compte des écoulements aux parois. Une autre évolution importante de ce modèle standard est la formulation proposée par le modèle $k-\varepsilon$ *Realizable* (Shih et al. [1993]). Ce modèle apporte une écriture différente de C_μ qui n'est plus constante mais variable. De plus la formulation standard de l'équation de transport de ε est modifiée. Dans cette nouvelle équation de transport, le terme de production est basé sur le module du tenseur des taux de déformation moyen. Le terme puits est également reformulé. L'évolution majeure proposée par le modèle $k-\varepsilon$ *Realizable* consiste à ajuster la valeur de C_μ.

En conclusion sur ces modèles, nous pouvons dire que le modèle $k-\varepsilon$ *Standard* est très largement répandu et utilisé pour des cas industriels. Les évolutions $k-\varepsilon$ *RNG* et $k-\varepsilon$ *Realizable* ont permis d'améliorer le modèle standard. Ces modèles sont tout aussi robustes et donnent de meilleurs résultats que le modèle standard dans de nombreuses configurations d'écoulement. De plus, le surcoût en terme de temps de calcul est relativement faible. Nous allons dans notre cas utiliser la dernière évolution ($k-\varepsilon$ *Realizable*) du modèle standard présenté afin de calculer l'écoulement moyen dans notre domaine.

2.3.2 Phase discrète (particules)

2.3.2.1 Modèles existants

En mécanique des fluides, il existe deux approches qui permettent de modéliser un écoulement de particules. La première est appelée « approche Lagrangienne » et la seconde « approche Eulérienne ».

1. *L'approche Lagrangienne :*
   Cette approche consiste à suivre un ensemble de particules ou la trajectoire de celles-ci. Elle permet d'étudier le couplage entre la phase porteuse et la phase particulaire. La méthode repose non pas sur la détermination de la trajectoire de toutes les particules mais plutôt sur un calcul de cette trajectoire pour un nombre assez grand de particules afin d'effectuer des statistiques fiables pour la globalité des particules.

2. *L'approche Eulérienne :*
   Dans cette approche, ce n'est pas la trajectoire des particules qui est suivie mais on choisit de décrire le champ global de concentration par l'intermédiaire d'une équation de convection/diffusion. Dans le cas d'une suspension diluée (fraction volumique de particules $< 10^{-6}$), nous utilisons un modèle qui ne prend pas en compte les interactions des particules sur l'écoulement fluide (Couplage one-way (figure 2.9)). Toutefois, il est à noter que cette approche ne permet pas de déterminer la position ainsi que la vitesse de chaque particule. Cependant, Chen et al. [2006],Lai et al. [2008] et Zhao et al. [2008] ont mis en évidence un bon accord entre des résultats issus des simulations numériques et des essais expérimentaux.

2.3.2.2 Choix du modèle

Modèle de transport

Dans notre cas, nous souhaitons un suivi de la concentration en particules dans le local. Par conséquent, nous allons utiliser une approche Eulérienne qui convient à notre application qui de surcroit présente une consommation en ressources et en temps de calcul beaucoup plus faible que le suivi Lagrangien. Le transport des particules peut être décrit par le modèle diffuso-inertiel de Zaichik et al. [2010]. L'équation de transport pour la concentration moyenne en nombre ou

la fraction volumique moyenne C s'écrit ainsi :

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left\{\left[\overline{u_i}+\tau_p g_i-\tau_p\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t}+\overline{u_k}\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k}\right)\right]C\right\} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(D_B\delta_{ik}+D^t_{ik}\right)\frac{\partial C}{\partial x_k}+C\frac{\partial}{\partial x_k}\left(D_B\delta_{ik}+\frac{\Omega}{1+\Omega}D^t_{ik}\right)\right]+S\,, \quad (2.40)$$

où $\overline{u_i}$ représente la vitesse moyenne du fluide, τ_p (s) le temps de réponse aérodynamique des particules considérées, D_B la diffusion brownienne des particules, $D^t_{p,ik}$ la diffusivité turbulente, S un terme source ($S=S(\overrightarrow{x},t)$) et $\Omega=\frac{\tau_p}{\tau^t_{f\to p}}$. $\tau^t_{f\to p}$ correspond à l'échelle de temps de la turbulence du fluide vue par les particules. Celui-ci est supposé égal à la durée de vie des tourbillons :

$$\tau^t_{f\to p}=\frac{3}{2}\frac{C_\mu k}{\sigma_t \varepsilon}\,. \quad (2.41)$$

Le temps de réponse aérodynamique d'une particule s'exprime de la façon suivante :

$$\tau_p=\frac{4\,r_p^2 C_\mu\,\rho_p}{18\mu_f}\,. \quad (2.42)$$

Ce temps de réponse τ_p correspond au temps caractéristique que met une particule à répondre à une sollicitation turbulente du fluide. Dans le modèle $k-\varepsilon\,Realizable$ utilisé, la diffusivité turbulente s'exprime de la manière suivante :

$$D^t_{ik}=\frac{\nu_t}{\sigma_t}\delta_{ik}-\frac{3\nu_t C_\mu k}{2\sigma_t\varepsilon}\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k}+\frac{\partial \overline{u_k}}{\partial x_i}\right)\,, \quad (2.43)$$

où le nombre de Schmidt σ_t est pris égal à 1. Le modèle de Zaichik et al. [2010] décrit de nombreux phénomènes physiques tel que la turbophorèse, la sédimentation, effets centrifuges ... Or d'après nos hypothèses d'utilisations initiales, plusieurs de ces phénomènes peuvent se simplifier et être supprimés comme par exemple la thermophorèse et la turbophorèse. Après simplification, nous allons utiliser le modèle dit « Drift flux » (Chen et al. [2006]) qui ne laisse pas apparaitre les termes de migration (turbophorèse, thermophorèse) ainsi que le terme de déviation. Il vient :

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left\{[\overline{u_i}+\tau_p g_i]C\right\}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(D_B\delta_{ik}+D^t_{ik}\right)\frac{\partial C}{\partial x_k}\right]+S\,. \quad (2.44)$$

Condition limite en paroi :

Étant donné que nous suivons des particules, il est important de prendre en compte l'effet du dépôt de particules sur les différentes parois. Pour ce faire, nous utilisons la loi de dépôt dynamique de Nerisson et al. [2011]. Cette loi donne le flux déposé J par unité de temps et de surface :

$$J=C(y^+)U_\tau V_d^+\,, \quad (2.45)$$

où U_τ correspond à la vitesse de frottement, $C(y^+)$ la concentration en particules à une distance y^+ de la paroi (valable pour y^+ compris entre 30 et 60) et V_d^+ la vitesse de dépôt adimensionnelle donnée par :

$$V_d^+ = \frac{\overrightarrow{g^+}.\overrightarrow{n}}{1-\exp(\overrightarrow{g^+}.\overrightarrow{n}I_p)}\,, \tag{2.46}$$

et

$$I_p(y^+) = \frac{\sigma_t}{k_0}\ln(y^+) + \lambda(S_{c_B},\tau_p^+)\,. \tag{2.47}$$

Ici, k_0 est la constante de Von Karman ($k_0 = 0.41$) et S_{c_B} est le nombre de Schmidt brownien. Les autres variables sont estimées avec les relations et corrélations suivantes :

$$\begin{cases} \overrightarrow{g^+} = \frac{\tau_p^{Stokes}}{u^*}\overrightarrow{g} \\ S_{c_B} = \frac{\nu_f}{D_B} \\ \tau_p^+ = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_f}\frac{u^{*2}}{\nu_f} \\ \lambda(S_{c_B},\tau_p^+) = \left[\frac{\tau_p^{+2n}}{w^n} + \left(\frac{S_{c_B}^{-\lambda_1}}{\lambda_0}\right)^n\right]^{-1/n} \\ n=2\,;\, w=1700\,;\, \lambda_0 = 13.7\,;\, \lambda_1 = \frac{2}{3} \end{cases}$$

2.3.3 Résumé des modèles choisis et conditions aux limites du domaine

La géométrie présentée au chapitre 3 est celle qui est utilisée dans le cas numérique et expérimental. Lors des simulations l'écoulement fluide est modélisé par les équations RANS avec l'utilisation du modèle de turbulence $k-\varepsilon$ *Realizable* et le modèle « Drift-flux » est utilisé pour la phase discrète. La modélisation des zones de proche paroi a un impact significatif sur les résultats de la simulation numérique car la présence des parois constitue la principale source de vorticité, de turbulence et les variables de l'écoulement turbulent y présentent un fort gradient. Les modèles de turbulence demeurent valables pour le calcul des écoulements turbulents loin des parois, cependant ces modèles doivent être développés pour être appliqués dans toute l'étendue de la couche limite à condition que la résolution du maillage soit satisfaisante. Les paramètres k et ε du modèle de turbulence sont initialisés dans le code de calcul (Ansys Fluent) par une estimation déterminée à partir des expression déterminées par Pope [2000] pour des conduites cylindriques.

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2 \;\; avec:\; I = 0.16Re^{-1/8}\,, \tag{2.48}$$

et :

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4}k^{3/2}}{l} \;\; avec:\; C_\mu = 0.09 \; et \; l = 0.07D\,, \tag{2.49}$$

où I est l'intensité turbulente, U est la vitesse moyenne et l est une longueur caractéristique (par exemple le diamètre lorsqu'il s'agit de conduite).

La figure 2.10 résume les différentes conditions aux limites qui sont appliquées aux simulations numériques sur la géométrie du local ventilé utilisé pour les essais.

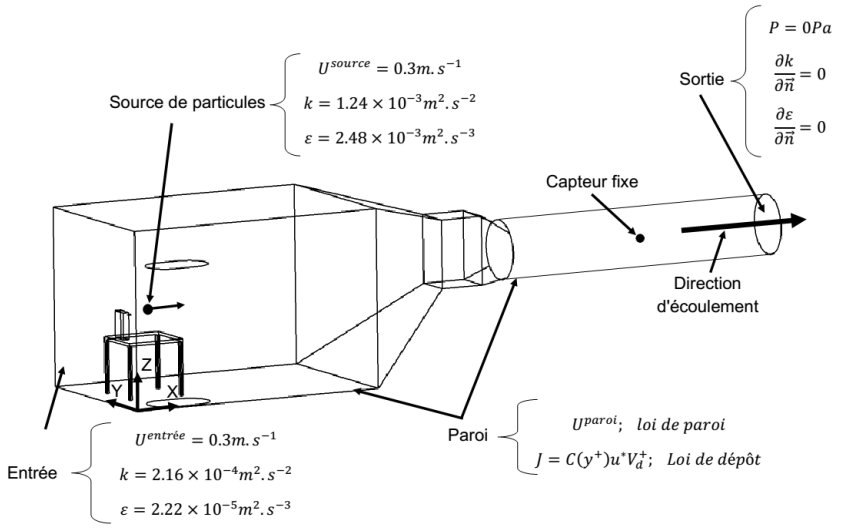


FIGURE 2.10 – Conditions aux limites appliquées aux simulations numériques

Après avoir défini les différents mécanismes qui régissent le transport des particules ainsi que les modèles qui seront appliqués pour suivre les écoulements fluide et particulaire, nous allons preter une attention particulière à la description de la géométrie du domaine (cabine ouverte ventilée) ainsi que de l'instrumentation qui sera utilisée pour l'étude.

Chapitre 3

Mise en place du banc d'essais

Ce chapitre est consacré à la description du cas d'application (cabine ouverte ventilée) et à la présentation de tous les outils (génération des aérosols et systèmes de prélèvements) utilisés dans cette étude. La cabine ouverte ventilée est utilisée dans tout les aspects des travaux réalisés (à savoir, dans les cas stationnaire/instationnaire et pour des applications numériques/expérimentales). Tout d'abord, une description générale de la cabine ventilée est effectuée. Ensuite, nous nous attarderons à la présentation des différents capteurs utilisés dans le cas expérimental. Enfin, les différents positionnements des sources de l'aérosol (qui seront utilisés dans les prochains chapitres) seront présentés.

3.1 Description générale de la cabine ouverte ventilée

Cette installation a été choisie car elle possède des dimensions à l'échelle d'un local de travail et de plus, son fonctionnement permet de prévenir toute exposition de l'opérateur aux poussières de bois puisqu'elles sont canalisées dans un système d'extraction. La figure 3.1 schématise la cabine ouverte utilisée pour l'étude. Les dimensions de la partie principale de la cabine sont : longueur $L = 4.5\,m$; largeur $l = 3\,m$; et hauteur $H = 3\,m$. Cette cabine possède un convergent de $2.5\,m$ de long qui débouche sur une conduite d'extraction de diamètre $1\,m$ et de longueur $15\,m$ (figure 3.2). A la sortie de cette conduite se trouve un extracteur permettant de régler le débit d'air traversant la cabine allant de $Q^{air}_{mini} = 8500\,m^3.h^{-1}$à $Q^{air}_{maxi} = 50000\,m^3.h^{-1}$. Dans notre cas de fonctionnement, nous allons nous placer à un débit permettant d'avoir une vitesse moyenne suivant X (figure 3.1) en entrée de cabine d'environ $U^{entrée} = 0.3\,m.s^{-1}$, soit un débit global de $Q^{air}_{cabine} = 9720\,m^3.h^{-1}$. Nous avons choisi ce débit puisque nous souhaitons avoir d'une part un écoulement maitrisé et d'autre part une vitesse de sédimentation des particules qui soit négligeable devant la vitesse de transport de celles-ci. Ainsi, notre étude se

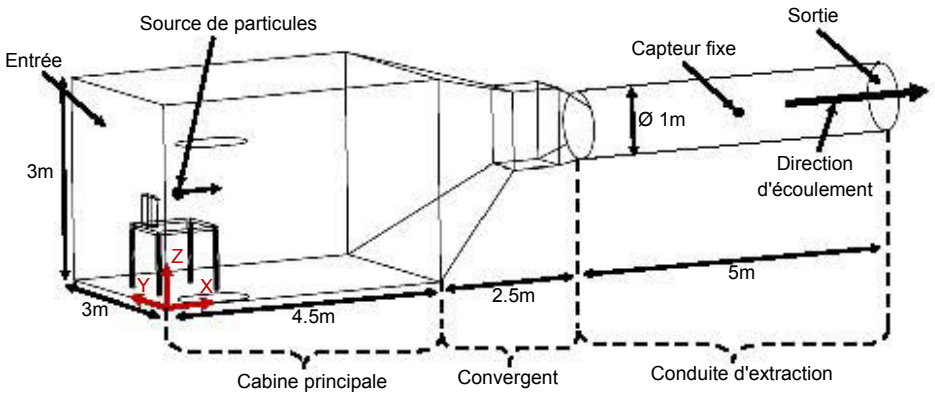
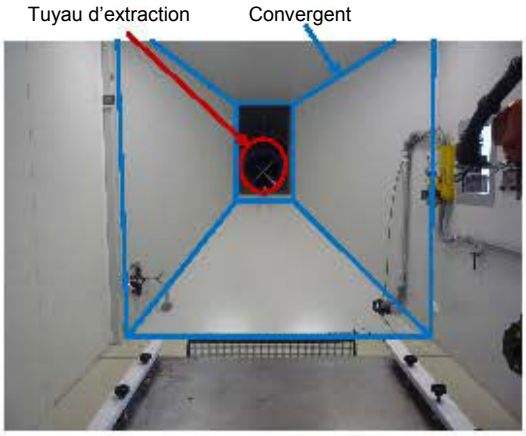


FIGURE 3.1 – Schéma du banc expérimental

dédie à des particules d'un diamètre aérodynamique inférieur à $10\,\mu m$ et de densité de l'ordre de $\rho_p = 1000\,kg.m^{-3}$. Or pour ce type de particules, la vitesse de sédimentation dans de l'air à $20°C$ et $101,3\,kPa$ est de l'ordre de $3.5 \times 10^{-3}\,m.s^{-1}$(Chapitre 2). Cette vitesse est négligeable par rapport à la vitesse de transport puisqu'elle est environ 100 fois plus faible. L'entrée de la cabine est équipée d'une toile diffusante (figure 3.2) qui permet d'homogénéiser le flux d'air.



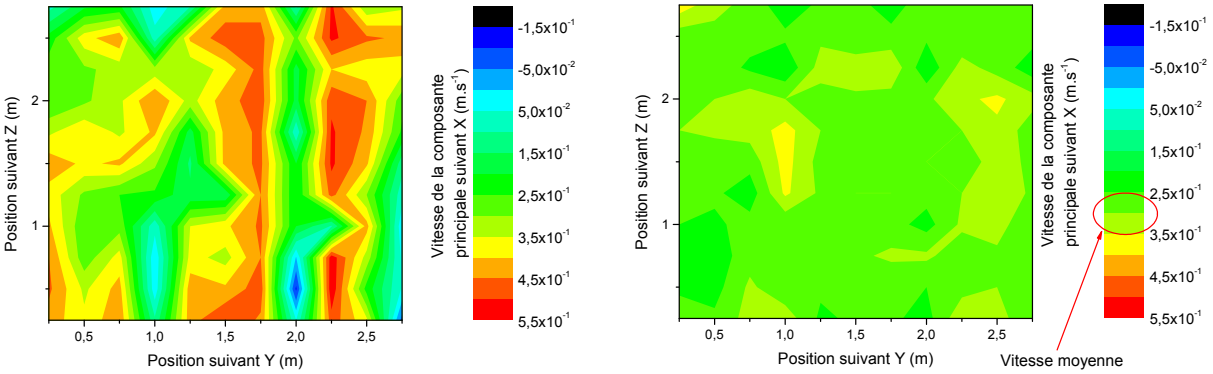
(a) Photographie de l'entrée de la cabine d'essais



(b) Photographie du fond de cabine et de la conduite d'extraction

FIGURE 3.2 – Photographies de la cabine expérimentale

La figure 3.3 représente la vitesse suivant l'axe X dans le cas où la toile diffusante est installée et dans le cas où elle n'y est pas. Cette vitesse est mesurée à l'aide d'un anémomètre à ultrason (Kaijo Denki WA-390). Nous remarquons très nettement l'apport de la toile diffusante puisque la vitesse de la composante principale (suivant X) est stable et de l'ordre de notre vitesse moyenne $U^{entrée} = 0.3\,m.s^{-1}$. Les conditions ambiantes (pression, humidité et température) du hall d'essais dans lequel se trouve la cabine ne peuvent être régulées de façon précise en raison de la dimension du local. Toutefois, afin de garder une température et une pression



(a) Sans toile diffusante (b) Avec toile diffusante

FIGURE 3.3 – Vitesse d'entrée de la cabine suivant X avec et sans toile diffusante

stable durant les expériences, le hall d'essais est placé en surpression grâce à un système de compensation (permettant d'injecter un débit d'air dans le hall supérieur au débit extrait par la cabine ouverte) à une température connue et constante. Grâce à cette compensation, nous pouvons limiter les fluctuations des conditions ambiantes qui provoqueraient des modifications sur l'écoulement aéraulique dans la cabine ainsi que des perturbations des essais expérimentaux. Après avoir présenté la géométrie de la cabine ouverte utilisée dans l'étude expérimentale et numérique, nous allons présenter leurs spécificités.

3.2 Cas expérimental : système de génération de particules et capteurs d'aérosol

3.2.1 Système de génération de particules

Deux types de systèmes de génération de particules sont utilisés dans le cadre de cette étude. Il peut s'agir soit d'un système entièrement contrôlable, le Palas RBG-1000 qui permet de générer un aérosol de propriétés connues (débit, granulométrie,...), soit d'une source d'aérosols de type industriel émettant des aérosols avec des débits et profils granulométriques non directement connus (ponceuses, scies-circulaires).

3.2.1.1 Palas RBG-1000

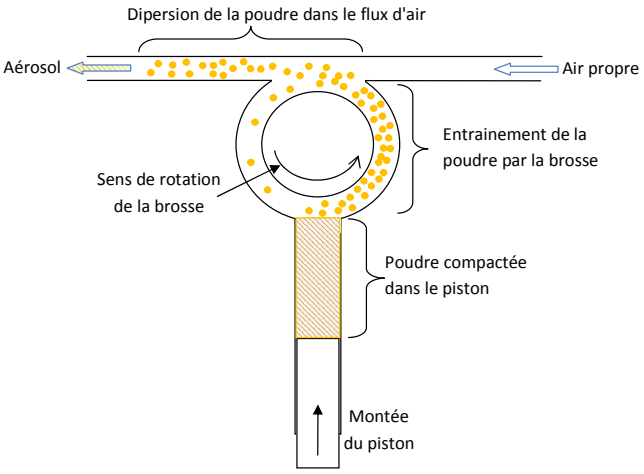
Le Palas RBG-1000 est un générateur à brosse tournante (figure 3.4). Ce générateur disperse une quantité de poudre définie, de façon constante, continue et reproductible. Il s'utilise pour une poudre répondant à différentes caractéristiques :



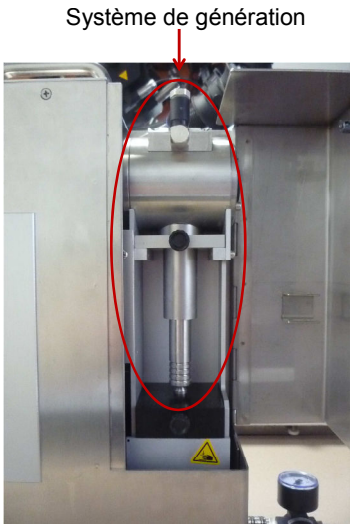
FIGURE 3.4 – Photographie du générateur Palas RBG 1000 utilisé

— taille des particules inférieure à $100\,\mu m$;
— la poudre ne doit pas être humide.

La figure 3.5a schématise le principe de fonctionnement du système d'injection et la figure 3.5b est une photographie de celui-ci.



(a) Schéma principe



(b) Photographie

FIGURE 3.5 – Système de génération des particules

Le générateur Palas RBG-1000 comprend un réservoir de stockage de particules et de compactage (figure 3.5). Un piston pousse le contenu du réservoir vers une brosse rotative qui pro-

pulse la poudre dans un flux d'air comprimé afin de générer un aérosol. Les paramètres réglables pour la production d'aérosols sont :

— le diamètre du réservoir (7, 10, 14, 20 et 28 mm) ;
— la vitesse de rotation de la brosse (de 600 à 1200 RPM) ;
— la vitesse de montée du piston (de 0 à 700 $mm.h^{-1}$) ;
— le débit d'air (de 2 à 5 $m^3.h^{-1}$).

Ces paramètres permettent de déterminer le débit massique ($mg.s^{-1}$) injecté par le système. En effet, il peut être calculé par l'équation 3.1.

$$S_{injectée}^{Palas} = \frac{\pi d_{reservoir}^2}{4} \times V_{piston} \times \rho_{poudre}^{apparente}, \tag{3.1}$$

où $S_{injectée}^{Palas}$ est le débit massique de particules en $mg.s^{-1}$, $d_{reservoir}$ est le diamètre du réservoir de poudre choisi en m, V_{piston} est la vitesse de montée du piston en $m.s^{-1}$ et $\rho_{poudre}^{apparente}$ est la masse volumique compacte de poudre dans le réservoir en $mg.m^{-3}$. La table 3.1 résume un exemple de calcul de débit d'injection dans différentes configurations du Palas RBG-1000 pour une poudre ayant une masse volumique apparente de $\rho_{poudre}^{apparente} = 1\,g.cm^{-3}$.

Diamètre piston	Vitesse de montée du piston		
	$1\,mm.h^{-1}$	$5\,mm.h^{-1}$	$700\,mm.h^{-1}$
	Débit d'injection		
mm	$mg.h^{-1}$		
7	38	190	27×10^3
10	79	395	55×10^3
20	324	1620	219×10^3
28	616	3080	430×10^3

Table 3.1 – Exemple de débit injecté par le Palas RBG-1000 pour une poudre de masse volumique apparente $1g.cm^{-3}$

Dans le cas de nos manipulations, les particules qui vont être utilisées sont de deux types :

— De la poudre d'alumine calibrée ;
— De la poussières de bois.

Les différentes caractéristiques poudres/poussières qui seront utilisées dans le générateur d'aérosol sont présentées ci-après.

Poudre d'alumine

Nous avons utilisé dans un premier temps de la poudre d'alumine de doucissage. C'est un oxyde d'aluminium (99.20% de Al_2O_3) qui est principalement utilisé dans :

— Le doucissage de verre minéral ;
— L'industrie des abrasifs en tant que grains détachés (rodage, sablage,...) ;
— La céramique oxydée ou céramique à usage industriel ;
— L'industrie des réfractaires, pisés réfractaires damés et matériel d'enfournement.

Le fournisseur de cette poudre nous a procuré les principales caractéristiques qui sont référencées dans la table 3.2. Selon le fournisseur, le diamètre de la poudre est centrée sur $5\,\mu m$.

CARACTÉRISTIQUES	
PRODUIT	Oxyde d'aluminium (AL2O3) pulvérisé
COULEUR	Blanche (corindon raffiné)
DURETÉ : MOHS	9
DURETÉ KNOOP	$1.800 - 2.200$
POINT DE FUSION	$2020°C$
DENSITÉ	$2.5 g.cm^{-3}$
STRUCTURE DES CRISTAUX	hexagonale (grains plats)
DIAMÈTRE	$5\mu m$

TABLE 3.2 – Principales caractéristiques fournisseur de la poudre d'alumine utilisée

Cependant, aucune information n'a été donnée relative au type de diamètre. Afin de vérifier la valeur fournie par le fournisseur, la granulométrique de la poudre a été analysée au moyen d'un Coulter Multisizer 4. Les détails se rapportant au fonctionnement de cet appareil sont présentés dans la Section 3.2.2. Les figures 3.6 et 3.7 représentent la fraction différentielle pour chaque diamètre de particules en nombre ou en volume. La fraction différentielle correspond à la proportion d'une certaine taille de particules par rapport à la quantité globale de particules mesurées. Ces mesures montrent deux résultats légèrement différents. En effet, lorsque nous regardons la granulométrie en nombre, nous observons qu'elle est centrée sur environ $2.8\,\mu m$ (ce qui est différent de la donnée du fournisseur). Mais, le second graphique qui présente la granulométrie en volume montre que celle-ci est centrée sur un diamètre aérodynamique d'environ $5\,\mu m$. Nous pouvons calculer le diamètre moyen arithmétique tel que :

$$D_{moyen} = \frac{\sum_{i=1}^{n} f_i d_i}{\sum_{i=1}^{n} f_i}\,, \tag{3.2}$$

avec D_{moyen} le diamètre arithmétique, f_i la fréquence de la classe et d_i le diamètre de la classe. Dans le cas de cette poudre d'alumine, nous avons une moyenne arithmétique en nombre de

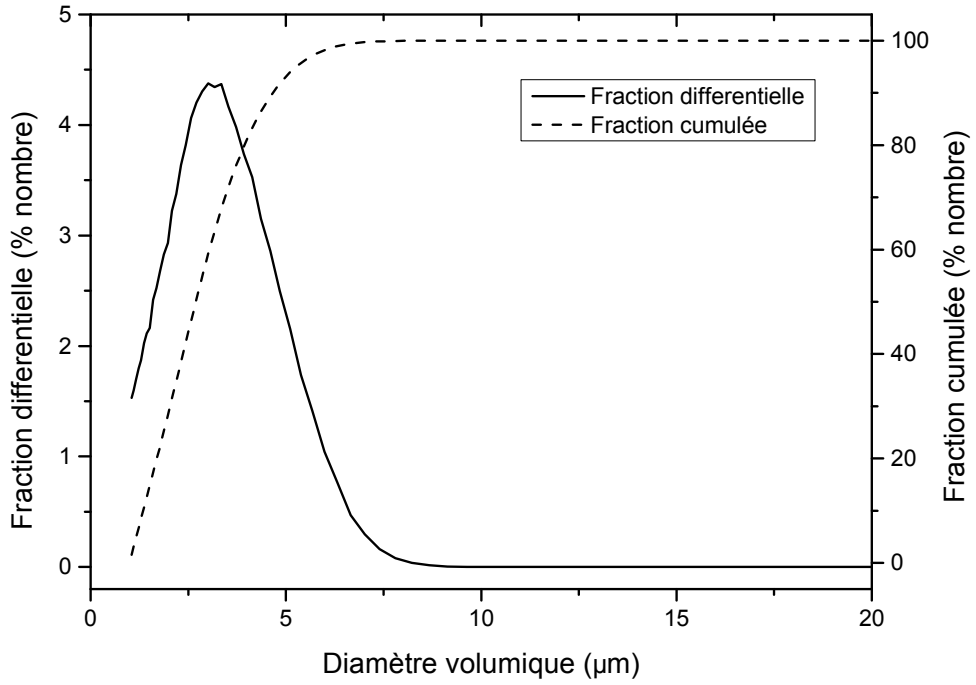


FIGURE 3.6 – Analyse de la granulométrie en nombre de la poudre d'Alumine au Coulter

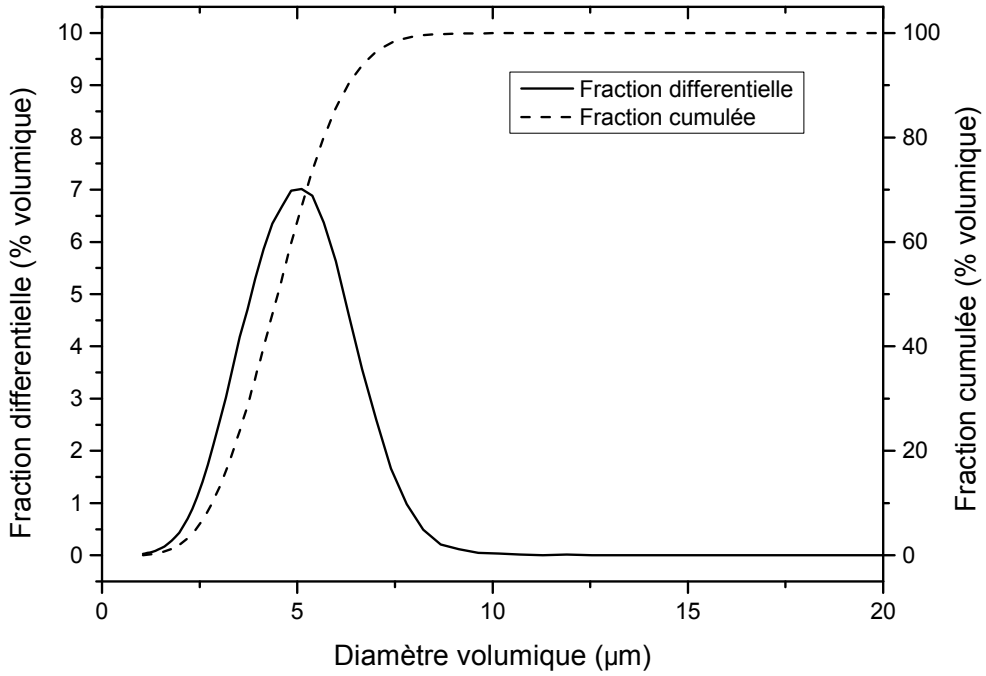
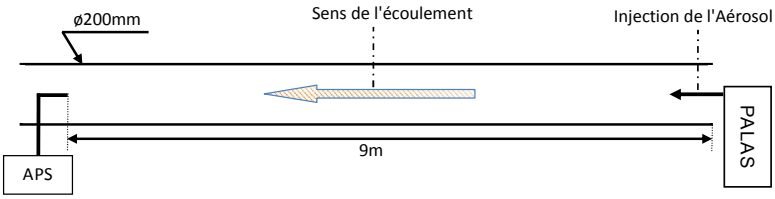


FIGURE 3.7 – Analyse de la granulométrie en volume de la poudre d'Alumine au Coulter

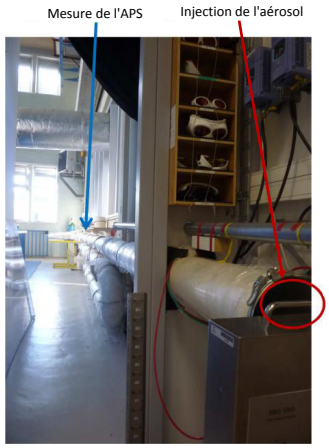
$3\,\mu m$ et une moyenne arithmétique en volume de $4.7\,\mu m$. Par conséquent, on en déduit que le diamètre fourni correspondait au diamètre d'un point de vue massique/volumique.

Poussières de bois

Les poussières de bois que nous avons utilisées sont issues d'un procédé soit de ponçage (bois de hêtre) ou soit de sciage (planche de MDF (Medium Density Fiber)). L'utilisation du Coulter Multisizer pour la mesure de la granulométrie de ces poussières n'est pas possible puisque ce compteur fonctionne en voie liquide. Ce capteur détecte le passage de particules (contenues dans un liquide) à travers un orifice. Dans le cas de la poussière de bois, l'orifice risque d'être colmaté et les particules hydrophiles verraient leur diamètre modifié par l'humidification. Nous avons donc opté pour l'utilisation d'un APS(TSI/3321) qui est présenté dans la Section 3.2.2. L'analyse granulométrique est réalisée sur un banc d'essais (figure 3.8) composé d'une grande longueur droite de canalisation (environ $10\,m$), et doté d'un piquage pour placer le prélèvement de l'aérosol. Cette canalisation est traversée par un débit d'air (mesuré à l'aide d'un diaphragme) réglé à $70\,m^3.h^{-1}$ ($U^{conduite} = 0.6\,m.s^{-1}$) afin de nous rapprocher de la vitesse dans la cabine ouverte. Nous injectons à un débit constant de la poussière assurant un concentration idéale pour



(a) Schéma de principe du banc



(b) Photographie du banc

FIGURE 3.8 – Banc d'essai pour la mesure de la granulométrie des poussières de bois

l'APS ($\approx 400\#.cm^{-3}$) et nous effectuons une mesure sur un temps d'environ 20 minutes. Cette injection est répétée cinq fois afin de vérifier la répétabilité de la mesure de la granulométrie. Les résultats obtenus pour les deux poussières utilisées (ponçage et sciage) sont présentés sur les figures 3.9 et 3.10.

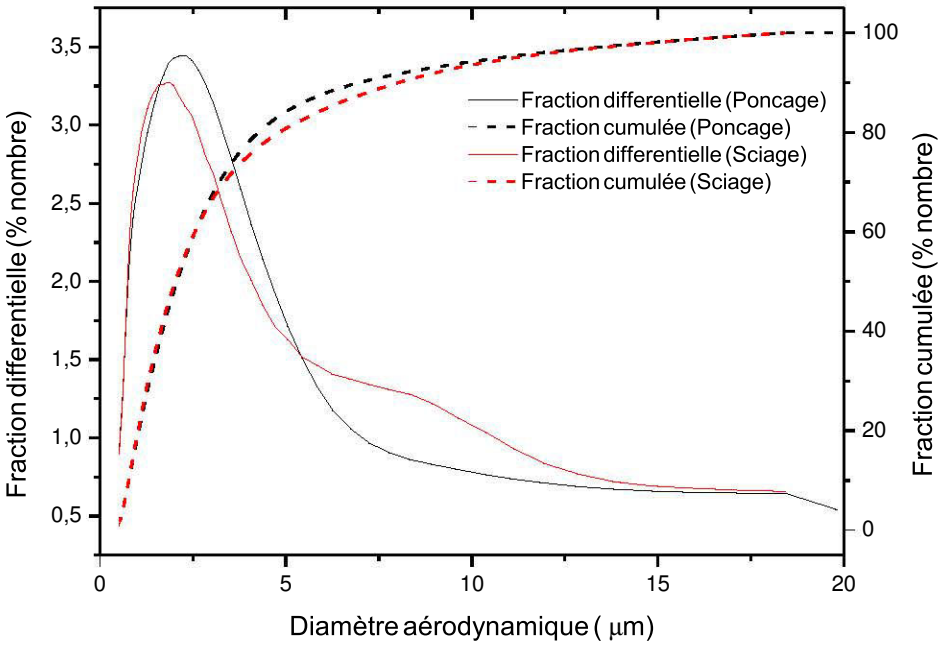


FIGURE 3.9 – Granulométrie en nombre mesurée par l'APS pour les poussières de bois

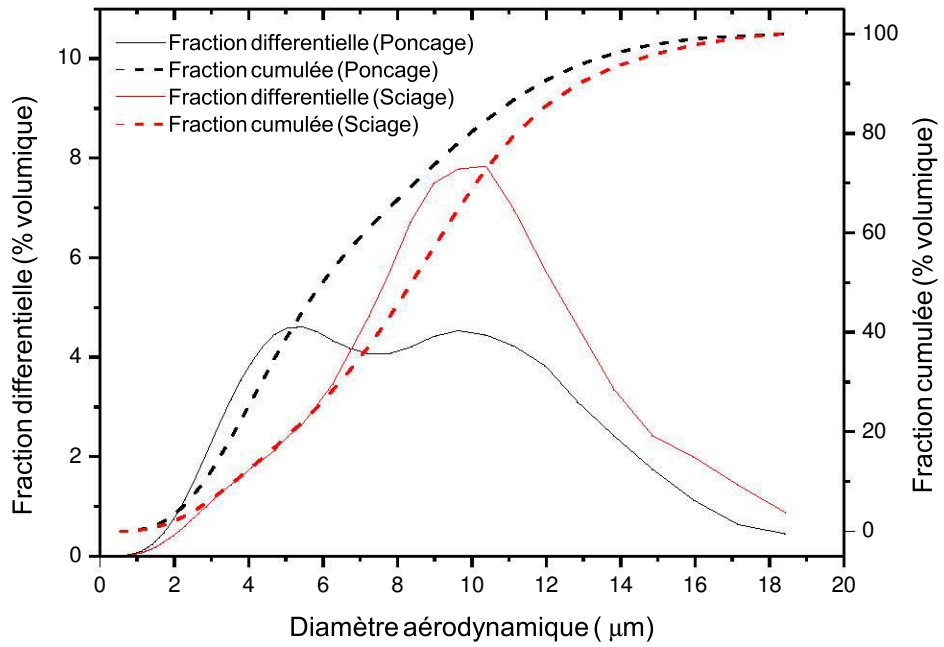


FIGURE 3.10 – Granulométrie en volume mesurée par l'APS pour les poussières de bois

La figure 3.9 montre que la granulométrie mesurée par l'APS pour le cas de la poussière de sciage et de ponçage est semblable. En effet, les deux granulométries sont centrées vers $2.5 - 3.5\,\mu m$. Cependant, nous pouvons constater la présence, dans le cas de la poussière de sciage, d'une fraction plus importante de particules de plus de $10\mu m$ qui n'est pas à négliger contrairement à la poussière de ponçage qui ne possède que très peu de particules dans ces dimensions. Le second graphique (figure 3.10) nous présente la granulométrie d'un point de vue volumique. On remarque que la proportion de particules de l'ordre de $10\,\mu m$ a un impact non négligeable sur cette granulométrie. En effet, dans le cas de la poussière de ponçage, cette très faible proportion de particules de l'ordre de $10\mu m$ a la même importance que la proportion de petites particules beaucoup plus nombreuses sur la granulométrie en volume. Alors que pour la poussière de sciage, cet impact est plus accentué puisque la contribution des petites particules sur le volume est très petite. La table 3.3, nous résume les diamètres moyens arithmétiques calculés pour les différentes poussières considérées. A noter que la mesure réalisée à l'aide du

POUSSIÈRE	DIAMÈTRE MOYEN ARITHMÉTIQUE	
	NOMBRE	VOLUME
	μm	
PONCAGE	3.4 ± 0.2	7.1 ± 0.4
SCIAGE	3.5 ± 0.3	8.7 ± 0.5

TABLE 3.3 – Diamètres moyens arithmétiques des différentes poussières de bois

compteur de particules (APS) ne correspond pas strictement à la granulométrie réelle de notre poussière de bois. En effet, il y a deux principaux éléments qui ne sont pas pris en compte dans cette analyse :

— La mesure s'effectue à une dizaine de mètres de notre source de particules afin d'avoir une concentration dans notre conduite homogène et aussi pour ne pas saturer le capteur. Cette configuration conduit à un dépôt de particules entre la source et la mesure qui n'est pas pris en compte lors de la mesure. Ce dépôt est évidemment beaucoup plus important dans le cas de la poussière de sciage, puisque celle-ci est composée de poussières plus grosse que celles obtenues lors du ponçage. Cependant, la mesure réalisée à cette distance permet d'obtenir un aperçu de la granulométrie de la fraction qui est en suspension dans l'air ;

— Le facteur de forme des particules de bois n'est pas pris en compte par l'APS qui le fixe à 1 (assimilant la forme des poussières à des sphères). La figure 3.11 représente une photographie de particules de bois par Microscopie à Balayage Électronique (MEB). On remarque très nettement que les particules de bois ne sont pas du tout sphériques et que

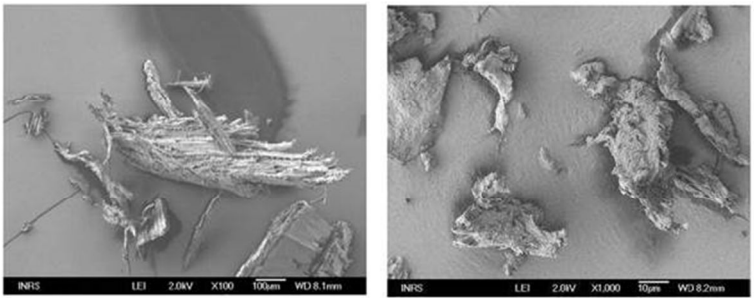


FIGURE 3.11 – Photographie MEB d'une particule de bois

la détermination d'un facteur de forme d'une telle particule est très complexe.

3.2.1.2 Machines électroportatives

Les machines électroportatives utilisées dans cette étude sont de deux types. La première catégorie est composée des ponceuses à bois (Figure 3.12) qui permettent d'effectuer des travaux de finitions. Les ponceuses sont utilisées avec des papiers abrasifs ayant plusieurs tailles de grains possible. Chaque taille de grains est définie par un chiffre correspondant au nombre de grains par cm^2. Plus le grain du papier est fin, plus le chiffre est grand. Par exemple :

— 80 correspond à un gros grain ;
— 120 correspond à un grain moyen ;
— 220 correspond à un grain fin.

Un seul grain de papier sera utilisé quelque soit le type de ponceuse utilisée dans cette étude.



FIGURE 3.12 – Photographie d'une ponceuse utilisée

La seconde catégorie est constituée des scies circulaires (figure 3.13) . Les scies sont des outils de découpe du bois. La qualité et la propreté de la découpe est fonction de la vitesse de rotation de la lame et du nombre de dents sur celle-ci.



FIGURE 3.13 – Photographie d'une scie circulaire utilisée

3.2.2 Métrologie des aérosols

Dans cette section, les différents appareils de mesures utilisés pour la mesure des aérosols sont présentés. Deux types de capteurs d'aérosols ont été testés :

— Une microbalance ;

— Plusieurs compteurs de particules.

Nous disposons d'un seul capteur de type microbalance (TEOM) et quatre compteurs de particules. Sur les quatre compteurs de particules, trois d'entre eux sont utilisés dans le banc d'essais (APS, Lighthouses, Dataram) et le quatrième (Coulter) est un analyseur de laboratoire permettant d'effectuer des granulométries de poudres. Tous ces capteurs sont détaillés dans les paragraphes suivants.

3.2.2.1 Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM-1405 \ Thermo Scientific)

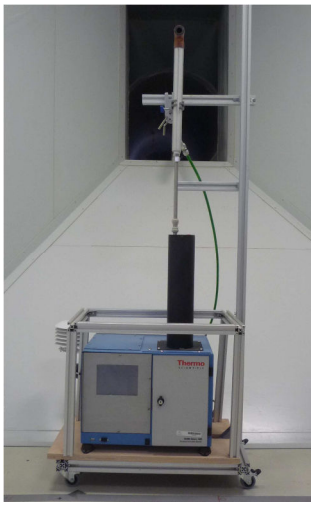


FIGURE 3.14 – Photographie du TEOM

Le TEOM est un analyseur massique de poussières atmosphériques (figure 3.14). Le principe de fonctionnement (figure 3.15) du TEOM repose sur l'utilisation d'un élément conique oscillant en verre.

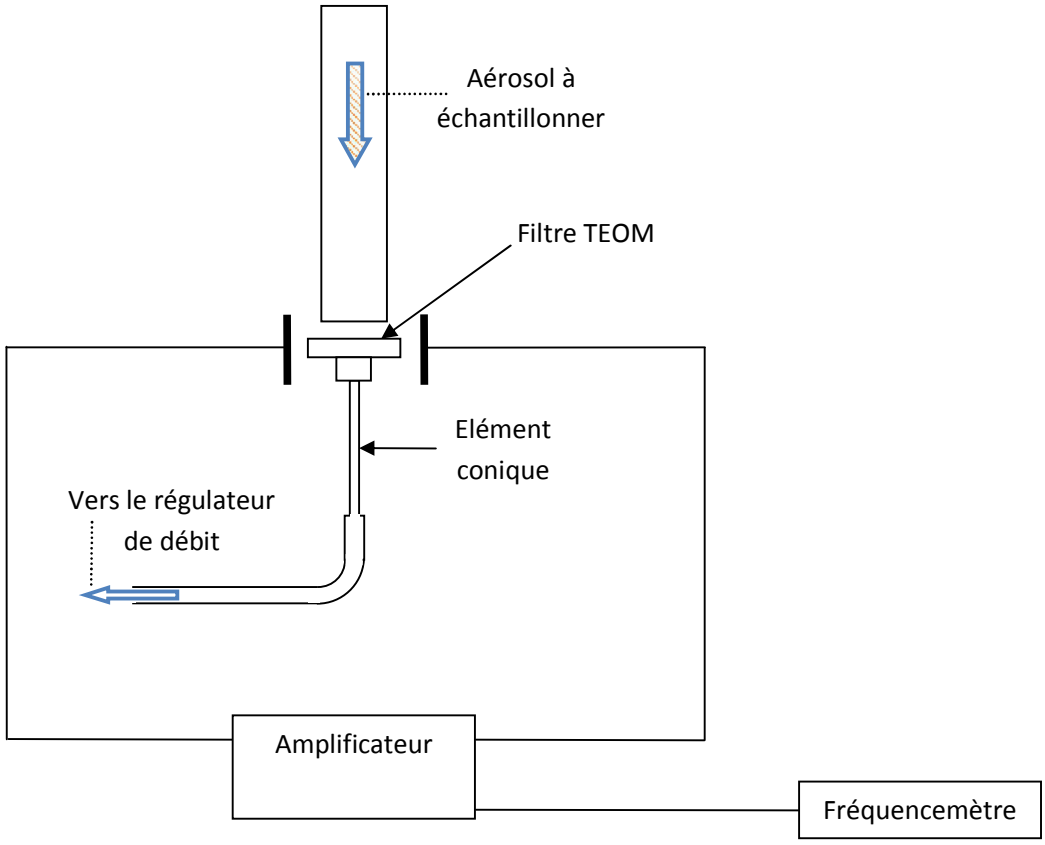


FIGURE 3.15 – Schéma du principe de fonctionnement du TEOM

Sur l'extrémité de ce cône se trouve un filtre où les particules se déposent pendant l'échantillonnage. Cet dépôt sur le filtre provoque une décroissance de la fréquence oscillatoire de l'élément conique qui permet de calculer un différentiel de masse sur le temps d'échantillonnage tel que :

$$\delta m = K_0 \times \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_0^2} \right), \tag{3.3}$$

avec δm la différence de masse entre le début et la fin du temps d'échantillonnage en g, K_0 la constante propre à l'élément oscillant en $g.s^{-2}$ (valant pour notre capteur $14168\,g.s^{-2}$), f_1 la fréquence d'oscillation du cône à la fin de l'échantillonnage en s^1et f_0 la fréquence en début d'échantillonnage. Le rapport entre cette masse et le volume de prélèvement durant l'échantillonnage nous permet de calculer la concentration massique moyenne. Ce capteur permet d'effectuer une mesure sur une gamme de concentration allant de $0.1\,g.m^{-3}$ jusque environ $1\,g.m^{-3}$. Nous plaçons le TEOM dans la cabine principale.

3.2.2.2 Coulter Multisizer 4

Le Coulter (figure 3.16) est un compteur de particules et de détermination de la taille de celles-ci. Cet appareil base son principe de fonctionnement sur la mesure d'un courant élec-



FIGURE 3.16 – Photographie du Coulter Multisizer

trique entre deux électrodes. Lorsqu'un courant passe entre deux électrodes par le biais d'une solution aqueuse électrolytique, une résistance entre ces électrodes peut être déterminée. Il est possible de compter des particules qui passent entre ces deux électrodes en enregistrant le signal électrique de celles-ci (figure 3.17). Un volume d'électrolyte équivalent au volume immergé de

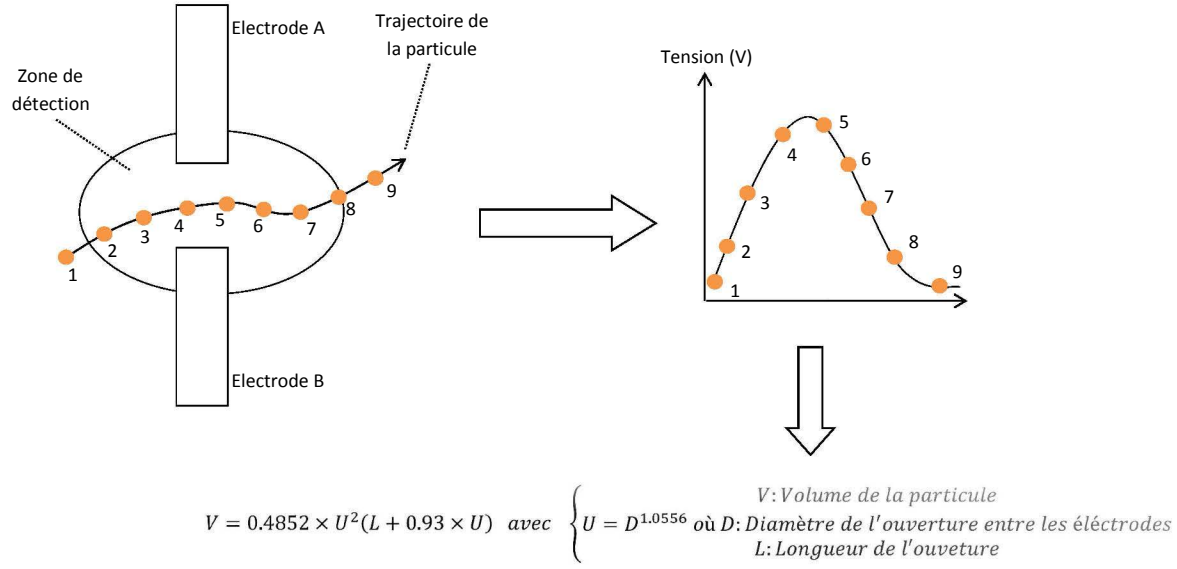


FIGURE 3.17 – Schéma du principe de fonctionnement du Coulter Multisizer

la particule est déplacé de la zone de détection. Ce déplacement provoque une variation de la résistance qui peut être directement mesurée par une impulsion de tension ou de courant. Cette

impulsion est proportionnelle au volume de la particule détectée. Il est donc possible de mesurer à partir de cet outil le nombre (système de comptage) et le volume des particules qui traversent la zone de détection entre les deux électrodes. Le volume ainsi déterminé peut être représenté par le diamètre sphérique équivalent. La réponse de cet appareil est essentiellement indépendante de la forme des particules ayant le même volume, une exception peut se faire dans des cas de formes extrêmes. La couleur ou l'indice de réfraction des particules n'ont pas d'incidence sur les résultats. Ce capteur permet de compter des particules ayant un diamètre volumique équivalent allant de 0.4 à 1200μm selon le diamètre d'ouverture entre les électrodes utilisées.

3.2.2.3 Aerodynamic Particle Sizer (APS-3321 \ TSI)

L'APS (figure 3.18) est un compteur de particules pouvant les classer sur 52 canaux de mesures allant de 0.5 à 20μm. La concentration maximale admise pour cet appareil est de 1000$\#cm^{-3}$. Cet appareil base sa mesure sur le temps de vol des particules entre deux faisceaux



FIGURE 3.18 – Photographie de l'APS

laser (très proches) situés dans la cellule de détection. Ce type de mesure permet de déterminer le diamètre aérodynamique des particules étudiées sans qu'il soit nécessaire d'en connaitre les propriétés optiques et morphologiques (indice optique, forme ...). En effet, le temps de vol

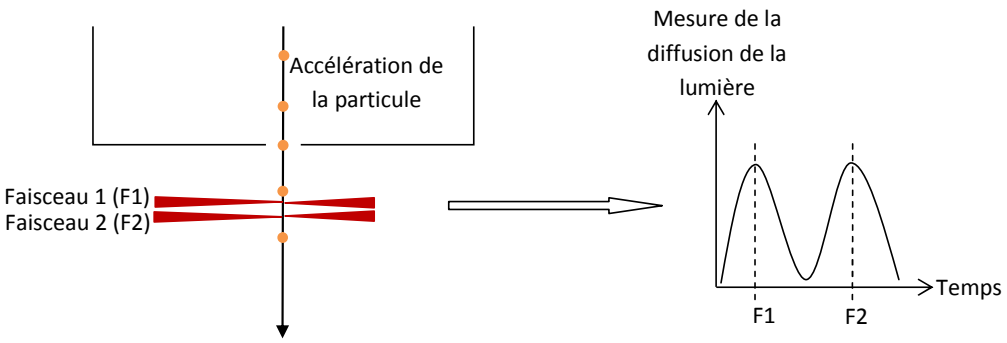


FIGURE 3.19 – Signal généré par les deux faisceaux laser lors du passage d'une particule

mesuré de la particule et l'accélération connue de l'écoulement de l'air dans la cellule sont directement reliés au diamètre de la particule par une calibration de l'appareil en amont. Le modèle 3321 de l'APS utilise un système optique avec deux faisceaux laser se recouvrant partiellement pour détecter une coïncidence. Ces faisceaux génèrent un signal à deux crêtes lors du passage d'une particule au travers (figure 3.19). Le temps entre l'apparition des deux crêtes correspond au temps de vol de la particule. La figure 3.20 représente les différents évènements susceptibles de ce produire durant une mesure par l'APS.

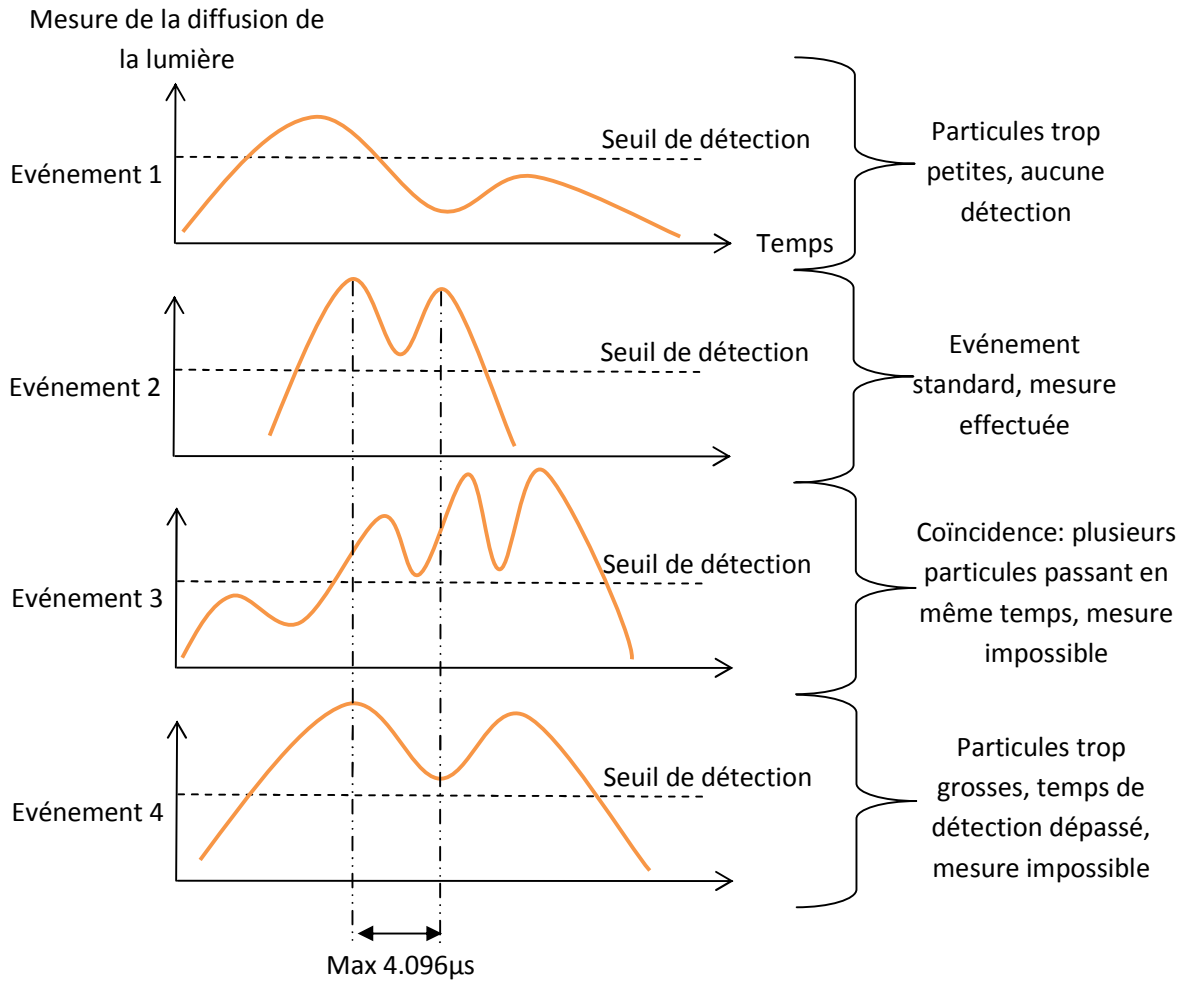


FIGURE 3.20 – Evénement de mesure de l'APS

L'APS étant le capteur permettant de faire une acquisition toutes les secondes et ayant le plus de canaux de mesures, nous avons décidé de le placer dans la conduite d'extraction. La mesure est effectuée en moyennant 5 points de prélèvement isocinétiques placés en croix dans la conduite d'extraction (figure 3.21).

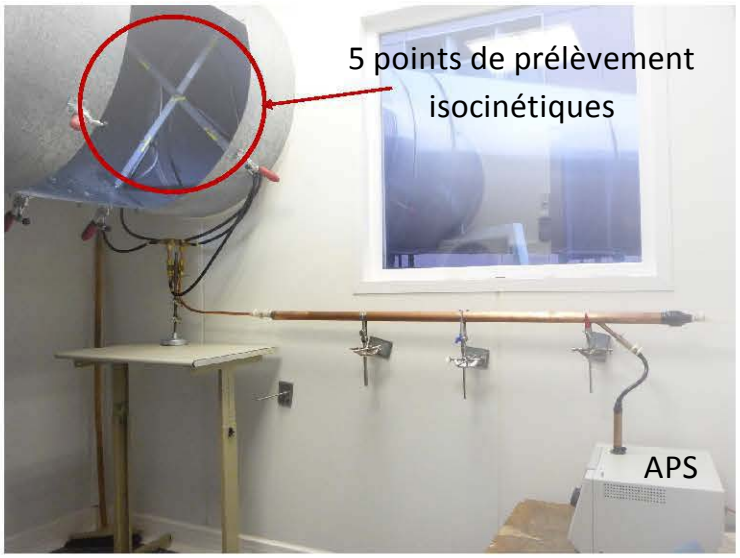


FIGURE 3.21 – Photographie de la mesure isocinétique avec l'APS

3.2.2.4 Lighthouse (Handheld-3016 \ Worldwide solution)

Cet appareil (figure 3.22) est un compteur de particules qui base son principe de fonctionnement sur la photométrie. Ce compteur effectue un comptage en classe (6 classes de mesure



FIGURE 3.22 – Photographie d'un lighthouse

sur une plage de taille de particules allant de 0.3 μm à 25 μm) de particules selon leur diamètre aérodynamique. L'étalonnage de ce compteur est effectué en usine à l'aide de billes parfaitement sphériques de latex auxquelles sont associées des réponses électriques en fonction du

diamètre. Dans notre cas des poussières de bois, celles-ci ne sont pas comparables aux billes de latex puisqu'elles ne sont pas sphériques et n'ont pas le même indice de réfraction. Par conséquent, le Lighthouse ne mesure pas un diamètre aérodynamique mais un diamètre optique. Le lighthouse effectue un calcul de la concentration massique de chaque taille de particules. La concentration en particules d'une classe est donnée par la relation suivante :

$$C_{n_i} = \frac{n_i}{V}, \tag{3.4}$$

où n_i est le nombre de particules comptées par classe et V est le volume prélevé sachant que le débit d'aspiration de l'appareil est de $2.81\,l.min^{-1}$. La concentration massique s'écrit donc :

$$C_m = \frac{\pi \rho_p}{6} \sum_{i=1}^{n} C_{n_i} \bar{d_{p_i}}^3, \tag{3.5}$$

avec $\bar{d_{p_i}}$ le diamètre médian de la classe granulométrique i.

3.2.2.5 DataRam (pDR-1500 \ Thermo Scientific)

Le personnal DataRam pDR-1500 (figure 3.23) est un néphélomètre qui permet une mesure en temps réel de la concentration massique des poussières en suspension dans l'air. Cet appareil



FIGURE 3.23 – DataRam pDR-1500

dispose de divers cyclones permettant de pré-sélectionner différentes fractions de tailles de particules (poussières totales, poussières thoraciques PM-10 ou alvéolaires PM-4, poussières PM-2.5 et PM-1.0). Après le cyclonage, les particules dont le diamètre aérodynamique correspond à la fraction souhaitée pénètrent dans la cellule de mesure illuminée par une diode émettant dans le proche infra-rouge. La lumière diffusée par les particules présentes dans la cellule de mesure

est focalisée sur un photo-détecteur. Le signal de mesure émis par le photo-détecteur est calibré pour fournir une concentration massique en particules en suspension dans l'air ambiant. Ce capteur permet d'effectuer un très grand nombre nombre d'acquisitions (50 000 mesures possibles dans la mémoire interne) et la gamme de mesure varie de 0.001 à $400 mg.m^{-3}$. La précision de la mesure est de l'ordre de $1\,\mu g.m^{-3}$. Ces capteurs sont placés dans la cabine principale.

3.2.2.6 Résumé des différentes métrologies utilisées et de leurs principales caractéristiques

Nous avons sélectionné quatre types de capteurs différents pour notre étude. La table 3.4 résume leurs principales caractéristiques.

	TEOM	APS	Lighthouse	DataRam
Type de capteur	microbalance	compteur de particules		néphélomètre
		Diamètre aérodynamique	Diamètre optique	
Gamme de mesure	poussières totales	$0.5-20\,\mu m$	$0.3-25\,\mu m$	poussières totales
Concentration maximale	$>1\,g.m^{-3}$	$1000\#.cm^{-3}$	$140\#.cm^{-3}$	$400\,mg.m^{-3}$
Débit de prélèvement	$2-2.5\,l.min^{-1}$	$5\,l.min^{-1}$	$2.8\,l.min^{-1}$	$1\,l.min^{-1}$

TABLE 3.4 – Principales caractéristiques des capteurs utilisés

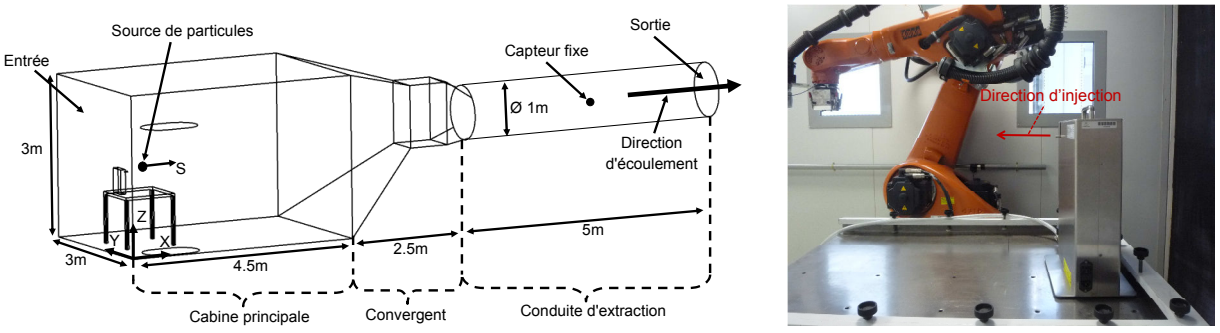
Dans cette partie, nous avons décrit les différents éléments (génération/métrologie des aérosols) constituant le banc d'essais. La section suivante de ce chapitre est consacrée aux différentes configurations qui seront employées pour l'application des méthodes d'estimations.

3.3 Configurations testées dans l'application de la méthode d'estimation

Dans cette partie, nous allons détailler de façon exhaustive les différentes configurations (position de la (des) source(s)) qui sont utilisées dans le cas des essais expérimentaux et/ou des simulations numériques.

— *Configuration 1 :*

La première configuration correspond à la configuration dite standard. Dans ce cas, la source de polluant est placée à l'entrée de la cabine et sa direction d'émission est dans le sens de l'écoulement global (suivant l'axe X). La figure 3.24, résume la configuration 1. La source dans cette configuration est positionnée à une hauteur de $H = 1.4m$ (suivant Z), à une distance de $X = 1m$ de l'entrée de la cabine et à $Y = 1.5m$.



(a) Schéma de la configuration 1

(b) Photo de la configuration 1

FIGURE 3.24 – Présentation de la configuration 1

— *Configuration 2 :*

Cette configuration est uniquement utilisée dans le cas numérique. La position de la source est similaire à la configuration 1 mais celle-ci émet dans 4 directions différentes (figure 3.25). Cette configuration est utilisée afin d'évaluer l'efficacité de la méthode d'estimation à reconstruire chaque direction indépendamment les unes des autres.

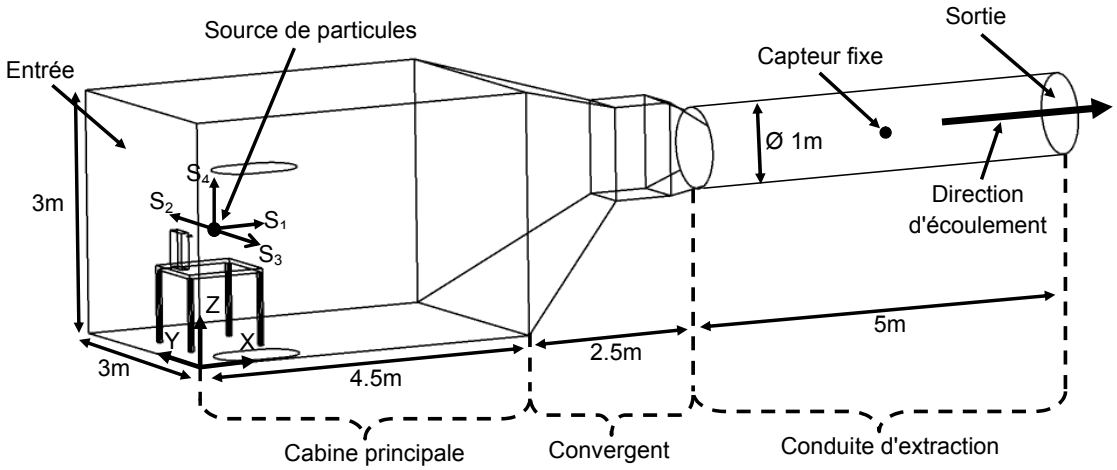
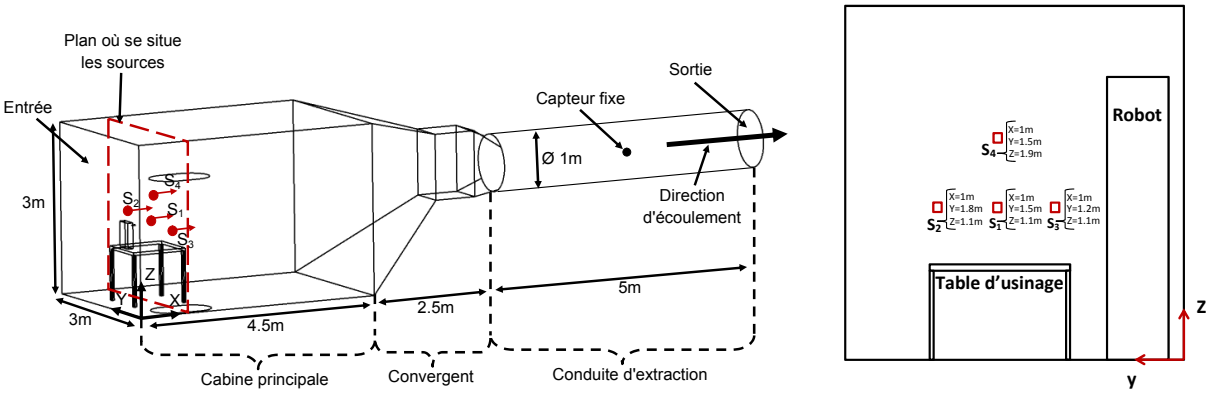


FIGURE 3.25 – Présentation de la configuration 2

— *Configuration 3 :*

Dans cette troisième configuration (utilisée elle aussi uniquement en simulation numérique), 4 sources éloignées les unes des autres (figure 3.26) sont mises en place. Ces sources sont placées sur le plan situé à $X = 1m$, à des postions Y et Z variables et l'émission des particules se fait dans le sens de l'écoulement (semblable à la configuration 1). Cette configuration est utilisée dans le but d'évaluer l'efficacité de la méthode à estimer différentes sources distantes les unes des autres.



(a) Schéma 3D de la position des 4 sources

(b) Position des 4 sources sur le plan X=1m

FIGURE 3.26 – Présentation de la configuration 3

— *Configuration 4 :*

La quatrième configuration mise en place est utilisée uniquement dans le domaine expérimental. Cette configuration consiste à installer un ventilateur face à la source (Configuration 1) soufflant à contre-courant de celle-ci (figure 3.27).

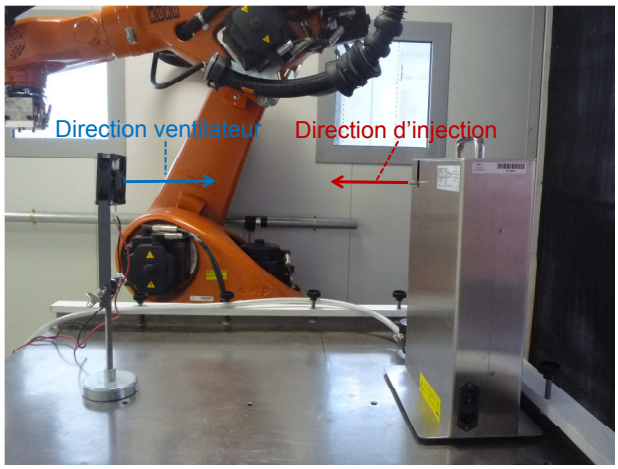
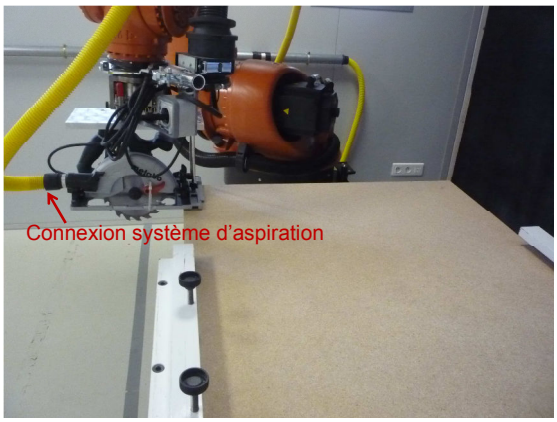


FIGURE 3.27 – Présentation de la configuration 4

— *Configuration 5 :*
La figure 3.28 représente la configuration 5 qui correspond à l'utilisation des machines portatives. La figure 3.28a présente l'utilisation d'une ponceuse par un opérateur et la Figure 3.28b est celle de l'utilisation d'une scie circulaire par le Robot KUKA KR60.



(a) Photo de l'opérateur maniant la ponceuse



(b) Photo du robot KUKA maniant la scie circulaire

FIGURE 3.28 – Présentation de la configuration 5

Toutes ces configurations ont trois objectifs distincts. Tout d'abord, la configuration 1 est utilisée dans le but de valider les méthodes d'estimation que ce soit dans le cas stationnaire et instationnaire. Ensuite, les configuration 2, 3 et 4 sont employées pour étudier la robustesse et les limites de la méthode d'estimation. Finalement, la configuration 5 est celle qui correspond à la phase où l'émission des machines électroportatives sera estimée. Après avoir présenté dans le chapitre 2 la physique des aérosols et dans celui-ci les outils qui seront utilisés, nous aborderons dans le chapitre suivant la méthode d'estimation dans le cas de sources stationnaires ainsi qu'une étude des limites de cette méthode.

Chapitre 4

Estimation de l'intensité d'une source de particules en régime stationnaire et aide au positionnement des capteurs

Dans ce chapitre, les débits d'émissions des sources de particules sont stationnaires et les conditions aux limites du local (débit d'air, température ambiante, etc...) sont, elles aussi, invariables dans le temps. A partir de ce postulat, tout d'abord, une méthode d'estimation de l'intensité d'une source de polluants particulaire sera mise en place. Par la suite, l'utilisation de celle-ci afin de proposer une démarche d'aide au positionnement des capteurs sera présentée. Ces deux méthodes sont initialement appliquées à la simulation numérique dans le but de valider la faisabilité d'une estimation de source et d'aider au positionnement des capteurs. La méthode est, ensuite, utilisée dans le cas expérimental afin de valider sa possible utilisation sur le terrain. Pour finir, le comportement de la méthode d'estimation dans différentes configurations d'application pouvant se présenter sur le terrain est étudié.

4.1 Méthode d'estimation et aide au positionnement des capteurs

4.1.1 Méthode générale d'estimation

Si l'on admet que la concentration en particules suit la loi de transport de Zaichik et al. [2010] (Diffuso-Inertia Model) ou Chen et al. [2006] (Drift Flux) (voir Chapitre 2) et si les conditions limites sont homogènes (proportionnalité à la concentration C ou constante) alors, il y a une linéarité entre la concentration et les débits sources. Dans ces conditions, il est possible

d'appliquer une méthode similaire à celle proposée par Braconnier and Bonthoux [2007] pour estimer N sources à partir de l'information recueillie par un nombre fini $M \geq N$ de mesures de concentration C_i à des postes fixes (i). Braconnier and Bonthoux [2007] ont utilisé cette méthode dans le cas d'un polluant gazeux dans un local ventilé. Nous pouvons définir l'expression de la concentration C_i comme étant la somme d'un bruit de fond f_i et de l'apport en particules des différentes sources situées dans le local.

$$C_i = f_i + \sum_{j=1}^{N} S_j \Lambda_{ij}. \tag{4.1}$$

Dans l'équation 4.1, l'apport en particules des sources à la concentration est défini par la somme des produits des débits sources (S_j) par les coefficients de transfert (Λ_{ij}). Ces coefficients varient d'un point de mesure à l'autre puisqu'ils sont directement fonction de l'écoulement des particules dans le local. La première étape de la méthode d'estimation consiste à calibrer les coefficients de la matrice de transfert (Λ). Cette calibration se fait en trois temps :

1. Mesure du bruit de fond présent dans l'enceinte à tous les points de mesure lorsque aucune source n'émet.

2. Mesure de la concentration aux M points résultant de l'action indépendante de chacune des sources j. L'émission des sources dans cette phase doit être parfaitement contrôlée (granulométrie maitrisée, débit connu S_{cal_j}, etc.). Nous construisons ainsi la matrice des concentrations mesurées $\mathbf{C_{cal}}$:

$$\mathbf{C_{cal}} = \begin{bmatrix} C_{point\,1}^{source\,1} & C_{point\,1}^{source\,2} & \cdots & C_{point\,1}^{source\,N} \\ C_{point\,2}^{source\,1} & C_{point\,2}^{source\,2} & \cdots & C_{point\,2}^{source\,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{point\,M}^{source\,1} & C_{point\,M}^{source\,2} & \cdots & C_{point\,M}^{source\,N} \end{bmatrix}. \tag{4.2}$$

3. Calcul des coefficients λ_{ij} à partir du bruit de fond et des mesures de concentration obtenues :

$$\lambda_{ij} = \frac{C_{cal_{ij}} - f_i}{S_{cal_j}}. \tag{4.3}$$

La relation (4.3) permet de construire la matrice Λ composée des coefficients de transfert Λ_{ij} (équation 4.4). Chaque coefficient représente l'intensité de la réponse (en un point) à l'injection

de particules de chaque source pondérée par l'erreur de mesure typique σ_i au point i.

$$\Lambda_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\sigma_i^{source\ j}} \ . \tag{4.4}$$

Nous pouvons remarquer que plus la concentration mesurée en un point est grande et plus son coefficient Λ_{ij} relatif à la source S_j est grand lui aussi. Après avoir calculé chaque coefficient de la matrice de transfert, nous pouvons passer à la seconde étape qui consiste à estimer le débit source. Dans cette étape, nous estimons les N facteurs contributifs (débit des sources $S_j^{inconnu}$) à l'aide des coefficients de transfert (4.4) et des M mesures de concentration. L'expression générale de la concentration mesurée reste similaire à l'équation (4.1) mais fait intervenir les débits inconnus $S_j^{inconnu}$:

$$C_i^{mesure} = f_i + \sum_{j=1}^{N} S_j^{inconnu} \Lambda_{ij}. \tag{4.5}$$

La détermination des débits $S_j^{inconnu}$ se fait par la méthode des moindres carrés ordinaires. L'estimateur des moindres carrés ordinaires S_{MCO} est le vecteur (des débits inconnus) qui minimise la quantité $\chi^2(S)$. Cette quantité représente la somme des carrés des écarts des valeurs mesurées $y = \frac{C_i^{mesure}}{\sigma_i}$ à la droite $\hat{y} = a \times x$ où a correspond aux coefficients de transfert et x aux débits des sources. Le principe de cette méthode est de minimiser au maximum cet écart tel que :

$$\chi^2(S) = \sum_{i=1}^{M} \left(\left(\sum_{j=1}^{N} \Lambda_{ij} S_j^{inconnu} \right) - \frac{C_i^{mesure}}{\sigma_i} \right)^2 . \tag{4.6}$$

La relation (4.6) peut se mettre sous la forme :

$$\chi^2(S) = \| \Lambda \ \mathrm{x} \ S^{inconnu} - C^{mesure} \|^2, \tag{4.7}$$

où $\|.\|$ désigne la norme euclidienne. La minimisation de $\chi^2(S)$ se fait en adjoignant une contrainte de non-négativité sur les débits à estimer ($S_j^{inconnu}$) selon l'algorithme NNLS (Non-Negative Least Squares) Lawson and Hanson [1974], Stark et al. [1995]. La variance des débits estimés $var(S_j^{inconnu})$ s'obtient par la relation (4.8).

$$var(S_j^{inconnu}) = s^2 \sum_{k=1}^{N} \left(\frac{V_{jk}}{W_{kk}} \right)^2 , \tag{4.8}$$

où les matrices **V** et **W** sont obtenues par la décomposition en valeurs singulières SVD (Lascaux and Theodor [1987], Press et al. [2007]) de la matrice de transfert Λ et s^2 est la variance résiduelle de la régression linéaire telle que $s^2 = \frac{1}{M-N} * \chi^2(S_{MCO})$. La méthode générale de la SVD est présentée dans le paragraphe 4.1.2. Par conséquent, l'écart type des estimations se traduit par :

$$\sigma_{S_j^{inconnu}} = \sqrt{var(S_j^{inconnu})}. \tag{4.9}$$

4.1.2 Principe de la Décomposition en Valeurs Singulières (SVD)

Dans notre étude, le problème à résoudre est linéaire défini par l'équation 4.5 où le nombre de mesures (M) de concentration est supérieur ou égal au nombre (N) de débits source à estimer ($S_j^{inconnu}$). La matrice Λ est une matrice rectangulaire à coefficients réels de dimension ($M \times N$) avec $M \geq N$. Cette matrice peut se décomposer sous la forme :

$$\Lambda = \left[\mathbf{U}\right] \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & w_{NN} \end{bmatrix} \left[\mathbf{V^T}\right]. \tag{4.10}$$

Dans l'expression (4.10) qui est appelée SVD « compacte », nous avons :

— $\mathbf{U}$ est une matrice orthogonale de dimension ($M \times N$) où ses vecteurs colonnes sont de norme unité, perpendiculaires deux à deux et $\mathbf{U^T U} = \mathbf{I}_N$. Où $\mathbf{I}_N$ est la matrice identité de taille ($N \times N$). Les colonnes de la matrice $\mathbf{U}$ sont construites par les N premiers vecteurs propres, classés par valeurs propres décroissantes, de la matrice $\Lambda\Lambda^T$.

— $\mathbf{W}$ est une matrice carrée et diagonale de dimension ($N \times N$) contenant les N valeurs singulières w_{ii} de la matrice Λ. Ces valeurs sont classées par ordre décroissant tel que $w_{11} \geq w_{22} \geq \cdots \geq w_{NN}$. Ces valeurs singulières sont par définition les racines carrées des valeurs propres de la matrice $\Lambda^T\Lambda$.

— $\mathbf{V}$ est une matrice orthogonale carrée de dimension ($N \times N$) où $\mathbf{V^T V} = \mathbf{I}_N$. Les colonnes de la matrice $\mathbf{V}$ représentent les N vecteurs propres, classés par valeurs propres décroissantes, de la matrice $\Lambda^T\Lambda$.

La décomposition en valeurs singulières intervient aussi bien dans l'estimation de sources que dans l'aide au positionnement des capteurs qui est présentée ci-après.

4.1.3 Aide au positionnement des capteurs

Dans la partie (4.1.1), nous avons présenté la méthode permettant d'estimer N sources de particules à partir de M mesures. D'une manière théorique le nombre de points de mesures peut être très important mais dans la réalité il est limité à la quantité de capteurs dont nous disposons. La question du choix de la position optimale des capteurs se pose. Afin d'effectuer un choix, nous mettons en place un critère de comparaison qui se base sur la variance des débits estimés. L'utilisation d'une simulation numérique (par CFD) du transport des particules dans le domaine étudié permet de choisir le positionnement des capteurs de manière à estimer au mieux la/les source(s). En effet, ce type de simulation permet de placer un très grand nombre de capteurs virtuels et de tester de nombreuses combinaisons de positions.

Dans un premier temps, de nombreux capteurs (au nombre de M) sont positionnés de manière uniforme dans le local étudié. Ces capteurs virtuels sont pré-positionnés dans les zones où les particules sont susceptibles d'être transportées par l'écoulement d'air. En effet, il n'est pas judicieux d'étudier les positions de capteurs où, d'après la CFD, aucune particule n'est présente. Nous créons tous les ensembles ω de capteurs possibles de m parmi M, ce qui donne un nombre total de combinaisons possibles de N_c (Avec $N_c = C_M^m$ qui est très grand). Pour chaque combinaison ω_θ (avec θ allant de 1 à N_c), nous calculons de façon analogue à l'équation (4.4) la matrice de transfert Λ^θ.

$$\Lambda^\theta = \frac{\lambda_{lj}}{\hat{\sigma}_l} \ \{l \in \omega_\theta\}. \tag{4.11}$$

En l'absence d'information plus détaillée sur les mesures réalisées, on considère que le problème est indépendant de l'écart-type est nous le fixons à une valeur unitaire $\hat{\sigma}_l = 1$.

Lorsque les matrices de transfert de chaque ensemble sont obtenues, la variance des débits estimés peut être calculée d'une manière similaire à l'équation (4.8).

$$var_\theta(S_j^{inconnu}) = s_\theta^2 \sum_{k=1}^{N} \left(\frac{V_{jk}^\theta}{W_{kk}^\theta} \right)^2, \tag{4.12}$$

où les matrices $\mathbf{V}^\theta$ et $\mathbf{W}^\theta$ sont les matrices résultantes de la SVD de Λ^θ de chaque ensemble. La variance résiduelle s_θ^2 de la minimisation reste inconnue puisque nous n'effectuons pas la résolution des moindres carrées dans cette étape de positionnement de capteurs. Toutefois, afin de minimiser la variance, nous considérons que si l'un des deux termes est minimisé alors celle-ci le sera (nous faisons l'hypothèse que les deux termes suivent la même tendance selon l'ensemble considéré). Étant donné que l'objectif visé consiste à réaliser un classement selon un critère relatif des ensembles ω_θ, nous pouvons lui affecter une valeur arbitraire et pour simplifier les calculs la fixer à $s_\theta^2 = 1$. Avec cette valeur, la relation (4.12) devient :

$$var_\theta(S_j^{inconnu}) = \sum_{k=1}^{N} \left(\frac{V_{jk}^\theta}{W_{kk}^\theta} \right)^2. \tag{4.13}$$

La variance est normalisée pour chaque ensemble par sa valeur maximale (équation 4.14). Cette normalisation permettra de classer les ensembles de capteurs sur une échelle allant de 0 à 1.

$$\Gamma^\theta = \frac{\sum_{j=1}^{N} var_\theta(S_j^{inconnu})}{max(\sum_{j=1}^{N} var_\theta(S_j^{inconnu}))}, \tag{4.14}$$

où Γ^θ est le critère de comparaison normalisé. Ce critère permettra de choisir l'ensemble de capteur en sachant que plus Γ^θ est petit et plus l'ensemble est de bonne qualité.

Dans cette première section du chapitre, une méthode d'estimation de l'intensité d'une ou plusieurs sources de particules en régime stationnaire ainsi que le procédé d'aide au positionnement des capteurs ont été définis. Ces deux méthodes vont être initialement exploitées d'un point de vue numérique (simulation CFD) puis expérimental dans le but de valider le processus d'estimation et afin d'analyser le positionnement des capteurs. Ensuite, une évaluation des limites de la méthode afin d'étudier son applicabilité sur le terrain est réalisée.

4.1.4 Résumé de l'application de la méthode

L'utilisation de la méthode consiste à suivre les étapes suivantes :

1. Étape facultative : les positions optimales des capteurs peuvent être déterminées en utilisant la méthode décrite dans le paragraphe 4.1.3 (de préférence en utilisant une modélisation CFD plutôt qu'une procédure expérimentale pour des raisons de simplicité).
2. Une source de référence d'aérosol contrôlable et stationnaire est placée à proximité de chaque source réelle qui doit être estimée (si une seule source de référence est disponible, elle peut être utilisée successivement pour chaque source inconnue).
3. Les capteurs de concentration en aérosol sont placés dans le champ lointain (leur nombre doit être supérieur ou égal au nombre de sources).
4. Les coefficients de transfert sont déterminés.
5. Le taux d'émission de(s) source(s) est estimé grâce à l'optimisation des moindres carrés donnée par l'équation 4.6 .

4.2 Application de la méthode d'estimation

Dans cette section nous détaillons, tout d'abord, la validation de cette méthode d'estimation d'une façon numérique et expérimentale. Ensuite, nous étudierons la robustesse de la méthode (numériquement et expérimentalement) à différentes configurations pouvant être rencontrées sur le terrain.

4.2.1 Validation numérique et expérimentale de la méthode d'estimation

On étudie dans ce paragraphe la configuration 1, afin de valider la méthode d'abord sur un cas simulé (CFD) puis expérimentalement.

4.2.1.1 Application numérique de la méthode à la configuration 1

Positionnement préalable des capteurs virtuels (cas numérique)

Afin de positionner judicieusement les capteurs virtuels, nous avons réalisé une simulation de l'écoulement des particules dans la cabine ventilée ouverte (modèles utilisés présentés dans le Chapitre 2 et géométrie de la cabine dans le Chapitre 3). La dispersion des particules est observée sur deux plans distincts. Le premier plan est appelé « plan médian » et le second « plan d'injection » (cf figure 4.1). La figure 4.2 représente, à titre indicatif (pour un débit d'émission

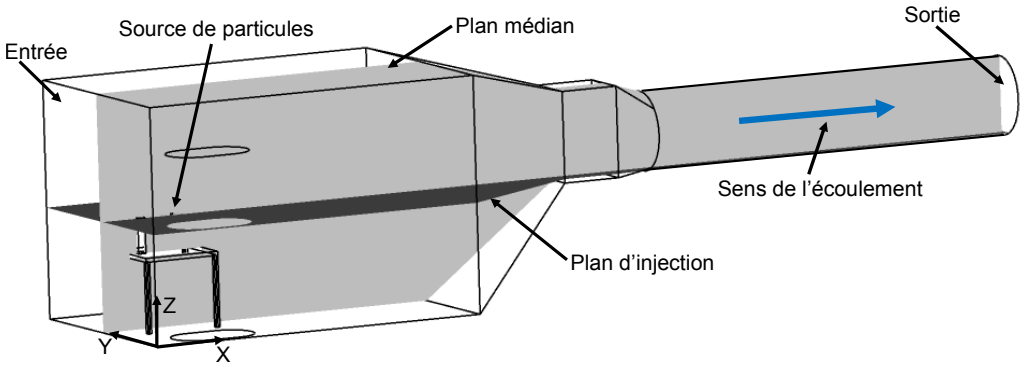


FIGURE 4.1 – Localisation des plans d'observations

de particules programmé de $1\,g.s^{-1}$), la concentration en particules suivant les deux plans de la simulation CFD afin de déterminer quelles seront les positions pré-sélectionnées des capteurs. Nous constatons, d'après ce résultat, que les particules ne se dispersent pas dans toute la cabine ouverte mais se concentrent dans une zone restreinte en fond de cabine avant d'être évacuée dans la conduite d'extraction. Cette simulation permet de positionner un nombre de 40 capteurs virtuels dans cette zone. Ces capteurs se placent suivant deux réseaux de 5×4 points (figure 4.3). Nous rappelons que la méthode d'estimation fait l'hypothèse d'une mesure en champ lointain afin que les perturbations occasionnées par le système d'injection n'influencent pas la mesure et que les capteurs doivent être positionnés en conséquence. De plus, dans notre cas, un capteur fixe est placé dans la conduite d'extraction. Faisant un total de 41 capteurs virtuels dans les simulations.

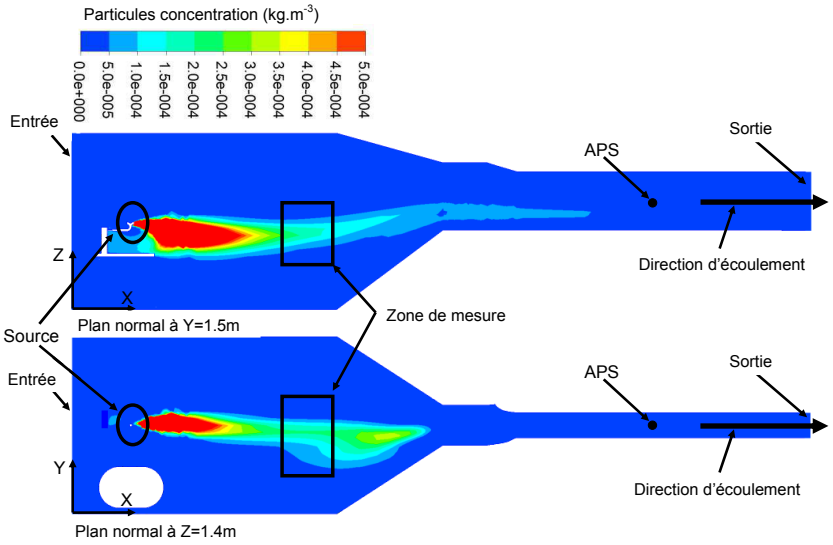


FIGURE 4.2 – Concentration en particules calculée par CFD dans la cabine

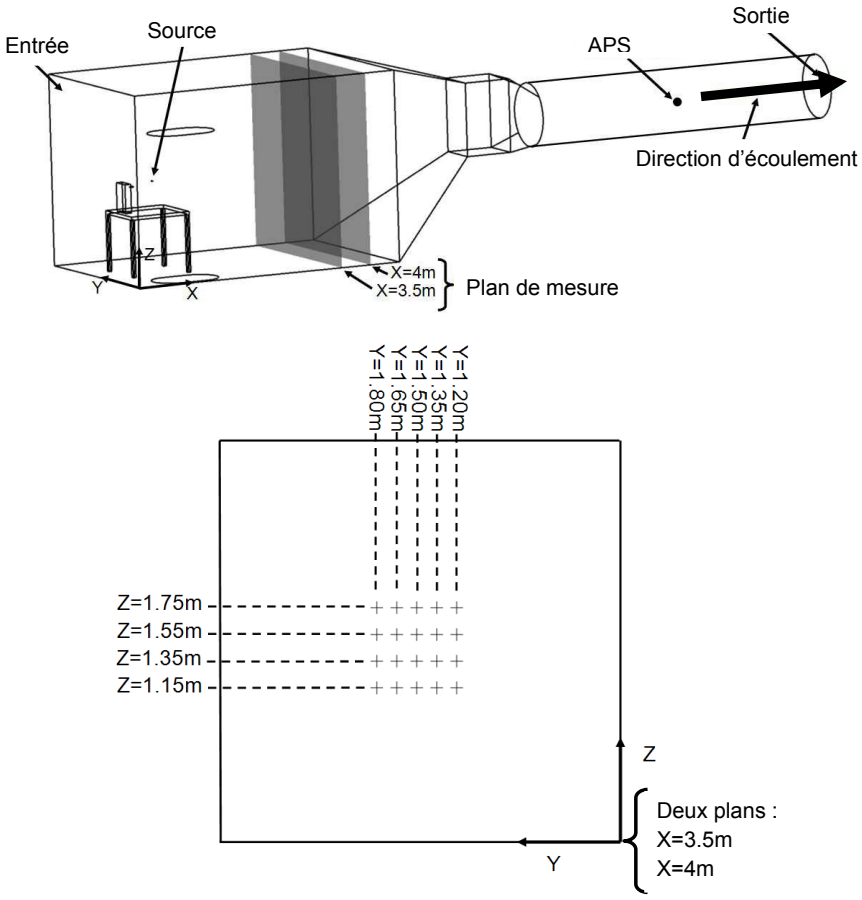


FIGURE 4.3 – Disposition des points de mesure virtuels

Estimation de la source de particules par 41 capteurs virtuels (cas numérique)

$1^{ère}$ étape : Détermination des coefficients de la matrice de transfert Λ

Dans ce paragraphe, la méthode d'estimation est utilisée dans le cas de la configuration 1 ayant un nombre de sources $N = 1$. Le nombre de capteurs virtuels maximum qui sont pré-positionnés est de $M = 41$.

La première étape de la méthode consiste à calculer les coefficients de transfert selon les équations 4.3 et 4.4. Pour ce faire, une simulation où la source de particules est active avec un débit massique s'élevant arbitrairement à $1 g.s^{-1}$ est réalisée (simulation avec le débit de calibration). La figure 4.4 représente les concentrations calculées aux 41 points pour ce cas de référence.

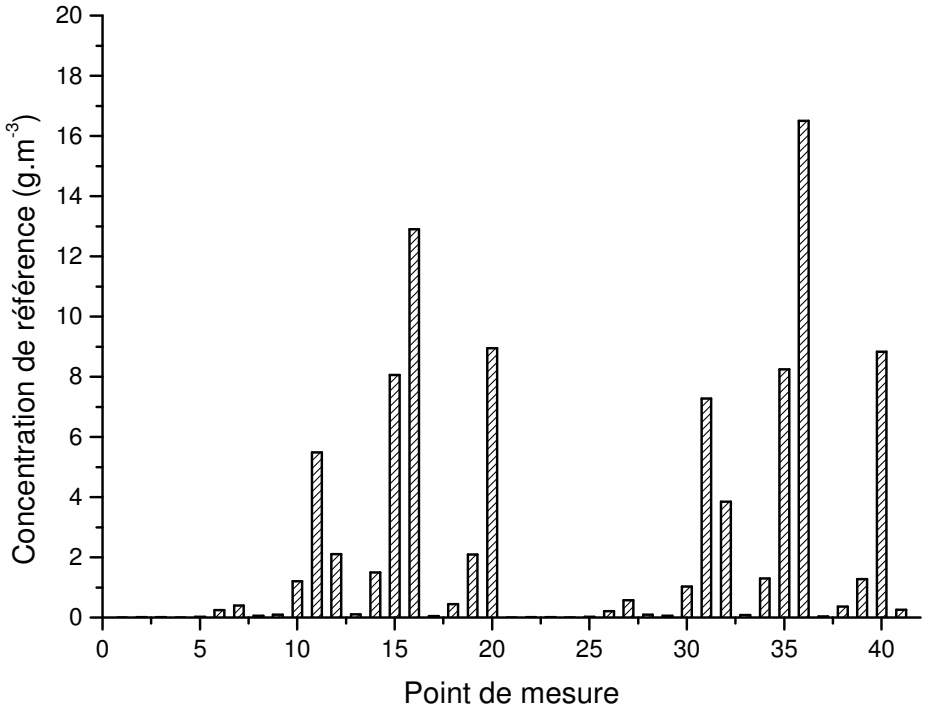


FIGURE 4.4 – Concentration calculée par la CFD pour un débit d'injection de $1\,g.s^{-1}$

D'après l'équation 4.3, la différence entre la concentration de référence $C_{cal_{ij}}$ et la concentration en bruit de fond f_i permet de déterminer les coefficients de transfert. Or le bruit de fond

étant nul dans le cas de la simulation numérique, celui-ci n'aura pas d'impact sur le calcul des coefficients de transfert. Ces coefficients sont représentés sur la figure 4.5 et sont donc semblables aux concentrations de référence. Les coefficients sont de différentes amplitudes selon

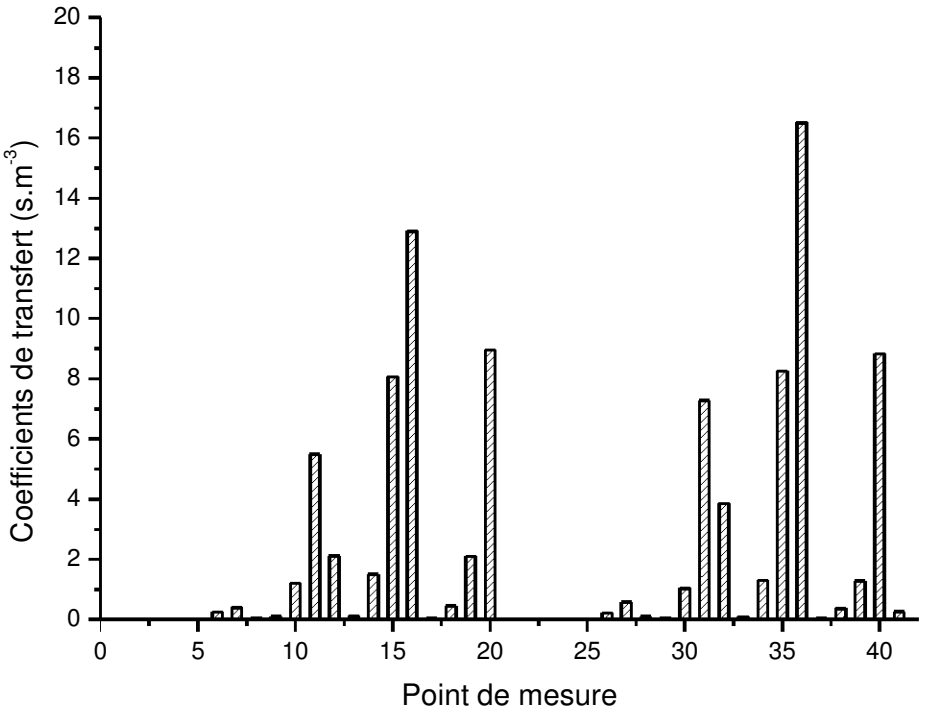


FIGURE 4.5 – Coefficient de transfert pour la configuration 1

le point considéré. La valeur du coefficient étant directement dépendante de la mesure de la concentration, cela signifie que plus cette valeur est grande et plus le point de mesure est sensible à l'injection de la source. Dans notre cas, le point numéro 36 est celui qui est le plus impacté par une injection dans la configuration considérée. Après avoir déterminé ces coefficients de transfert, nous pouvons estimer des débits d'émissions différents.

2^{nd} étape : Estimation du débit d'une source inconnue

Tout d'abord, nous définissons l'erreur moyenne d'estimation entre la valeur programmée dans la simulation numérique et la valeur estimée en % tel que :

$$\varepsilon_{estim} = \frac{|S^{inconnu^{estim}} - S^{prog}|}{S^{prog}} \times 100. \tag{4.15}$$

Nous avons réalisé deux simulations différentes ayant comme débit d'émission à estimer $4.85\,g.s^{-1}$ et $36.63 \times 10^{-2}\,g.s^{-1}$. La table 4.1 résume les résultats de l'estimation obtenus après avoir utilisé la méthode sur les deux simulations.

DÉBIT DE POLLUANT PROGRAMMÉ	DÉBIT DE POLLUANT ESTIMÉ	ECART TYPE DE L'ESTIMATION	ECART MOYEN
S^{prog}	$S^{inconnu^{estim}}$	$\sigma^{estim}_{S^{inconnu}}$	ε_{estim}
$g.s^{-1}$			%
4.85	4.852	8.25×10^{-5}	0.04
36.63×10^{-2}	36.64×10^{-2}	1.15×10^{-5}	0.03

TABLE 4.1 – Résultats de l'estimation pour deux débits programmés

Dans cette configuration numérique idéale avec les 41 capteurs virtuels, l'estimation réalisée est très proche de la valeur programmée. En effet, dans le cas des deux débits testés, les différences entre les débits programmés et estimés sont très faibles ($< 0.05\%$) et l'écart type sur l'estimation est quasi-nul ($\approx 10^{-5}\,g.s^{-1}$). Cela est dû au fait que la variance résiduelle de la minimisation (très faible à la base puisque nous sommes dans un cas numérique idéal) est pondérée par le rapport $\frac{1}{M-N}$ qui vaut dans notre cas $\frac{1}{41-1} = 0.025$. Dans ce cas numérique avec 41 capteurs, l'estimation est de très bonne qualité et l'erreur sur les résultats peut être en partie due à des approximations/arrondis des simulations CFD. Après avoir effectué cette estimation à partir des 41 capteurs virtuels, la sélection de 5 positions pertinentes de capteurs, qui pourront être appliquées au cas expérimental, est effectuée.

Estimation de la source de particules par 5 capteurs virtuels

Dans notre cas expérimental, le nombre de capteurs est limité non pas à 40 capteurs sur les deux plans de mesure (figure 4.3) mais à 4 seulement. Pour rappel, un cinquième capteur fixe est situé dans la conduite d'extraction. Par conséquent, nous allons déterminer à partir de la méthode d'aide au positionnement des capteurs (section 4.1.3) un placement pertinent des 4 capteurs dans le fond de la cabine ouverte. Nous effectuons donc toutes les combinaisons possible de 4 capteurs parmi 40 (soit un total de 91390 combinaisons) en rajoutant à chaque ensemble le capteur fixe situé dans la conduite d'extraction. Pour chaque ensemble, nous calculons le critère de comparaison qui correspond à la variance sur l'estimation. La figure 4.6 représente le résultat du calcul de ce critère de comparaison dans le cas de la configuration 1. D'après ces résultats, nous remarquons que le critère normalisé est quasiment constant pour

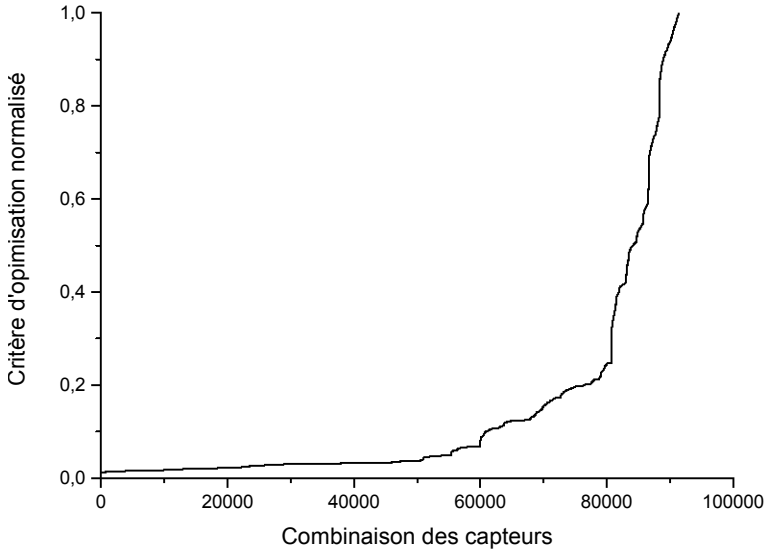


FIGURE 4.6 – Critère de comparaison dans le cas de la configuration 1

les 50000 premières combinaisons où il passe de 0.01 à 0.035. En ce qui concerne la seconde moitié de la courbe, une forte augmentation de cette valeur est observable. La valeur optimale obtenue ($\Gamma_\theta = 0.01$) correspondrait théoriquement à la meilleure position possible des capteurs. Cette valeur est obtenue pour la combinaison des capteurs numéro 16,20,36,40 et 41. Les capteurs 16,20,36 et 40 sont les 4 capteurs optimaux en fond de cabine et le capteur 41 est celui positionné dans la conduite d'extraction. Ceux-ci se situent aux coordonnées présentées dans la table 4.2.

CAPTEURS	COORDONNÉES X	COORDONNÉES Y	COORDONNÉES Z
	m	m	m
16	4	1.35	1.15
20	4	1.20	1.15
36	3.5	1.35	1.15
40	3.5	1.20	1.15
41	11.5	1.5	1.85

TABLE 4.2 – Coordonnées des capteurs optimaux dans le cas de la configuration 1

La position optimale des 4 capteurs en fond de cabine pose un problème puisque dans notre cas (simulation numérique avec des capteurs virtuels idéaux) nous remarquons qu'ils se placent tous à la même hauteur ($Z = 1.15m$) et proches les uns des autres. En effet, dans la simulation numérique, la concentration est calculée en un point sans prendre en compte le fait que le capteur est un élément physique qui est perturbateur pour l'écoulement des particules. C'est

pourquoi, nous avons décidé de sélectionner des positions de capteurs directement dans la cabine expérimentale qui nous conviennent et de vérifier à l'aide du critère de comparaison si ce positionnement reste cohérent. Ces positions sont choisies de façon à ce qu'aucune perturbation d'une mesure provoquée par un capteur ne soit répercutée sur la mesure d'un autre capteur. L'ensemble de capteurs ainsi que leurs positions est référencé dans la table 4.3.

CAPTEURS	COORDONNÉES X	COORDONNÉES Y	COORDONNÉES Z
	m	m	m
9	4	1.50	1.75
10	4	1.50	1.55
27	3.5	1.65	1.35
35	3.5	1.35	1.35
41	11.5	1.5	1.85

TABLE 4.3 – Coordonnées des capteurs sélectionnés dans le cas de la configuration 1

Avant de valider la méthode d'estimation par cette sélection de capteurs, nous avons étudié la valeur de son critère de comparaison dans la figure 4.6. La valeur du critère obtenue pour l'ensemble sélectionné est $\Gamma_\theta = 0.03$. Cet ensemble se situe dans la première partie de la courbe où le critère est quasi-constant. Nous avons effectué l'estimation des deux débits sources programmés dans le cas de la position optimale des capteurs et de la position sélectionnée afin d'analyser la qualité de l'estimation en fonction de la position de capteurs choisis. Les résultats sont décrits dans la table 4.4. D'après les tables 4.1 et 4.4, nous constatons que l'estimation du

CAPTEURS **OPTIMAUX**			
S^{prog}	$S^{inconnu^{estim}}$	$\sigma^{estim}_{S^{inconnu}}$	ε_{estim}
$g.s^{-1}$			%
4.85	4.852	2.7×10^{-3}	0.05
36.63×10^{-2}	36.65×10^{-2}	3.7×10^{-4}	0.05

CAPTEURS **SÉLÉCTIONNÉS**			
S^{prog}	$S^{inconnu^{estim}}$	$\sigma^{estim}_{S^{inconnu}}$	ε_{estim}
$g.s^{-1}$			%
4.85	4.854	4.2×10^{-3}	0.08
36.63×10^{-2}	36.65×10^{-2}	4.3×10^{-4}	0.05

TABLE 4.4 – Résultats de l'estimation des deux débits pour les 5 capteurs optimaux et les 5 capteurs sélectionnés

débit est de bonne qualité (écart $< 0.1\%$) que ce soit avec 41 capteurs ou 5 capteurs. Nous re-

marquons que l'écart entre le débit estimé et le débit programmé est du même ordre de grandeur dans le cas de l'utilisation des capteurs optimaux ou des capteurs sélectionnés. La plus grande différence dans les résultats se situe sur l'écart type de l'estimation. Lorsque l'on utilise les 41 capteurs l'écart-type est pondéré par le rapport $\frac{1}{M-N} = 0.025$ alors que dans le cas des 5 capteurs la pondération n'est plus que de 0.25 (soit un facteur 10 de différence). Ce facteur 10 se répercute donc sur l'écart type de l'estimation qui passe d'un ordre de grandeur de $10^{-5}\,g.s^{-1}$ (pour le cas de 41 capteurs) à $10^{-4}\,g.s^{-1}$ (pour le cas de 5 capteurs). De plus, nous pouvons remarquer une légère dégradation au niveau de l'écart type entre le cas des capteurs optimaux et celui des capteurs sélectionnés sans que ce soit pour autant significatif.

Conclusion de l'estimation par simulation numérique de la configuration 1

Dans ce premier cas de simulation numérique, une source de particules stationnaires dans la configuration 1 a été estimée. Tout d'abord à partir de 41 puis de 5 capteurs virtuels. L'estimation de la source par 41 capteurs a montré que la méthode permet d'obtenir des résultats très proches entre les débits estimés et programmés. De plus, l'écart-type sur l'estimation est faible (10^5 fois plus faible que le débit programmé ou estimé) puisqu'il dépend directement de la différence entre le nombre de capteurs utilisés et le nombre de sources à estimer. Celui-ci dépend aussi de la valeur de la minimisation des moindres carrées (équation 4.6) qui est très faible dans le cas de la simulation numérique avec des capteurs virtuels idéaux. Ensuite, la méthode d'aide au positionnement des capteurs a été employée afin de déterminer la position optimale de ceux-ci. Cependant, la combinaison ressortie posait problème puisqu'elle ne permettait pas, d'un point de vue pratique, d'installer physiquement les différents capteurs dans le cas expérimental. En effet, ils étaient trop proches les uns des autres, ce qui aurait eu pour conséquence de perturber l'écoulement des particules dans la cabine ouverte et donc de perturber les mesures des capteurs. Nous avons donc cherché une configuration de capteurs qui permettait de les insérer facilement dans la cabine tout en restant dans les combinaisons ayant un critère de comparaison pas trop grand. Après avoir sélectionné cette autre configuration, nous avons estimé la source de particules à partir de la configuration optimale et de la configuration sélectionnée afin de les comparer en regardant la différence entre l'estimation et le débit réel ainsi que l'écart type de l'estimation. D'après ces résultats, l'écart type de l'estimation n'augmente pas significativement entre le cas des 5 capteurs optimaux et celui avec les 5 capteurs sélectionnés (l'ordre de grandeur de $10^{-4} g.s^{-1}$ reste le même dans les deux cas). De plus, l'écart moyen entre le débit estimé et le débit réel ne dépasse pas 0.1%. L'estimation dans le cas de la configuration 1 par 5 capteurs s'effectue correctement dans le cas d'une simulation numérique avec des capteurs virtuels « idéaux ». Nous allons dans le paragraphe suivant valider la méthode d'estimation à

partir d'essais expérimentaux.

4.2.1.2 Application expérimentale de la méthode à la configuration 1

Dans ce paragraphe, nous étudions expérimentalement la configuration 1. Nous nous plaçons dans le cas où les capteurs sont placés suivant les positions sélectionnées dans la section 4.2.1.1. La figure 4.7 schématise la position de la source d'émission (PALAS RBG-1000) et celle des différents capteurs qui sont utilisés dans l'étude stationnaire (vue de dessus). Dans ces capteurs, nous retrouvons le capteur massique (TEOM) ainsi que quatre compteurs de particules (3 Lighthouses et un APS en conduite). Les particules utilisées pour cette configuration sont celles d'alumines présentées dans le chapitre précédent.

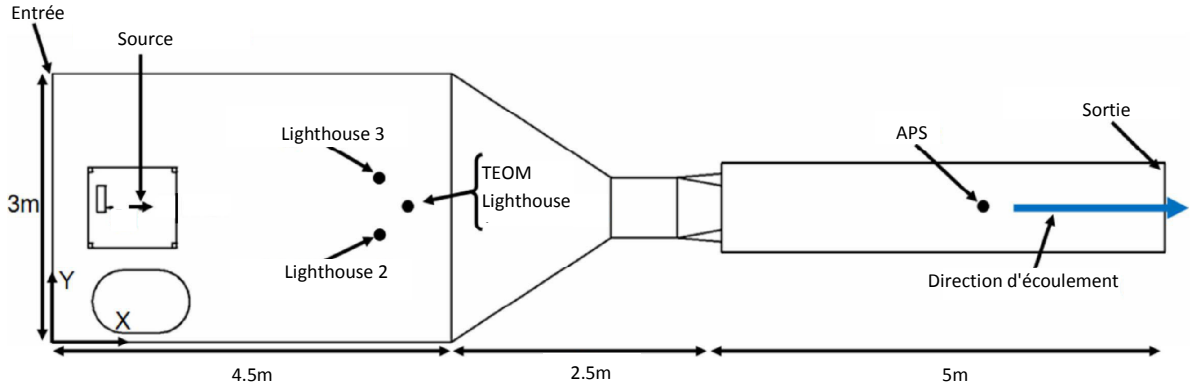
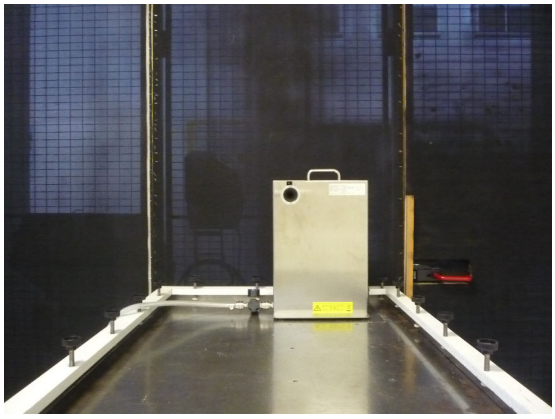
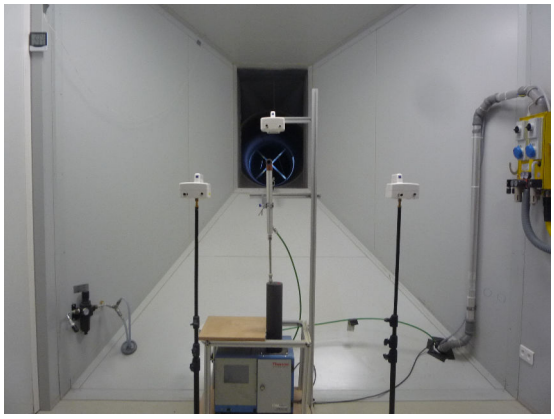


FIGURE 4.7 – Schéma de la position des capteurs et de la source (vue du dessus)

La figure 4.8 présente la position des différents appareils dans la cabine d'essais.



(a) PALAS RBG 1000



(b) Capteurs

FIGURE 4.8 – Photos de l'installation des différents éléments pour la configuration 1

La suite de cette partie traite des résultats obtenus pour l'estimation de la source de particules.

$1^{ère}$ étape : Détermination des coefficients de la matrice de transfert Λ

Afin de calculer les coefficients de transfert, nous injectons un débit de référence S_{ref} qui est fixé à $4.95 \pm 0.20 mg.s^{-1}$. Ce débit est calculé à partir de la masse de poudre disposée dans le piston et du temps d'injection. La fluctuation de ce débit d'injection correspond à l'écart type sur dix injections différentes. Les cinq capteurs nous fournissent une réponse temporelle du signal. Le temps d'acquisition de l'APS est de $1s$ alors que celui du TEOM et des Lighthouses est de $30s$. La figure 4.9 est un exemple de signal obtenu par l'APS durant l'injection de référence.

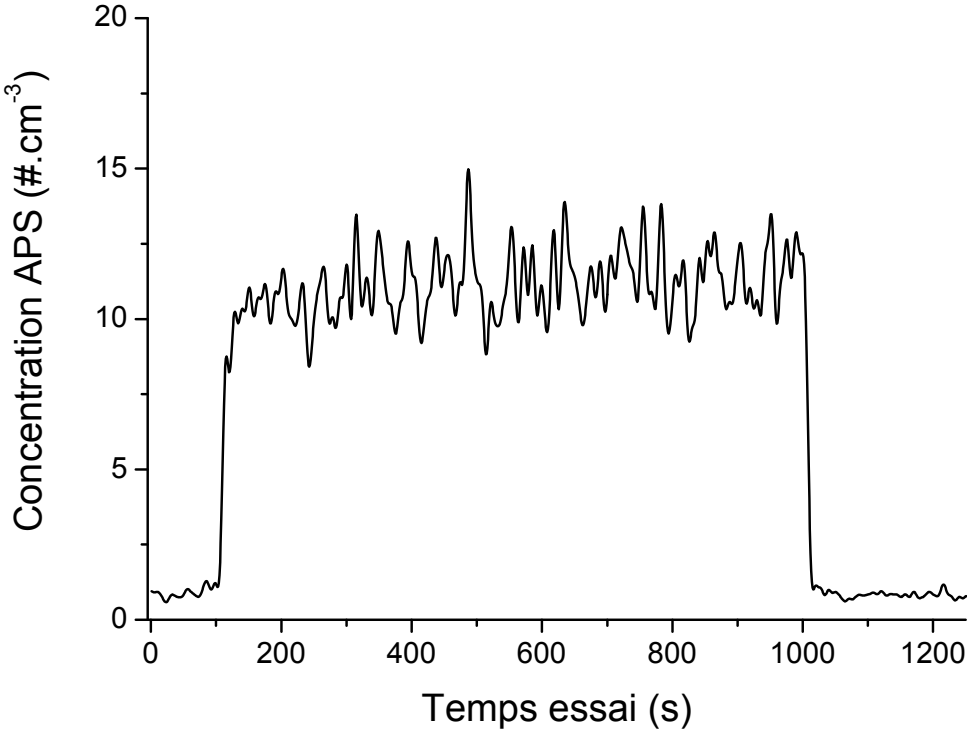


FIGURE 4.9 – Mesure de la concentration de référence par l'APS pour la configuration 1

La mesure atteint un palier de moyenne $C_{ref}^{APS} = 11.25 \#.cm^{-3}$ et d'écart type $\sigma_{ref}^{APS} = 1.42 \#.cm^{-3}$. C'est cette valeur moyenne et cet écart type qui sont utilisés afin de calculer le coefficient de transfert (équation 4.3 et 4.4) propre à l'APS. Le bruit de fond moyen dans le cas de référence (C_{ref}^{fond}) est mesuré sur dix minutes avant et après l'injection. Cette démarche est réalisée sur les autres capteurs de la même façon. La table 4.5 résume les différents résultats obtenus en ce qui concerne les mesures des concentrations pour l'émission de la source de référence.

DÉBIT DE RÉFÉRENCE	CAPTEUR	CONCENTRATION MESURÉE	ÉCART-TYPE MESURÉ
$4.9 \pm 0.2 mg.s^{-1}$	Lighthouse 1	$36.8 mg.m^{-3}$	$4.3 mg.m^{-3}$
	Lighthouse 2	$16.2 mg.m^{-3}$	$2.9 mg.m^{-3}$
	Lighthouse 3	$7.6 mg.m^{-3}$	$1.7 mg.m^{-3}$
	TEOM	$9.2 mg.m^{-3}$	$1.1 mg.m^{-3}$
	APS	$10.3 \#.cm^{-3}$	$1.4 \#.cm^{-3}$

TABLE 4.5 – Mesure de la concentration moyenne et de l'écart-type de référence pour la configuration 1

La matrice de transfert finale (dans ce cas un vecteur puisqu'il n'y a qu'une seule source de particules) obtenue est la suivante :

$$\Lambda = \begin{pmatrix} 1.74 \\ 1.13 \\ 0.90 \\ 1.68 \\ 1.48 \end{pmatrix} \quad s.m^{-3}. \tag{4.16}$$

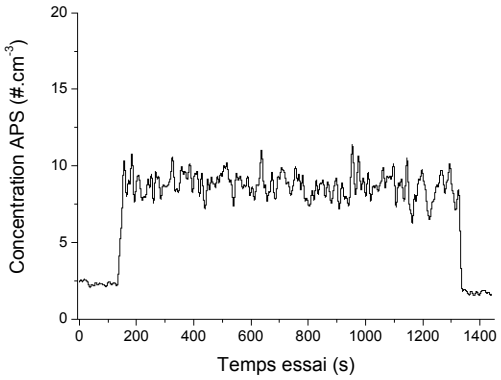
La première étape de la méthode étant achevée, nous pouvons passer à l'étape d'estimation.

2^{nd} étape : Estimation du débit d'une source inconnue

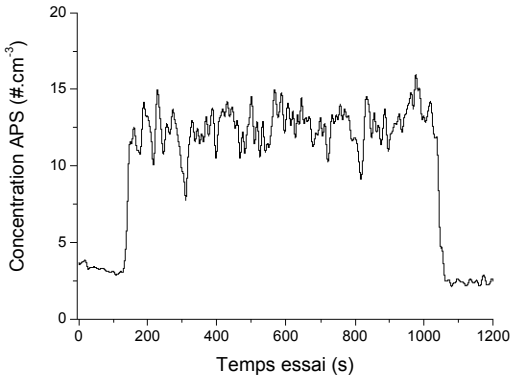
Nous définissons de façon analogue à l'équation 4.15 l'erreur moyenne d'estimation entre la valeur réelle dans le cas expérimental et la valeur estimée en % tel que :

$$\varepsilon_{estim} = \frac{|S^{inconnu^{estim}} - S^{réel}|}{S^{réel}} \times 100. \tag{4.17}$$

Dans ce paragraphe, nous allons présenter l'estimation de deux débits différents. Ces débits sont connus puisque nous les contrôlons via le système de génération PALAS. Tout d'abord, nous imposons un débit A de $2.80 \pm 0.24 mg.s^{-1}$ puis un débit B de $6.30 \pm 0.49 mg.s^{-1}$. La figure 4.10 représente la mesure de concentration par l'APS en fonction de ces deux débits de particules.



(a) Concentration mesurée pour le débit A



(b) Concentration mesurée pour le débit B

FIGURE 4.10 – Concentration mesurée par l'APS en fonction des deux débits à estimer

Nous constatons sur les figures 4.9 et 4.10 que les concentrations atteintes au niveau du palier sont cohérentes. En effet, nous avons bien un accroissement de la concentration mesurée en fonction du débit injecté. La table 4.6 résume les mesures obtenues (concentrations moyennes et écart-types) dans le cas des débits A et B pour les différents capteurs utilisés.

		DÉBIT A		DÉBIT B	
CAPTEURS	Unité de mesure	Concentration mesurée	Écart-type	Concentration mesurée	Écart-type
Lighthouse 1	$mg.m^{-3}$	19.1	5.5	42.3	4.7
Lighthouse 2	$mg.m^{-3}$	8.0	3.0	18.4	2.8
Lighthouse 3	$mg.m^{-3}$	2.5	1.4	8.9	1.6
TEOM	$mg.m^{-3}$	4.1	1.0	10.2	1.2
APS	$\#.cm^{-3}$	6.7	1.2	11.7	1.6

TABLE 4.6 – Mesures des concentrations moyennes et des écart-types pour les débits A et B de la configuration 1

L'observation réalisée auparavant sur les courbes de concentration mesurée par l'APS est aussi faisable pour tous les autres capteurs (voir tables 4.5 et 4.6). En effet, les concentrations mesurées sont d'autant plus importantes que les débits d'injection le sont. En toute logique, notre problème étant basé sur une hypothèse de linéarité, nous devrions avoir le rapport entre les mesures des concentrations (d'un même capteur) pour deux débits différents égal au rapport entre ces deux débits. Par exemple, nous devrions avoir :

$$\frac{C_{APS}^{Débit\,A}}{C_{APS}^{Débit\,réf}} = \frac{S^{Débit\,A}}{S^{Débit\,réf}} \tag{4.18}$$

La table 4.7 présente le résultat du calcul de ces rapports.

Capteur	Rapport A/ Ref		Rapport B/Ref	
	Rapport concentration	Rapport débit	Rapport concentration	Rapport débit
Lighthouse 1	0.36	0.56	1.15	1.27
Lighthouse 2	0.49		1.13	
Lighthouse 3	0.33		1.17	
TEOM	0.45		1.10	
APS	0.65		1.13	

TABLE 4.7 – Calcul des différents rapports des concentrations et débits pour la configuration 1

Nous constatons qu'aucun rapport de concentration n'est strictement identique à celui des débits (le cas idéal). Toutefois, l'ordre de grandeur de ces rapports est conservé dans tous les cas et par conséquent, la linéarité du système semble avérée.

En utilisant la matrice de transfert (équation 4.16) ainsi que les données de concentrations mesurées pour les débits A et B (table 4.6), nous pouvons estimer à l'aide de la méthode des moindres carrées linéaire conjuguée à une contrainte de non-négativité les débits A et B. La table 4.8 résume les résultats obtenus pour l'estimation des différents débits.

	Débit réel	Débit estimé	Erreur moyenne sur l'estimation
	$S^{réel} \pm \sigma^{réel}$	$S^{inconnu^{estim}} \pm \sigma^{estim}_{S^{inconnu}}$	ε_{estim}
	$mg.s^{-1}$	$mg.s^{-1}$	%
Débit A	2.8 ± 0.2	2.6 ± 0.3	7.1
Débit B	6.3 ± 0.5	5.4 ± 0.5	14.3

TABLE 4.8 – Résultats de l'estimation des débits A et B de la configuration 1

D'après les résultats expérimentaux, les débits estimés obtenus sont du même ordre de grandeur que les débits réellement injectés. Pour le premier débit A, l'erreur moyenne entre le débit réel et l'estimation s'élève à 9% alors que pour le débit B, celle-ci est de 15%. Toutefois, les intervalles de confiance des débits estimés et réels se recoupent dans les deux cas. L'écart observé peut être imputé au fait de l'instationnarité des mesures (figure 4.9 et 4.10). En effet, elle provoque une incertitude sur C et donc une incertitude sur S.

Conclusion de l'estimation de la configuration 1

La mise en place expérimentale de la méthode d'estimation dans la configuration 1 a permis de mettre en évidence que la méthode semble fournir des résultats cohérents. En effet, nous avons remarqué que l'erreur moyenne entre l'estimation et la réalité atteint une dizaine de pourcent et que l'intervalle de confiance de l'estimation recoupe (dans les deux cas testés) celui du débit réel. Après avoir validé la méthode d'estimation de la source d'un point de vue expérimental pour la configuration 1, celle-ci sera appliquée sur les autres configurations (2, 3 et 4) afin d'évaluer ses limites dans des situations qui peuvent être rencontrées sur le terrain. Elle sera employée sur une version simulée ou expérimentale de chaque configuration en fonction de la facilité de la mise en place.

4.2.2 Configurations limites d'utilisation de la méthode

Cette partie est consacrée à l'évaluation de la méthode dans différentes configurations d'applications afin d'étudier ses limites pratiques. Nous allons donc étudier trois configurations supplémentaires (configuration 2, 3 et 4 présentées dans le Chapitre 3). Les configurations 2 et 3 sont étudiées par simulation numérique. Cela permet d'étudier l'impact de la présence de plusieurs sources de particules sur l'estimation. Ces sources peuvent être situées au même endroit (configuration 2) ou bien être distantes les unes des autres (configuration 3). Quant à la configuration 4, elle sera mise en place d'un point de vue expérimental et correspondra à une perturbation de la source à estimer par rapport à la source de référence. Celle-ci consiste à étudier la robustesse de la méthode par rapport à une perturbation aéraulique de la source à estimer.

4.2.2.1 Application de la méthode à la configuration 2

Cette configuration est mise en place uniquement par simulation numérique puisque expérimentalement nous ne disposons pas de quatre sources d'émission de particules. Dans cette configuration, les quatre sources sont situées au même endroit et possèdent des directions d'émissions différentes. Étudiant cette configuration dans le cas numérique, il est intéressant d'effectuer l'estimation à partir des 41 capteurs virtuels, des 5 optimaux (pour cette configuration) et finalement des 5 sélectionnés précédemment afin d'analyser si l'impact de ce choix des capteurs est similaire à celui de la configuration 1.

$1^{ère}$ étape : Détermination des coefficients de la matrice de transfert Λ

Nous effectuons dans un premier temps le calcul des coefficients de la matrice de transfert. Pour ce faire, nous effectuons cinq simulations distinctes correspondant aux quatre directions d'émissions en plus de la simulation du bruit de fond. Après avoir réalisé chaque simulation, nous calculons les coefficients Λ_{ij} correspondant (voir figure 4.11).

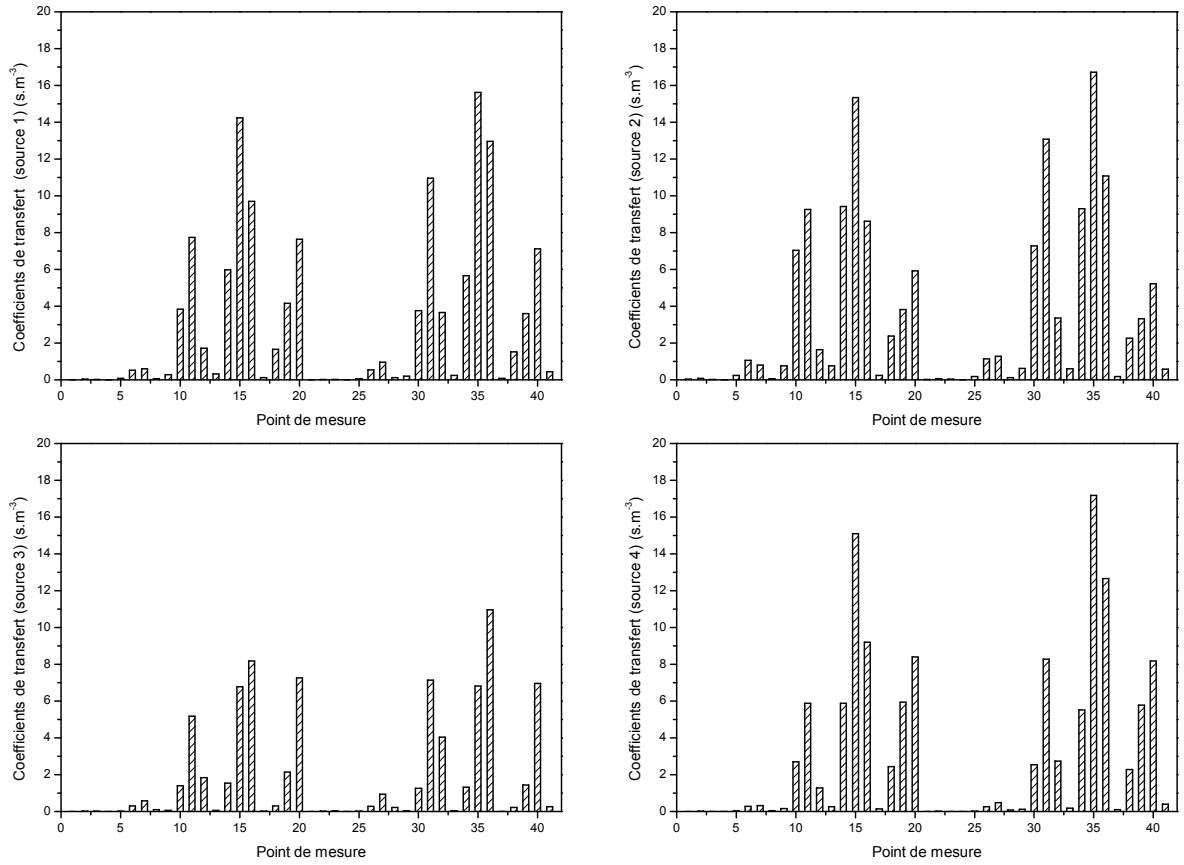


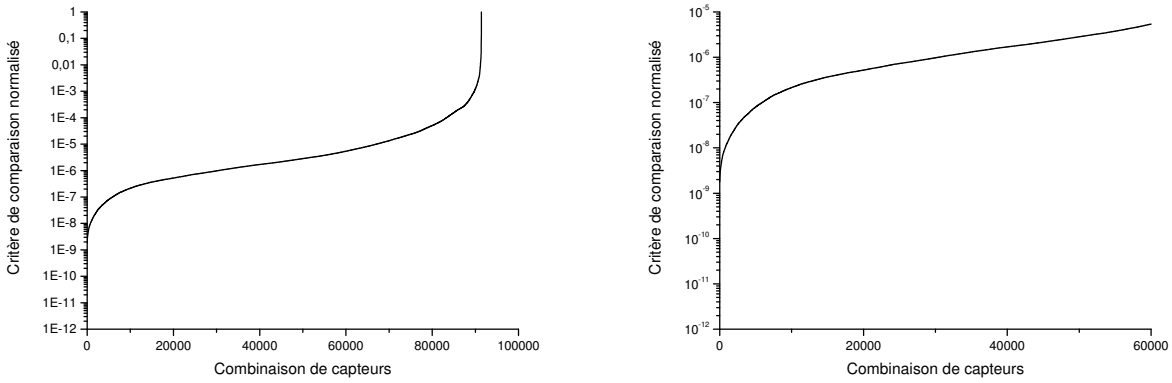
FIGURE 4.11 – Coefficient de transfert des 4 sources pour la configuration 2

Nous constatons sur les quatre graphiques représentant les coefficients de transfert qu'il n'y a que très peu de différences entre les capteurs en fonction de la source de particules considérée. En effet, pour chaque source se sont les mêmes capteurs qui répondent le plus. La seule « réelle » différence réside dans l'amplitude de ces coefficients. Prenons l'exemple du capteur virtuel numéro 35 qui est le capteur ayant la plus forte réponse suivant 3 sources sur 4. Celui-ci a comme coefficient de transfert des valeurs allant de $7s.m^{-3}$ dans le cas de la source 3 jusqu'à $17s.m^{-3}$ dans le cas de la source 2. A contrario, certains capteurs ne présentent aucune différence entre les 4 directions d'injection (par exemple les capteurs 1 à 5) et ont des coefficients de transfert proche de zéro. Cela signifie que ces capteurs ne sont pas sensibles à l'injection de

la source considérée. Avant de passer à la seconde étape d'estimation, le critère de comparaison des capteurs sera analysé comme dans le § 4.2.1.1.

Analyse du critère de comparaison des ensembles de capteurs

L'analyse du critère de comparaison des ensembles de capteurs permet de déterminer les 5 capteurs « optimaux » ainsi que de statuer sur la conformité de ceux sélectionnés précédemment (pour la configuration 1) dans cette configuration. La figure 4.12a nous montre l'évolution du critère de comparaison pour tous les ensembles de capteurs considérés et la figure 4.12b représente un « zoom » sur les 60000 premiers ensembles. Comme dans le cas de la configuration 1,



(a) critère de tous les ensembles de capteurs

(b) Critère des 60000 premiers ensembles

FIGURE 4.12 – Critère de comparaison dans le cas de la configuration 2

un très grand nombre de combinaisons semble avoir un niveau du critère proche (les 60000 premiers ensembles se situent entre 3.1×10^{-8} et 5.5×10^{-6}). Dans un premier temps, nous avons déterminé les capteurs optimaux de cette configuration (critère de comparaison 3.1×10^{-8}). Ceux-ci sont référencés dans la table 4.9. En ce qui concerne l'ensemble présélectionné dans le

NUMÉRO DU CAPTEUR	COORDONNÉES X	COORDONNÉES Y	COORDONNÉES Z
	m	m	m
31	3.5	1.5	1.35
34	3.5	1.35	1.55
35	3.5	1.35	1.35
40	3.5	1.2	1.35
41	11.5	1.5	1.85

TABLE 4.9 – Position des capteurs optimaux pour la configuration 2

cas de la configuration 1, nous avons un critère de comparaison de 3.7×10^{-7}, ce qui le situe à la $15313^{ème}$ position des ensembles. Cette analyse du critère à permis de montrer que l'ensemble sélectionné dans la configuration 1 est proche (en terme de variance sur l'estimation) de l'ensemble optimal. Ensuite, l'estimation des quatre sources par les 41 capteurs puis par les 5 capteurs optimaux et pour finir par les 5 capteurs sélectionnés est réalisée. Ces trois cas permettront de voir l'impact du choix des ensembles sur l'estimation.

2^{nd} étape : Estimation des débits sources inconnus

Une simulation numérique est faite en imposant des débits (table 4.10) sur les 4 sources simultanément.

SOURCE CONSIDÉRÉE	DÉBIT DE PARTICULES PROGRAMMÉ
	$g.s^{-1}$
Source 1	3
Source 2	2.5
Source 3	6.25×10^{-1}
Source 4	18.75×10^{-1}

TABLE 4.10 – Débit à estimer dans le cas d'une injection suivant 4 sources de la configuration 2

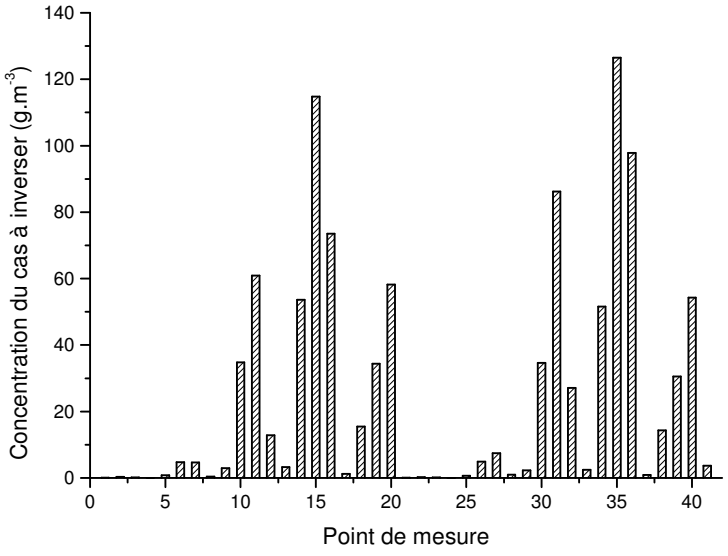


FIGURE 4.13 – Concentration calculée par CFD pour les débits à estimer dans la configuration 2

La figure 4.13 montre le résultat du calcul de la concentration par la CFD pour la simulation à estimer aux 41 points de mesure. D'après le calcul de la concentration des différents capteurs virtuels, il semble que ceux qui sont les plus sensibles pour la configuration 2 sont globalement les mêmes que pour la configuration 1. En effet, le capteur 35 reste celui ayant la plus forte réponse. L'estimation des 4 sources à l'aide des coefficients de transfert (figure 4.11) est présentée dans la table 4.11. Cette estimation est réalisée soit par les 41 valeurs de concentration, soit les 5 valeurs des capteurs optimaux ou sélectionnés.

	TOUS LES CAPTEURS (41 CAPTEURS)		
	S^{prog}	$S^{inconnu^{estim}} \pm \sigma^{estim}_{S^{inconnu}}$	ε_{estim}
SOURCES CONSIDÉRÉES	$g.s^{-1}$		%
Source 1	3.0	3.93 ± 0.07	31.1
Source 2	2.5	2.14 ± 0.03	14.4
Source 3	0.625	0.28 ± 0.03	55.8
Source 4	1.875	1.59 ± 0.03	15.4
Somme	8.0	7.94 ± 0.03	0.8

	5 CAPTEURS **OPTIMAUX**		
	S^{prog}	$S^{inconnu^{estim}} \pm \sigma^{estim}_{S^{inconnu}}$	ε_{estim}
SOURCES CONSIDÉRÉES	$g.s^{-1}$		%
Source 1	3.0	3.50 ± 0.75	16.6
Source 2	2.5	2.30 ± 0.25	8.0
Source 3	0.625	0.46 ± 0.32	26.9
Source 4	1.875	1.69 ± 0.35	9.8
Somme	8.0	7.95 ± 0.36	0.6

	5 CAPTEURS **SÉLECTIONNÉS**		
	S^{prog}	$S^{inconnu^{estim}} \pm \sigma^{estim}_{S^{inconnu}}$	ε_{estim}
SOURCES CONSIDÉRÉES	$g.s^{-1}$		%
Source 1	3.0	4.52 ± 0.92	50.8
Source 2	2.5	1.97 ± 0.26	21.1
Source 3	0.625	0.10 ± 0.35	83.7
Source 4	1.875	1.30 ± 0.44	30.5
Somme	8.0	7.90 ± 0.42	1.3

TABLE 4.11 – Résultats de l'estimation des 4 sources pour la configuration 2

Les résultats présentés dans la table 4.11 permettent de tirer plusieurs observations. Celles-ci sont semblables quel que soit le choix des capteurs utilisés pour l'estimation (41 capteurs, 5 capteurs optimaux ou les 5 capteurs sélectionnés).

— Premièrement, les résultats de l'estimation individuelle de chaque source ne semble pas réalisable. En effet, l'écart moyen entre le débit estimé et celui programmé peut atteindre 83.7%. Le plus faible écart est de 8% dans le cas de l'estimation de la source 2 par l'ensemble de capteurs optimaux.

— Deuxièmement, la somme des débits des 4 sources est conservé. Dans les trois cas, l'écart moyen entre la somme des débits estimés et programmés atteint au maximum 1.3%. On peut donc en conclure que l'estimation de la source « globale » est faisable.

— Troisièmement, On remarque que l'écart-type sur l'estimation suit la même évolution que le cas de la configuration 1. En effet, lors de l'utilisation des 41 capteurs, l'ordre de grandeur de l'écart-type est dix fois plus petit que lors de l'utilisation de 5 capteurs. Ceci est dû au rapport $\frac{1}{M-N}$ de l'équation 4.8 qui dépend directement du nombre de capteurs utilisés. De plus, dans les deux cas où seulement 5 capteurs sont utilisés, l'ordre de grandeur de cet écart-type reste le même.

Conclusion sur l'application de la méthode à la configuration_2

Selon les résultats obtenus lors de l'application de la méthode à la configuration 2, il est possible de résumer le comportement de cette méthode en deux points :

— L'estimation individuelle des sources dans ce genre de configuration n'est pas faisable. En effet, les écarts entre les débits programmés et estimés sont très importants alors que nous sommes dans un cas de capteurs virtuels idéaux. L'explication la plus vraisemblable vient du fait que celles-ci sont trop proches les unes des autres et par conséquent, les coefficients de transfert calculés ne présentent pas assez de différences pour que l'estimation soit discriminante ;
— Nous pouvons toutefois constater que l'estimation « globale » de la source est de bonne qualité puisque l'écart moyen entre le débit global estimé et programmé est faible (inférieur à 1.3%) dans chaque cas.

Ceci nous permet de conclure que même si la discrimination des sources ne semble pas réalisable, nous pouvons estimer une intensité globale d'émission de ces sources. Dans le but de valider l'hypothèse formulée dans le premier point de la conclusion, nous allons appliquer la méthode à la configuration 3 qui correspond à l'estimation de 4 sources positionnées à des endroits différents, ce qui devrait permettre d'obtenir des coefficients de transfert significativement différents entre eux.

4.2.2.2 Application de la méthode à la configuration 3

Pour les même raisons que dans le § 4.2.2.1, cette configuration n'est traitée que dans le cas numérique. Dans cette configuration, les sources sont positionnées à des endroits différents définis dans le Chapitre 3.

1ère étape : Détermination des coefficients de la matrice de transfert Λ

Nous calculons de façon analogue à la configuration 2 les coefficients de la matrice de transfert (voir figure 4.14).

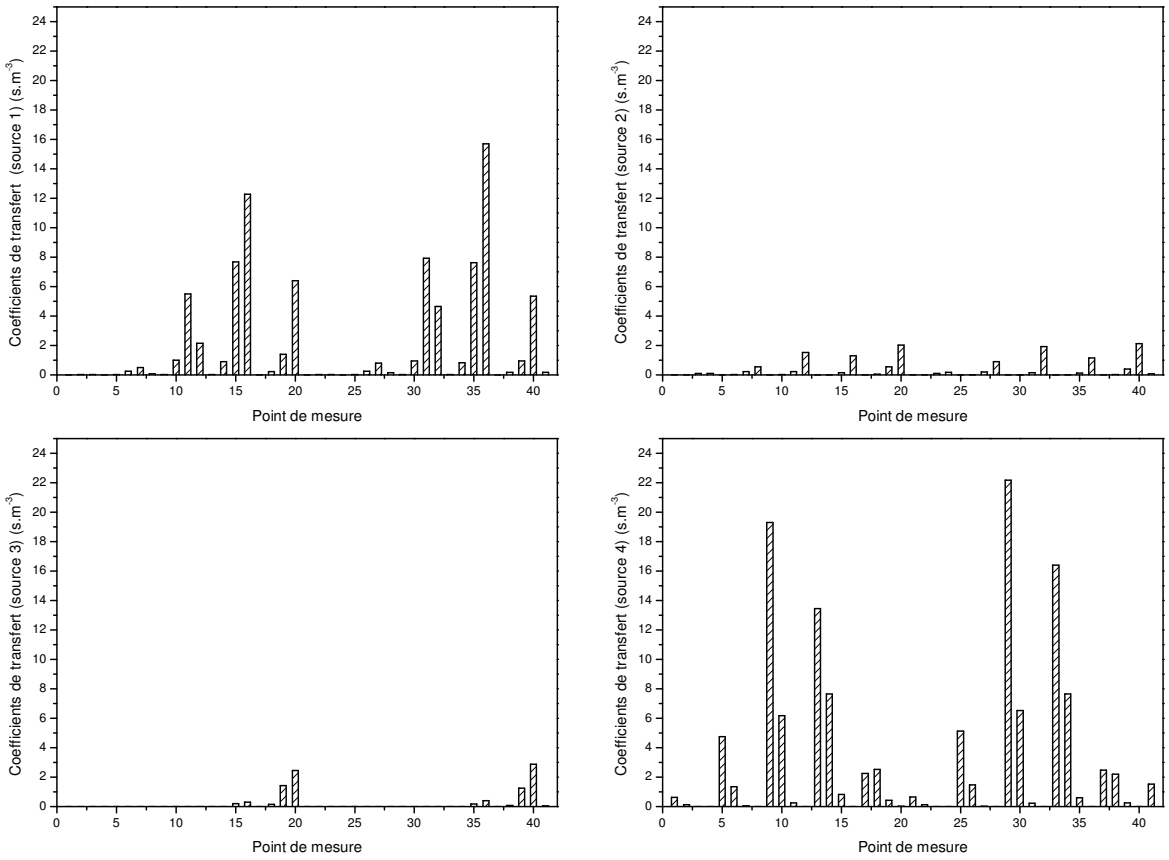


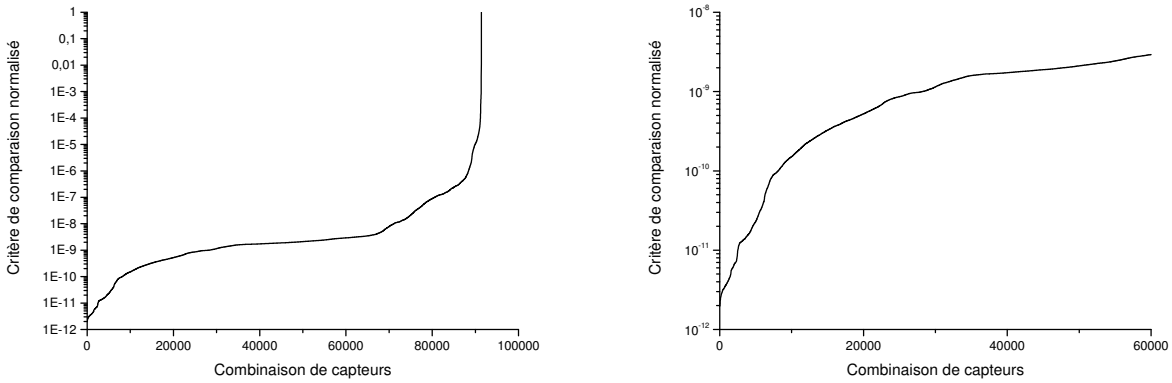
FIGURE 4.14 – Coefficients de transfert des 4 sources distantes

Les coefficients de transfert sont très différents du cas de la configuration 2. Nous rappelons que précédemment les coefficients des capteurs virtuels étaient semblables quelle que soit la source considérée. Or, dans ce cas-ci, nous constatons de grandes disparités entre les différents capteurs par rapport à la source considérée. Par exemple, les sources 2 et 3 ont des coefficients beaucoup plus faibles que les sources 1 et 4. Nous remarquons également, que d'un point à

l'autre, les coefficients sont totalement différents par rapport à la source considérée. En effet, prenons l'exemple du point numéro 36 qui a un coefficient de transfert élevé seulement dans le cas de la source 1 alors que le point 29 n'est sensible quasiment qu'à la source 4.

Analyse du critère de comparaison des ensembles de capteurs

Tout comme dans le cas de la configuration 2, le critère de comparaison basé sur la variance de chaque ensemble de 5 capteurs est étudié afin de savoir lequel est optimal et où se situe l'ensemble sélectionné dans cette configuration. Les figures 4.15a et 4.15b montrent (comme pour



(a) Critère de tous les ensembles

(b) Zoom sur les 60000 premiers critères

FIGURE 4.15 – Critère de comparaison pour chaque ensemble de capteurs considérés dans le cas de la configuration 3

les configurations 1 et 2) que la plupart des combinaisons de capteurs permettent d'obtenir une valeur du critère de comparaison faible. La table 4.12 résume la position des capteurs optimaux obtenue pour la valeur la plus faible du critère (soit une valeur de 1.96×10^{-12}).

NUMÉRO DE CAPTEUR	COORDONNÉE X	COORDONNÉE Y	COORDONNÉE Z
	m	m	m
29	3.5	1.5	1.75
32	3.5	1.5	1.5
35	3.5	1.35	1.35
40	3.5	1.2	1.35
41	11.5	1.5	1.85

TABLE 4.12 – Position des capteurs optimaux pour la configuration 3

En ce qui concerne l'ensemble sélectionné dans la configuration 1, il se situe à la $30000^{ème}$ position avec une valeur du critère d'optimisation de 1.35×10^{-9}. Ce qui signifie que cet ensemble

se situe dans le premier quart des combinaisons. Après avoir déterminé l'ensemble optimal dans cette configuration et analysé le critère de comparaison de notre ensemble sélectionné, les quatre sources pour les différents cas de capteurs utilisés vont être estimées.

2^{nd} étape : estimation des débits sources inconnus

Une simulation numérique est réalisée en imposant des injections simultanées à chaque source. La simulation calcule les concentrations de la figure 4.16. Nous remarquons sur celle-ci que de nombreux capteurs répondent significativement (environ 35 capteurs sur 41) aux quatre sources émissives alors que dans le cas de la configuration 1 ou 2, ils sont beaucoup moins nombreux (environ 20 sur 41). La table 4.13 résume les résultats obtenus pour les différentes

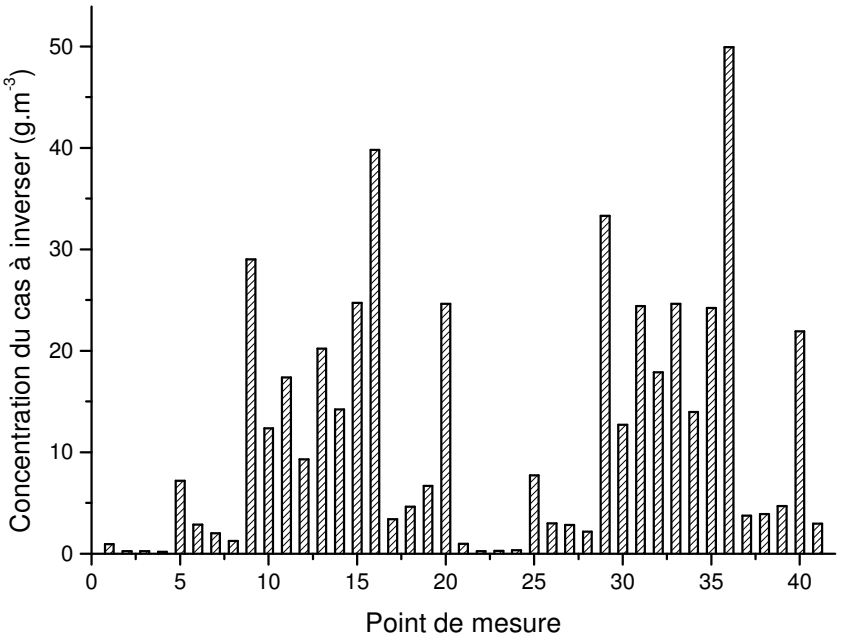


FIGURE 4.16 – Concentration calculée par CFD pour les débits à estimer dans la configuration 3

estimations réalisées. D'après cette table, les estimations individuelles des 4 sources, quel que soit le cas de capteurs considérés, sont très proches des débits programmés dans la simulation (écart moyen minimum de 0.04% et maximum de 7.4%). De plus, nous remarquons que le débit global est lui aussi conservé dans tous les cas (écart maximum de 0.6%).

	TOUS LES CAPTEURS (41 CAPTEURS)		
	S^{prog}	$S^{inconnu^{estim}} \pm \sigma^{estim}_{S^{inconnu}}$	ε_{estim}
SOURCES CONSIDÉRÉES	$g.s^{-1}$		%
Source 1	3	3.01 ± 0.003	0.5
Source 2	2	1.96 ± 0.020	2.1
Source 3	0.5	0.54 ± 0.017	7.4
Source 4	1.5	1.50 ± 0.001	0.2
Somme	7	7.01 ± 0.005	0.1

	5 CAPTEURS **OPTIMAUX**		
	S^{prog}	$S^{inconnu^{estim}} \pm \sigma^{estim}_{S^{inconnu}}$	ε_{estim}
SOURCES CONSIDÉRÉES	$g.s^{-1}$		%
Source 1	3	3.01 ± 0.08	0.13
Source 2	2	2.02 ± 0.37	0.96
Source 3	0.5	0.52 ± 0.31	4.88
Source 4	1.5	1.49 ± 0.026	0.19
Somme	7	7.04 ± 0.18	0.6

	5 CAPTEURS **SÉLECTIONNÉS**		
	S^{prog}	$S^{inconnu^{estim}} \pm \sigma^{estim}_{S^{inconnu}}$	ε_{estim}
SOURCES CONSIDÉRÉES	$g.s^{-1}$		%
Source 1	3	3.02 ± 0.10	0.60
Source 2	2	1.94 ± 0.38	2.70
Source 3	0.5	0.53 ± 0.49	5.34
Source 4	1.5	1.50 ± 0.04	0.04
Somme	7	6.99 ± 0.22	0.14

TABLE 4.13 – Résultats des estimations des sources dans la configuration 3

Conclusion sur l'application de la méthode à la configuration 3

La configuration 3 a permis de valider l'hypothèse retenue lors de l'application de la méthode sur la configuration 2 qui supposait que la position des sources était trop proche pour permettre d'être estimées individuellement. En effet, la configuration 3 a montré que l'estimation de sources distantes peut être réalisée et que l'estimation globale de ces sources reste de bonne qualité. Par conséquent, lorsque l'on dispose de sources assez éloignées les unes des autres, nous obtenons des coefficients de transfert sur les points de mesure qui varient significativement. Cette variation permet de discriminer chaque source lors de la résolution de l'estimation. Après avoir évalué l'impact du nombre de sources et leur position sur l'estimation, l'influence d'une modification radicale de l'aéraulique de la source sur l'estimation peut être étudiée.

4.2.2.3 Application de la méthode à la configuration 4

La configuration 4 correspond à une perturbation de la source à estimer par rapport à la source utilisée dans le cas de référence. Cette configuration sera mise en place d'un point de vue expérimental puisqu'il suffit d'ajouter un élément perturbateur (ventilateur de brassage) à la source. En effet, dans un cas d'application réel, la source de référence permettant de calibrer les coefficients de transfert est une source contrôlable (direction d'émission, granulométrie ...) alors que la source de polluant à estimer est généralement non contrôlée.

$1^{ère}$ étape : Détermination des coefficients de la matrice de transfert Λ

La détermination des coefficients de la matrice de transfert s'effectue dans le cas où le ventilateur de brassage est éteint. En d'autres termes, les coefficients de transfert sont identiques à ceux obtenus lors de la configuration 1 (§ 4.2.1.2) :

$$\Lambda = \begin{pmatrix} 1.74 \\ 1.13 \\ 0.90 \\ 1.68 \\ 1.48 \end{pmatrix} \; s.m^{-3}.$$

2^{nd} étape : Estimation des débits sources inconnus (sources radicalement différentes de l'étape de calibration)

Dans cette étape, le ventilateur de brassage est en fonctionnement. Nous considérons deux débits différents de la source pour cette configuration appelés respectivement débit C ($2.52 \pm 0.35\, mg.s^{-1}$) et débit D ($6.75 \pm 0.51\, mg.s^{-1}$). La table 4.14 présente les mesures effectuées par les 5 capteurs dans le cas des débits d'injections C et D. Nous calculons d'abord les rapports

		DÉBIT C		DÉBIT D	
CAPTEURS	Unité de mesure	Concentration mesurée	Écart-type	Concentration mesurée	Écart-type
Lighthouse 1	$mg.m^{-3}$	1.04	0.28	2.94	1.05
Lighthouse 2	$mg.m^{-3}$	2.47	0.53	8.67	0.84
Lighthouse 3	$mg.m^{-3}$	1.33	0.43	10.05	2.08
TEOM	$mg.m^{-3}$	0.81	0.19	2.96	0.55
APS	$\#.cm^{-3}$	5.23	0.63	14.36	1.36

TABLE 4.14 – Mesures des concentrations pour les débits C et D dans la configuration 4

de concentration et les rapports des débits afin de connaître la tendance des réponses de nos capteurs par rapport à la linéarité du problème (de façon analogue au paragraphe 4.2.1.2). La table 4.15 résume les résultats de ce calcul.

	RAPPORT C/ Ref		RAPPORT D/Ref	
CAPTEUR	Rapport concentration	Rapport débit	Rapport concentration	Rapport débit
Lighthouse 1	0.03	0.51	0.08	1.36
Lighthouse 2	0.15		0.54	
Lighthouse 3	0.17		1.32	
TEOM	0.09		0.32	
APS	0.51		1.39	

TABLE 4.15 – Calcul des différents rapports pour les débit C et D pour la configuration 4

La table 4.15 montre très clairement que les rapports ne se conservent aucunement pour quasiment tous les capteurs. Seul l'APS (capteur placé dans la conduite d'extraction où la globalité des particules doit être conduite) fournit un rapport de concentration identique à celui des débits dans les deux cas. Nous pouvons donc d'ores et déjà faire l'hypothèse que l'estimation de la source risque d'être de mauvaise qualité du fait de la non-proportionnalité observée par ces rapports pour 4 capteurs sur 5. Nous vérifions cette supposition en effectuant l'estimation de la source à partir des données de ces 5 capteurs et des coefficients de transfert. La table 4.16 présente les estimations des deux débits testés. Tout comme l'observation des rapports (table

	DÉBIT RÉEL	DÉBIT ESTIMÉ	ERREUR MOYENNE SUR L'ESTIMATION
	$S^{réel} \pm \sigma^{réel}$	$S^{inconnu^{estim}} \pm \sigma^{estim}_{Sinconnu}$	ε_{estim}
	$mg.s^{-1}$	$mg.s^{-1}$	%
Débit C	2.5 ± 0.4	3.9 ± 2	55
Débit D	$6.8 + 0.5$	4.9 ± 1.8	26

TABLE 4.16 – Résultats de l'estimation des débits C et D à partir des 5 capteurs pour la configuration 4

4.15) pouvait le laissait présumer, les estimations ne sont pas satisfaisantes puisque celle effectuée dans le cas du débit C présente une erreur moyenne de 55% et celle dans le cas du débit D de 25%. Néanmoins, la tendance des débits réels (débit C $<$ débit D) est conservée dans les estimations (débit estimé C $<$ débit estimé D) et l'ordre de grandeur entre les estimations et la réalité est conservé.

D'après les rapports de concentration et de débits calculés dans la table 4.15, il semblerait que l'APS pourrait fournir à lui seul de meilleurs résultats. Une estimation de la source uniquement à partir de ce capteur est donc réalisée. Ce qui signifie que le problème étudié est grandement simplifié. En effet, la relation entre le débit massique et la mesure de la concentration peut s'écrire sous la forme :

$$C_{APS}^{mesurée} = \Lambda_{APS} \times S, \tag{4.19}$$

où C_{APS} est la concentration mesurée en $mg.m^{-3}$, S le débit de polluant en $mg.s^{-1}$ et Λ_{APS} le coefficient de transfert de l'APS en $s.m^{-3}$. A noter que cette relation est vérifiée si le polluant est parfaitement mélangé dans la cabine, dans ce cas $\Lambda_{APS} = \frac{S_{cal}}{C_{cal_{APS}}}$, où S_{cal} est le débit massique de polluant du cas de référence pour la calibration et $C_{cal_{APS}}$ la concentration de calibration résultant de ce débit. Les résultats obtenus pour cette estimation sont présentés dans la table 4.17. Nous remarquons une très nette amélioration du résultat de l'estimation des deux débits

	DÉBIT RÉEL	DÉBIT ESTIMÉ	ERREUR SUR L'ESTIMATION
	$S^{réel} \pm \sigma^{réel}$	$S^{inconnu^{estim}} \pm \sigma^{estim}_{S^{inconnu}}$	ε_{estim}
	$mg.s^{-1}$	$mg.s^{-1}$	%
Débit C	2.5 ± 0.4	2.4 ± 0.5	4
Débit D	6.8 ± 0.5	6.6 ± 0.7	2.9

TABLE 4.17 – Résultats de l'estimation des débits C et D pour la configuration 4 à partir de l'APS uniquement

testés puisqu'il n'y a que quelques pour cent d'écart entre l'estimation et le débit réel.

Conclusion sur l'application de la méthode à la configuration 4

La configuration 4 permet de mettre en avant deux conclusions concernant la méthode d'estimation appliquée :

— L'estimation du terme source se détériore lorsque les capteurs sont situés dans une zone où l'aéraulique est fortement affectée par une modification de la source de particules entre l'étape de calibration (calcul des coefficients de transfert) et l'étape d'estimation..

— Quand il est possible de mesurer la concentration dans une zone où la totalité du polluant est entrainée et parfaitement mélangée (par exemple, dans un conduit d'extraction principal), l'estimation ne dépend pas de manière significative d'une modification aérodynamique de la source de particules. Sur le terrain, cela peut correspondre au cas d'un conduit d'évacuation d'une hotte ou d'une cabine de peinture.

4.3 Conclusion du chapitre 4

Dans ce chapitre, une méthode pour estimer les taux d'aérosol émis par des sources inconnues à partir de mesures de concentration en champ lointain a été présentée et évaluée. Cette méthode est applicable à des cas dans lesquels la ventilation est stable et les sources d'aérosols sont stationnaires. Ces deux conditions conduisent à des champs de concentration d'aérosol permanents. Cette méthode suppose également que les particules d'aérosol soient suffisamment diluées et de faible inertie afin de ne pas affecter l'écoulement du gaz porteur.

Une première étape (configuration 1) de validation dans un cas idéal (simulation CFD) a montré que le procédé permet une estimation précise d'une source isolée. Cette approche numérique permet également d'aider à positionner les capteurs pour l'application au cas expérimental. La méthode a ensuite été appliquée à la cabine ouverte afin de la valider sur le terrain. Cette application directe a permis de montrer que cette méthode est en mesure de reconstituer une source isolée similaire à celle utilisée pour la phase d'étalonnage.

Une seconde étape (configuration 2, 3 et 4) d'analyse du comportement de la méthode à différentes configurations d'application a montré que :

— l'estimation de plusieurs sources confondues (configuration 2, simulation CFD) est possible mais uniquement dans le cas où l'on se résume à l'émission globale de ces sources. En d'autre terme, nous ne sommes pas capable d'estimer chaque source individuellement mais nous pouvons estimer la somme des débits d'émission. La méthode n'est pas capable d'estimer individuellement des sources confondues puisque lors de la phase de calibration, les coefficients de transfert relatifs à chaque source ne sont pas significativement différents et donc l'estimateur des moindres carrées ne permet pas de discriminer les sources entre elles.

— l'estimation de sources distantes (configuration 3, simulation CFD) est possible que ce soit individuellement pour chaque source ou globalement. En effet, dans cette configuration, les coefficients de transfert sont sensiblement différents entre eux pour chaque source considérée. Dans cette configuration, l'estimateur des moindres carrées permet de discriminer les sources entre elles.

— l'estimation d'une source réelle significativement différente (d'un point de vue aérodynamique) de la source de référence (configuration 4, cas expérimental) est détériorée par rapport à la configuration idéale de sources similaires même si le taux d'émission

réel reste toujours dans l'intervalle de confiance de l'estimation. Toutefois, dans cette configuration, la concentration mesurée dans le conduit d'extraction n'a pas été significativement affectée par la modification de la source. Une relation simple peut donc être utilisée afin d'effectuer une estimation de la source à partir d'un unique capteur placé dans ce conduit d'extraction. Compte tenu de ces observations, plusieurs applications possibles sur le terrain peuvent être proposées :

— Lorsque les sources pour les différentes phases (calcul des coefficients de transfert et estimation) sont similaires d'un point de vue aéraulique, la méthode peut être utilisée directement ;

— Lorsque la source réelle modifie fortement l'aéraulique qui existait pendant la phase d'étalonnage et qu'une zone où les particules sont parfaitement mélangées existe, alors une méthode simplifiée en utilisant un seul capteur dans cette zone fournit de meilleurs résultats que la méthode ayant des capteurs dans le champ ;

— Lorsque la source réelle peut fortement affecter l'aéraulique qui existait pendant la phase d'étalonnage, on pourrait envisager d'appliquer une perturbation permanente pendant les phases de calibrage et d'estimation, de telle sorte que la perturbation causée par la source réelle devient négligeable par rapport à celle provoquée volontairement. Dans ce cas, le présent procédé peut alors être utilisé directement.

Après avoir établi la méthode pour des sources stationnaires, nous allons consacrer les chapitres suivants à des sources instationnaires. En effet, les sources instationnaires sont les plus répandues sur le terrain.

Chapitre 5

Estimation de l'intensité d'une source de particules en régime instationnaire

Dans ce chapitre, une méthode d'estimation d'une source en régime instationnaire est introduite. Le régime est instationnaire du point de vue du débit d'injection de la source alors que l'écoulement aéraulique du local est permanent. Tout d'abord, nous détaillerons le modèle envisagé pour la résolution de notre problème inverse. Puis, nous validerons cette méthode d'un point de vue numérique et expérimental (tout comme dans le chapitre précédent). Enfin, nous évaluerons la robustesse de la méthode à des mesures plus ou moins bruitées.

5.1 Modèle envisagé

D'un point de vue général, la méthode d'estimation de la source qui est mise en place dans cette partie est similaire à celle décrite dans le Chapitre 4, à savoir que deux étapes distinctes sont utilisées :

1. Calibration d'une **fonction** de transfert : dans le Chapitre 4, les différentes données (mesures de concentration, débits d'injection) étaient stationnaires, ce qui conduisait au calcul de **coefficients** de transfert. Dans le cas présent, les données étant instationnaires, une **fonction** de transfert dépendante du temps doit être déterminée à partir d'un débit source connu et d'une mesure de concentration.
2. Estimation de la source : dans cette phase, la fonction de transfert déterminée précédemment et des mesures de concentration (résultant de la source inconnue) sont utilisées afin d'estimer le débit source inconnu.

Afin de mener à bien ces deux points de la méthode, une approche convolutive du problème inverse est envisagée. Cette approche est détaillée ci-après.

5.1.1 Approche convolutive

Nous souhaitons évaluer un débit source (S) à une position ($\vec{P_0}$) à partir d'une mesure de concentration en particules (C) à la position ($\vec{P}$) . La façon la plus instinctive pour effectuer cette évaluation est de mettre en relation ces deux variables (le débit débit $S(P,t)$ et la concentration $C(P,t)$). Il est possible de croiser ces deux grandeurs avec l'équation d'advection diffusion générique, soit :

$$\frac{\partial C(P,t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left([\overline{u_i} + \tau_p g_i] C(P,t)\right) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(D(P)\frac{\partial C(P,t)}{\partial x_k}\right) + S(t)\phi(P-P_0), \tag{5.1}$$

où u_i est la composante de vitesse de l'air (uniquement dépendante de l'espace et non du temps, l'écoulement étant permanent (hypothèse propre à la méthode d'estimation utilisée), $C(P,t)$ est la concentration à la position P à l'instant t , $D(P,t)$ est la diffusivité (somme de la diffusivité brownienne et turbulente), $S(t)$ est le terme source et ϕ et une fonction caractéristique de la source telle que $\phi(P-P_0) = 1$ pour $P = P_0$ et $\phi(P-P_0) = 0$ sinon. Les conditions aux limites sont homogènes et initialement nous avons :

$$\begin{cases} C(P,0) = 0 \\ S(0) = 0 \end{cases}, \tag{5.2}$$

L'équation 5.1 peut être soumise à une transformation de Laplace. A partir des conditions limites et initiales, nous obtenons un système d'équation différentielle partiel dépendant uniquement de l'espace pour une valeur fixée de paramètre de Laplace p. On obtient la relation suivante :

$$pC(P,p) + \frac{\partial}{\partial x_i}\left([\overline{u_i} + \tau_p g_i] C(P,p)\right) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(D(P)\frac{\partial C(P,p)}{\partial x_k}\right) + S(p)\phi(P-P_0). \tag{5.3}$$

Cette nouvelle équation différentielle montre que la transformée de Laplace $C(P,p)$ de la concentration $C(P,t)$ au point P est proportionnelle au débit source $S(p)$. Nous pouvons définir à partir de cette observation la concentration (dans le domaine de Laplace) comme étant un produit de la source et d'une fonction de transfert appelée impédance $Z(P,p)$ telle que :

$$C(P,p) = Z(P,p)\,S(p). \tag{5.4}$$

Lorsque l'on revient dans le domaine temporel, on a :

$$C(P,t) = Z(P,t) \divideontimes S(t), \tag{5.5}$$

avec « $\divideontimes$ » l'opérateur du produit de convolution. Le développement de ce produit donne :

$$C(P,t) = \int_0^t Z(P,t-t')S(t)dt'. \tag{5.6}$$

5.1.2 Discrétisation du problème

L'équation 5.6 est continue dans le temps. Dans une approche inverse, cette équation doit être associée à une discrétisation en m pas de temps avec $t_i = t_0 + i\Delta t$ (pour i allant de 1 à m), où t_0 est l'instant initial correspondant à la concentration nulle et Δt est le pas de temps de discrétisation. La discrétisation de la concentration peut donc s'écrire sous la forme :

$$C_i = C(P,t_i) \; avec \; i = 1 \, à \, m. \tag{5.7}$$

De la même manière, les inconnues du problème inverse (impédance $Z(P,t)$ et débit source $S(t)$) sont paramétrées sur une base finie telles que :

$$\begin{cases} S(t) = \sum_{j=1}^{m} S_j h_j(t) \\ Z(t) = \sum_{j=1}^{m} Z_j h_j(t) \end{cases} \quad où \, h_j(t) = \Upsilon(t - t_{j-1}) - \Upsilon(t - t_j) \, avec \; j = 1 \, à \, m, \tag{5.8}$$

où Υ représente la fonction de Heaviside (figure 5.1). Cela signifie que S_j et Z_j sont les valeurs

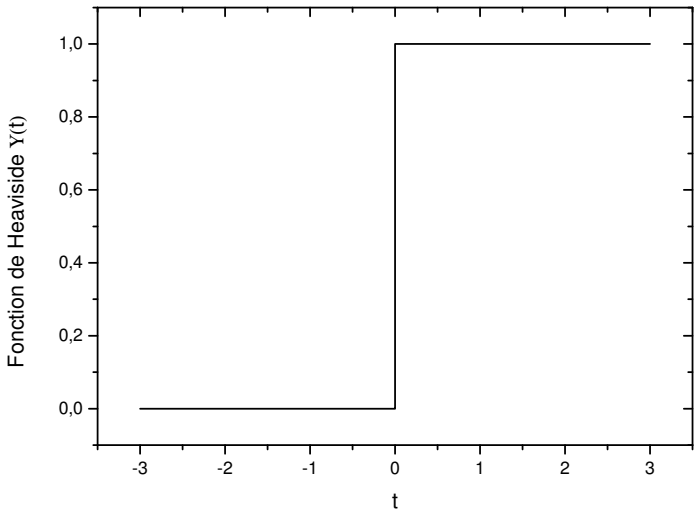


FIGURE 5.1 – Représentation de la fonction de Heaviside

moyennes des fonctions temporelles d'origines ($S(t)$ et $Z(t)$) sur l'intervalle $\left[t_{j-1}\, t_j\right]$. Si le pas de temps est suffisamment faible (la fréquence $\frac{1}{\Delta t}$ est supérieure aux plus grandes harmoniques présentent dans le spectre de Fourier de $S(t)$ et $Z(t)$), il est possible d'approcher l'équation 5.6 par une quadrature de la façon suivante :

$$C_i \approx \Delta t \sum_{j=1}^{m} Z_{i-j} S_j. \tag{5.9}$$

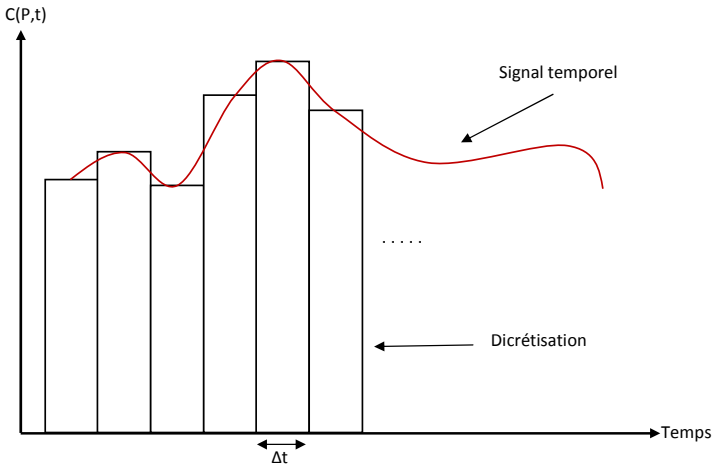


FIGURE 5.2 – Discrétisation d'un signal temporel par des rectangles moyens

La figure 5.2 est une représentation d'une quadrature par les valeurs moyennes. Cette discrétisation (qui est commutative) peut se mettre aussi sous une forme faisant intervenir des matrices et des vecteurs tels que :

$$C = \mathbf{M}(\mathrm{Z})\, S, \tag{5.10}$$

où chaque colonne de C, Z et S est composée des m valeurs scalaires de C_i, Z_i et S_i. L'opérateur $\mathbf{M}$ est une matrice carrée (appelée matrice de Toeplitz) qui est fonction d'un vecteur colonne. La matrice de Toeplitz d'un vecteur colonne x ayant m valeurs scalaires se définit de la manière suivante :

$$\mathbf{M}(x) = \Delta t \begin{bmatrix} x_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ x_2 & x_1 & 0 & \cdots & \vdots \\ x_3 & x_2 & x_1 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ x_m & x_{m-1} & x_{m-2} & \cdots & x_1 \end{bmatrix}. \tag{5.11}$$

Une des propriétés du produit de convolution est que celui-ci est commutatif. Ce qui signifie que l'équation 5.10 peut aussi s'écrire de la façon suivante :

$$C = \mathbf{M}(\mathbf{S})\, Z. \tag{5.12}$$

L'équation 5.12 est utilisée en tant que modèle linéaire pour l'identification de l'impédance et l'équation 5.10 constitue le modèle pour l'estimation de la source. Il est possible à partir de cette approche convolutive de faire un lien intéressant entre le coefficient de transfert du régime stationnaire et l'impédance (fonction de transfert) du régime instationnaire. Ce lien est décrit dans le paragraphe suivant.

5.1.3 Lien entre régime stationnaire et instationnaire

Dans le Chapitre 4, nous avons vu qu'il y a une proportionnalité entre le débit source et la concentration mesurée. Dans le cas de l'émission d'une source unique, la relation de la concentration est de la forme :

$$C^{\#}(P) = \Lambda S^{\#}, \tag{5.13}$$

où # se réfère à la valeur en régime stationnaire.Λ est le coefficient de transfert entre la concentration mesurée et la source de débit $S^{\#}$. Une des façons d'atteindre ce régime stationnaire, en démarrant avec une source et une concentration initialement nulles, est d'appliquer un échelon au niveau du débit source.

$$S(t) = S^{\#}\Upsilon(t), \tag{5.14}$$

Dans le domaine de Laplace l'équation 5.14 donne :

$$S(p) = \frac{S^{\#}}{p}. \tag{5.15}$$

Lorsque nous substituons la source $S(p)$ de l'équation 5.4 par celle de l'équation 5.15, nous obtenons :

$$pC(P,p) = Z(P,p)\,S^{\#}. \tag{5.16}$$

Or,

$$\lim_{p\to 0}[pC(P,p)] = \lim_{t\to+\infty}[C(P,t)] = C^{\#}(P).$$

Ainsi, nous avons :

$$\lim_{p\to 0}\left[Z(P,p)\,S^{\#}\right] = Z(P,0)\,S^{\#} = C^{\#}(P). \tag{5.17}$$

En comparant les équations 5.13 et 5.17, nous constatons que :

$$\Lambda S^{\#} = \lim_{p\to 0}\left[Z(P,p)\,S^{\#}\right], \tag{5.18}$$

Ainsi, il vient :

$$\Lambda = \int_0^{+\infty} \exp(-0t)\,Z(t)\,dt \tag{5.19}$$

L'équation 5.19 nous montre que l'intégrale sous la courbe de l'impédance correspond (pour un échelon de débit $S^{\#}$) à la valeur du coefficient de transfert en stationnaire pour ce même débit. Cette même équation permet de définir le terme de « dose » de la quantité x qui sera noté $D_x^{\int}$ et définie de la façon suivante :

$$D_x^{\int} = \int_0^{+\infty} x(t)\,dt \;\text{ avec }\; x(t) = C(P,t),\, Z(P,t)\,ou\,S(t). \tag{5.20}$$

A partir des équations 5.19 et 5.20, nous concluons que :

$$\Lambda = D_Z^{\int}. \tag{5.21}$$

Dans le but de pouvoir calculer $D_C^{\int}$ et $D_S^{\int}$, il faut que le débit $S(t)$ soit nul après un temps fini. Dans ces conditions, il est possible de réecrire la relation 5.4 pour un paramètre de Laplace $p = 0$ à partir des doses telle que :

$$D_C^{\int} = D_Z^{\int} D_S^{\int}. \tag{5.22}$$

Après avoir défini l'approche envisagée ainsi que la notion de dose, nous allons consacrer la suite de cette section à la résolution des deux étapes de la méthode. Dans un premier temps, la méthode des moindres carrées ordinaires est utilisée dans le but de déterminer l'impédance $Z(t)$ puis dans un second temps, nous estimerons le débit source $S(t)$ à partir également des moindres carrés ordinaires.

5.1.4 Régularisation de la déconvolution du problème

5.1.4.1 Estimation de l'impédance

Problème des moindres carrés ordinaires

La résolution par la méthode des moindres carrés ordinaires est similaire à celle utilisée dans le Chapitre 4. Dans le cas de l'estimation de l'impédance $Z(t)$, nous disposons d'un débit source connu et considéré sans bruit $S_{cal}(t)$ et d'une mesure de concentration $C_{cal}(t)$ composée de la somme d'une valeur exacte $C_{cal}^{exact}(t)$ avec un bruit de mesure ε d'espérance nulle ($\mathrm{E}(\varepsilon) = 0$). La concentration en vecteur colonne s'écrit donc :

$$C_{cal} = C_{cal}^{exact} + \varepsilon, \tag{5.23}$$

où,

$$C_{cal}^{exact} = \mathbf{M}(S_{cal})\, Z^{exact}. \tag{5.24}$$

Avec Z^{exact} l'impédance parfaite (sans bruit). A partir des équations 5.23 et 5.24 la solution des moindres carrées ordinaires est :

$$Z_{MCO}^{estim} = \arg\left\{\min\left[\chi_{MCO}^2(Z)\right]\right\}, \tag{5.25}$$

avec,

$$\chi_{MCO}^2(Z) = \|C_{cal} - \mathbf{M}(S_{cal})\, Z\|^2, \tag{5.26}$$

d'où,

$$Z_{MCO}^{estim} = \mathbf{M}(S_{cal})^{-\mathbf{1}}\, C_{cal}. \tag{5.27}$$

On remarque que ce problème d'identification de l'impédance est mal posé. En effet, la résolution de celui-ci dépend directement de la matrice de Toeplitz $\mathbf{M}(S_{cal})$ qui est une matrice triangulaire inférieure. Le déterminant de cette matrice correspond au produit des coefficients diagonaux, soit :

$$\det\left[\mathbf{M}(S_{cal})\right] = \left(\Delta t\, S_{cal_{1,1}}\right)^{m}. \tag{5.28}$$

Par conséquent, afin d'inverser cette matrice dans l'équation 5.27, il faut que le déterminant de celle-ci soit différent de zéro. Ainsi, le choix de l'instant initial est crucial et celui-ci doit être choisi pour une valeur de débit non nulle. Toutefois, si la première valeur de S_{cal} est proche de zéro alors le déterminant de la matrice tendra, lui aussi, vers zéro et le problème sera mal posé. La même remarque peut être faite pour le choix du pas de temps. En effet, un pas de temps trop faible apporterait une bonne résolution d'un point de vue de la discrétisation (équation 5.8) et le modèle de la concentration (équation 5.7) serait non-biaisé. Cependant, si ce pas de temps est trop faible alors le déterminant de $\mathbf{M}(S_{cal})$ avoisinerait zéro et le problème serait encore mal posé.

Par conséquent, Il faut réaliser une régularisation du système. Nous avons opté pour l'utilisation d'une méthode de type TSVD (Décomposition en Valeurs Singulières « Tronquée »).

Inversion de la matrice de Toeplitz par TSVD

Dans le Chapitre 4, nous avons introduit la Décomposition en Valeurs Singulières (SVD). Après un rapide rappel de la SVD, nous allons détailler le principe de cette même décomposition mais dite « tronquée ».

Pour rappel, la matrice $\mathbf{M}(\mathrm{S_{cal}})$ peut se décomposer en trois matrices :

$$\mathbf{M}(\mathrm{S_{cal}}) = \left[\mathbf{U}(\mathrm{S_{cal}})\right]\left[\mathbf{W}(\mathrm{S_{cal}})\right]\left[\mathbf{V}(\mathrm{S_{cal}})\right]^{\mathbf{T}}. \tag{5.29}$$

Nous noterons par la suite $\mathbf{U}(\mathrm{S_{cal}}) = \mathbf{U}$, $\mathbf{W}(\mathrm{S_{cal}}) = \mathbf{W}$ et $\mathbf{V}(\mathrm{S_{cal}}) = \mathbf{V}$. Il est possible de réecrire l'équation 5.27 telle que :

$$Z_{MCO}^{estim} = \left[V\right]\left[W\right]^{-\mathbf{1}}\left[U\right]^{\mathbf{T}} C_{cal}. \tag{5.30}$$

La matrice $\mathbf{W}$ est diagonale et composée de m valeurs singulières numérotées dans l'ordre croissant ($w_{11} > w_{22} > \cdots > w_{mm}$). Cette identité est valide seulement si et seulement si la matrice $\mathbf{M}(S_{cal})$ est de rang plein (c'est-à-dire si chaque colonne ou ligne est indépendante l'une de l'autre) avec sa valeur singulière la plus petite strictement positive. Dans la pratique, nous nous rendons compte que le nombre de conditionnement de $\mathbf{M}(\mathrm{S_{cal}})$ défini par $\mathrm{Cond}\left(\mathbf{M}(\mathrm{S_{cal}})\right) = \frac{w_{11}}{w_{mm}}$ est très grand. En conséquence, il faut régulariser le problème afin de diminuer ce conditionnement. La méthode de régularisation utilisée dans ce cas est une troncature des matrices $\mathbf{U}$, $\mathbf{W}$

et **V**. La troncature consiste à ne garder que les α (avec $\alpha < m$) premières valeurs singulières dans le cas de la matrice **W** et les α premières colonnes des matrices **U** et **V**. Le calcul de l'impédance estimée devient alors :

$$Z_{\alpha}^{estim} = \left[V_a\right]\left[W_a\right]^{-1}\left[U_a\right]^{\mathbf{T}} C_{cal}\,, \tag{5.31}$$

avec

$$\mathbf{W_a} = \begin{bmatrix} w_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_{22} & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & w_{\alpha\alpha} \end{bmatrix}, \mathbf{V_a} = \begin{bmatrix} V_1 & V_2 & \cdots & V_\alpha \end{bmatrix} \text{ et } \mathbf{U_a} = \begin{bmatrix} U_1 & U_2 & \cdots & U_\alpha \end{bmatrix}, \tag{5.32}$$

où $_{\mathbf{a}}$ est un indice indiquant que la matrice est tronquée. Il existe une troncature alternative qui consiste non pas à supprimer les $m-\alpha_1$ plus petites valeurs singulières mais à les remplacer par l'infini. L'impédance estimée s'écrit dans ce cas avec les matrices **U** et **V** complètes :

$$Z_{\alpha_1}^{estim} = \left[V\right]\left[W_\alpha\right]^{-1}\left[U\right]^{\mathbf{T}} C_{cal} \text{ avec } \left[\mathbf{W}_\alpha\right]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/w_{11} & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & 0 & 1/w_{\alpha\alpha} & 0 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & 0 & 0 & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{5.33}$$

Cette alternative a pour intérêt principal de garder les matrices **U** et **V** entières. Réaliser la troncature de la matrice de Toeplitz apporte une stabilité à la résolution du problème. Il faut néanmoins déterminer cet ordre de troncature α à appliquer à la SVD. Le paragraphe suivant traite d'une méthode permettant de déterminer l'ordre de troncature.

Choix du paramètre de troncature

Le choix de l'ordre de troncature passe par l'utilisation du principe de Morozov (Kirsch [1996]). Ce principe stipule que l'erreur$_{\text{rms}}$ (moyenne quadratique des résidus) doit être la plus proche possible de l'écart type (σ) sur le bruit de mesure. Nous cherchons donc à déterminer α tel que :

$$J\left(Z_{\alpha}^{estim}\right) < m\left(\sigma\right)^2 \text{ et } J\left(Z_{\alpha+1}^{estim}\right) \geq m\left(\sigma\right)^2. \tag{5.34}$$

Erreur commise sur l'estimation de l'impédance

Lors de l'estimation de l'impédance, il s'avère utile de déterminer l'erreur commise sur celle-ci. Nous pouvons déterminer cette erreur en partant des équations 5.29 et 5.31. La troncature SVD de l'équation 5.29 peut s'écrire sous la forme :

$$\mathbf{M} = \left[\mathbf{U}\right]\left[\mathbf{W}\right]\left[\mathbf{V}\right]^{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix}\mathbf{U_a} & \mathbf{U_b}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}W_a & 0\\ 0 & W_b\end{bmatrix}\begin{bmatrix}V_a\\ V_b\end{bmatrix}^{\mathbf{T}}. \tag{5.35}$$

Il vient alors :

$$\mathbf{M} = \left[\mathbf{U_a}\right]\left[\mathbf{W_a}\right]\left[\mathbf{V_a}\right]^{\mathbf{T}} + \left[\mathbf{U_b}\right]\left[\mathbf{W_b}\right]\left[\mathbf{V_b}\right]^{\mathbf{T}}. \tag{5.36}$$

Les matrices avec l'indice « $_{\mathbf{b}}$ » représente la partie tronquée/supprimée de la matrice de Toeplitz et celles avec l'indice « $_{\mathbf{a}}$ » correspondent à la partie conservée (les α plus grandes valeurs singulières). Si la matrice $\mathbf{M}$ est de rang plein, alors il est possible de définir une matrice $\mathbf{M}^{'}$ telle que :

$$\mathbf{M}^{'} = \left[\mathbf{V_a}\right]\left[\mathbf{W_a}\right]^{-\mathbf{1}}\left[\mathbf{U_a}\right]^{\mathbf{T}} + \left[\mathbf{V_b}\right]\left[\mathbf{W_b}\right]^{-\mathbf{1}}\left[\mathbf{U_b}\right]^{\mathbf{T}}. \tag{5.37}$$

En utilisant les propriétés d'orthogonalités, nous montrons :

$$\mathbf{M}^{'-\mathbf{1}}\mathbf{M}^{'} = \mathbf{M}^{'}\mathbf{M}^{'-\mathbf{1}} = \mathbf{I}_m. \tag{5.38}$$

De plus, il est possible d'écrire différentes propriétés à partir des matrices issues de la TSVD telles que :

$$\begin{cases}\left[\mathbf{U_a}\right]^{\mathbf{T}}\left[\mathbf{U_b}\right] = \left[\mathbf{U_b}\right]^{\mathbf{T}}\left[\mathbf{U_a}\right] = \left[\mathbf{V_a}\right]^{\mathbf{T}}\left[\mathbf{V_b}\right] = \left[\mathbf{V_b}\right]^{\mathbf{T}}\left[\mathbf{V_a}\right] = 0 & ;\\ \left[\mathbf{U_a}\right]^{\mathbf{T}}\left[\mathbf{U_a}\right] = \left[\mathbf{V_a}\right]^{\mathbf{T}}\left[\mathbf{V_a}\right] = \mathbf{I}_\alpha & ;\\ \left[\mathbf{U_b}\right]^{\mathbf{T}}\left[\mathbf{U_b}\right] = \left[\mathbf{V_b}\right]^{\mathbf{T}}\left[\mathbf{V_b}\right] = \mathbf{I}_{m-\alpha} & ;\\ \left[\mathbf{U_a}\right]\left[\mathbf{U_a}\right]^{\mathbf{T}} + \left[\mathbf{U_b}\right]\left[\mathbf{U_b}\right]^{\mathbf{T}} = \left[\mathbf{U}\right]\left[\mathbf{U}\right]^{\mathbf{T}} = \mathbf{I}_m & .\end{cases}$$

En utilisant ces propriétés ci-dessus, l'inverse de la matrice $\mathbf{M}$ s'écrit donc :

$$\mathbf{M}^{-\mathbf{1}} = \mathbf{M}^{'} = \left[\mathbf{V_a}\right]\left[\mathbf{W_a}\right]^{-\mathbf{1}}\left[\mathbf{U_a}\right]^{\mathbf{T}} + \left[\mathbf{V_b}\right]\left[\mathbf{W_b}\right]^{-\mathbf{1}}\left[\mathbf{U_b}\right]^{\mathbf{T}}. \tag{5.39}$$

L'estimation de l'impédance Z_α^{estim} se fait à partir du premier terme de l'équation 5.39 (notation « $_{\mathbf{a}}$ »). Ainsi, l'erreur sur l'estimation est représentée par le second terme de cette même équation (Notation « $_{\mathbf{b}}$ »). L'erreur effectuée sur le calcul de l'impédance (e_Z) se décrit comme étant la différence entre l'impédance estimée et celle exacte :

$$e_Z = Z_\alpha^{estim} - Z^{exact}, \tag{5.40}$$

ce qui conduit à :

$$e_Z = \left[V_a\right]\left[W_a\right]^{-1}\left[U_a\right]^{\mathbf{T}} C_{cal} - \mathbf{M^{-1}} C_{cal}^{exact}\ , \tag{5.41}$$

équivalent à (équations 5.23, 5.39) :

$$\begin{aligned} e_Z \;=\; & \left[V_a\right]\left[W_a\right]^{-1}\left[U_a\right]^{\mathbf{T}}\left(C_{cal}^{exact}+\varepsilon\right) \\ & -\left\{\left[\mathbf{V_a}\right]\left[\mathbf{W_a}\right]^{-1}\left[\mathbf{U_a}\right]^{\mathbf{T}} + \left[\mathbf{V_b}\right]\left[\mathbf{W_b}\right]^{-1}\left[\mathbf{U_b}\right]^{\mathbf{T}}\right\} C_{cal}^{exact}. \end{aligned} \tag{5.42}$$

Après avoir développé et simplifié l'équation 5.42, nous obtenons une erreur sur l'estimation de l'impédance s'écrivant :

$$e_Z = \left[\mathbf{V_a}\right]\left[\mathbf{W_a}\right]^{-1}\left[\mathbf{U}_a\right]^{\mathbf{T}}\varepsilon - \left[\mathbf{V_b}\right]\left[\mathbf{W_b}\right]^{-1}\left[\mathbf{U_b}\right]^{T} C_{cal}^{exact}. \tag{5.43}$$

Or dans le cas de la troncature, $\left[\mathbf{W_b}\right]^{-1} = 0$. Par conséquent, l'erreur s'écrit finalement :

$$e_Z = \left[\mathbf{V_a}\right]\left[\mathbf{W_a}\right]^{-1}\left[\mathbf{U}_a\right]^{\mathbf{T}}\varepsilon. \tag{5.44}$$

On peut conclure d'après l'équation 5.44 que l'erreur dépend uniquement de ε.

5.1.4.2 Estimation du débit inconnu

Lorsque l'impédance $Z_{\alpha_1}^{estim}$ est calculée, le modèle de convolution à résoudre pour estimer un débit source inconnu ($S^{inconnu}$) est représenté par l'équation 5.10. Afin de déterminer le débit source, nous utilisons une nouvelle mesure de concentration ($C_{mesurée}$) qui est définie de façon analogue à l'équation 5.23 avec un bruit de mesure ε d'espérance nulle ($\mathrm{E}(\varepsilon) = 0$). Dans ce cas, on a :

$$C^{exact} = \mathbf{M}(Z^{exact})\, S^{inconnu}. \tag{5.45}$$

La procédure de résolution de l'équation 5.45 est la même que celle développée dans le § précédent avec l'estimateur des moindres carrées ordinaires tel que :

$$S_{MCO}^{inconnu} = \arg\left\{\min\left[\chi^2_{MCO}(S)\right]\right\} = \mathbf{M}(Z_{\alpha_1}^{estim})^{-\mathbf{1}} C_{mesurée}, \tag{5.46}$$

avec :

$$\chi^2_{MCO}(S) = \|C_{mesurée} - \mathbf{M}(Z_{\alpha_1}^{estim})\, S\|^2. \tag{5.47}$$

Tout comme la détermination de l'impédance, l'estimation du débit se fait à partir de la TSVD et donc de la régularisation de la décomposition en valeurs singulières. La relation permettant le calcul de ce débit avec un ordre de troncature de α_2 est la suivante :

$$S_{\alpha_2}^{inconnu^{estim}} = \left[V\right]\left[W\right]^{-1}\left[U\right]^{\mathbf{T}} C_{mesurée} \text{ avec } \mathbf{M}(Z_{\alpha_1}^{estim}) = \left[V_a\right]\left[W_a\right]^{-1}\left[U_a\right]^{\mathbf{T}}. \tag{5.48}$$

Après avoir estimé le débit de la source inconnu, il est possible de calculer la dose émise. Cette dose correspond à la quantité de matière globale (masse émise) par la source. Il est possible aussi de calculer la dose de l'impédance qui représente le coefficient de transfert dans le cas stationnaire (section 5.1.3).

5.1.4.3 Estimation de la dose globale

Nous pouvons discerner deux méthodes pour calculer la dose de l'impédance ou de la source estimée. La première façon est d'utiliser la définition du calcul de la dose (équation 5.20). Les deux relations pour calculer les différentes doses sont les suivantes :

$$\begin{cases} D^{\int}_{Z^{estim}_{\alpha_1}} = \Delta t \sum \left(Z^{estim}_{\alpha_1}\right) & . \\ D^{\int}_{S^{inconnu^{estim}}_{\alpha_2}} = \Delta t \sum \left(S^{inconnu^{estim}}_{\alpha_2}\right) & . \end{cases} \tag{5.49}$$

La seconde façon de calculer les doses est d'utiliser la relation 5.22 tels que :

$$\begin{cases} D^{\int}_{Z^{estim}_{\alpha_1}} = \frac{D^{\int}_{C_{cal}}}{D^{\int}_{S_{cal}}} & . \\ D^{\int}_{S^{inconnu^{estim}}_{\alpha_2}} = \frac{D^{\int}_{C_{mesurée}}}{D^{\int}_{Z^{estim}_{\alpha_1}}} & . \end{cases} \tag{5.50}$$

La première méthode fait appel à deux valeurs scalaires d'un problème mal posé alors que la seconde méthode ne fait appel uniquement à une seule de ces valeurs scalaires ($D^{\int}_{Z^{estim}_{\alpha_1}}$).

5.1.5 Résumé : implémentation de la méthode

Dans ce passage, nous résumons la façon de résoudre le problème d'estimation en instationnaire.

1. *Calibration de l'impédance :*

   Nous utilisons le débit émis par une source de référence (débit connu) et la mesure de la concentration correspondante. Pour effectuer le calcul, nous utilisons la relation suivante combinée à la troncature de Morozov (déterminée à partir de $\sigma^{calibration}$ de la mesure de concentration) d'ordre α_1 :

   $$Z^{estim}_{\alpha_1} = \mathbf{M}_{\alpha_1}(S_{cal})^{-1} C_{cal}.$$

   Le calcul de la dose s'effectue à partir d'une de ces deux relations :

   $$D^{\int}_{Z^{estim}_{\alpha_1}} = \Delta t \sum \left(Z^{estim}_{\alpha_1}\right) \text{ ou } D^{\int}_{Z^{estim}_{\alpha_1}} = \frac{D^{\int}_{C_{cal}}}{D^{\int}_{S_{cal}}}.$$

2. *Estimation du débit source inconnu :*

   L'utilisation de l'impédance calibrée précédemment et de la mesure de concentration correspond à une source inconnue sont utilisées dans le but d'effectuer l'estimation du débit source. Nous utilisons la même procédure que pour la calibration de l'impédance avec un ordre de troncature α_2 (déterminée à partir de $\sigma^{estimation}$ de la mesure de concentration). La relation est donc la suivante :

$$S_{\alpha_2}^{inconnu^{estim}} = \mathbf{M}_{\alpha_2} (Z_{\alpha_1}^{estim})^{-1} C_{mesurée}.$$

   La dose se calcule à partir de :

$$D^{\int}_{S_{\alpha_2}^{inconnu^{estim}}} = \Delta t \sum \left(S_{\alpha_2}^{inconnu^{estim}} \right) \text{ ou } D^{\int}_{S_{\alpha_2}^{inconnu^{estim}}} = \frac{D^{\int}_{C_{mesurée}}}{D^{\int}_{Z_{\alpha_1}^{estim}}}.$$

5.2 Application de la méthode d'estimation

Dans cette section, la méthode précédemment présentée est évaluée dans le cas de la configuration 1 (Chapitre 3). Initialement, nous validons la méthode en l'appliquant d'abord dans le cas idéal de la simulation numérique (CFD) puis dans un cas expérimental. L'influence du bruit de mesure sur l'estimation de la source est ensuite étudiée (en simulation numérique).

5.2.1 Validation numérique de la méthode

Les principaux avantages de la simulation numérique sont :
— L'invariance des paramètres extérieurs (température, humidité,...) ;
— La parfaite constance dans le temps de la source de particules (pas de bruit).

La figure 5.3 représente les débits qui seront appliqués au niveau de la source lors des phases de calibration et d'estimation. Avant de passer à l'application de la méthode, il est nécessaire d'évaluer si les simulations numériques ont été correctement réalisées.

	DOSE DE L'INJECTION DE RÉFÉRENCE	DOSE DE L'INJECTION À ESTIMER
	mg	mg
En entrée	300	420
En sortie	299.9	419.8

TABLE 5.1 – Doses lors de l'étude de la conservation de la masse pour chaque simulation

Pour ce faire, la conservation des doses de particules entre l'entrée et la sortie est étudiée. Le

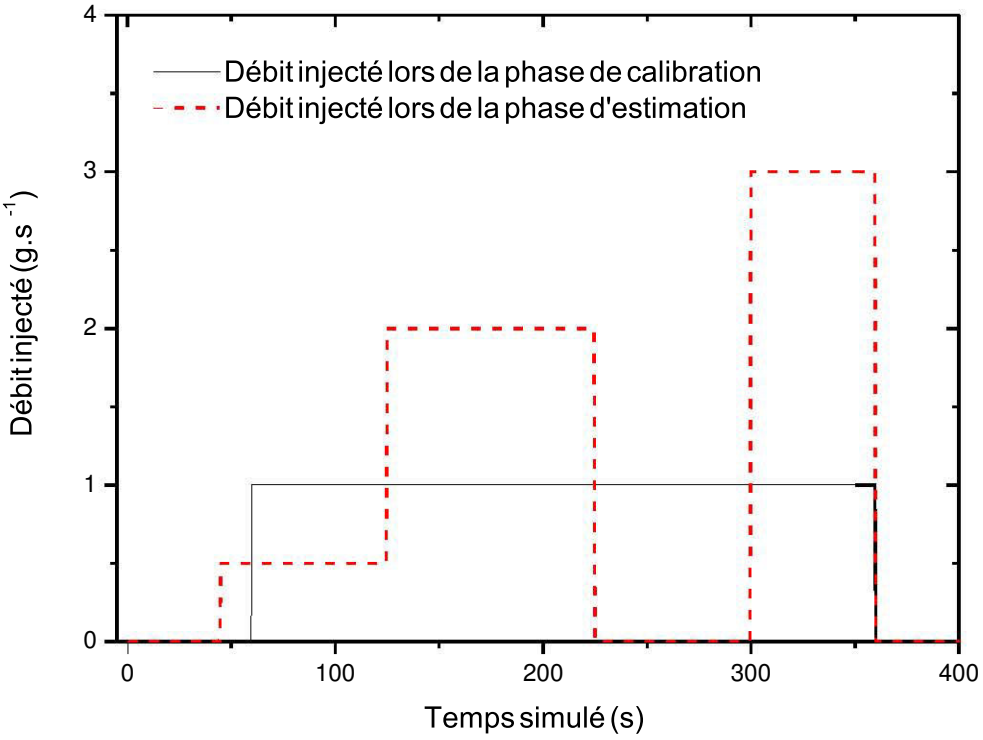


FIGURE 5.3 – Débits programmés dans les simulations numériques pour les phases de calibration et d'estimation

calcul de celles-ci est réalisé à l'aide de l'équation 5.20 (table 5.1). A partir des résultats obtenus dans la table 5.1, nous pouvons conclure qu'il y a une bonne conservation de la masse lors des simulations numériques. Après avoir validé la conservation lors des simulations, la méthode d'estimation va être appliquée.

$1^{ère}$ étape : Calibration de l'impédance

Dans cette étape, les deux signaux (de débit d'injection et de concentration mesurée en sortie) de la figure 5.4 sont utilisés. Il a été précisé dans la section 5.1.4.1 que la première valeur du débit de référence doit être non nulle dans le but de pouvoir inverser la matrice de Toeplitz $\mathbf{M}(S_{cal})$. De ce fait, le temps $t = t_0$ est pris au temps $t_{simulation} = 60s$ où le débit d'injection est fixé à une valeur échelon de $1g.s^{-1}$. La matrice de Toeplitz est constituée uniquement d'une valeur unitaire sur la partie inférieure. Les valeurs singulières de la décomposition SVD sont représentées sur la figure 5.5.

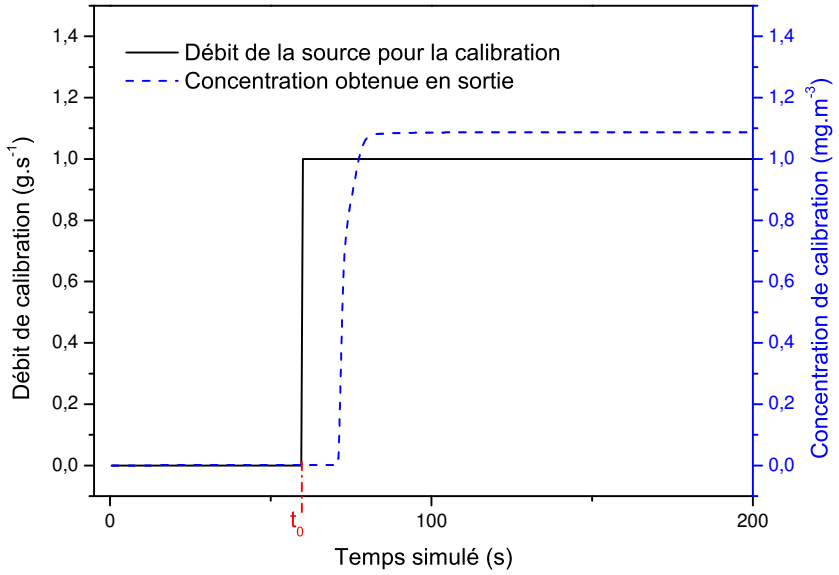


FIGURE 5.4 – Débit de la source pour la calibration et signal de concentration en sortie correspondant (validation CFD de la méthode)

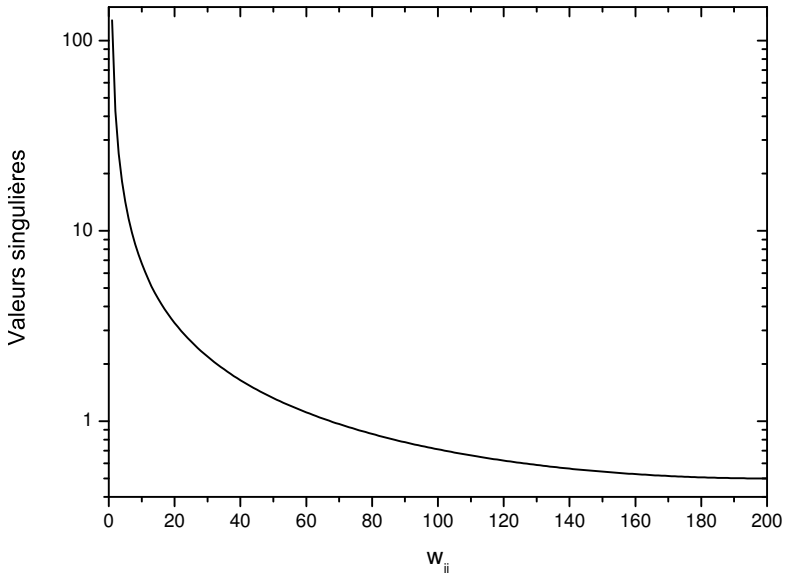


FIGURE 5.5 – Valeurs singulières de la matrice de Toeplitz ($\mathbf{M}(S_{cal})$) (validation CFD de la méthode)

Nous remarquons que les valeurs singulières sont bien classées dans l'ordre décroissant et passent de 127 pour la plus grande à 0.5 pour la plus petite. La troncature en utilisant le principe de Morozov va être réalisée afin de supprimer les plus petites de ces valeurs singulières pouvant poser un problème lors de l'inversion. Toutefois, dans ce cas numérique, il n'y a aucun bruit sur la concentration calculée, il est donc supposé comme extrêmement faible (de l'ordre de la convergence du calcul de la CFD pour les particules), soit un bruit d'environ $\sigma^{calibration} = 1 \times 10^{-8} g.m^{-3}$. La figure 5.6 représente l'erreur$_{rms}$ de la reconstruction du signal de concentration en fonction de l'ordre de troncature ainsi que la droite d'équation $y = \sigma^{calibration}$. Cette erreur$_{\text{rms}}$

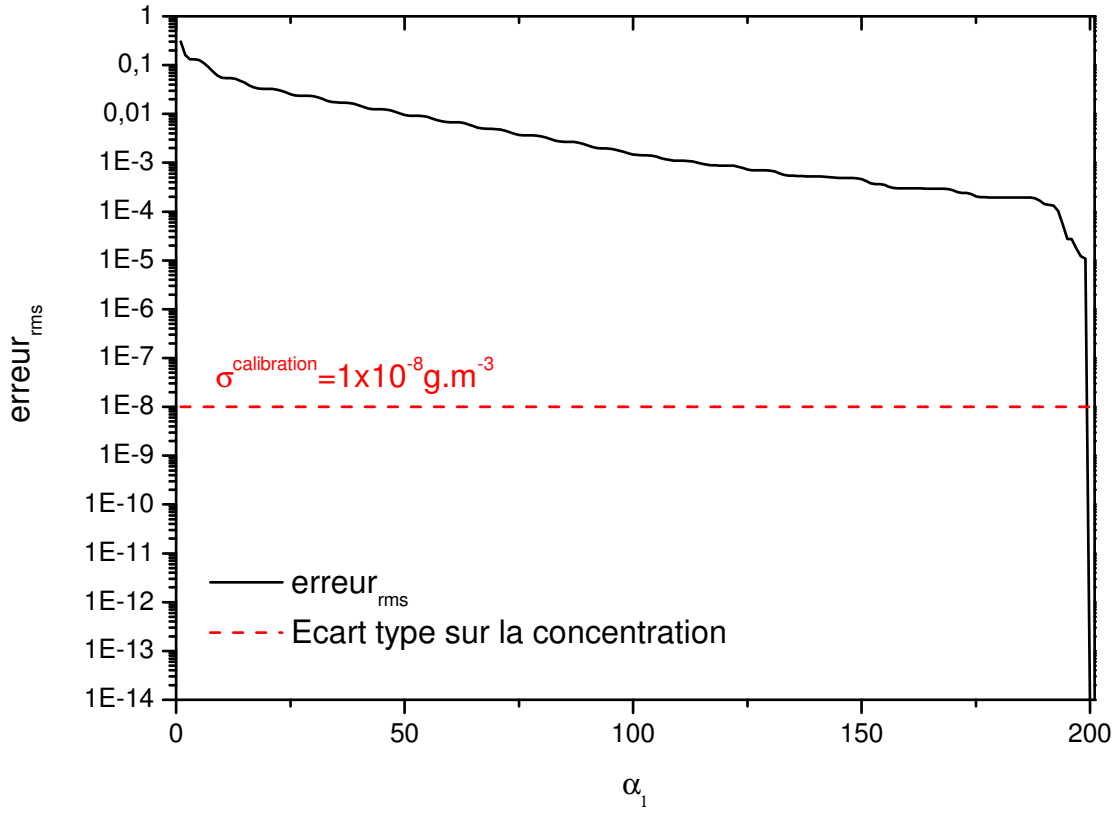


FIGURE 5.6 – Détermination de la troncature α_1 à partir de l'erreur$_{rms}$ et de l'écart type sur la concentration (validation CFD de la méthode)

se calcule pour chaque ordre de troncature telle que :

$$\text{erreur}_{\text{rms}} = \|C_{cal} - \mathbf{M}(Z_{\alpha_1}^{estim}) S_{cal}\|^2. \tag{5.51}$$

Lorsque nous sommes en présence d'un cas idéal sans bruit (CFD), nous remarquons que la troncature pour la calibration α_1 est de 199 sur 200 valeurs singulières. Par conséquent, pour

le calcul de la calibration, la troncature utilisée est très faible, seulement une valeur supprimée. La figure 5.7 décrit l'impédance résultante de l'équation 5.12. On remarque que l'impédance

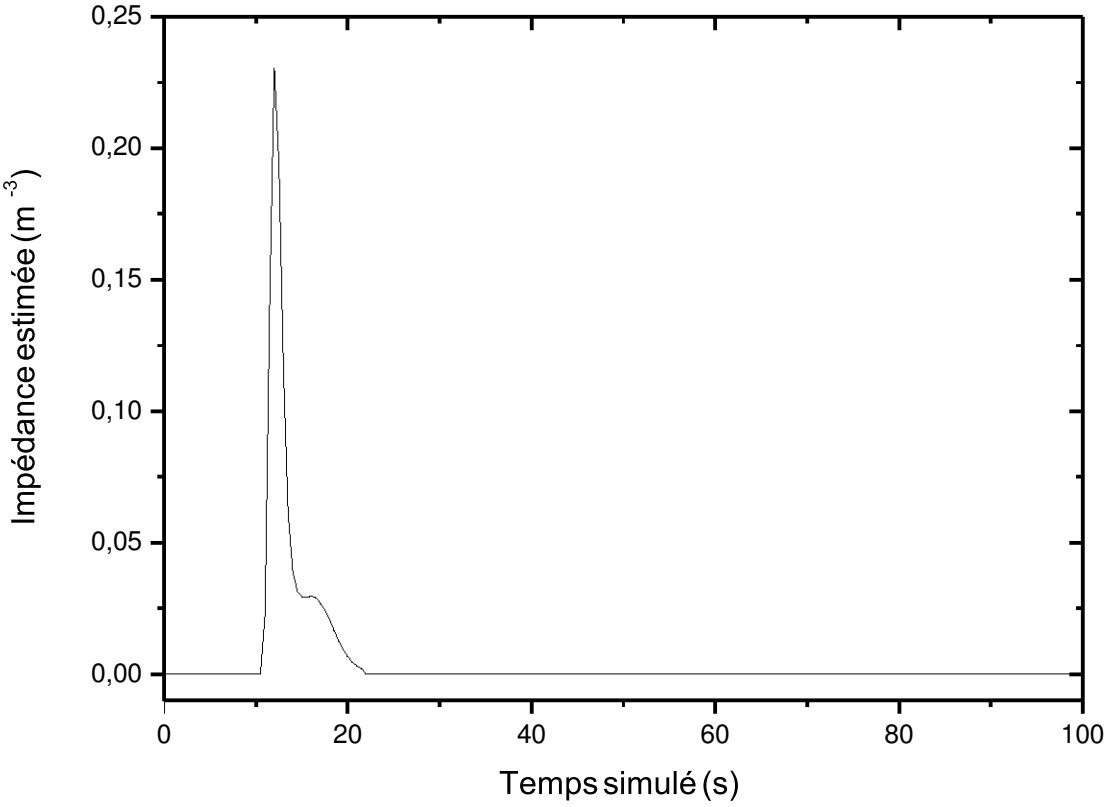


FIGURE 5.7 – Impédance idéale estimée (validation CFD de la méthode)

est « nette » avec néanmoins un décrochement (changement de pente d'accroissement) vers 15s. Afin d'analyser ce décrochement, une superposition des courbes de la concentration et l'impédance calculée sur les 30 premières secondes peut être intéressante (figure 5.8). Nous remarquons sur la figure 5.8 que la concentration subit un changement de courbure d'accroissement au même instant que celui remarqué sur l'impédance. Cette modification de courbure est probablement due à l'écoulement du polluant particulaire simulé dans notre calcul CFD. En effet, il est possible que deux « chemins » soient suivis par le polluant pour atteindre le point de mesure. Le premier parcours du polluant est direct (ce qui induit le pic de l'impédance) alors que le second passe par une zone où la vitesse du fluide est plus faible ce qui conduit à l'observation d'un temps de retard sur la concentration calculée et donc finalement provoque une cassure sur l'impédance déterminée. Maintenant que l'impédance est calibrée, la seconde étape

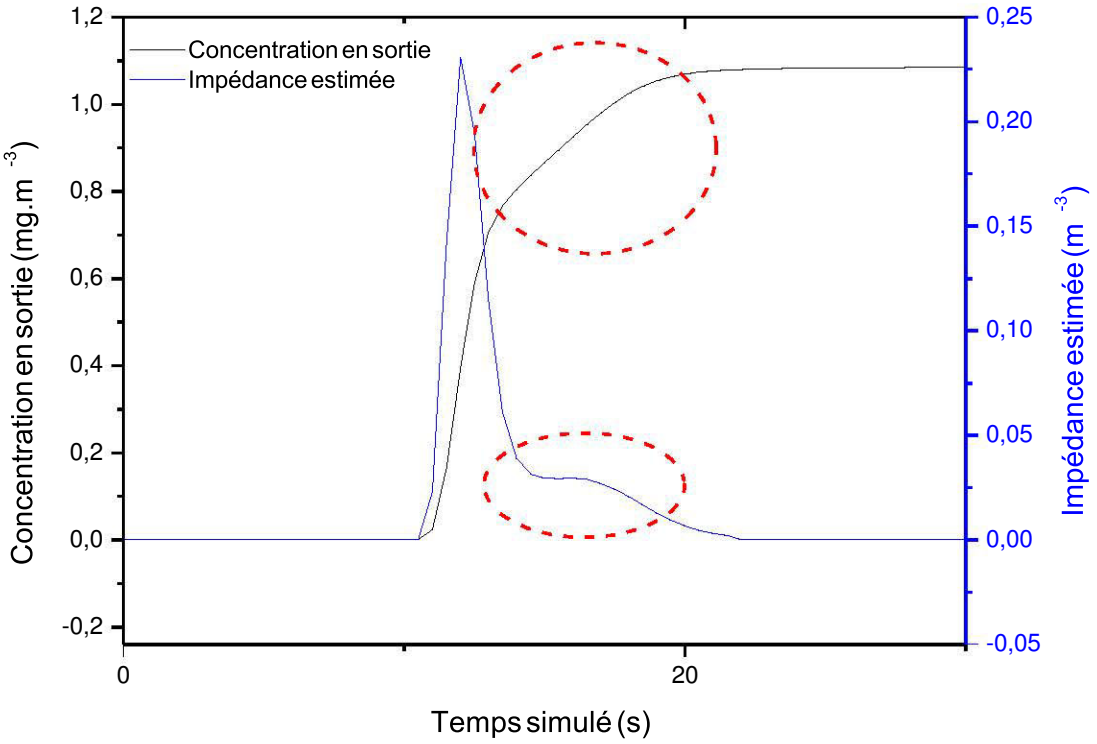


FIGURE 5.8 – Superposition des courbes d'impédance idéale et de concentration en sortie (validation CFD de la méthode)

qui consiste à estimer un débit source inconnu va être effectuée.

2^{nd} étape : Estimation d'une source inconnue

Nous allons dans ce paragraphe déterminer la source définie sur la figure 5.3 à partir de l'impédance (figure 5.7) et du signal de concentration calculée en sortie par la CFD (figure 5.9). Similairement à la phase de calibration, nous utilisons la méthode de troncature de Morozov. Pour effectuer le calcul matriciel (équation 5.10), il faut que la taille du vecteur impédance soit équivalent à celui de la concentration. Dans notre configuration, le vecteur concentration est constitué de 840 valeurs. Par conséquent, nous complétons le vecteur impédance de zéro pour avoir le même nombre de composantes que le vecteur concentration. Cet ajout n'a aucun impact puisque la partie « utile » de l'impédance est uniquement le pic caractéristique. La décomposition de la matrice de Toeplitz de l'impédance estimée précédemment donne les valeurs singulières suivantes (figure 5.10). Nous remarquons sur la courbe des valeurs singulières de la

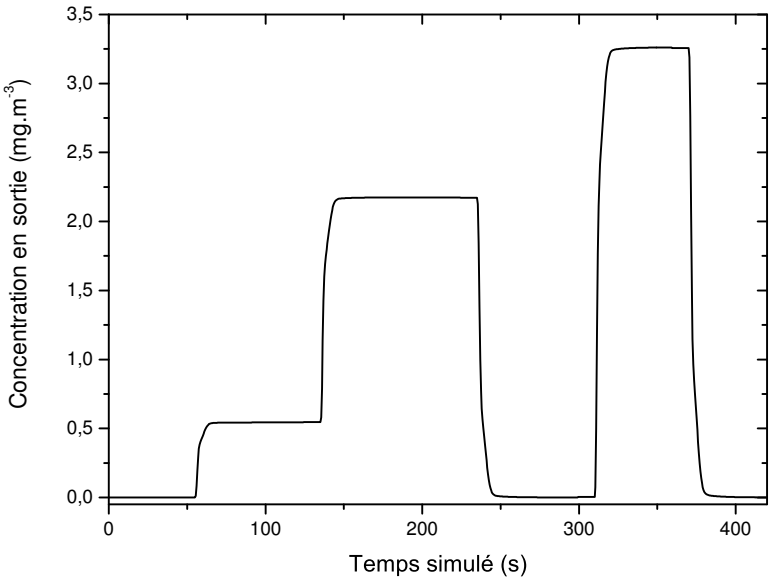


FIGURE 5.9 – Concentration en sortie calculée par CFD dans le cas à estimer (validation CFD de la méthode)

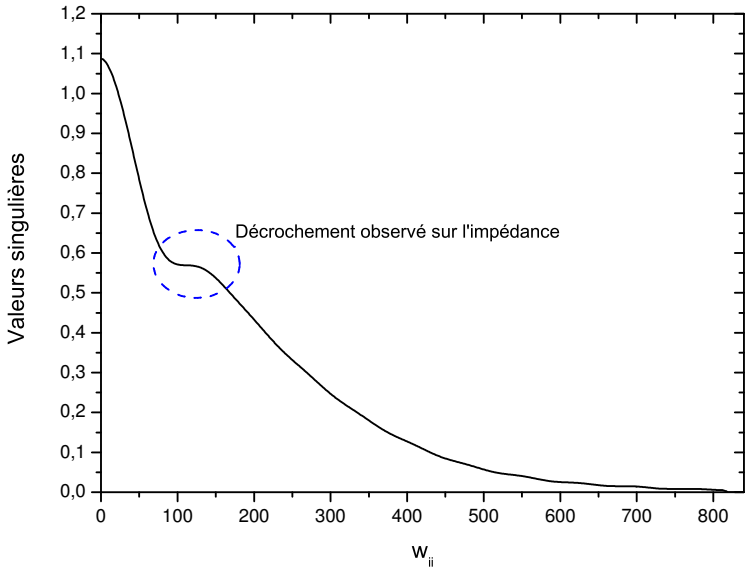


FIGURE 5.10 – Valeurs singulières de la matrice de Toeplitz ($\mathbf{M}(Z_{\alpha_1}^{estim})$) (validation CFD de la méthode)

matrice de Toeplitz de l'impédance qu'il existe un décrochement de courbe semblable à celui observé sur l'impédance. En comparaison avec les valeurs singulières de la phase de calibration, nous pouvons observer un ratio beaucoup plus grand entre la plus grande valeur et la plus petite. Dans le cas de la calibration, ce ratio est d'environ 10^2 et dans cette étape il est de l'ordre de 10^{18}. La troncature α_2 est déterminée à partir de la même valeur de bruit sur le signal (soit $\sigma^{estimation} = 1 \times 10^{-8} g.m^{-3}$). La figure 5.11 représente la détermination de la troncature. Dans

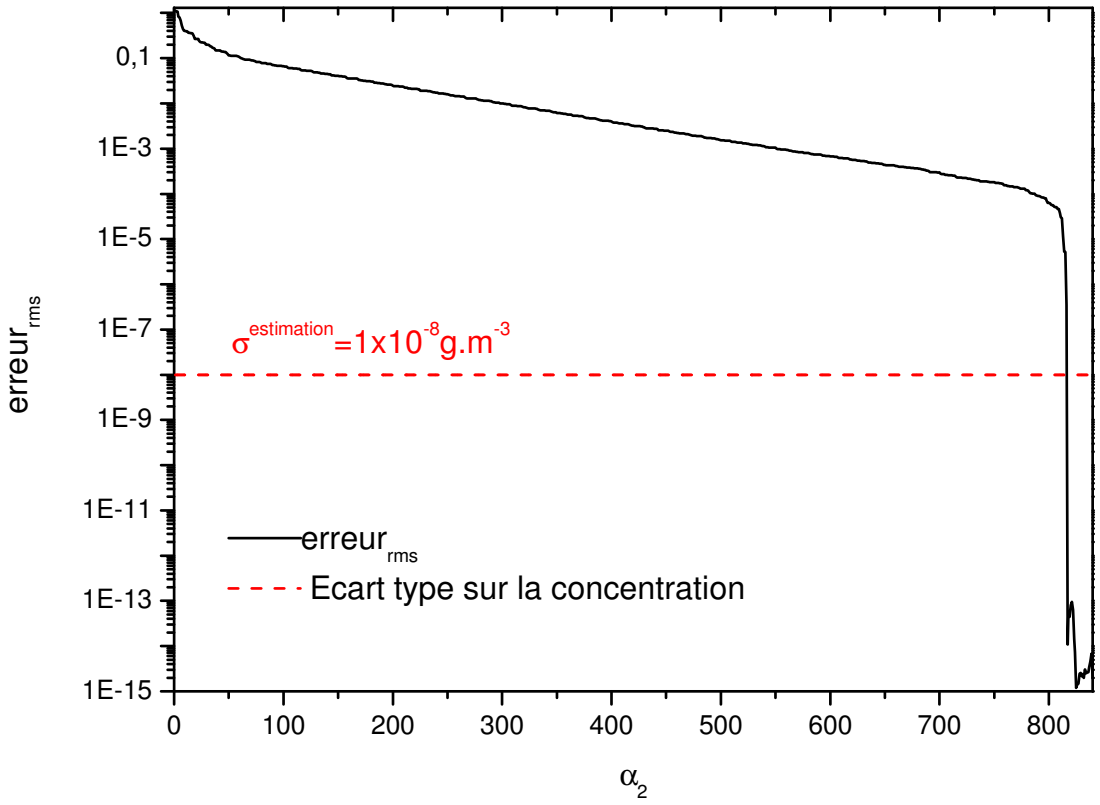


FIGURE 5.11 – Détermination de la troncature α_2 à appliquer lors de la TSVD (validation CFD de la méthode)

ce cas, la troncature α_2 est une fois encore pas très importante puisque nous conservons 816 valeurs sur les 840 disponibles. La figure 5.12 correspond à l'estimation du débit programmé dans la simulation numérique. Nous nous rendons compte que l'allure temporelle de notre estimation est très proche de celle du débit programmé. Afin de parfaire cette comparaison, les doses programmées et estimées, qui d'après la figure 5.12 sembleraient être très proche l'une de l'autre, sont analysées et reportées dans la table 5.2. Comme nous pouvions le penser après avoir observé l'allure temporelle, nous remarquons que la dose estimée est très proche de celle

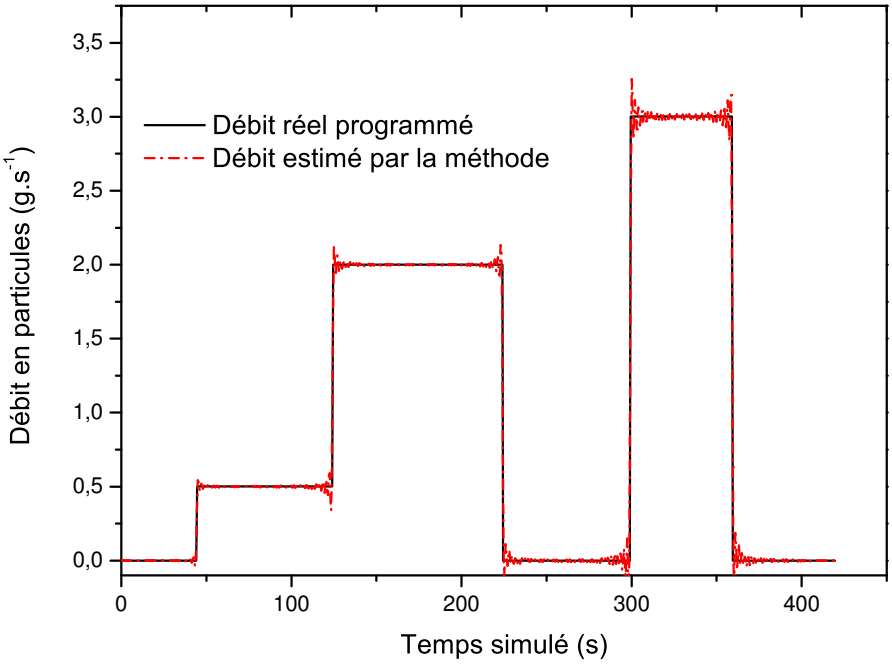


FIGURE 5.12 – Comparaison entre le débit programmé et estimé dans le cas de la CFD pour une configuration idéale non-bruitée (validation CFD de la méthode)

DOSE DE L'INJECTION PROGRAMMÉE	DOSE DE L'INJECTION ESTIMÉE
mg	mg
420	420.02

TABLE 5.2 – Doses programmée et estimée lors de la validation CFD de la méthode

programmée. L'estimation réalisée est donc de très bonne qualité et la méthode d'estimation est validée dans le cas numérique sans bruit de mesure. Maintenant, la méthode va être appliquée à un cas expérimental afin de la soumettre à un cas pratique présentant un bruit de mesure non maitrisable.

5.2.2 Validation expérimentale de la méthode

Dans cette section, nous appliquons la méthode au cas expérimental avec comme source de particules le système de génération contrôlable (Palas RBG-1000). Avant toute chose, une description succincte de la modification sur le banc d'essais est réalisée puis nous étudierons l'estimation dans la configuration 1.

Modification du banc expérimental

Dans la perspective d'étudier des machines portatives (sources totalement différentes du Palas RBG-1000 utilisé dans le cas de référence) des ventilateurs qui ont pour objectif de perturber l'aéraulique de l'injection de la source sont mis en place. En effet, dans la section « Configurations limites d'utilisation de la méthode » du chapitre 4, nous avions établi les limites de l'application de la méthode en stationnaire. La conclusion qui en a été tirée est que lorsque la source à estimer est aérauliquement très différente de la source utilisée pour la calibration, alors il faut perturber chacune des sources de façon à ce que cette différence soit masquées. La figure 5.13 présente l'installation des différents ventilateurs qui sont positionnés dans la cabine afin de perturber le Palas RBG-1000 et les machines portatives. Tous les futurs essais seront réalisés

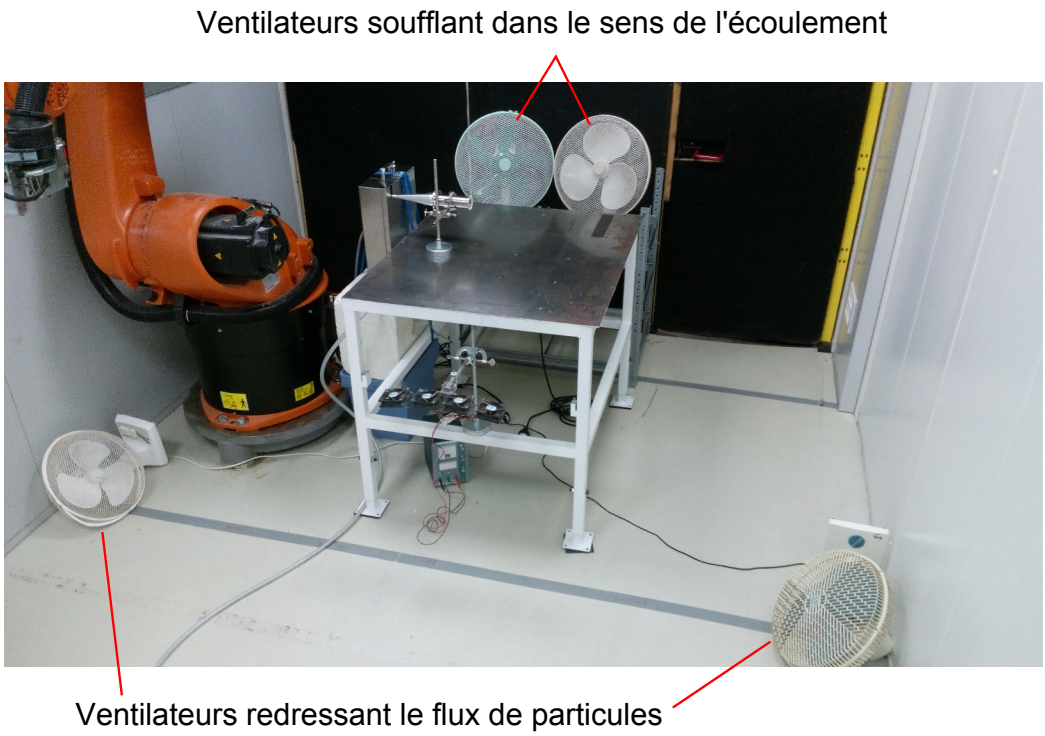
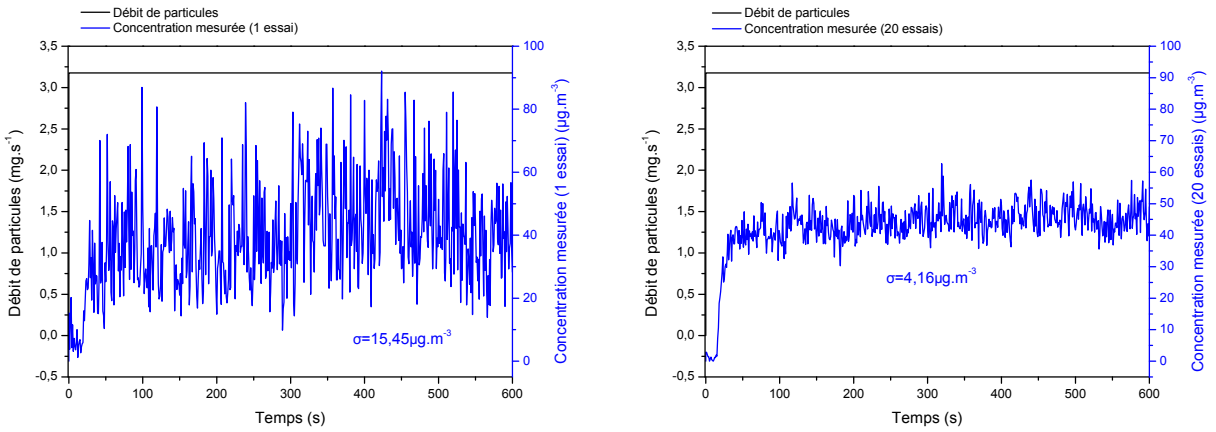


FIGURE 5.13 – Photographie de l'installation des ventilateurs qui perturbent l'injection des différentes sources

avec ces ventilateurs en fonctionnement et le capteur unique utilisé est l'APS situé en sortie (là où l'ensemble des poussières sont conduites) avec un temps d'acquisition des données de 1s. De plus, dans ce cas expérimental, la poussière utilisée est celle issue du procédé de ponçage du bois. Les caractéristiques de cette poussière sont présentées dans le Chapitre 3.

$1^{ère}$ étape : Calibration de l'impédance

La calibration de l'impédance se fait à partir du débit de particules et du signal de concentration enregistré par l'APS. Nous effectuons 20 essais identiques afin d'obtenir un signal moyenné de la concentration et ayant un bruit de mesure le plus faible possible. La figure 5.14a représente la mesure réalisée sur un essai et la figure 5.14b décrit ce même signal moyenné sur 20 essais. Le débit de particules émis par le Palas est considéré comme stationnaire durant l'injection et ce pour les 20 essais. La moyenne sur les 20 essais est utilisée pour calibrer l'impédance puis-



(a) Mesure sur 1 essai

(b) Mesure moyennée sur 20 essais

FIGURE 5.14 – Débit émis par le Palas RBG-1000 et concentration mesurée par l'APS pour la phase de calibration de l'impédance (validation expérimentale de la méthode)

qu'elle permet d'obtenir un signal moins bruité. Nous effectuons le calcul sur les 600 secondes du signal de la figure 5.14b. Les vecteurs sont donc composés de 600 valeurs puisque la période d'acquisition de l'APS est, nous le rappelons, de 1s. La figure 5.15 représente l'erreur r_{rms} sur la concentration calculée dans le but de déterminer l'ordre de la troncature, à appliquer sur le TSVD de la matrice de Toeplitz du débit d'injection, suivant le critère de Morozov. D'après les résultats obtenus sur la courbe représentant l'erreur r_{rms} en fonction de la troncature, nous remarquons que celle-ci est plutôt forte puisque nous ne conservons que 35 valeurs sur les 600 disponibles. Contrairement au cas de la simulation numérique où les signaux utilisés sont non-bruités, ici, le rapport signal sur bruit (RSB_{L2}) est de 9.1 ce qui classe la mesure dans une catégorie de signaux fortement bruités. Le rapport signal sur bruit se définit de la façon suivante :

$$RSB_{L2}(C) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} C_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} \varepsilon_i^2}}. \tag{5.52}$$

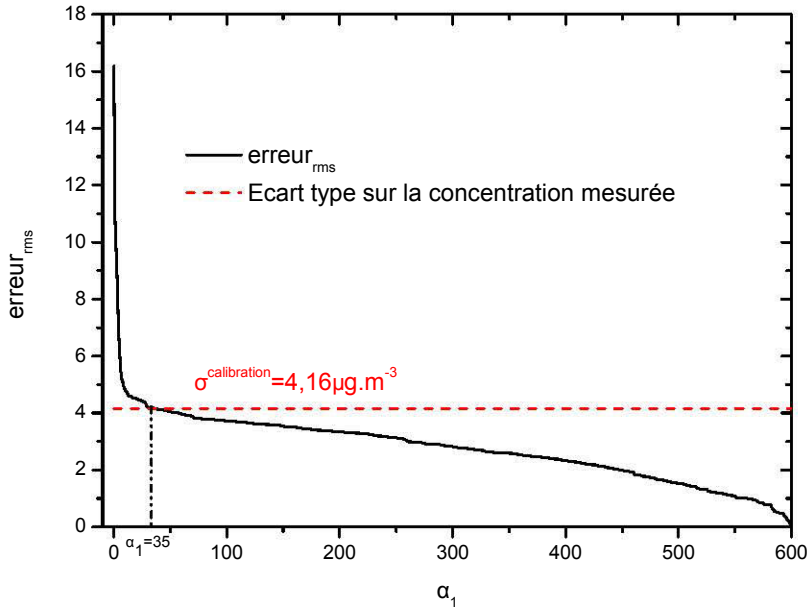


FIGURE 5.15 – Détermination de la troncature α_1 à appliquer lors de la TSVD (validation expérimentale de la méthode)

L'impédance résultante de ces deux signaux et de la troncature réalisée est décrit sur la figure 5.16.

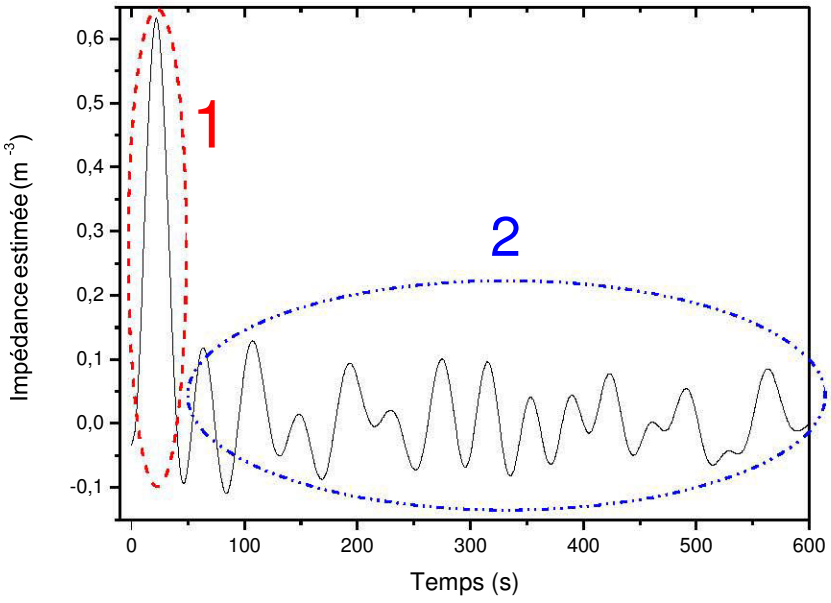


FIGURE 5.16 – Impédance expérimentale obtenue à partir des signaux moyennés sur 20 essais et de la troncature $\alpha_1 = 35$ (validation expérimentale de la méthode)

On distingue très nettement sur cette impédance expérimentale deux zones. La première (**1**) correspond au pic caractéristique qui représente le temps de réponse du capteur ainsi que l'intensité globale de la réponse par rapport à l'injection. La seconde zone (**2**) quant à elle, représente des fluctuations « non » physiques qui sont uniquement dues au bruit sur la mesure de concentration. Nous remarquons sur cette impédance qu'il n'y a pas (comme dans le cas de la CFD) de changement de pente de celle-ci après le pic principal. Ceci est probablement dû au fait que nous avons rajouté des ventilateurs de brassage et qu'il n'y a plus les deux « chemins » d'écoulement des particules. L'impédance étant déterminée, le débit de la source inconnue peut donc être estimé à partir d'une nouvelle mesure de concentration.

2^{nd} étape : Estimation d'une source inconnue

Dans ce paragraphe, le Palas RBG-1000 est à nouveau utilisé comme source. La manipulation effectuée suit le même protocole que dans la phase de calibration. Nous avons décidé d'injecter un débit de particules qui suivrait la même allure temporelle que lors de la simulation CFD. La figure 5.17 représente le débit réellement injecté ainsi que la concentration mesurée.

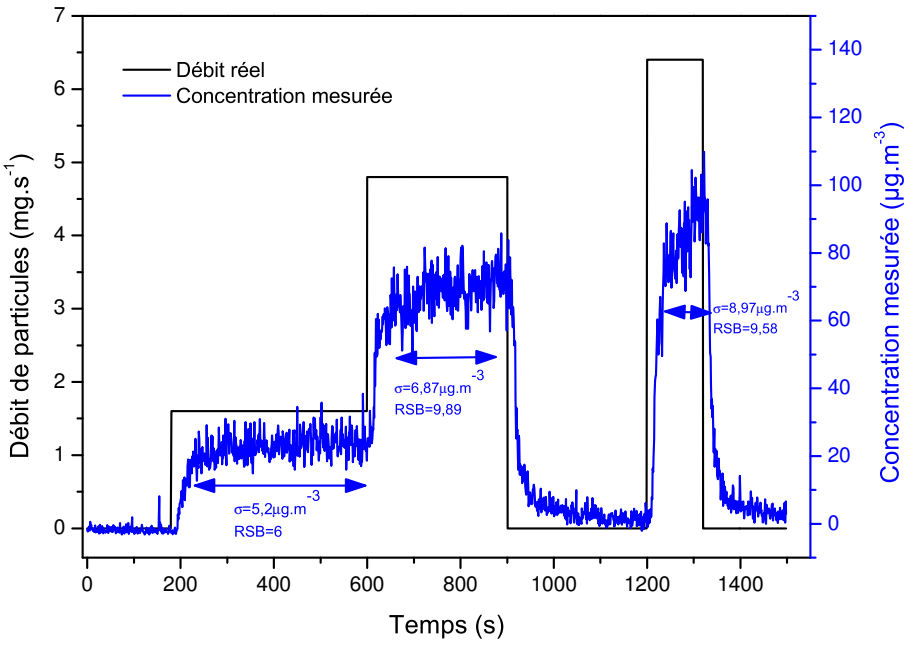


FIGURE 5.17 – Débit réellement injecté et concentration correspondante mesurée lors de la 2^{nd} étape de la méthode appliquée au cas expérimental (validation expérimentale de la méthode)

A partir de l'impédance estimée précédemment et de la mesure de concentration, la troncature optimale ainsi que l'estimation du débit source vont être effectuées. La figure 5.18 représente l'erreurr_{rms} sur la concentration mesurée obtenue à partir de l'impédance estimée. L'écart-type de mesure considéré pour la détermination de la troncature α_2 est celui correspondant au rapport signal sur bruit le plus restrictif (soit $\sigma^{estimation} = 3.85\mu g.m^{-3}$). A l'aide de la courbe

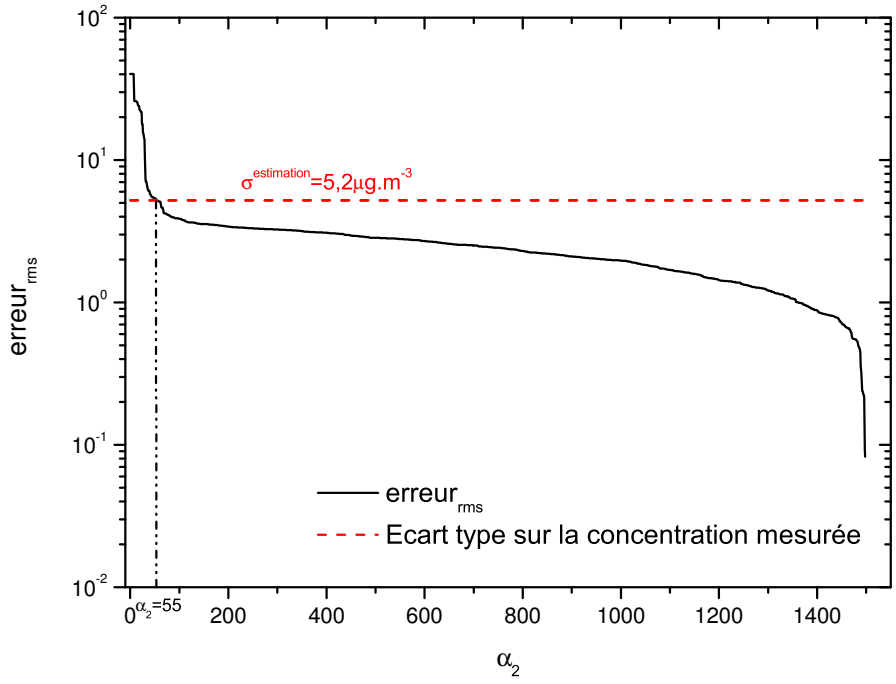


FIGURE 5.18 – Détermination de la troncature α_2 à appliquer lors de la TSVD (validation expérimentale de la méthode)

représentant l'erreurr_{rms} en fonction de la troncature, nous pouvons choisir une troncature telle que $\alpha_2 = 55$. En utilisant la concentration mesurée, l'impédance ainsi que l'ordre de troncature, nous obtenons le débit estimé présenté sur la figure 5.19. Nous remarquons d'après cette courbe du débit estimé que l'allure temporelle semble être suivie correctement. La dose émise peut être calculée dans le cas du débit réel et estimé. Nous obtenons les valeurs recensées dans la table 5.3.

DOSE DE L'INJECTION RÉELLE	DOSE DE L'INJECTION ESTIMÉE
g	g
2.880	2.867

TABLE 5.3 – Dose réelle et estimée lors de la validation expérimentale de la méthode

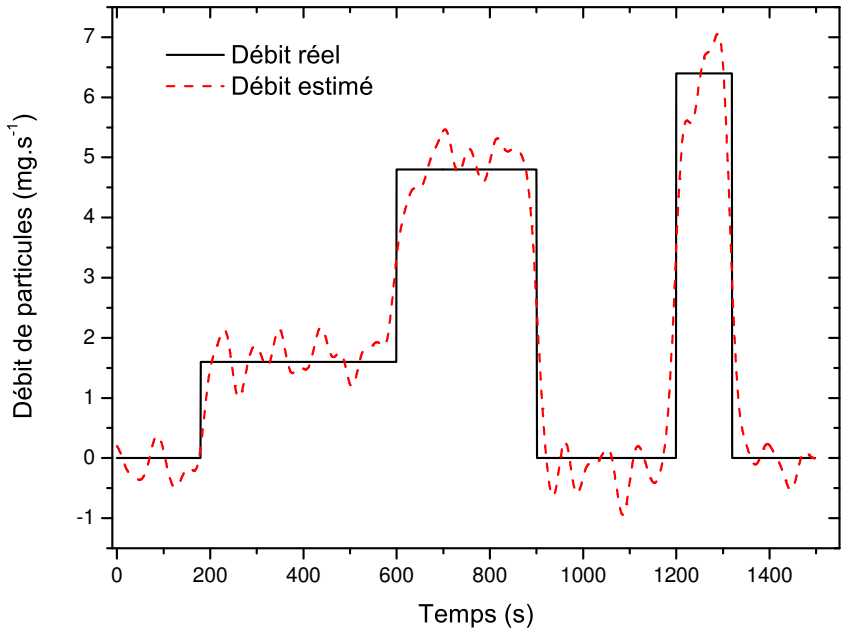


FIGURE 5.19 – Estimation du débit injecté par le Palas RBG-1000 (validation expérimentale de la méthode)

Nous remarquons, d'après ce résultat, que la dose émise estimée est très proche de la dose émise réelle. Par conséquent, l'application de la méthode d'estimation dans le cas expérimental avec le système de génération contrôlable peut être validé.

5.2.3 Conclusion de la validation

Dans les parties précédentes, la méthode d'estimation a été appliquée à un cas numérique (CFD) idéal sans aucun bruit de mesure puis à un cas expérimental dans le but de la valider. Tout d'abord, lorsque le signal n'est pas bruité, la méthode fonctionne parfaitement (reconstruction temporelle du signal de la source et dose émise par celle-ci) et la troncature lors de la TSVD reste très faible. Ensuite, l'application de cette méthode à l'injection du générateur d'aérosol Palas RBG-1000 a permis de valider la méthode d'un point de vue expérimental. En effet, même si le signal est, cette fois-ci, fortement bruité, l'estimation reste entièrement cohérente avec la réalité. Par ailleurs, dans le cas où le signal est bruité, nous remarquons que la troncature lors de la TSVD est beaucoup plus importante. Après avoir validé la méthode, une étude de la robustesse de celle-ci à différents niveaux de bruit sur le signal de concentration est initiée. Pour ce faire, l'utilisation exclusive des signaux issus de la simulation numérique est privilégiée.

5.2.4 Étude de l'impact du rapport RSB sur l'estimation

Dans cette section, trois niveaux de rapport RSB (équation 5.52) sont étudiés.

$$\begin{cases} RSB_{L2}(C) = 25 \Rightarrow & R_1 \\ RSB_{L2}(C) = 5 \Rightarrow & R_2 \\ RSB_{L2}(C) = 2.5 \Rightarrow & R_3 \end{cases}$$

Plus ce rapport est petit et plus le signal sera bruité.

$1^{ère}$ étape : Calibration de l'impédance

L'impédance est estimée pour chaque rapport RSB différent. La figure 5.20 représente les trois niveaux de bruitage du signal de référence calculé dans la CFD. On visualise bien sur la figure

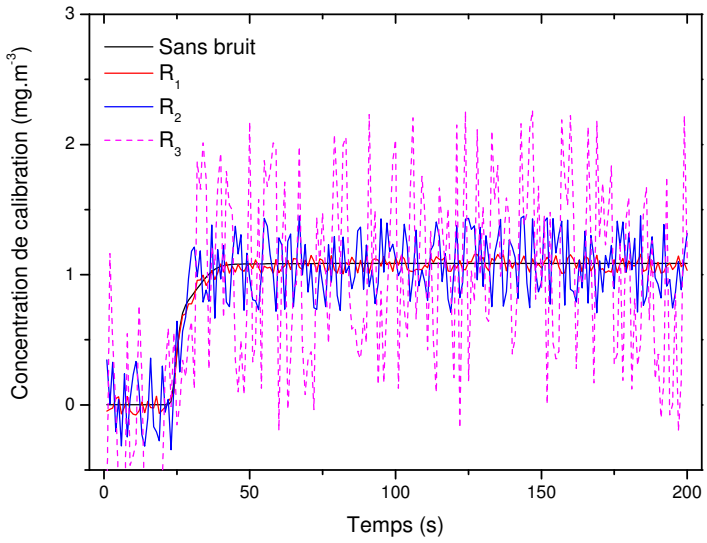


FIGURE 5.20 – Concentrations de référence calculées dans la CFD pour les différents niveaux de bruit (impact du rapport RSB sur l'estimation)

5.20 les différents niveaux de bruitage du signal. La seconde partie de la calibration consiste à déterminer l'ordre de troncature α_1 pour chaque niveau de bruit. La figure 5.21 représente l'erreurr_{rms} en fonction de la troncature. Nous remarquons aisément que plus le rapport RSB est faible, plus la troncature est forte. En effet, les troncatures pour les cas R_1, R_2 et R_3 sont respectivement $\alpha_1^{R_1} = 35$, $\alpha_1^{R_2} = 15$ et $\alpha_1^{R_3} = 1$. La figure 5.22 présente les impédances obtenues.

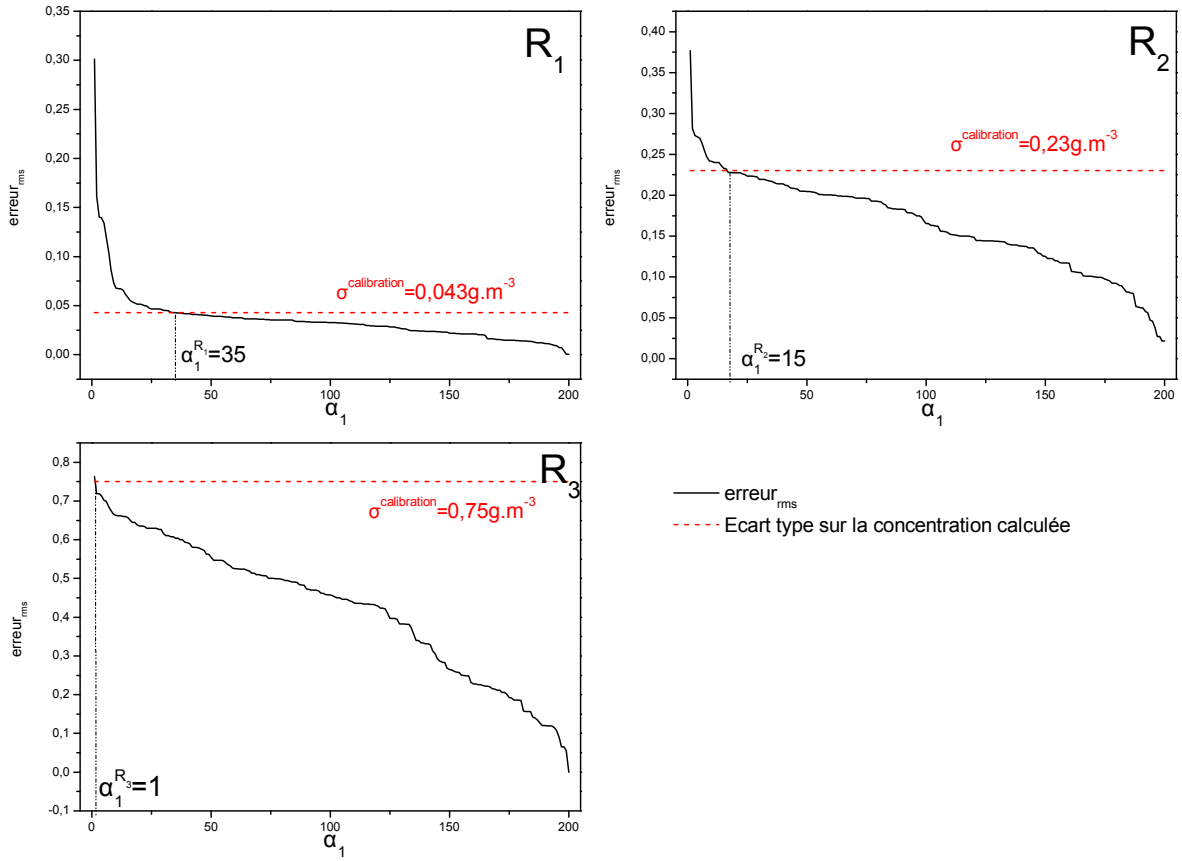


FIGURE 5.21 – Détermination de la troncature α_1 pour les différents niveaux de bruitage (impact du rapport RSB sur l'estimation)

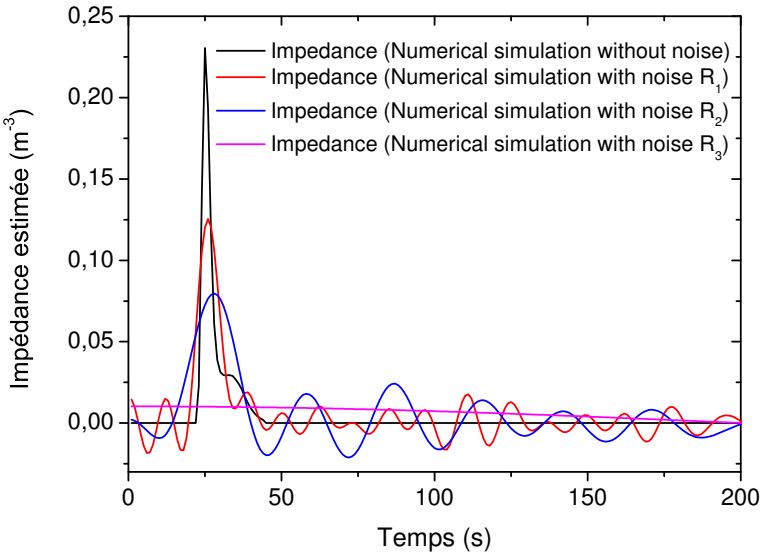


FIGURE 5.22 – Impédances estimées pour les différents niveaux de bruitage (impact du rapport RSB sur l'estimation)

Plus le rapport RSB est petit et plus l'impédance s'écarte de l'impédance idéale (sans aucun bruit). On constate que l'amplitude du pic est quasiment de moitié lorsque le rapport signal sur bruit atteint 25 et le pic disparait totalement pour un RSB de 2.5. Néanmoins, si l'on regarde la dose de l'impédance (table 5.4), on remarque que lorsque le rapport RSB est de 25 alors la dose est quasiment identique au cas idéal et lorsque le RSB diminue, nous dérivons de celui-ci mais faiblement. Après avoir déterminé l'impédance pour les différents RSB considérés nous

NIVEAU DE BRUIT	DOSE DE L'IMPÉDANCE ESTIMÉE	ÉCART PAR RAPPORT AU CAS SANS BRUIT
	$s.m^{-3}$	%
Sans bruit	1.077	
R_1	1.072	0.46
R_2	0.990	8.07
R_3	1.310	22.56

TABLE 5.4 – Doses de l'impédance estimée pour les différents niveaux de bruit (impact du rapport RSB sur l'estimation)

passons à la phase d'estimation de la source inconnue.

2^{nd} étape : Estimation d'une source inconnue

Dans ce paragraphe, nous effectuons l'estimation de la source à partir de la concentration bruitée avec les trois RSB précédemment utilisés et les impédances correspondantes.

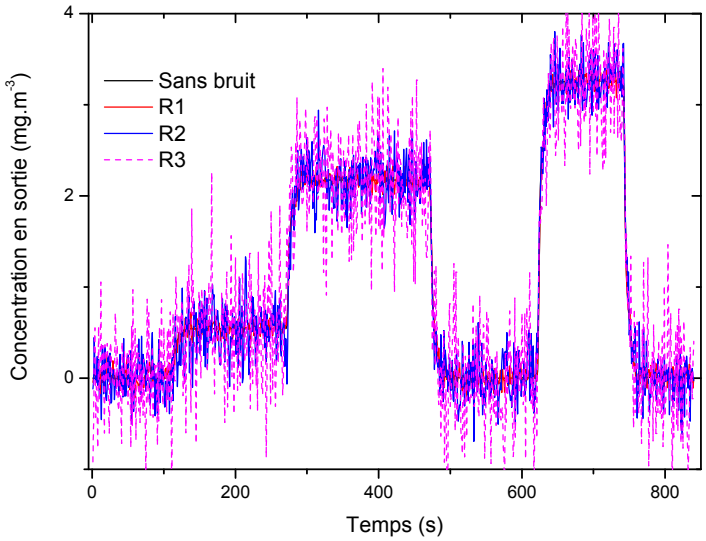


FIGURE 5.23 – Concentration pour l'étape d'estimation calculée dans la CFD pour les différents niveaux de bruit (impact du rapport RSB sur l'estimation)

La figure 5.23 représente la concentration calculée par la CFD pour les différents niveaux de bruit.Comme il a été fait dans la phase de calibration, l'erreurr_{rms} sur la concentration en fonction de α_2 est calculée dans le but d'établir l'ordre de troncature lors de la TSVD et ce, pour chaque niveau de bruit. La figure 5.24 représente cette évaluation. Nous faisons les mêmes

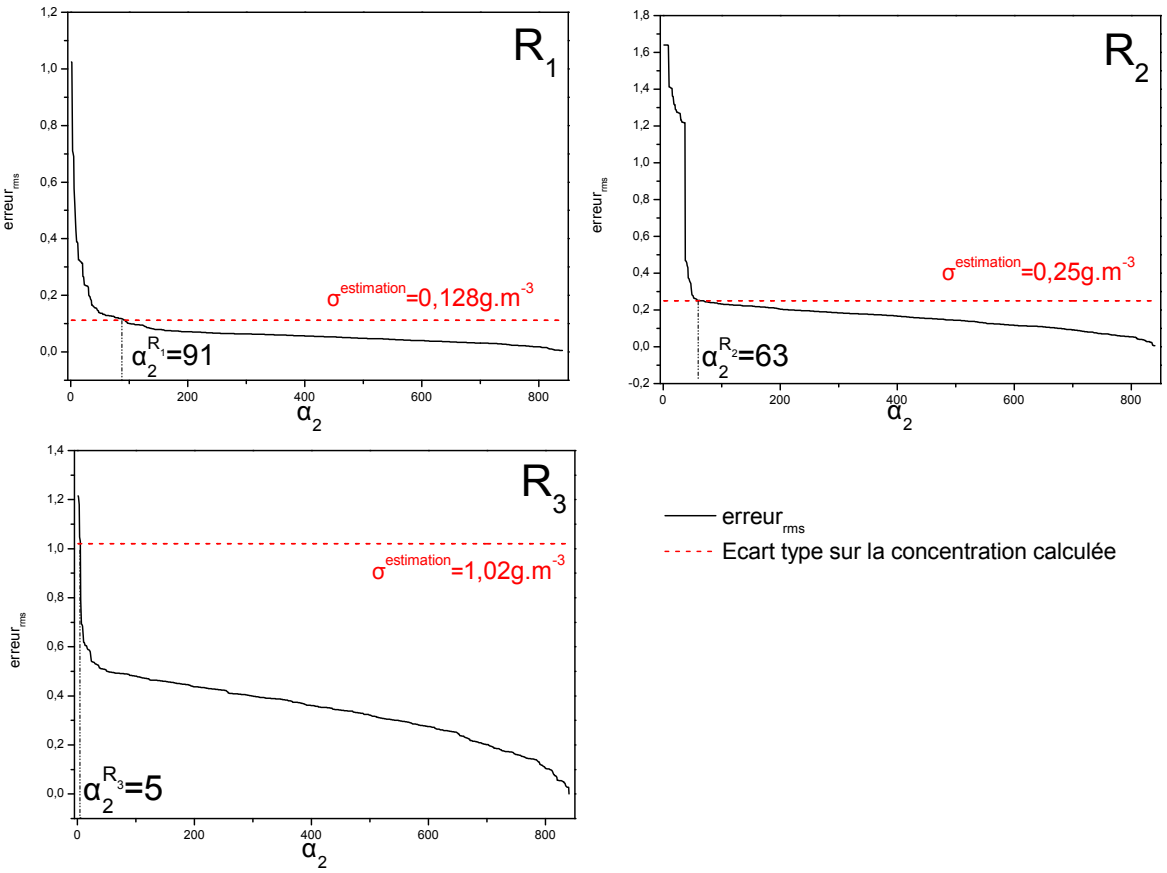


FIGURE 5.24 – Détermination de la troncature α_2 pour les différents niveaux de bruitage (impact du rapport RSB sur l'estimation)

commentaires que lors de la calibration : plus le rapport signal sur bruit est petit et plus la troncature est forte. En effet, on constate que les troncatures lors de la phase d'estimation pour les cas R_1, R_2 et R_3 sont respectivement $\alpha_2^{R_1} = 91$, $\alpha_2^{R_2} = 63$ et $\alpha_2^{R_3} = 5$. A partir de ces différentes troncatures, des impédances et des concentrations bruitées, nous estimons la source. La figure 5.25 présente le résultat des estimations. D'après la figure 5.25, nous constatons que l'allure temporelle générale est conservée dans le cas des rapports R_1 et R_2 alors que pour le cas du rapport R_3 la reconstruction est totalement incohérente. Lorsque nous regardons de plus près les estimations où l'allure temporelle est bonne, nous remarquons que plus le rapport RSB est faible et plus les oscillations de l'estimation sont grandes. La dose émise estimée est calculée afin de peaufiner l'analyse des estimations (table 5.5).

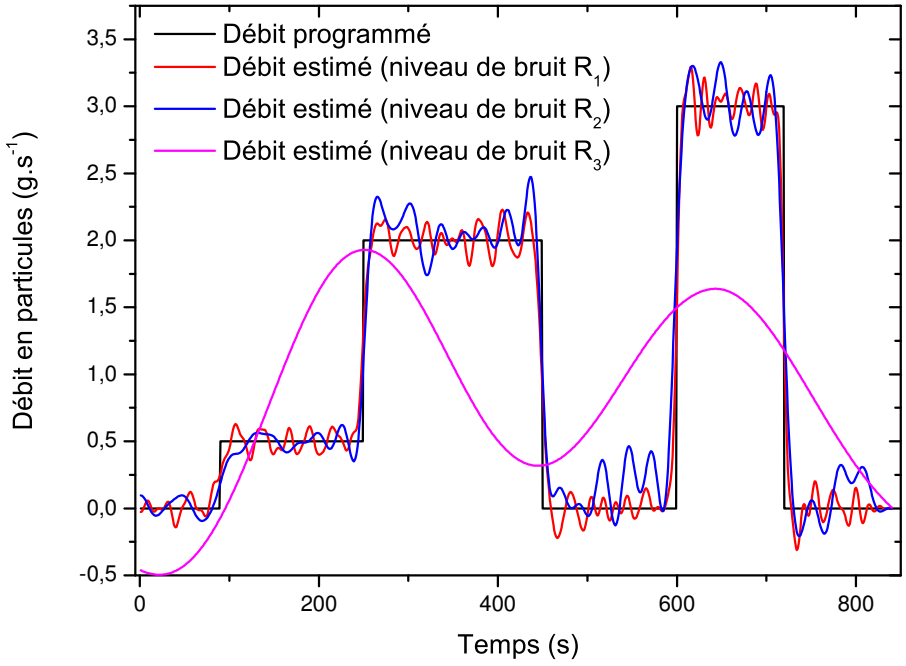


FIGURE 5.25 – Estimation de la source pour les différents niveaux de bruit (impact du rapport RSB sur l'estimation)

	DOSE DE PARTICULES ÉMISES	ÉCART PAR RAPPORT AU CAS PROGRAMMÉ DANS LA CFD
	g	%
Dose programmée	420	
NIVEAU DE BRUIT		
R_1	422.6	0.6
R_2	445.6	6.1
R_3	367.1	12.6

TABLE 5.5 – Dose de particules émises estimée pour les différents niveaux de bruit (impact du rapport RSB sur l'estimation)

D'après les calculs de la dose émise, nous nous rendons compte que plus le rapport signal sur bruit est faible et plus l'estimation de la dose semble s'écarter de la réalité (observation similaire effectuée lors de la phase de calibration sur la dose de l'impédance). Toutefois, la dose

reste dans tous les cas relativement bien conservée, ce qui constitue un résultat particulièrement intéressant.

Conclusion de l'impact du rapport signal sur bruit

Dans cette section, il nous a été permis d'évaluer la méthode lorsque les signaux sont bruités. Nous avons mis en place trois niveaux de bruit différents qui vont d'un bruitage faible ($RSB_{L2}(C) = 25$) à un bruitage extrêmement fort ($RSB_{L2}(C) = 2.5$). Il est possible de conclure, à la vue des résultats présentés dans les deux paragraphes précédents, que le rapport signal sur bruit a un impact évident sur l'application de la méthode. En effet, lorsque ce rapport est faible, nous remarquons que la troncature réalisée à l'aide du principe de Morozov est très forte et qu'il n'est plus possible d'estimer l'allure temporelle de l'injection programmée mais que la dose émise estimée reste très proche de la dose réelle (à 10% près). Alors que pour les rapports $RSB_{L2}(C) \geq 5$, nous avons pu visualiser des reconstructions temporelles cohérentes et une estimation de la dose $\leq 6\%$ par rapport à celle programmée.

5.3 Conclusion du chapitre 5

Dans ce chapitre, une méthode pour estimer les taux d'aérosols émis par une source inconnue instationnaire à partir d'une mesure de concentration en temps réel a été présentée et évaluée. La méthode est appliquée lorsque l'écoulement principal d'air est permanent afin que les mesures réalisées dans la phase de calibration et d'estimation puissent être cohérentes les unes avec les autres. Tout comme dans le Chapitre 4, les particules considérées sont suffisamment diluées et de faible inertie afin de ne pas affecter l'écoulement de l'air.

La méthode mise en place se résume par la résolution des deux équations suivantes à l'aide de la TSVD sur les matrices de Toeplitz $\mathbf{M}$ d'ordre de troncature α_1 ou α_2 selon l'étape considérée :

$$\begin{cases} \text{Etape de calibration} \Rightarrow & Z_{\alpha_1}^{estim} = \mathbf{M}_{\alpha_1}(S_{cal})^{-1} C_{cal} \\ \text{Etape d'estimation} \Rightarrow & S_{\alpha_2}^{inconnu^{estim}} = \mathbf{M}_{\alpha_2}(Z_{\alpha_1}^{estim})^{-1} C_{mesurée} \end{cases}. \tag{5.53}$$

Une première étape de validation dans un cas idéal (simulation CFD avec aucun bruit sur le signal de concentration mesurée) a montré que l'estimation est cohérente avec le débit programmé dans la CFD. En effet, nous arrivons à suivre correctement l'allure temporelle de l'injection ainsi que la dose globale émise par la source. La méthode a ensuite été directement appliquée au cas expérimental en utilisant de la poussière de bois issue de ponçage. La conclusion

émise est la très bonne qualité de l'estimation en utilisant la source contrôlable Palas RBG-1000. En effet, même dans le cas expérimental où nous avions un bruit de mesure important ($RSB_{L2}(C) \approx 9$), la reconstruction temporelle est correctement conservée et la dose estimée est quasiment identique à la dose injectée réellement ($\leq 1\%$). La méthode a donc, dans cette première partie du chapitre, été validée d'un point de vue idéal (simulation CFD) et expérimental.

La seconde partie du chapitre était consacrée à l'analyse de l'impact du bruitage du signal de concentration sur l'estimation. Cette analyse s'est faite uniquement à partir des concentrations calculées par la CFD qui ne présentaient initialement aucun bruit. Un bruitage artificiel suivant trois niveaux différents a été ajouté (très faiblement bruité avec $RSB_{L2}(C) = 25$, fortement bruité $RSB_{L2}(C) = 5$ et très fortement bruité $RSB_{L2}(C) = 2.5$). Cette analyse a permis de mettre en évidence que le bruitage a un impact direct sur les deux étapes de l'estimation. En effet, plus le bruitage sur signal est élevé et plus l'ordre de troncature pour la TSVD est forte. Lorsque cette troncature devient trop forte (ce qui est le cas pour le signal très fortement bruité où $\alpha_1 = 1$ (soit 1 seule valeur gardée sur 200) et $\alpha_2 = 5$ (soit 5 valeurs gardées sur 840)), l'impédance estimée n'a plus du tout l'allure d'une impédance type et la reconstruction de l'allure temporelle devient de très mauvaise qualité. Nous remarquons tout de même que l'estimation de la dose est juste à environ 10% près de la dose programmée. Dans le cas où la troncature est moins forte, nous remarquons que les impédances estimées s'éloignent de l'impédance idéale tout en gardant l'allure typique qui est attendue. Cet éloignement ne se discerne pas d'un point de vue de la dose de l'impédance mais juste de l'allure temporelle de celle-ci. En effet, on remarque que l'impédance bruitée possède un pic caractéristique plus évasé et moins haut que celui de l'impédance idéale. De plus, il y a apparition d'un phénomène pseudo-oscillatoire (autour de zéro) caractéristique du bruit de mesure. Effectivement, nous constatons que plus le rapport RSB est petit, plus l'amplitude et la période de ces pseudo-oscillations sont grandes. Lors de l'estimation avec ce type d'impédance, il est néanmoins possible de reconstruire l'allure temporelle de l'injection fidèlement et la dose émise estimée reste très proche de la dose exacte.

Après avoir établi la méthode d'estimation dans le cas d'une source instationnaire, elle sera appliquée directement à des machines électroportatives. Le Chapitre 6 traitera de cette application.

Chapitre 6

Application de la méthode instationnaire aux machines électroportatives

Dans ce chapitre, l'application de la méthode aux machines électroportatives travaillant le bois est abordée. Deux types de machines seront étudiés, les ponceuses et les scies circulaires. Dans la première section de ce chapitre, nous allons détailler la démarche générale employée (protocole opératoire des essais ainsi que la méthode de validation de l'estimation) dans le cas de cette étude. Dans une deuxième section, nous présenterons les résultats des estimations pour les ponceuses puis, les scies circulaires. Enfin, nous conclurons sur l'application de la méthode directement à une source de type industrielle.

6.1 Démarche générale employée

Dans cette partie, le mode opératoire pour réaliser une classification des machines dans le but d'estimer leur performance est présentée. Cette classification s'effectue à partir du calcul de critères adimensionnels (présentés ultérieurement dans cette section) basés sur trois variables différentes :

- La masse émise ($M_{émise}$) qui correspond à la dose de poussières estimée à l'aide de la méthode décrite dans le chapitre 5 ;
- La masse aspirée ($M_{aspirée}$) correspondant à la quantité de poussières récupérée par le système de captage relié à la machine étudiée ;
- La masse usinée ($M_{usinée}$) qui représente la quantité globale de matière enlevée du bois usiné.

Il est à noter que la masse aspirée dépend du débit d'aspiration imposé sur la machine et de l'efficacité de son dispositif de captage. En effet, toutes les machines électroportatives sont

raccordées à un système d'aspiration durant leur fonctionnement. Le débit d'aspiration utilisé par les machines est de $80m^3.h^{-1}$ pour les ponceuses et varie entre 120 et $180m^3.h^{-1}$ pour les scies circulaires. Il est donc possible d'écrire le bilan massique suivant pour la poussière générée par l'usinage :

$$M_{usinée} = M_{émise} + M_{aspirée} + M_{déposée}, \tag{6.1}$$

où les masses $M_{usinée}$, $M_{émise}$ et $M_{aspirée}$ sont définies précédemment et la $M_{déposée}$ est la quantité de poussières qui se dépose dans la cabine. Deux des termes de ce bilan ($M_{usinée}$ et $M_{déposée}$) peuvent se déterminer par une simple pesée alors que la masse émise se calcule (comme les doses déterminées dans le Chapitre 5) à partir de l'estimation du débit source. La masse aspirée quant à elle est mesurée en effectuant un échantillonnage en amont du système de filtration. La figure 6.1 représente l'installation de ce point de prélèvement. Le prélèvement sur cassette (à

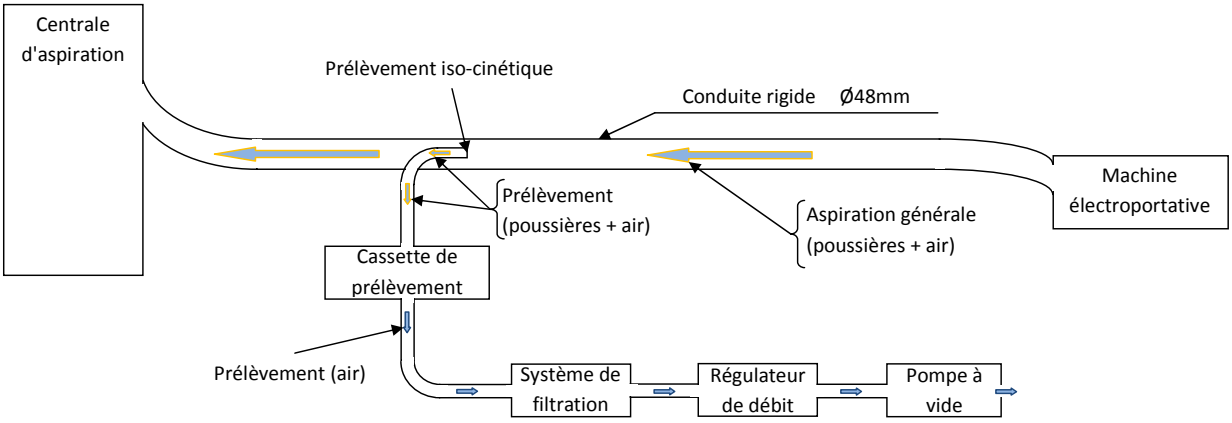


FIGURE 6.1 – Schéma de l'installation utilisée pour déterminer la masse aspirée

savoir que cette dite « cassette » est en réalité un disque totalement imperméable à la poussière) est isocinétique, il est donc aisé de remonter à la masse aspirée à l'aide de la relation suivante :

$$M_{aspirée} = \left(\frac{M_{cassette}}{V_{prélèvement}} \times Q_{aspiration} \right) \times t_{prélèvement}, \tag{6.2}$$

où $M_{cassette}$ est la masse (g) de poussière sur la cassette, $V_{prélèvement}$ est le volume (m^3) de l'échantillonnage, $Q_{aspiration}$ est le débit d'aspiration ($m^3.s^{-1}$) qui est raccordé à la machine et $t_{prélèvement}$ est le temps (s) d'échantillonnage. Le volume de prélèvement est déterminé à l'aide d'un régulateur de débit (Brooks©SLA5853S) relié à une pompe à vide (Vacuubrand©MV 10 NT), le débit d'aspiration est quant à lui mesuré à l'aide d'un système venturi et la masse de la cassette à partir d'une balance précise au centième de gramme.

L'erreur commise sur la masse aspirée peut s'écrire de la façon suivante :

$$\frac{\Delta M_{aspirée}}{M_{aspirée}} = \frac{\Delta M_{cassette}}{M_{cassette}} + \frac{\Delta V_{prélèvement}}{V_{prélèvement}} + \frac{\Delta Q_{aspiration}}{Q_{aspiration}} + \frac{\Delta t_{prélèvement}}{t_{prélèvement}}. \tag{6.3}$$

A partir de la relation ci-dessus et du matériel que nous utilisons pour effectuer les mesures, la principale cause d'erreur sur la mesure est celle effectuée sur le débit d'aspiration, puisqu'elle est de l'ordre de 1% alors que la masse et le volume prélevé sont de l'ordre de 0.5% et celle sur le temps peut être estimée à 0.5%. Par conséquent, nous supputons et majorons l'erreur sur la masse aspirée à 5% puisqu'il existe d'autres erreurs potentielles (homogénéité de la concentration en poussières dans la conduite, isocinétisme, ...).

Le protocole mis en place pour l'étude de chaque type de machines portatives est le même :

1. *Calibration de l'impédance :*
   La première étape est réalisée à l'aide du Palas RBG-1000 avec de la poussière de bois ayant la même granulométrie que celle émise par le procédé. Nous effectuons 20 essais identiques. Ces essais sont réalisés dans la configuration 1 avec les ventilateurs mis en place (voir Chapitre 5) qui permettront de perturber d'une façon identique la source de référence et la source à estimer. A partir des données moyennées des vingt essais, l'impédance Z^{estim} peut être calibrée.

2. *Estimation de source :*
   Dans cette étape, 5 essais différents pour chaque machine sont effectués. Ceux-ci ne seront pas moyennés puisque même s'ils sont semblables, nous ne pouvons pas être certain qu'ils soient parfaitement identiques (cas réel d'un usinage). Par conséquent, une estimation de la dose émise à partir de l'impédance estimée et de la mesure de concentration est effectuée pour chaque essai et ensuite, les résultats obtenus sont analysés.

3. *Analyse des données :*
   Afin d'étudier les résultats, trois critères différents permettant la caractérisation de la performance des machines étudiées sont mis en place. Ces critères peuvent être moyennés sur les 5 essais puisqu'ils sont adimensionnels et représentent la performance globale de la machine (théoriquement cette performance doit être constante pour les 5 essais puisque le fonctionnement pour chaque test est semblable).

a) **Critère 1 :** coefficient d'efficacité de captage tel que :

$$C_1 = \frac{M_{aspirée}}{M_{usinée}}. \tag{6.4}$$

Cette relation fait intervenir une valeur dite « exacte ». En effet, la $M_{usinée}$ est dite « directe » puisqu'elle est déterminée directement par une mesure de pesée avant et après usinage (d'où une erreur commise uniquement sur la pesée) alors que la $M_{aspirée}$ est issue d'un échantillonnage puis d'une pesée (possibilité d'erreur supplémentaire). Plus la valeur de ce coefficient est proche de 1 et plus la machine étudiée est de bonne qualité.

b) **Critère 2 :** coefficient d'efficacité de captage tel que :

$$C_2 = \frac{M_{usinée} - M_{émise}}{M_{usinée}}. \tag{6.5}$$

Cette relation fait aussi intervenir la même valeur dite « directe » ($M_{usinée}$) et une valeur issue d'une mesure puis de l'estimation ($M_{émise}$). Tout comme le critère précédent, plus ce coefficient est proche de 1 et plus l'efficacité de captage est bonne.

c) **Critère 3 :** coefficient d'émission (proportion d'émission) tel que :

$$C_3 = \frac{M_{émise}}{M_{émise} + M_{aspirée}}. \tag{6.6}$$

Cette relation est l'inverse d'un coefficient d'efficacité de captage puisqu'il détermine la proportion de poussières émises par l'usinage dans l'atmosphère ambiante. Dans ce cas, les deux variables sont issues d'un échantillonnage/mesure et d'une pesée/estimation. Par conséquent, l'erreur commise sur ce critère peut être plus importante que pour les deux premiers. A contrario, des deux premiers critères, la valeur doit être proche de 0 pour que la machine soit considérée comme satisfaisante.

4. Discrimination des machines :
   La dernière étape consiste à comparer le classement des différentes machines issues de chaque critère afin de pouvoir les discriminer entre elles et émettre une recommandation d'utilisation.

La suite de ce chapitre présente l'application de ce protocole opératoire aux machines électroportatives ainsi que les résultats en terme de recommandation des machines.

6.2 Caractérisation de l'émission des différentes machines durant l'usinage.

6.2.1 $1^{ère}$ catégorie de machine : les ponceuses

Dans cette section, les émissions des 6 ponceuses différentes sont évaluées avec un débit d'aspiration commun à chacune d'entre elles de $80 m^3.h^{-1}$. Les 6 ponceuses ont pour dénominations P_i avec $i \in [1;6]$. Cette section est abordée suivant 4 points :

- Calibration de l'impédance pour les essais sur les ponceuses à l'aide du générateur Palas RBG-1000 ;
- Estimation des doses émises par les ponceuses ;
- Analyse des données et critères de discrimination des ponceuses ;
- Conclusion de l'étude menée sur les ponceuses.

6.2.1.1 Calibration de l'impédance pour les essais sur les ponceuses

La première étape de la méthode consiste à réaliser la calibration de l'impédance. Les 20 injections effectuées ont donné les mesures présentées dans le figure 6.2. A partir de ces données,

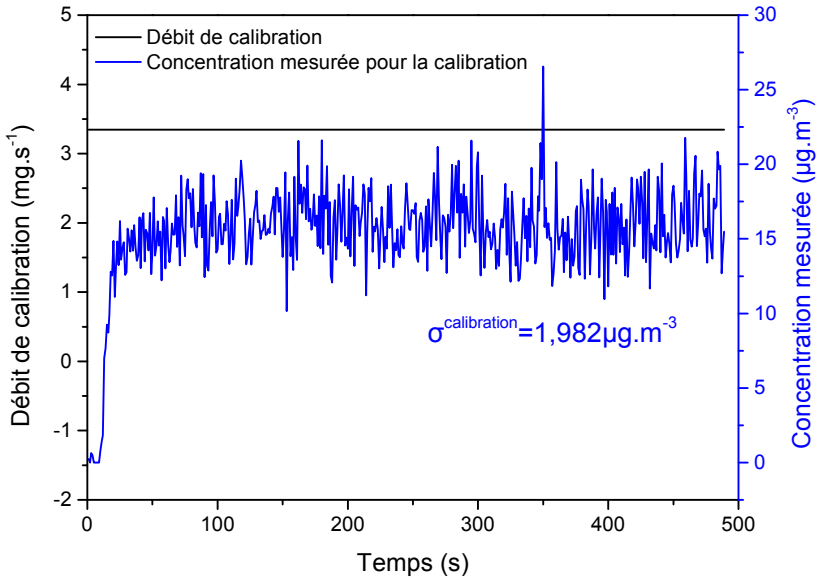


FIGURE 6.2 – Débit d'injection et concentration résultante pour la phase de calibration lors de l'étude des ponceuses

il est possible de déterminer la troncature à réaliser (principe de Morozov) ainsi que de calculer l'impédance estimée. Les résultats (troncature et l'impédance) sont présentés sur les figures 6.3 et 6.4.

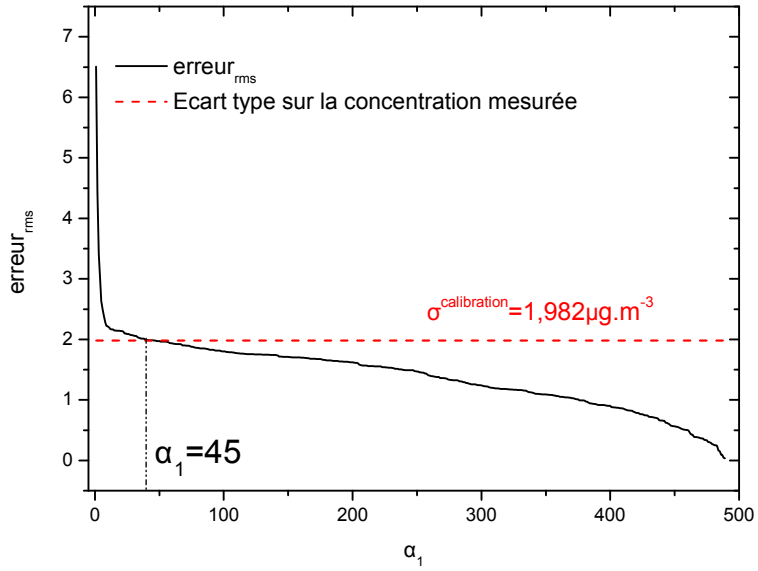


FIGURE 6.3 – Détermination de la troncature α_1 lors de la phase de calibration dans l'étude des ponceuses

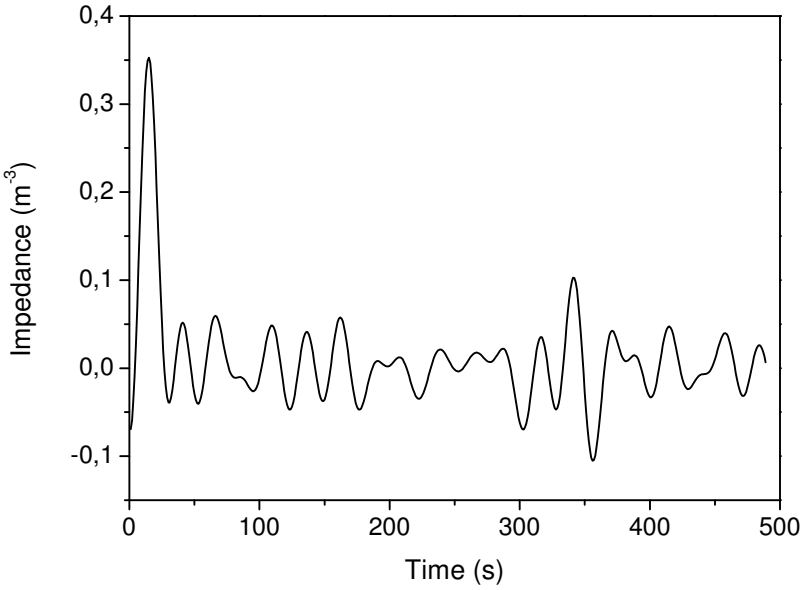


FIGURE 6.4 – Détermination de l'impédance pour la phase de calibration dans l'étude des ponceuses

Nous remarquons que l'impédance créée est semblable (amplitude du pic) à celle obtenue dans le Chapitre 5. Nous distinguons très nettement le pic caractéristique puis les pseudo-oscillations dues au bruit de mesure. Cette impédance est similaire à celle du chapitre 5 puis-

qu'elle est réalisée dans des configurations quasi-identiques (poussières de bois utilisées, générateur, ...). Le prochain paragraphe traite de l'estimation de la dose émise lors d'une opération d'usinage pour les différentes ponceuses à partir de cette impédance.

6.2.1.2 Estimation des doses émises par les ponceuses

Dans cette partie, l'estimation sur un premier cas d'usinage de la ponceuse P_1 est entièrement détaillée. Puis, les résultats de la méthode sont étendus aux autres ponceuses.

Ponceuse P_1 :

a) Estimation de l'allure temporelle du débit et de la dose émise dans le cas de la ponceuse P_1

La figure 6.5 représente la concentration mesurée à la sortie de la cabine lors d'un essai réalisé avec la ponceuse P_1. Nous remarquons d'après ce cycle que lorsque la ponceuse P_1 entame

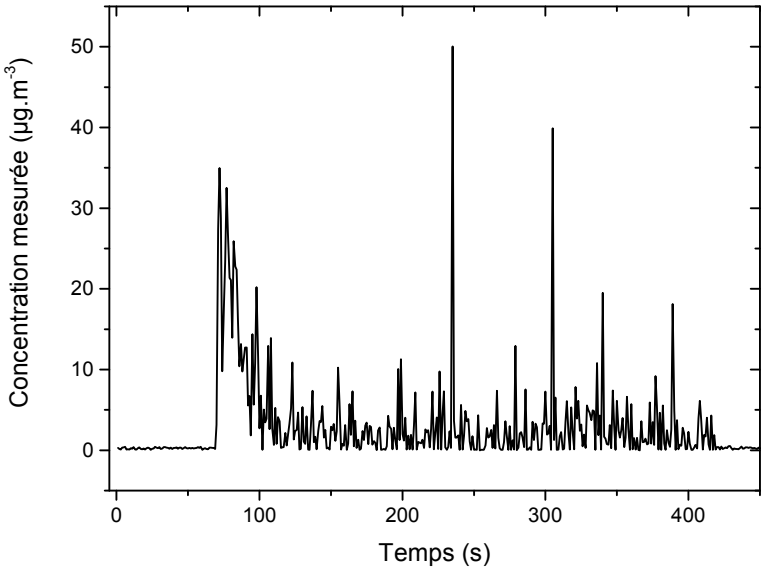


FIGURE 6.5 – Concentration mesurée durant un cycle d'usinage réalisé par la ponceuse P_1

son usinage, il y a un pic d'émission qui disparait rapidement pour laisser place à une émission plus régulière, bien qu'instationnaire. Après avoir réalisé cet essai, il faut estimer l'émission de cette ponceuse conduisant à cette mesure. Pour ce faire, nous devons tout d'abord déterminer la troncature pour la TSVD de la matrice de Toeplitz de l'impédance estimée. Nous rappelons que pour déterminer la troncature, il nous faut un écart type sur le signal de concentration mesurée. Or dans notre cas, nous sommes confrontés à un signal issu d'un usinage quelconque où l'écart type n'est pas identifiable puisqu'il n'y a pas de stabilité sur la mesure. Afin d'appliquer le

principe de Morozov en utilisant un écart type cohérent avec notre manipulation, nous le considérons comme étant égal à celui de la phase de calibration (soit $\sigma^{calibration} = 1.982\mu g.m^{-3}$). Nous obtenons ainsi un ordre de troncature de $\alpha_2^{\sigma^{calibration}} = 365$. La figure 6.6 présente la troncature obtenue à partir du principe de Morozov pour l'application à la TSVD lors de la phase d'estimation. A partir de cette troncature et de la mesure de concentration, nous déterminons

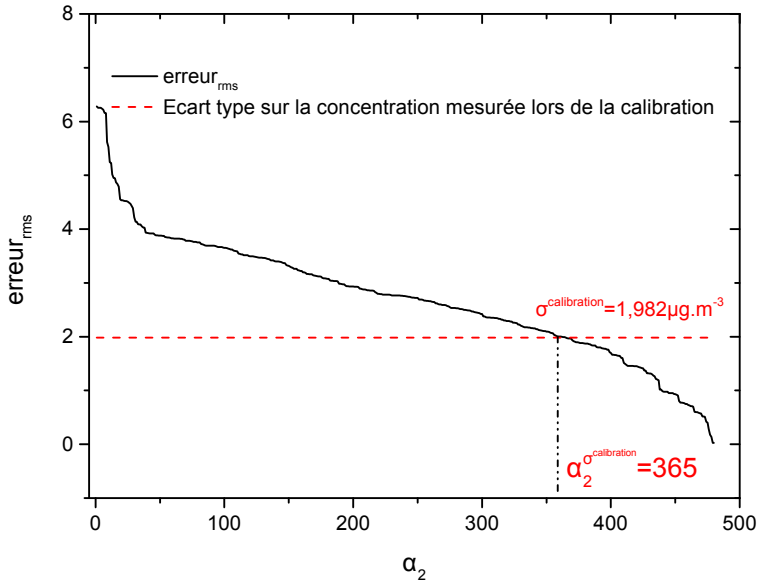


FIGURE 6.6 – Troncature obtenue à partir du principe de Morozov pour l'application à la TSVD lors de la phase d'estimation

l'allure temporelle de l'émission de la ponceuse (figure 6.7). Si nous comparons la courbe de la figure 6.7 avec celle de la concentration mesurée (figure 6.5), nous remarquons que l'allure temporelle estimée est totalement incohérente. En effet, la raison voudrait que l'allure de l'estimation de l'émission ait la même tendance que celle de la concentration puisque nous sommes dans un problème linéaire. C'est-à-dire, que l'on s'attend à un pic d'émission en début d'usinage, suivi d'une émission plus stable. Par conséquent, une manière différente de tronquer la matrice de Toeplitz doit être opérée. Pour ce faire, nous regardons de plus près l'impédance estimée durant la phase de calibration. On distingue alors très nettement les deux zones caractéristiques de celles-ci. Entre le temps $t = 1s$ et $t = 27s$, nous sommes en présence du pic caractéristique de l'impédance. Ensuite, ce ne sont que les fluctuations dues au bruit de mesure lors de l'injection de référence. Le pic caractéristique est composé de 27 valeurs puisque l'acquisition du capteur est de une valeur par seconde. Nous fixons donc un ordre de troncature (appelé « Post-pic ») correspondant au nombre de valeurs présent dans le pic caractéristique soit $\alpha_2^{Post-pic} = 27$. L'estimation de l'allure temporelle par ce nouvel ordre de troncature est décrit sur la figure 6.8.

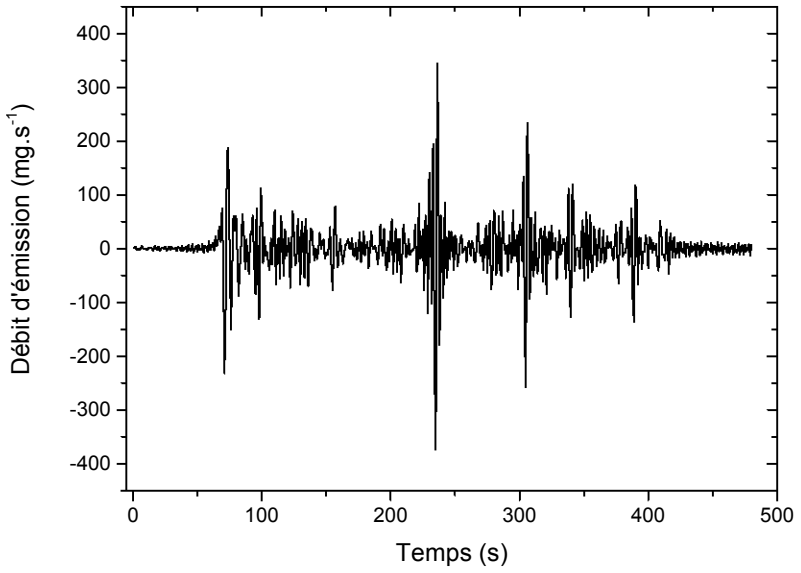


FIGURE 6.7 – Allure temporelle de l'émission lors de l'essai 1 de la ponceuse P_1 à partir de la troncature $\alpha_2^{\sigma^{calibration}}$

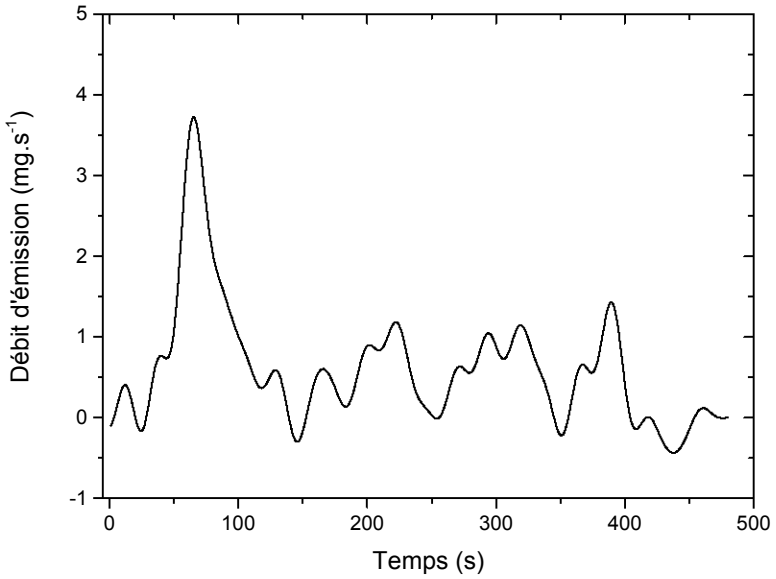


FIGURE 6.8 – Allure temporelle de l'émission lors de l'essai 1 de la ponceuse P_1 à partir de la troncature Post-pic $\alpha_2^{Post-pic}$

Nous pouvons constater que l'allure temporelle dans ce cas semble cohérente en comparaison de celle de la première estimée. En effet, si l'on compare la figure 6.8 avec la figure 6.5, nous remarquons que le pic du débit d'émission apparait (à $t = 65s$) quelques secondes avant l'apparition du pic de concentration (à $t = 77s$) et qu'ensuite le débit semble quelque peu stable tout comme la concentration mesurée. L'écart de temps entre le pic de concentration et

d'émission correspond au temps d'apparition du pic de l'impédance.

Les cinq essais de la ponceuse 1 ont apporté les mêmes conclusions concernant l'ordre de troncature. La figure 6.9 recense les résultats complets (concentrations mesurées, estimations à partir des troncatures $\alpha_2^{\sigma^{calibration}}$ et $\alpha_2^{Post-pic}$) sur les quatre autres essais effectués avec la ponceuse 1. L'observation effectuée dans le cas de l'essai 1 de cette ponceuse peut donc s'effectuer

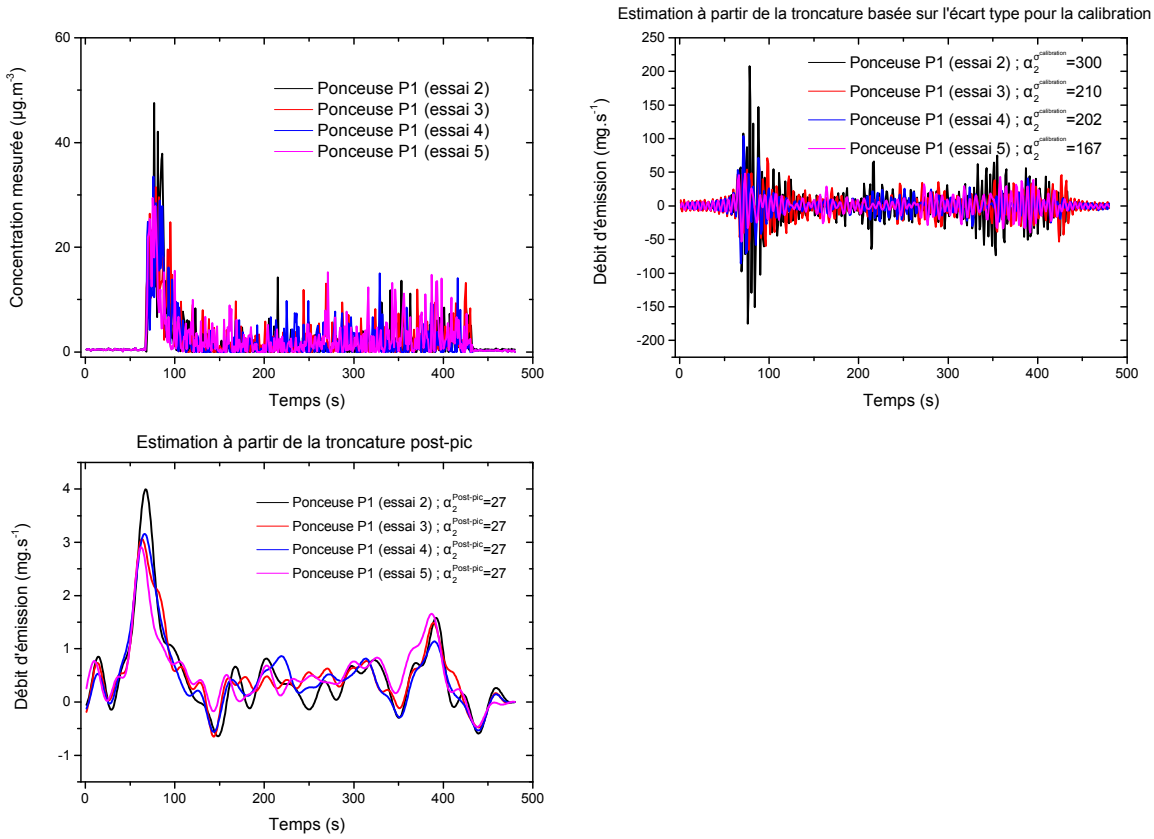


FIGURE 6.9 – Résultats complets des estimations sur la ponceuse P_1 pour les 4 derniers essais

pour les quatre autres essais. En effet, la troncature basée sur le cas de calibration ne permet pas d'estimer correctement l'allure de l'émission alors que le cas de la troncature « Post-pic » fournit pour chaque essai une reconstruction temporelle cohérente avec les concentrations mesurées. Après avoir reconstruit l'allure temporelle avec les deux troncatures différentes, les doses émises dans chaque cas sont évaluées. La table 6.1 présente les résultats des doses obtenues pour chaque essai et chaque troncature. Les résultats issus de la table 6.1 nous permettent de remarquer qu'entre la troncature $\alpha_2^{\sigma^{calibration}}$ et $\alpha_2^{Post-pic}$, il n'y a pas de grandes différences des doses émises estimées mais que la distinction s'effectue d'un point de vue de la reconstruction temporelle (figure 6.9). Celle-ci semble de meilleure qualité lorsque la troncature est de l'ordre de $\alpha_2^{Post-pic}$. L'essai 1 est soumis à un test sur l'influence de l'ordre de troncature sur la dose émise estimée afin de voir si ce résultat est une simple coïncidence ou non (figure 6.10). Nous

ESSAIS	TRONCATURE $\alpha_2^{\sigma^{calibration}}$	TRONCATURE $\alpha_2^{Post-pic}$
	DOSES ÉMISES	
	g	
1	0.271	0.281
2	0.214	0.216
3	0.245	0.225
4	0.214	0.209
5	0.211	0.237

TABLE 6.1 – Doses émises par la ponceuse P_1 pour chaque essai en fonction de la troncature considérée

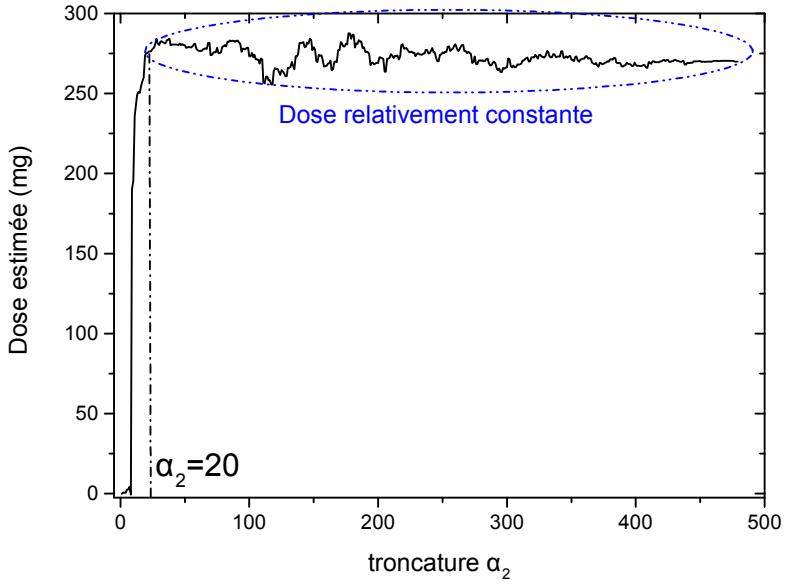


FIGURE 6.10 – Dose émise estimée en fonction de l'ordre de troncature pour l'essai 1 de la ponceuse P_1

pouvons remarquer sur le graphique représentant la dose en fonction de la troncature que celle-ci semble constante pour une troncature supérieure à $\alpha_2 = 20$. A partir de ce dernier résultat, nous remarquons que la troncature n'a tout bonnement pas d'influence sur la dose à partir d'une certaine valeur de celle-ci. La seule différence se fait d'un point de vue de l'allure temporelle de l'injection. A partir de ce résultat, il est possible de déterminer une troncature satisfaisante ou d'évaluer si la dose estimée est correcte avec la troncature choisie. Dans notre cas, la troncature dite « Post-pic » est utilisée puisqu'elle est un bon compromis entre la reconstruction temporelle (qui semble cohérente avec la mesure de concentration) et la dose estimée. Par la suite, les résultats des autres ponceuses sont uniquement donnés dans le cas de la troncature Post-pic.

b) Analyse du bilan massique des essais de la ponceuse P_1

Pour l'analyse du bilan massique, nous appelons T1 la somme de la masse émise, masse déposée et masse aspirée. L'erreur commise sur la masse usinée est estimée à 0.2g qui correspond à l'erreur de lecture sur la balance. Quant à la masse déposée qui est toujours très faible, dans le cas des ponceuses, nous ne pouvons fixer son erreur puisqu'elle dépend d'une pesée et du « transport » des supports (où le dépôt à lieu) jusqu'à la balance. La dose émise étant estimée, nous allons pouvoir regarder le bilan massique sur le procédé pour chaque essai. La table 6.2 résume les résultats obtenus pour celui-ci. Le bilan massique est de bonne qualité pour chaque

Essais	$M_{émise}$	$M_{déposée}$	$M_{aspirée}$	T1	$M_{usinée}$	Écart entre les deux termes	
	g						%
1	0.27 ± 0.05	1.0	15.9 ± 0.8	17.2 ± 0.9	17.5 ± 0.2	0.7	1.7
2	0.21 ± 0.04	1.6	17.6 ± 0.9	19.4 ± 0.9	19.7 ± 0.2	0.3	1.8
3	0.25 ± 0.04	0.9	12.0 ± 0.6	13.1 ± 0.6	13.8 ± 0.2	0.7	5.3
4	0.21 ± 0.03	0.8	19.4 ± 1	20.4 ± 1.0	21.6 ± 0.2	1.2	5.7
5	0.21 ± 0.03	1.4	17.6 ± 0.9	19.2 ± 0.9	19.5 ± 0.2	0.3	1.6

avec T1 la somme de la masse émise, masse déposée et masse aspirée

TABLE 6.2 – Bilan massique dans le cas des essais sur la ponceuse 1

essai avec un écart maximum de 5.7% entre la masse usinée et la sommes des autres masses. De plus, l'écart est toujours positif, ce qui signifie que la somme des termes de droite du bilan est toujours inférieure à la masse usinée. Il n'y a donc pas de surestimation d'une des quantités mesurées ou de la quantité estimée. Avec l'intervalle d'erreur sur la somme et celui sur la masse usinée, nous constatons que le bilan est vérifié dans le cas de la ponceuse 1.

Ponceuse P_2 :

a) Estimation de l'allure temporelle du débit et de la dose émise dans le cas de la ponceuse P_2

La figure 6.11 représente la mesure de la concentration de l'essai 1 et l'estimation réalisée à partir de la troncature « Post-pic » pour la ponceuse P_2. Nous ne présentons pas tous les essais effectués puisque cela surchargerait les graphiques et donc la lisibilité de ceux-ci. Dans ce résultat, il n'y a pas de pic de concentration en début d'essai comme pour la $1^{ère}$ ponceuse et il semble que l'émission de la machine croisse légèrement sur la fin du cycle d'usinage. La table

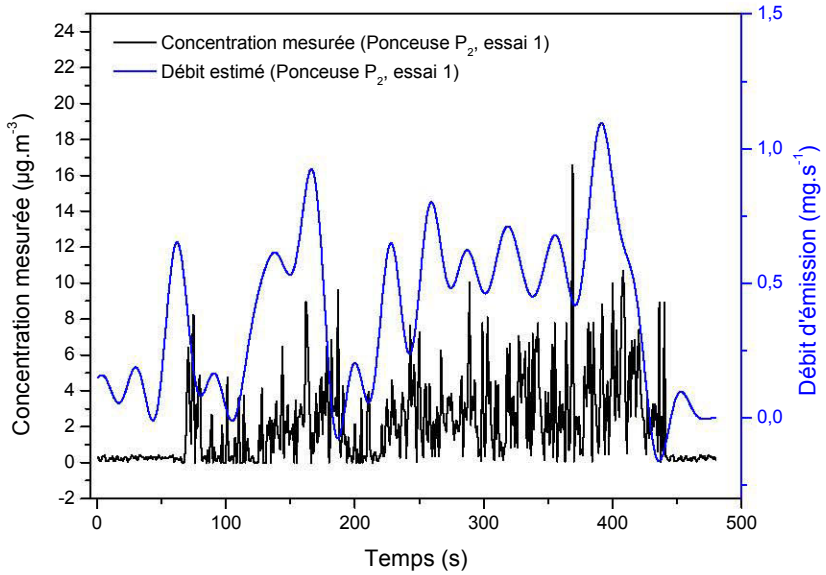


FIGURE 6.11 – Concentration mesurée et débit estimé dans le cas de l'essai 1 la ponceuse P_2

6.3 suivante résume les différentes doses estimées pour les 5 essais effectués sur la ponceuse P_2. Les cinq essais fournissent des estimations de la dose du même ordre de grandeur pour 4 essais

		Essais				
		1	2	3	4	5
Doses émises	g	0.18	0.12	0.18	0.21	0.08

TABLE 6.3 – Doses émises par la ponceuse P_2

sur 5 (l'essai 5 fournit une dose plus faible que les autres) et la dose émise estimée moyenne s'élève à 0.14g.

b) Analyse du bilan massique des essais de la ponceuse P_2

La table 6.4 présente le bilan massique réalisé dans le cas de cette ponceuse. Nous remarquons que les masses usinées sont semblables à celles de la première ponceuse mais que la masse émise est légèrement plus faible. En ce qui concerne le bilan, celui-ci reste convenable puisqu'il est du même ordre de grandeur que celui de la ponceuse P_1 et que les intervalles se recoupent dans quatre cas sur cinq, ce qui permet de conclure que le bilan dans le cas de la ponceuse 2 est vérifié.

Essais	$M_{émise}$	$M_{déposée}$	$M_{aspirée}$	T1	$M_{usinée}$	Écart entre les deux termes	
	g						%
1	0.18 ± 0.02	0.8	16.3 ± 0.8	17.3 ± 0.8	18.2 ± 0.2	0.9	4.8
2	0.12 ± 0.01	0.9	18.5 ± 0.9	19.5 ± 0.9	20.2 ± 0.2	0.7	3.4
3	0.18 ± 0.02	0.3	18.1 ± 0.9	18.6 ± 0.9	19.5 ± 0.2	0.9	4.4
4	0.21 ± 0.03	0.1	20.1 ± 1	20.4 ± 1	21.5 ± 0.2	1.1	5.0
5	0.08 ± 0.01	0.2	16.3 ± 0.8	16.6 ± 0.8	17.8 ± 0.2	1.2	6.6

avec T1 la somme de la masse émise, masse déposée et masse aspirée

TABLE 6.4 – Bilan massique dans le cas des essais sur la ponceuse 2

Ponceuse P_3 :

a) Estimation de l'allure temporelle du débit et de la dose émise dans le cas de la ponceuse P_3

La figure 6.12 correspond à la concentration mesurée ainsi qu'à l'estimation réalisée pour l'essai 1 sur la ponceuse P_3. L'allure temporelle estimée obtenue est cohérente puisque nous

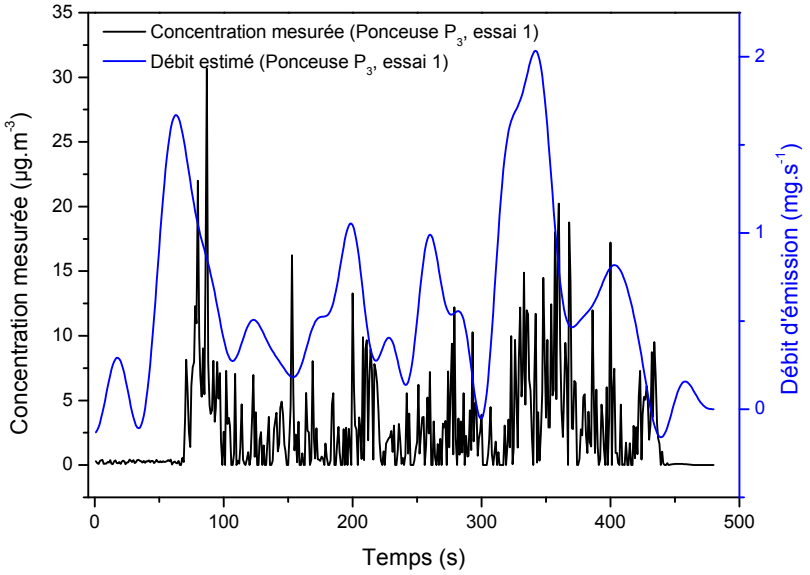


FIGURE 6.12 – Concentration mesurée et débit estimé dans le cas de l'essai 1 la ponceuse P_3

pouvons observer au début du travail d'usinage un pic de concentration résultant du pic d'émission quelques secondes auparavant. La table 6.5 fournit les différentes doses estimées pour les

5 essais effectués sur la ponceuse P_3. Les doses émises estimées pour cette ponceuse sont supé-

		Essais				
		1	2	3	4	5
Doses émises	g	0.28	0.23	0.27	0.34	0.17

TABLE 6.5 – Doses émises par la ponceuse P_3

rieures à celles des deux premières et elles sont répétables sur les cinq essais. La dose moyenne s'élève à 0.26g (soit une valeur équivalente à la ponceuse P_1).

b) Analyse du bilan massique des essais de la ponceuse P_3

La table 6.6 présente le bilan massique réalisé dans le cas de la ponceuse P_3. Le bilan est

Essais	$M_{émise}$	$M_{déposée}$	$M_{aspirée}$	T1	$M_{usinée}$	Écart entre les deux termes	
	g						%
1	0.28 ± 0.05	0.3	9.0 ± 0.5	9.6 ± 0.6	10.3 ± 0.2	0.7	6.7
2	0.23 ± 0.04	0.4	11.2 ± 0.6	11.8 ± 0.6	12.5 ± 0.2	0.7	5.5
3	0.27 ± 0.05	0.7	12.0 ± 0.6	13.0 ± 0.7	13.9 ± 0.2	0.9	6.4
4	0.34 ± 0.07	0.5	9.9 ± 0.5	10.7 ± 0.6	11.1 ± 0.2	0.4	3.3
5	0.17 ± 0.02	0.5	10.3 ± 0.5	11.0 ± 0.5	11.5 ± 0.2	0.5	4.5

avec T1 la somme de la masse émise, masse déposée et masse aspirée

TABLE 6.6 – Bilan massique dans le cas des essais sur la ponceuse 3

validé de la même façon que dans les deux cas précédents (soit environ 5%) et les intervalles se recoupent pour les essais. En ce qui concerne cette ponceuse, la masse usinée est plus faible que celle des deux premières ponceuses.

Ponceuse P_4 :

a) Estimation de l'allure temporelle du débit et de la dose émise dans le cas de la ponceuse P_4

A l'image des trois premières ponceuses étudiées, la figure 6.13 est représentative de la concentration et de l'estimation pour un cycle d'usinage. A la vue de cette estimation, il semble que cette ponceuse soit déjà moins émissive que les précédentes. En effet, la concentration mesurée est plus faible que pour les 3 premières ponceuses et l'allure temporelle semble être elle

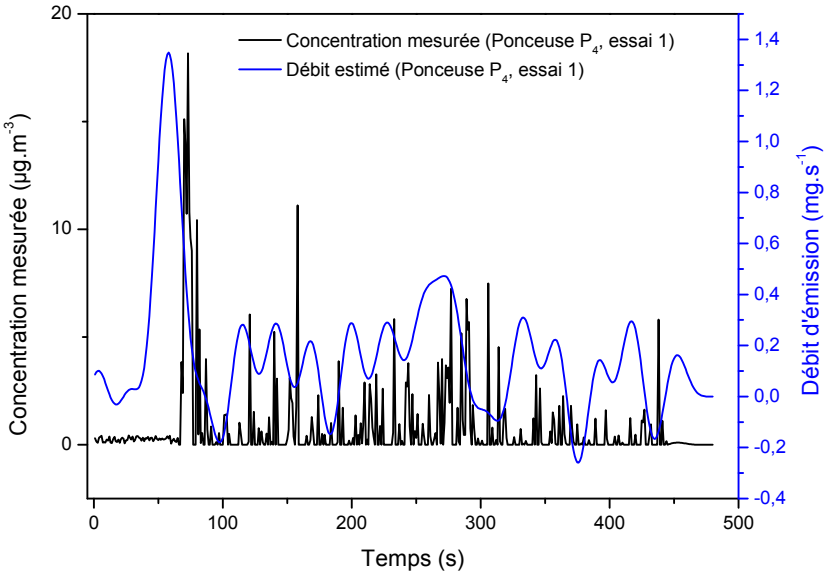


FIGURE 6.13 – Concentration mesurée et débit estimé dans le cas de l'essai 1 la ponceuse P_4

aussi plus faible. La table 6.7 donne les différentes doses estimées pour les 5 essais effectués sur la ponceuse P_4. Tout comme l'analyse de la figure 6.13 le laissait présumer, la ponceuse P_4

		Essais				
		1	2	3	4	5
Doses émises	g	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04

TABLE 6.7 – Doses émises par la ponceuse P_4

semble émettre moins que les autres machines (0.04g) et la répétabilité des essais est avérée.

b) Analyse du bilan massique des essais de la ponceuse P_4

La table 6.8 résume le bilan massique réalisé pour la ponceuse 4. Les masses usinées, quant à elles, se situent entre celles des ponceuses P_2 et P_3. Le bilan massique boucle à l'identique de celui des autres ponceuses testées jusqu'à présent.

Essais	$M_{émise}$	$M_{déposée}$	$M_{aspirée}$	T1	$M_{usinée}$	Écart entre les deux termes	
	g						%
1	0.06 ± 0.01	0.1	15.1 ± 0.8	15.3 ± 0.8	16.2 ± 0.2	0.9	5.3
2	0.04 ± 0.01	0.2	14.4 ± 0.7	14.6 ± 0.7	15.5 ± 0.2	0.9	6.1
3	0.04 ± 0.01	0.1	14.1 ± 0.7	14.2 ± 0.7	15.0 ± 0.2	0.8	5.1
4	0.04 ± 0.01	0.3	13.3 ± 0.7	13.6 ± 0.7	13.7 ± 0.2	0.1	0.9
5	0.04 ± 0.01	0.2	12.5 ± 0.6	12.7 ± 0.6	13.3 ± 0.2	0.6	4.4

avec T1 la somme de la masse émise, masse déposée et masse aspirée

TABLE 6.8 – Bilan massique dans le cas des essais sur la ponceuse 4

Ponceuse P_5 :

a) Estimation de l'allure temporelle du débit et de la dose émise dans le cas de la ponceuse P_5

La concentration mesurée lors de l'essai 1 et l'estimation faite pour celui-ci sont décrits dans la figure 6.14 alors que la table 6.9 décrit les doses estimées pour chaque essai réalisé.

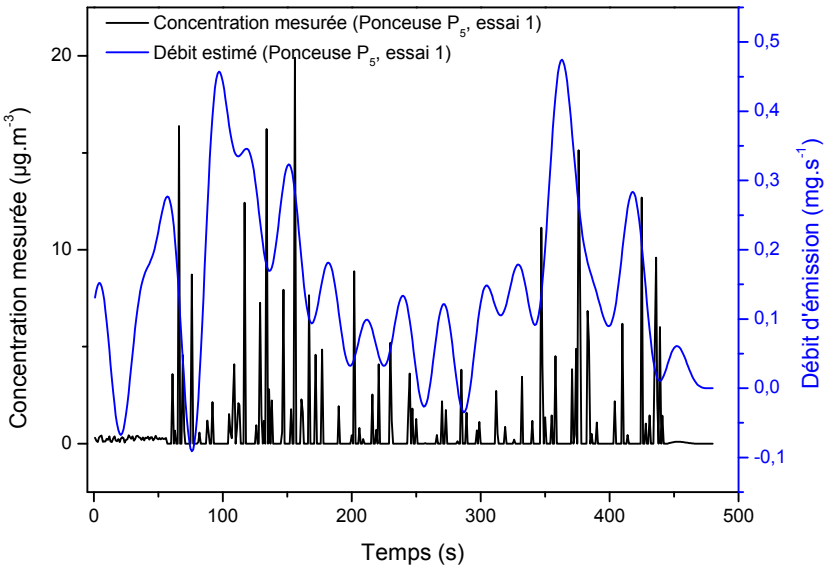


FIGURE 6.14 – Concentration mesurée et débit estimé dans le cas de l'essai 1 la ponceuse P_5

Cette figure et cette table montrent que l'émission de cette ponceuse semble similaire à celle de la ponceuse P_4. En effet, les doses émises sont très faibles (0.05g en moyenne) et la répétabilité

		Essais				
		1	2	3	4	5
Doses émises	g	0.05	0.04	0.06	0.08	0.04

TABLE 6.9 – Doses émises par la ponceuse P_5

des essais est bonne.

b) Analyse du bilan massique des essais de la ponceuse P_5

Le bilan massique de chaque essai est présenté dans la table 6.10. Les masses usinées sont

Essais	$M_{émise}$	$M_{déposée}$	$M_{aspirée}$	T1	$M_{usinée}$	Écart entre les deux termes	
	g						%
1	0.05 ± 0.01	0.35	11.2 ± 0.6	11.6 ± 0.6	12.0 ± 0.2	0.4	3.0
2	0.04 ± 0.01	0.1	10.3 ± 0.5	10.4 ± 0.5	10.5 ± 0.2	0.1	1.3
3	0.06 ± 0.01	0.1	13.2 ± 0.7	13.4 ± 0.7	13.9 ± 0.2	0.5	3.7
4	0.08 ± 0.01	0.1	11.9 ± 0.6	12.1 ± 0.6	13.0 ± 0.2	0.9	6.8
5	0.04 ± 0.01	0.1	12.5 ± 0.6	12.6 ± 0.6	13.0 ± 0.2	0.4	3.0

avec T1 la somme de la masse émise, masse déposée et masse aspirée

TABLE 6.10 – Bilan massique dans le cas des essais sur la ponceuse 5

légèrement inférieures à la ponceuse précédente et le bilan massique est en accord avec les commentaires réalisés jusqu'ici sur les quatre autres ponceuses testées. Nous pouvons d'ores et déjà faire l'hypothèse que les ponceuses P_4 et P_5 ont des performances très proches.

Ponceuse P_6 :

a) Estimation de l'allure temporelle du débit et de la dose émise dans le cas de la ponceuse P_6

L'essai 1 réalisé pour cette ponceuse fournit les allures de concentration et d'émission temporelle présentée dans la figure 6.15. La table 6.11 décrit les doses estimées lors de chaque essai réalisé. La figure et la table obtenues dans le cas de la ponceuse 6 montrent que l'émission de celle-ci semble se situer entre le lot de ponceuses P_1, P_2 et P_3 (qui émettent des quantités de poussières avoisinantes) et le lot composé des ponceuses P_4 et P_5. On remarque que l'estimation lors du $4^{ème}$essai est plus grande que les quatre autres. Nous ne pouvons émettre aucune

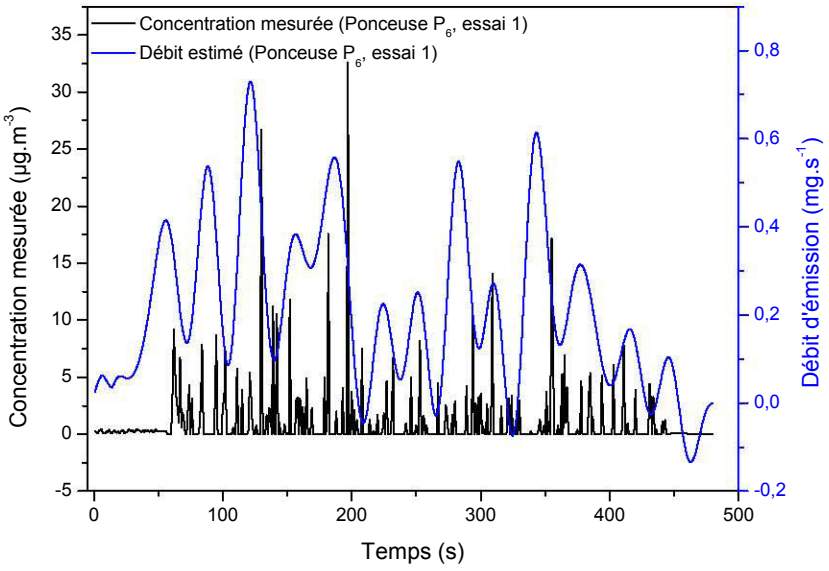


FIGURE 6.15 – Concentration mesurée et débit estimé dans le cas de l'essai 1 la ponceuse P_6

		Essais				
		1	2	3	4	5
Doses émises	g	0.13	0.16	0.10	0.39	0.15

TABLE 6.11 – Doses émises par la ponceuse P_6

hypothèse sur ce résultat pour le moment. L'analyse du bilan pourra peut être apporter des informations complémentaires permettant de l'expliquer.

b) Analyse du bilan massique des essais de la ponceuse P_6

Le bilan massique de chaque essai est présenté dans la table 6.12. Le bouclage du bilan

Essais	$M_{émise}$	$M_{déposée}$	$M_{aspirée}$	T1	$M_{usinée}$	Écart entre les deux termes	
	g						%
1	0.13 ± 0.01	0.2	14.6 ± 0.7	14.9 ± 0.7	15.4 ± 0.2	0.5	3.6
2	0.16 ± 0.02	0.6	11.2 ± 0.6	12.0 ± 0.6	12.6 ± 0.2	0.6	4.4
3	0.10 ± 0.01	0.9	12.5 ± 0.6	13.5 ± 0.6	14.0 ± 0.2	0.5	3.7
4	0.39 ± 0.07	0.8	13.8 ± 0.7	15.0 ± 0.8	15.2 ± 0.2	0.2	1.6
5	0.15 ± 0.02	0.6	12.0 ± 0.6	12.8 ± 0.6	13.1 ± 0.2	0.3	2.4

avec T1 la somme de la masse émise, masse déposée et masse aspirée

TABLE 6.12 – Bilan massique dans le cas des essais sur la ponceuse 6

massique de cette dernière ponceuse testée est très semblable à celui des 5 premières ponceuses étudiées. Dans le cas de l'essai 4, seule la masse émise estimée est différente des autres essais. Le bouclage de cet essai est, quant à lui, le meilleur des cinq puisqu'il est seulement de 1.6%. Il n'y a donc aucune explication évidente à la présence d'une estimation de masse émise aussi élevée. De plus, les intervalles entre le terme somme et la masse usinée se recoupent une fois encore, le bilan est donc vérifié.

Analyse des résultats de toutes les ponceuses :

Les résultats obtenus sur les 6 ponceuses nous permettent de faire différentes remarques :

- Le dépôt pour chaque essai est très faible. En effet, cela est dû à l'utilisation de ventilateurs qui forcent les poussières émises par l'usinage (qui sont fines) à rester en suspension et à suivre l'écoulement de l'air dans la cabine. De plus, la direction d'émission des poussières par la ponceuse facilite le travail des ventilateurs puisqu'elle émet ces poussières directement dans le flux d'air provoqué par ceux-ci.
- On remarque que la masse aspirée est bien plus grande que la masse émise dans l'air pour chaque cycle d'usinage . Cela signifie que le système de captage des machines combiné à un débit de $80 m^3 h^{-1}$ d'aspiration semble être efficace. La figure 6.16 représente la masse émise de chaque machine et la figure 6.17 correspond à la masse aspirée. Nous constatons d'après ces deux graphiques que les ponceuses P_1, P_2 et P_3 semblent

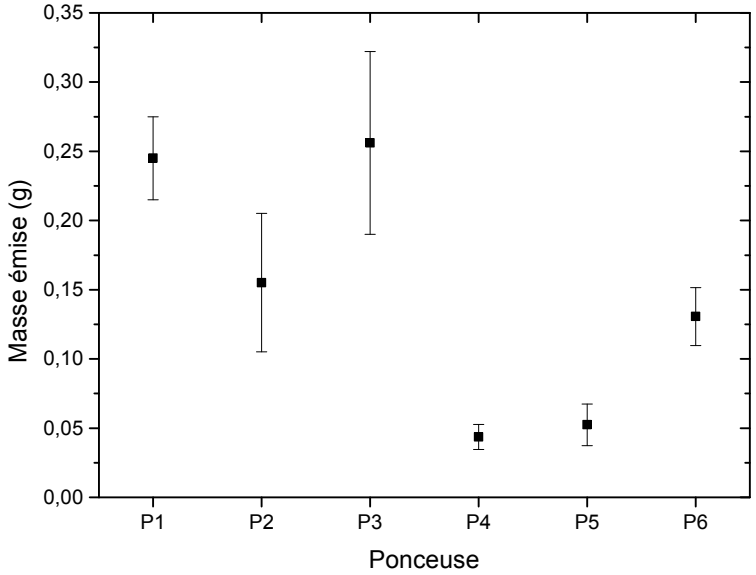


FIGURE 6.16 – Masse moyenne émise par les ponceuses durant un cycle d'usinage

émettre plus de poussières que les autres ponceuses mais parallèlement, les systèmes

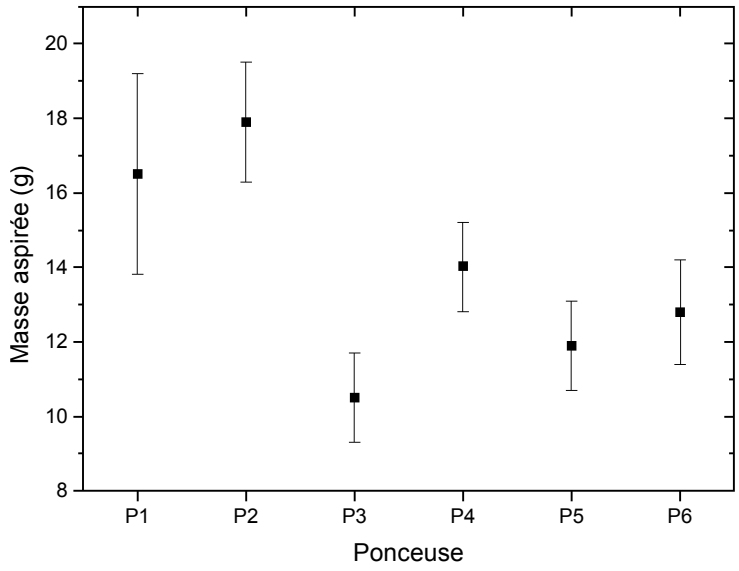


FIGURE 6.17 – Masse moyenne aspirée par les ponceuses durant un cycle d'usinage

d'aspiration des ponceuses P_1 et P_2 captent plus de poussières aussi. Les critères qui seront calculés dans le paragraphe suivant pondèreront ces différents paramètres avec la masse totale poncée. Ainsi, une comparaison des machines entre-elles sera beaucoup plus pertinente.

— Le dernier point à soulever concerne la masse estimée et le bouclage du bilan massique. On remarque que la dose émise est constamment faible et qu'il manque, pour boucler le bilan global du procédé d'usinage, une masse identique voire supérieure à cette dose émise. Il est donc raisonnable de se demander si cette dose émise estimée correspond à une quelconque réalité ou s'il s'agit d'un simple artéfact. Afin de répondre à cette question, 8 essais supplémentaires ont été réalisés. Ces essais consistaient à effectuer une opération de ponçage avec dans un premier temps un débit d'aspiration de $40m^3h^{-1}$ puis avec une aspiration nulle (à la place du tuyau d'aspiration, un sac de récupération de poussières fourni par le fabricant de la ponceuse est utilisé). Les machines ont été choisies aléatoirement pour effectuer ces tests. La ponceuse P_1 a été soumise à deux tests avec $40m^3h^{-1}$ d'aspiration et à deux essais avec le sac de récupération. La ponceuse P_2 a été utilisée pour faire deux tests uniquement avec le sac et la ponceuse P_4 a été sujette à deux essais avec une aspiration de $40m^3h^{-1}$. La table 6.13 présente (d'une manière plus succincte que précédemment) le bilan massique des 8 essais réalisés. Nous remarquons d'après la table des résultats des essais supplémentaires ainsi que de toutes les tables réalisées (pour chaque ponceuse) que le bilan est vérifié à 5% près environ. De plus, les intervalles d'erreur de la somme et de la masse usinée, se recoupent quasiment à chaque fois. On peut en déduire que le bouclage du bilan est indépendant du niveau

			$M_{émise}$	T1	$M_{usinée}$	Écart entre les deux termes	
Essais			g				%
$40m^3h^{-1}$	P_1	1	2.35 ± 0.2	20.1 ± 1.2	21.1 ± 0.2	1.0	4.7
		2	2.65 ± 0.2	19.1 ± 1.2	20.0 ± 0.2	0.9	4.5
	P_4	3	0.69 ± 0.1	10.1 ± 0.6	10.3 ± 0.2	0.2	2.3
		4	0.39 ± 0.07	9.1 ± 0.6	9.8 ± 0.2	0.7	6.8
Sac	P_1	5	7.12 ± 0.4	19.2 ± 1.5	20.5 ± 0.2	1.3	6.3
		6	4.59 ± 0.3	15.6 ± 1.1	16.2 ± 0.2	0.6	3.7
	P_2	7	3.00 ± 0.2	9.1 ± 0.7	9.7 ± 0.2	0.6	6.2
		8	2.91 ± 0.2	9.6 ± 0.7	10.1 ± 0.2	0.5	5.0

avec T1 la somme de la masse émise, masse déposée et masse aspirée

TABLE 6.13 – Essais supplémentaires pour analyser le bilan massique selon le type d'aspiration

d'aspiration. De plus, la dose émise estimée (en comparant les valeurs pour une même ponceuse à des niveaux différents d'aspiration) est d'autant plus élevée que l'aspiration en aval de la machine est faible. Nous pouvons en conclure que les estimations réalisées pour chaque ponceuse semblent être de bonnes qualités et sont valides.

6.2.1.3 Analyse des données, critères de discrimination des ponceuses

A partir des données des tables 6.2, 6.4, 6.6, 6.8, 6.10 et 6.12, les trois critères C_1(efficacité de captage calculée à partir des masses aspirées et usinées), C_2(efficacité de captage calculée à partir des masses émises et usinées) et C_3(proportion d'émission calculée à partir des masses émises et aspirées) peuvent être calculés et un classement basé sur la performance peut donc en résulter. La figure 6.18 représente le résultat du calcul des trois critères pour chaque ponceuse étudiée. Le graphique représentant les trois critères montrent des résultats cohérents dans l'ensemble. En effet, nous avons précédemment remarqué une grande différence entre la masse émise (de l'ordre du dixième de gramme) en poussières et la masse aspirée (de l'ordre de la dizaine de gramme) par le système de captage. Dans cette condition, les critères 1 et 2 fournissent des résultats semblables où le coefficient d'efficacité de captage est grand pour toutes les machines (toujours supérieur à 0.88 dans le cas du critère 1 et 0.97 dans le cas du critère 2). Le critère 3 permet de voir que la proportion émise lors d'une opération d'usinage avec $80m^3.h^{-1}$ d'aspiration est faible quelle que soit la machine étudiée. Ce critère atteint au maximum environ 2.5% de la quantité usinée dans le cas de la ponceuse P_3.

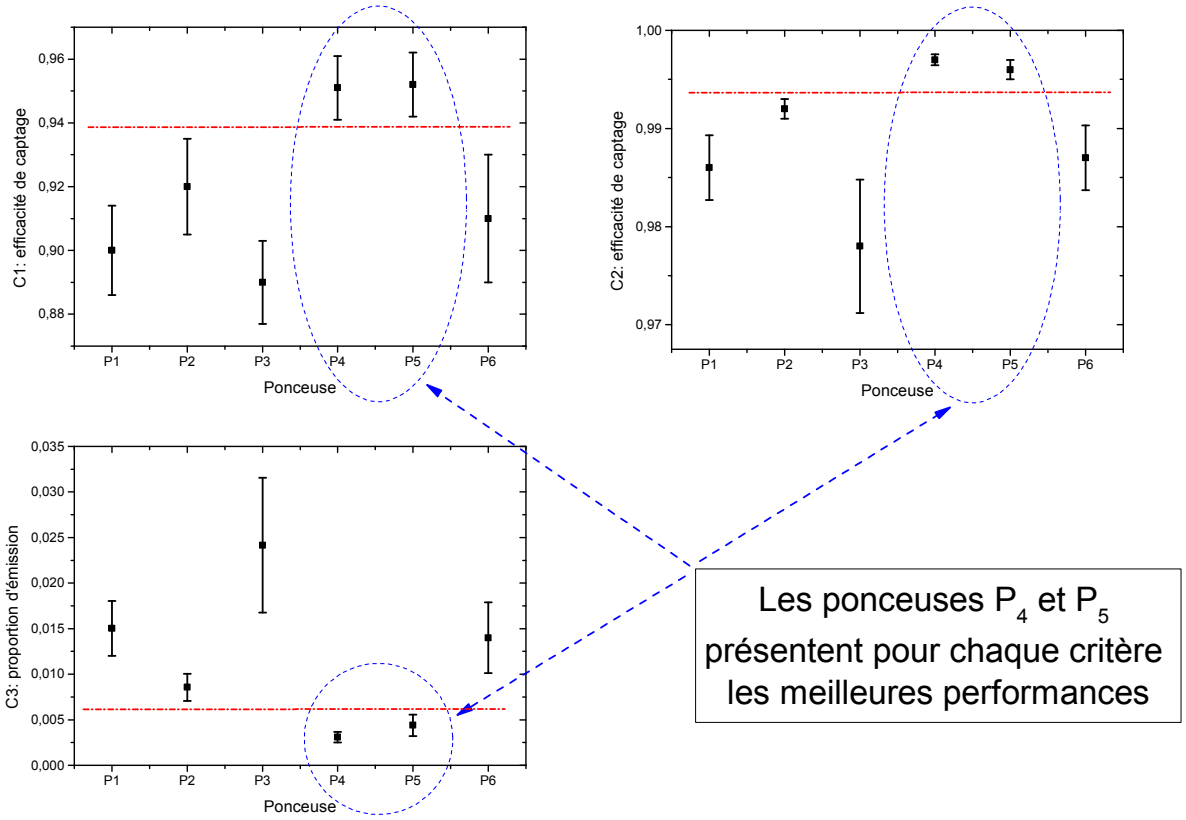


FIGURE 6.18 – Critères de discrimination calculés pour chaque ponceuse étudiée

La table suivante 6.14 résume le classement des différentes ponceuses de la plus performante vers la moins performante pour chaque critère. Les résultats montrent que les classements sont

Rang	Critère 1	Critère 2	Critère 3
1	P_5	P_4	P_4
2	P_4	P_5	P_5
3	P_2	P_2	P_2
4	P_6	P_6	P_6
5	P_1	P_1	P_1
6	P_3	P_3	P_3

TABLE 6.14 – Résultat de la discrimination des ponceuses

très proches quel que soit le critère considéré. En effet, seules les ponceuses P_4 et P_5 voient leur position respective changer de place dans le classement selon le critère considéré. Or, les valeurs obtenues pour ces deux ponceuses sont si proches que nous pouvons leur accorder la même performance.

6.2.1.4 Conclusion de l'étude menée sur les ponceuses

L'étude sur les ponceuses a permis d'émettre un classement global allant de la machine la plus performante à la moins performante. Il a été démontré que les ponceuses sont globalement de bonne qualité en terme d'émission et de captage. En effet, la proportion de poussières émises dans l'air pendant un cycle d'usinage est très faible par rapport à la quantité poncée. Toutefois, malgré des résultats plutôt corrects pour l'ensemble des ponceuses, il est possible d'en ressortir une recommandation envers les ponceuses P_4 et P_5 (qui sont aussi performantes l'une que l'autre) puisque l'efficacité de captage est la plus haute avec au minimum 95% de la masse poncée (critère 1 ou 2) qui est récupérée dans le système d'aspiration et une proportion émise très faible inférieur à 1% de la masse poncée (critère 3). Par conséquent, les ponceuses P_4 et P_5 pourrait être recommandées à l'utilisation.

Après avoir établi une recommandation sur les ponceuses, les mêmes tests sont réalisés sur 4 scies circulaires différentes.

6.2.2 2^{nd} catégorie de machine : les scies circulaires

Dans cette section, l'émission de 4 scies circulaires différentes va être évaluée avec un débit d'aspiration d'environ $120 m^3.h^{-1}$pour chacune. Ces 4 scies ont pour dénomination Sc_i avec $i \in [1;4]$. Cette section sera abordée de la même manière que celle traitant des ponceuses :

— Calibration de l'impédance pour les essais sur les scies circulaires ;
— Estimation des doses émises par les scies circulaires ;
— Analyse des données, critères de discrimination des scies circulaires ;
— Conclusion de l'étude menée sur les scies circulaires.

6.2.2.1 Calibration de l'impédance pour les essais sur les scies circulaires

Tout comme la méthode utilisée le nécessite, l'impédance entre la mesure de concentration et le débit source est initialement calibrée. Le Palas RBG-1000 est utilisé avec de la poussière de sciage récupérée lors de différentes opérations d'usinage. Les signaux utilisés pour la calibration sont présentés sur la figure 6.19. A partir de ces deux signaux, il est possible de déterminer la troncature par le principe de Morozov et d'estimer l'impédance résultante. Les résultats (troncature et impédance) sont présentés sur les figures 6.20 et 6.21.

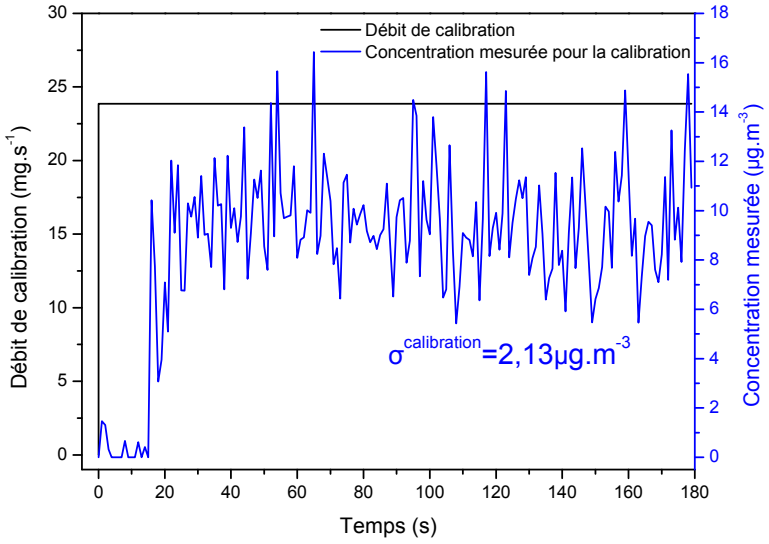


FIGURE 6.19 – Débit d'injection et concentration résultante dans le cas de référence des scies circulaires

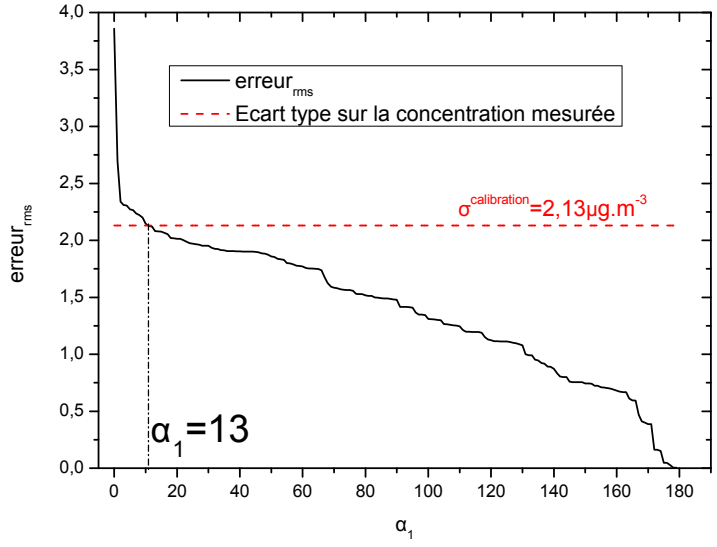


FIGURE 6.20 – Détermination de la troncature α_1 lors de la phase de calibration dans l'étude des scies circulaires

Nous remarquons que l'impédance créée est toujours semblable (allure temporelle) à celles obtenues jusqu'ici. Toutefois, l'amplitude du pic caractéristique dans le cas de la poussières de sciage est plus bas que celui de la poussière de ponçage. Cela est logique puisque dans le cas du ponçage, quasiment l'ensemble de la poussière émise atteint le capteur. Or, dans le cas du sciage, il y a de plus grosses poussières qui sédimentent et se déposent entre le le point d'injection et le capteur. Par conséquent, même si le débit d'émission des scies est plus élevé que celui des ponceuses, nous remarquons que la concentration mesurée est plus faible. Ce qui tend à dire

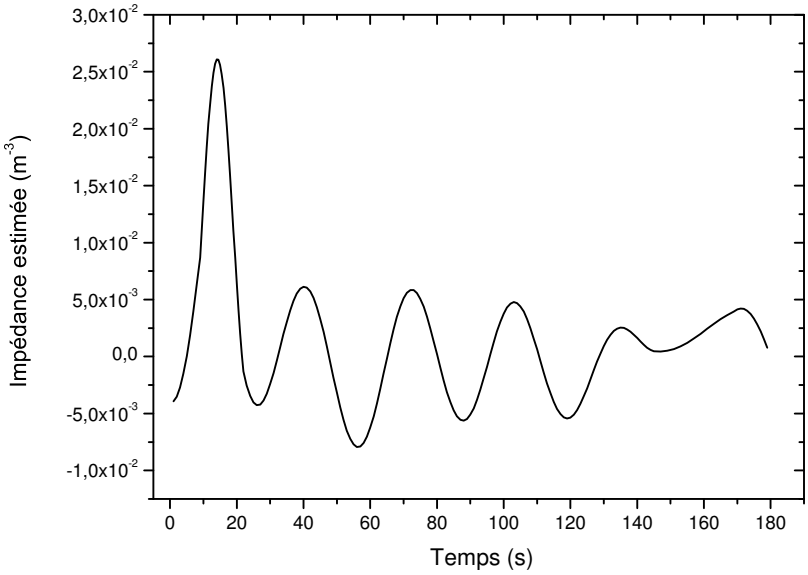


FIGURE 6.21 – Détermination de l'impédance pour la phase de calibration dans l'étude des scies circulaires

qu'il y a plus de pertes « en ligne ». L'impédance calculée prend en compte le potentiel dépôt qu'il y a entre le point d'injection et le capteur. L'impédance pour l'étude des scies circulaires étant calibrée, l'estimation des doses émises lors des opérations de sciages peut être effectuée.

6.2.2.2 Estimation des doses émises par les scies circulaires

Un cycle type d'usinage (dans notre cas test) correspond à quatre passes successives pour un temps de fonctionnement de la scie d'environ 6 minutes. L'estimation sur un premier cas d'usinage de la scie Sc_1 sera détaillée. Puis, nous présenterons de manière similaire à l'étude des ponceuses les résultats obtenus pour les scies Sc_2, Sc_3 et Sc_4.

Scie circulaire Sc_1 :

a) Estimation de l'allure temporelle du débit et de la dose émise dans le cas de la scie Sc_1

Lors d'un test, nous obtenons une mesure de concentration où les quatre passes sont apparentes comme sur la figure 6.22. En effet, nous distinguons très nettement les 4 passes effectuées lors du sciage. La détermination de la troncature par le principe de Morozov est encore plus compliquée que pour les ponceuses du fait qu'aucun écart-type de mesure est évident. Nous

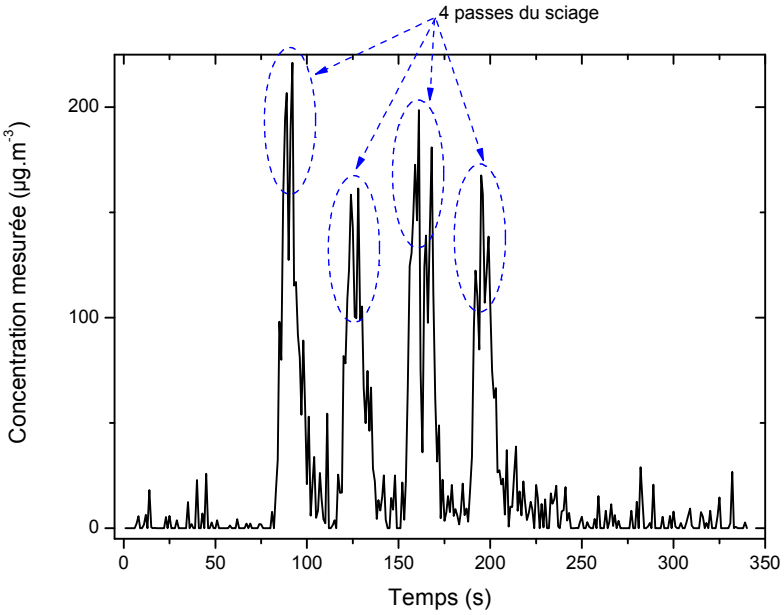


FIGURE 6.22 – Concentration mesurée lors d'une opération de sciage de la scie Sc_1

nous plaçons donc dans un cas similaire à celui des ponceuses où nous utilisons la troncature dite « post-pic » pour effectuer l'estimation. En effet, cette troncature semblait être un bon compromis entre une reconstruction fidèle de l'allure temporelle et une estimation convenable de la dose émise. Dans le cas du sciage, la troncature « Post-pic » correspond à $\alpha_2^{Post-pic} = 23$ (proche de la valeur obtenue pour le ponçage puisque la distance entre le capteur est la source reste la même et que la vitesse caractéristique de l'air dans la cabine est identique). A partir des résultats (figures 6.21 de l'impédance et 6.22 de la concentration mesurée), nous déterminons le débit source émis par la scie circulaire pour cet essai. D'après l'allure temporelle reconstituée (figure 6.23), nous constatons bien les 4 pics d'émissions dus aux 4 passes du sciage. A partir de ce résultat, il est possible de déterminer la masse émise lors du sciage. Pour ce faire, nous calculons l'intégrale sous la courbe dans l'intervalle de temps du sciage (entre $t = 60s$ et $t = 210s$ dans ce cas). Dans le cas présent, la masse émise est estimée à $19.5g$. Comme pour le cas des ponceuses, une vérification de l'impact de la troncature choisie sur cette estimation de masse est effectuée. La figure 6.24 représente donc le calcul de la masse émise en fonction de la troncature. D'après ce calcul, la masse émise semble être assez constante pour une troncature supérieure à $\alpha_2 = 10$ même si cette dose est réellement constante pour un $\alpha_2 \geq 225$. Toutefois, nous souhaitons une reconstruction temporelle cohérente avec la réalité. De ce fait, nous gardons l'ordre de troncature dit « Post-pic) pour tous les essais futurs. La table 6.15 présente les masses émises estimées par notre méthode pour les 5 essais réalisés avec une troncature de $\alpha_2^{Post-pic} = 23$. On remarque d'après le tableau ci-dessus que la masse émise est de l'ordre de $17g$ et que les cinq essais sont répétables.

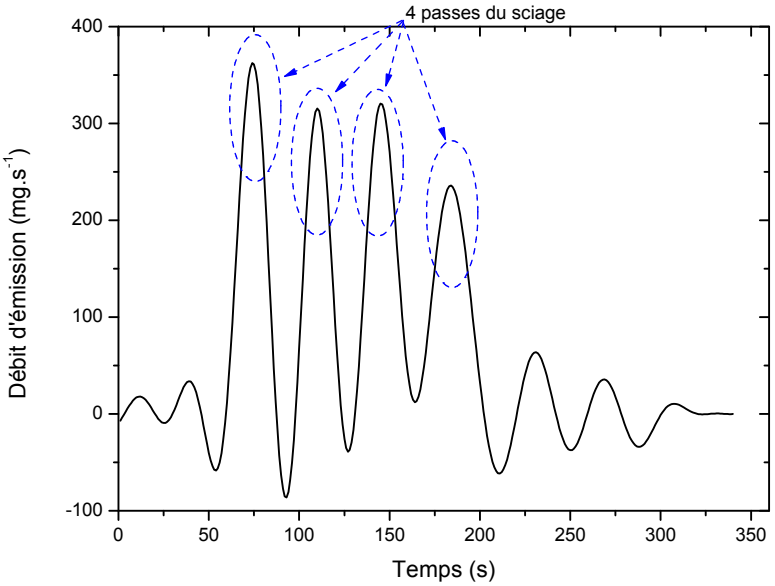


FIGURE 6.23 – Débit de poussières émis par la scie circulaire Sc_1 lors d'un usinage

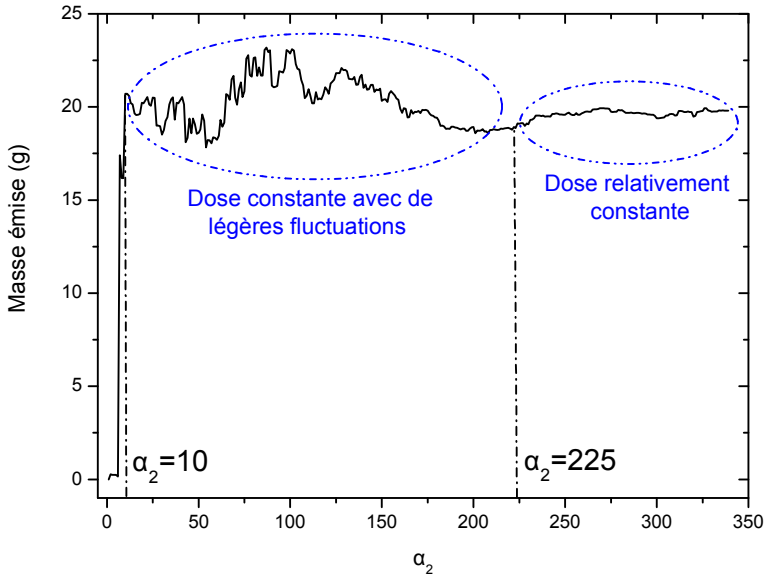


FIGURE 6.24 – Masse émise lors de l'usinage effectué par la scie Sc_1 en fonction de la troncature de l'impédance

b) Analyse du bilan massique des essais de la scie Sc_1

Le bilan massique global de l'ensemble des 5 essais réalisés sur la scie Sc_1 est analysé. La relation que nous utilisions dans le cas des ponceuses (équation 6.1) est toujours valable mais

		Essais				
		1	2	3	4	5
Doses émises	g	19.5	17.9	15.1	17.6	16.4

TABLE 6.15 – Doses émises par la scie Sc_1

la mesure de la masse déposée est impossible dans ce cas. En effet, dans le cas du ponçage, le peu de dépôt qu'il y a, s'effectue à proximité de la ponceuse ce qui rend la récupération de la poussière ainsi que la mesure faisable (même si tout le dépôt ne peut être considéré). Or dans le cas de la scie circulaire, la zone de dépôt de la poussière est plus vaste et s'élargit à tout le sol de la cabine puisque l'émission des particules est directement dirigée vers celui-ci et les ventilateurs ne « réussissent » pas à maintenir en suspension efficacement les grosses poussières. La mesure du dépôt devient donc impossible du fait de la surface à couvrir. Nous faisons donc l'impasse sur cette mesure et considérons le bilan massique suivant :

$$M_{usinée} = M_{émise} + M_{aspirée}. \tag{6.7}$$

Dans cette relation, la masse émise et la masse aspirée sont déterminées comme précédemment et la masse usinée est calculée à partir du volume découpé et de la masse volumique du matériau utilisé. Nous calculons donc la masse usinée telle que :

$$M_{usinée} = e \times L \times h \times \rho_{matériau}, \tag{6.8}$$

avec e l'épaisseur de la lame, L la longueur de la planche à découper, h sa hauteur et $\rho_{matériau}$ la masse volumique apparente du matériau. Dans le cas du ponçage, l'erreur commise sur la masse usinée dépendait exclusivement de la pesée. Or dans ce cas, elle dépend de paramètres soit de fabrication de la scie (épaisseur de la lame), soit du matériau usiné (longueur de planche,...). L'erreur sur chaque paramètre est de l'ordre de 1%, soit une erreur globale sur la masse usinée d'environ 4%.

La table 6.16 résume les bilans massiques des 5 essais réalisés sur la scie Sc_1. D'après les résultats de la table précédente, nous constatons que malgré la non prise en compte de la masse déposée, nous bouclons correctement le bilan. En effet, nous avons un écart moyen de 7.2% entre la masse usinée et la somme de la masse émise avec celle aspirée. De plus nous remarquons que l'écart est toujours positif, c'est à dire qu'il manque de la matière du côté de l'estimation (en moyenne $5.4g$). De plus, nous constatons que les intervalles d'erreurs sur la somme et sur la masse usinée ne se recoupent pas toujours, ce qui pourrait être dû à la masse déposée qui n'est pas prise en compte dans le bilan.

Essais	$M_{émise}$	$M_{déposée}$	$M_{aspirée}$	T1	$M_{usinée}$	Écart entre les deux termes	
	g						%
1	19.5 ± 1.2	ND	51.5 ± 2.6	71.0 ± 3.8	74.5 ± 3.0	3.5	4.7
2	17.9 ± 0.9	ND	53.2 ± 2.7	71.1 ± 3.6	74.5 ± 3.0	3.4	4.6
3	15.1 ± 0.7	ND	53.2 ± 2.7	68.3 ± 3.4	74.5 ± 3.0	6.2	8.3
4	17.6 ± 0.9	ND	47.9 ± 2.4	65.5 ± 3.3	74.5 ± 3.0	9	12
5	16.4 ± 0.8	ND	53.2 ± 2.7	69.6 ± 3.5	74.5 ± 3.0	4.9	6.6

ND=Non défini ; T1=la somme de la masse émise, masse déposée et masse aspirée

TABLE 6.16 – Bilan massique dans le cas des essais sur la scie Sc_1

Scie circulaire Sc_2 :

a) Estimation de l'allure temporelle du débit et de la dose émise dans le cas de la scie Sc_2

La figure 6.25 représente la mesure de la concentration lors de l'essai 1 du sciage avec la scie Sc_2 et l'estimation réalisée à partir de la troncature « Post-pic ». Tout comme le cas de la

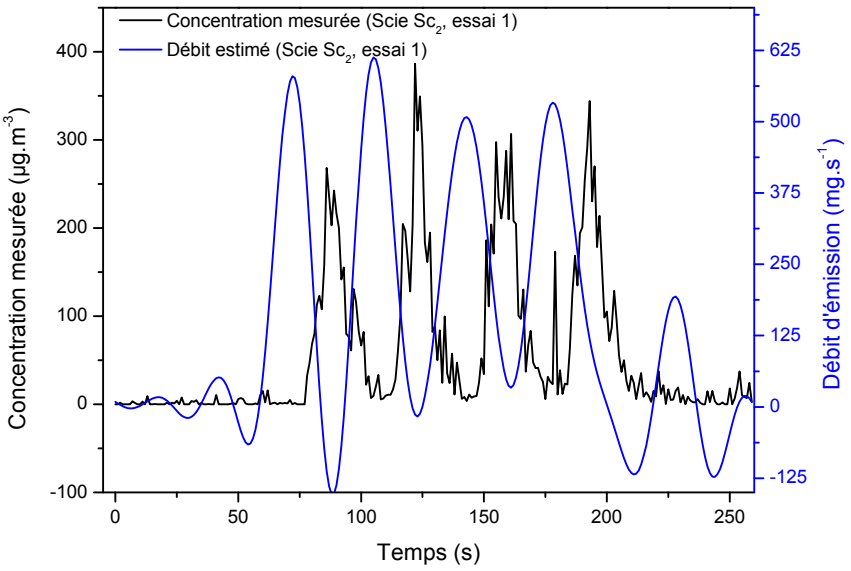


FIGURE 6.25 – Concentration mesurée et débit estimé dans le cas de l'essai 1 de la scie Sc_2

première scie, nous avons autant de pics de concentration mesurée que de passes du sciage (pics de l'injection estimée). Toutefois, nous remarquons que l'amplitude des débits estimés est plus importante que pour la première scie. La table 6.17 résume les différentes doses estimées pour les 5 essais effectués sur la scie Sc_2. On remarque que quel que soit l'essai, la masse émise es-

		Essais				
		1	2	3	4	5
Doses émises	g	36.1	40.1	36.7	37.9	38.6

TABLE 6.17 – Doses émises par la scie Sc_2

timée est de l'ordre de $40g$. Par conséquent, la répétabilité des mesures sur la scie 2 est avérée, ce qui est garant d'une bonne qualité de la mesure.

b) Analyse du bilan massique des essais de la scie Sc_2

La table 6.18 présente le bilan massique réalisé dans le cas de la scie Sc_2. D'après cette

Essais	$M_{émise}$	$M_{déposée}$	$M_{aspirée}$	T1	$M_{usinée}$	Écart entre les deux termes	
	g						%
1	36.1 ± 1.7	ND	29.5 ± 1.5	65.6 ± 3.2	71.3 ± 2.9	5.7	8.0
2	40.1 ± 1.9	ND	31.1 ± 1.6	71.2 ± 3.5	71.3 ± 2.9	0.1	0.2
3	36.7 ± 1.7	ND	31.3 ± 1.6	68.0 ± 3.3	71.3 ± 2.9	3.3	4.6
4	37.9 ± 1.8	ND	31.3 ± 1.6	69.2 ± 3.4	71.3 ± 2.9	2.1	2.9
5	38.6 ± 1.8	ND	31.3 ± 1.6	69.9 ± 3.4	71.3 ± 2.9	1.4	2.0

ND=Non défini ; T1=la somme de la masse émise, masse déposée et masse aspirée

TABLE 6.18 – Bouclage du bilan massique dans le cas des essais sur la scie Sc_2

table, la masse aspirée et la masse émise sont identiques pour chaque essai. Le bilan massique est semblable à la scie Sc_1 avec environ un écart de l'ordre de 5% en moyenne. Néanmoins, dans ce cas, nous remarquons que les intervalles d'erreurs se chevauchent dans chaque cas. Il est possible que pour cette scie, le dépôt (non mesuré) est plus faible que le cas précédent, voir quasiment nul.

Scie circulaire Sc_3 :

a) Estimation de l'allure temporelle du débit et de la dose émise dans le cas de la scie Sc_3

5 essais ont été réalisés avec la scie 3. La figure 6.26 représente la concentration mesurée lors du premier essai ainsi que le débit estimé par la méthode. L'amplitude des pics d'émission estimés est du même ordre de grandeur que ceux de la scie Sc_1. Dans la table 6.19 nous résumons les doses émises lors des essais avec la scie 3. D'après ce tableau, la dose émise est de

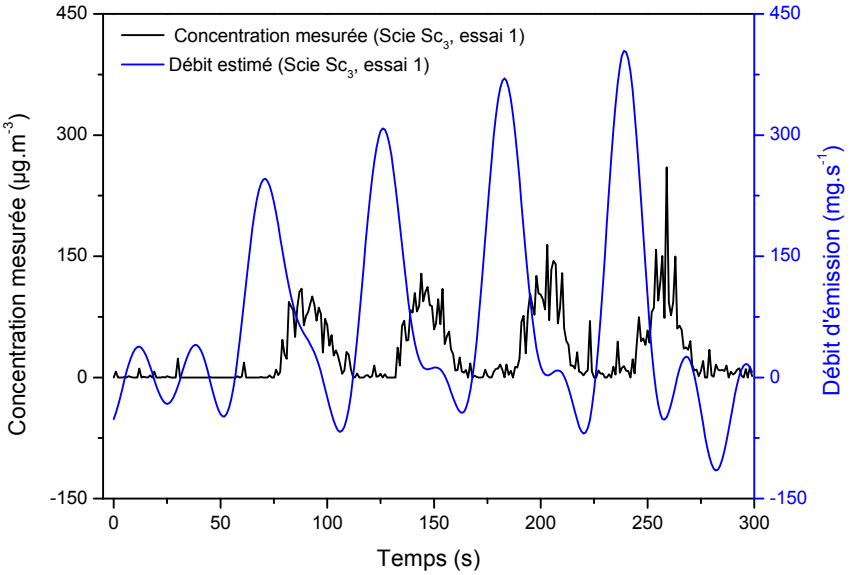


FIGURE 6.26 – Concentration mesurée et débit estimé dans le cas de l'essai 1 de la scie Sc_3

		Essais				
		1	2	3	4	5
Doses émises	g	12.7	14.0	12.1	16.7	14.5

TABLE 6.19 – Doses émises par la scie Sc_3

l'ordre de la dizaine de gramme et en moyenne elle est de $15g$. Les cinq essais sont correctement répétables puisque les valeurs sont proches quel que soit l'essai considéré.

b) Analyse du bilan massique des essais de la scie Sc_3

Dans la table 6.20, le bilan massique des 5 essais est traité. La table ci-dessus montre que la masse émise est la plus faible des trois scies jusqu'à présent testées mais que la masse usinée est elle aussi la plus faible. Le bouclage, quant à lui, est de l'ordre de 6% environ comme dans les cas précédents. D'après ce résultat, nous pouvons d'ors et déjà évaluer cette scie comme étant très proche de la scie Sc_1.

Essais	$M_{émise}$	$M_{déposée}$	$M_{aspirée}$	T1	$M_{usinée}$	Écart entre les deux termes	
	g						%
1	12.7 ± 0.5	ND	43.1 ± 2.2	55.8 ± 2.7	61.6 ± 2.5	5.8	9.4
2	14.0 ± 0.6	ND	44.8 ± 2.2	58.8 ± 2.8	61.6 ± 2.5	2.8	4.5
3	12.1 ± 0.5	ND	43.1 ± 2.2	55.2 ± 2.7	61.6 ± 2.5	6.4	10.3
4	16.7 ± 0.7	ND	42.6 ± 2.1	59.3 ± 2.8	61.6 ± 2.5	2.3	3.7
5	14.5 ± 0.6	ND	44.8 ± 2.2	59.3 ± 2.8	61.6 ± 2.5	2.3	3.7

ND=Non défini ; T1=la somme de la masse émise, masse déposée et masse aspirée

TABLE 6.20 – Bouclage du bilan massique dans le cas des essais sur la scie Sc_3

Scie circulaire Sc_4 :

a) Estimation de l'allure temporelle du débit et de la dose émise ans le cas de la scie Sc_4

La figure 6.27 représente la concentration mesurée ainsi que l'estimation du débit faite pour le premier des 5 essais effectués sur la scie Sc_4. Nous constatons que l'amplitude des pics du

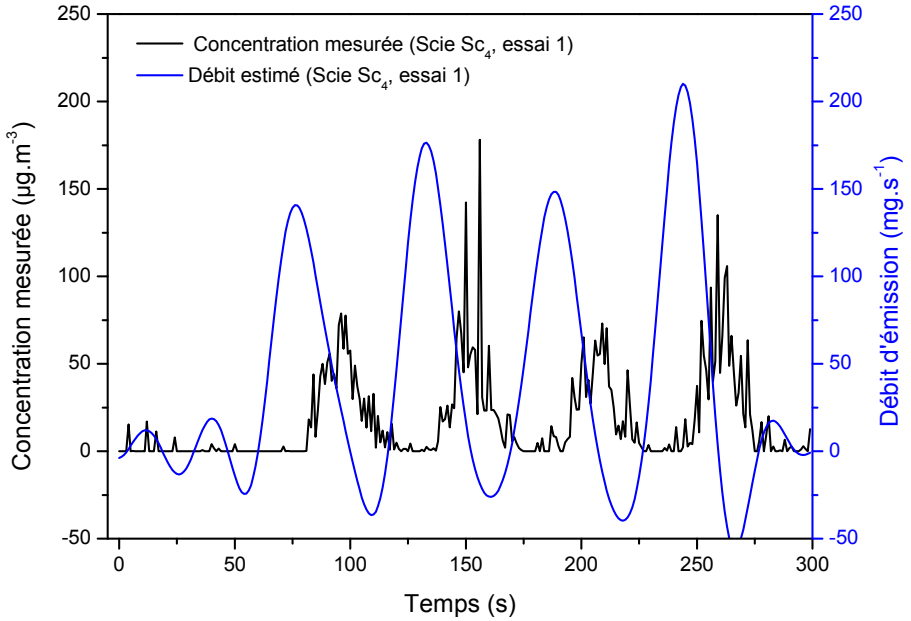


FIGURE 6.27 – Concentration mesurée et débit estimé dans le cas de l'essai 1 de la scie Sc_4

débit émis est plus faible que pour les trois autres scies mais que la largeur de ceux-ci est légè-

rement supérieure. La table 6.21 résume les masses estimées émises lors des 5 différents essais. La masse moyenne émise est de $23.3g$, ce qui est (en terme uniquement de masse) la seconde

		Essais				
		1	2	3	4	5
Doses émises	g	21.8	18.0	24.4	25.3	27.2

TABLE 6.21 – Doses émises par la scie Sc_4

scie la plus émissive. Les essais restent aussi répétables que dans les cas précédents.

b) Analyse du bilan massique des essais de la scie Sc_4

D'après la table suivante (table 6.22) nous pouvons conclure que le bilan pour cette scie est de moins bonne qualité que pour les autres scies. En effet, l'écart moyen entre la masse usinée

Essais	$M_{émise}$	$M_{déposée}$	$M_{aspirée}$	T1	$M_{usinée}$	Écart entre les deux termes	
	g						%
1	21.8 ± 1.3	ND	35.3 ± 1.8	57.1 ± 3.1	64.8 ± 2.6	7.5	11.6
2	18.0 ± 1.1	ND	35.3 ± 1.8	53.3 ± 2.9	64.8 ± 2.6	11.5	17.7
3	24.4 ± 1.4	ND	31.6 ± 1.6	56.0 ± 3.0	64.8 ± 2.6	8.8	13.6
4	25.3 ± 1.5	ND	31.3 ± 1.6	60.6 ± 3.1	64.8 ± 2.6	4.2	6.5
5	27.2 ± 1.6	ND	37.1 ± 1.9	64.3 ± 3.5	64.8 ± 2.6	0.5	7.7

ND = Non défini ; T1=la somme de la masse émise, masse déposée et masse aspirée

TABLE 6.22 – Bouclage du bilan massique dans le cas des essais sur la scie Sc_4

et la somme de la masse émise et aspirée est d'environ 11%. Toutefois, nous restons dans le même ordre de grandeur que les autres scies. Par conséquent, les résultats obtenus pour cette scie semblent ne pas être anormaux.

Analyse des résultats de toutes les scies circulaires :

D'après les essais réalisés sur les 4 scies, il est possible d'émettre deux principaux commentaires :

— La méthode semble être répétable. En effet, sur les 5 essais réalisés par scie, les valeurs obtenues sont proches que ce soit pour l'estimation de la masse émise, la masse usinée ou la masse aspirée. Cela nous permet de dire que les essais semblent être de bonnes qualités puisqu'il n'y a que peu de dispersion dans les mesures réalisées.

— Le dépôt durant le sciage n'est pas mesurable puisque celui-ci est présent sur l'ensemble de la surface au sol (soit environ $9m^2$). Bien qu'il manque le terme de dépôt dans le bilan, nous constatons que celui-ci est globalement de bonne qualité puisque nous sommes à environ 5% à 10% d'écart entre la masse usinée et la somme de la masse aspirée et émise. Ce bilan est légèrement moins bon que celui des ponceuses mais il reste tout à fait correct. Ce qui montre que la méthode d'estimation mise en place semble fonctionner correctement.

6.2.2.3 Analyse des données, critères de discrimination des scies circulaires

Dans ce paragraphe, le calcul des critères de discrimination des 4 scies entre elles est réalisé. La figure 6.28 représente le résultat de ces trois critères pour chaque machine étudiée. D'après

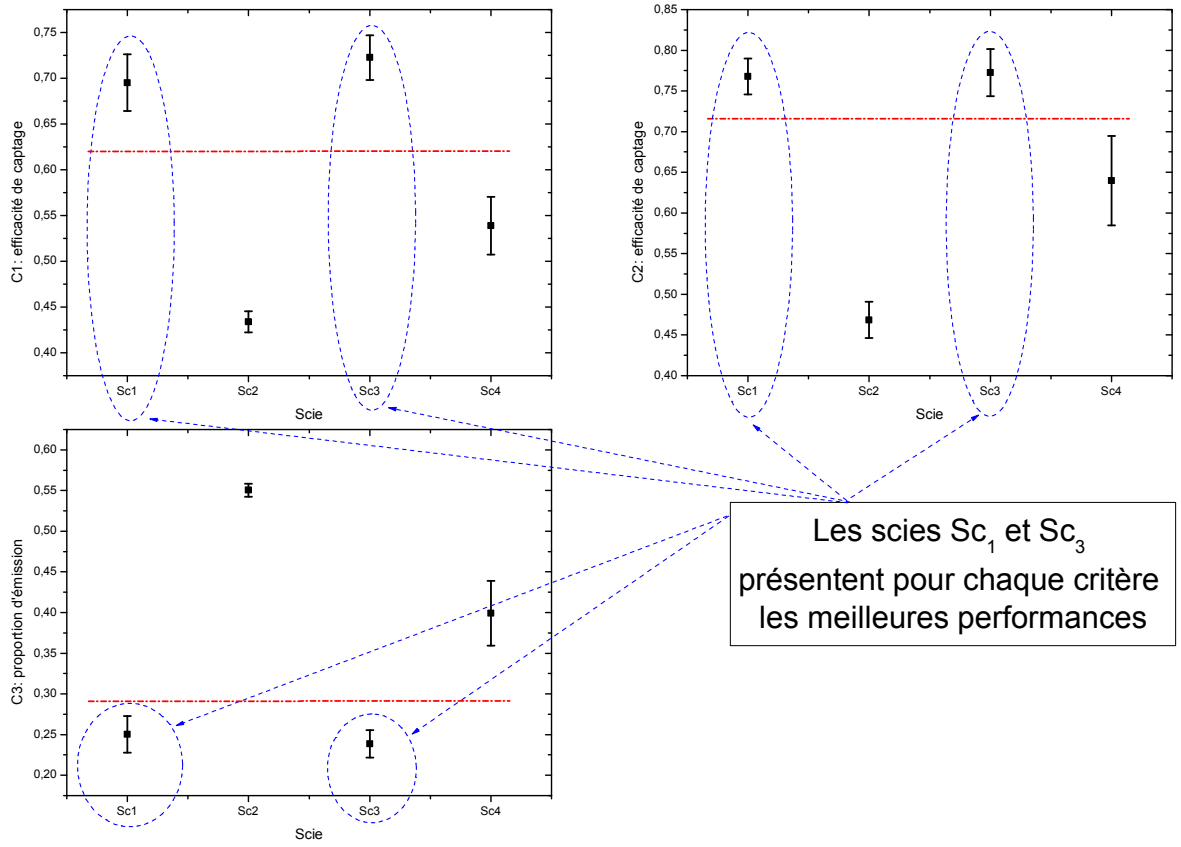


FIGURE 6.28 – Critères de discrimination calculés pour chaque scie étudiée

la figure ci-dessus et la table 6.23, nous observons que le classement des machines est identique pour chacun de ces critères. De plus, il y a une nette différence entre les scies elles-mêmes puisque les scies Sc_1 et Sc_3 possèdent des résultats semblables et bien meilleurs que les deux autres scies. En effet, ces deux scies voient leurs coefficients de captage (critère 1 ou 2) d'en-

viron 0.7 alors que les scies Sc_2 et Sc_4 voient les leurs respectivement à 0.45 et 0.55. Dans le cas de la proportion émise, la scie Sc_2 est la moins bonne avec une valeur critère de 0.55 puis la scie Sc_4 avec 0.4 et les scie Sc_1 et Sc_3 sont à 0.25. Le classement montre que la scie Sc_3 est

Rang	Critère 1	Critère 2	Critère 3
1	Sc_3	Sc_3	Sc_3
2	Sc_1	Sc_1	Sc_1
3	Sc_4	Sc_4	Sc_4
4	Sc_2	Sc_2	Sc_2

TABLE 6.23 – Résultat de la discrimination des scies

de meilleure qualité que la scie Sc_1 pour chaque critère. Cependant, il faut nuancer ce résultat, puisque les valeurs obtenues pour ces deux scies sont très proches.

De plus, il est possible, à partir de ces résultats de confirmer que le choix de la troncature « Post-pic » est cohérent. En effet, même si sur la figure 6.24, nous voyons que la dose n'est pas strictement constante entre $\alpha_2 = 10$ et $\alpha_2 = 225$, l'impact du choix de cette troncature (et par la même occasion de la valeur de la dose émise estimée) ne suffit pas à masquer la différence évidente de performance dans le calcul des critères.

6.2.2.4 Conclusion sur les scies circulaires

L'étude sur les scies permet d'émettre une recommandation des machines les plus performantes. Il a été démontré dans ces tests que les scies s'avèrent être bien moins performantes que les ponceuses. En effet, le meilleur coefficient d'efficacité de captage est de 0.7 pour les scies alors qu'il est très proche de 1 dans le cas des ponceuses. Il y a dans le cas des scies une très grande disparité des résultats entre elles. Il est donc aisé de recommander dans notre cas les scies Sc_1 et Sc_3 et de déconseiller les scies Sc_2 et Sc_4 à l'utilisation.

6.3 Conclusion du chapitre 6

Dans ce chapitre, il nous a été possible d'appliquer la méthode d'estimation de source dans le cas instationnaire directement à des machines électroportatives. Tout d'abord, une étude de la performance des ponceuses à été faite et ensuite les scies circulaires ont été traitées. L'analyse de ces deux types de machines nous a permis de valider définitivement la méthode d'estimation sur un cas pratique de type industriel et de mettre en place une recommandation d'utilisation pour chaque catégorie de machines.

Les ponceuses

Les essais ont été effectués sur 6 ponceuses différentes fonctionnant avec un débit d'aspiration correspondant aux préconisations (soit $80m^3.h^{-1}$). L'analyse du bilan massique global sur le procédé a permis de valider la méthode puisqu'il se vérifie à environ 5% pour chaque ponceuse, ce qui prouve que la méthode utilisée est satisfaisante. Toutefois, sur ce bilan, nous nous sommes rendus compte que la masse estimée est très faible par rapport à la masse aspirée. De plus, la masse émise estimée est du même niveau voire plus faible, que la quantité manquante pour le bilan massique. A partir de ce constat, nous nous sommes interrogés sur la légitimité de l'estimation. Afin d'étudier la pertinence de l'estimation, huit essais sur des ponceuses différentes et avec des débits d'aspirations plus faible que ceux préconisés (soit 4 essais à $40m^3.h^{-1}$ et 4 essais sans aspiration mais avec le sac de récupération de poussières fourni par le fabricant) ont été réalisés. Ces huit tests ont été concluants puisque nous avons remarqué que la masse émise estimée augmente lorsque l'aspiration diminue alors que le bilan massique boucle de façon identique aux cas où l'aspiration est à $80m^3.h^{-1}$. Par conséquent, nous pouvons conclure que les estimations réalisées avec le débit d'aspiration préconisé sont valides.

Nous avons alors constaté que toutes les ponceuses possèdent des performances correctes. En effet, les critères qui sont calculés pour effectuer la discrimination des machines sont de bonne qualité. Les critères C_1 et C_2 fournissent des valeurs très proche de 1 pour toutes les ponceuses (ce qui signifie que l'efficacité de captage est bonne) et le critère C_3 est très proche de 0 (ce qui signifie que la proportion de masse émise est très faible par rapport à la masse usinée). Bien que les résultats soient semblables pour toutes les ponceuses, il est possible d'émettre une recommandation d'utilisation. Deux ponceuses (P_4 et P_5) présentent des résultats sensiblement meilleurs que ceux des quatre autres machines.

Les scies

Quatre scies ont été évaluées dans cette étude avec un débit d'aspiration fixé à environ $120m^3.h^{-1}$. Le procédé de sciage a été lui aussi soumis au bilan massique global de la même façon que celui de ponçage. La différence avec le cas des ponceuses était que la masse déposée dans la cabine ne pouvait pas être aisément mesurable donc cette masse a été écartée du bilan. Sous cette condition, nous avons constaté que le bilan massique des essais se comportait tout de même convenablement, puisque celui-ci est vérifié à 5-10% près. Par conséquent, la méthode utilisée est aussi validée dans le cas des scies circulaires. A contrario des ponceuses, les scies présentent des performances de captage moindres. En effet, dans le meilleur des cas, les critères correspondants à l'efficacité de captage (C_1 et C_2) donnent 0.7 alors que le critère de proportion d'émission C_3 fournit une valeur de 0.25. Ainsi, d'après ces résultats, nous pouvons sans peine réaliser une recommandation d'utilisation. Effectivement, les scies Sc_1 et Sc_2 sortent du

lot puisqu'elles présentent des critères bien plus avantageux que les autres scies analysées.

Chapitre 7

Conclusion générale et perspectives

7.1 Conclusion générale

Le travail réalisé dans cette thèse et présenté dans ce manuscrit avait pour objectif d'élaborer une méthode d'estimation du potentiel émissif des machines électroportatives usinant du bois afin de pouvoir les discriminer entre-elles, dans une perspective d'hygiène industrielle. En effet, il est nécessaire de réaliser un classement de ces machines selon leurs performances de captage puisqu'elles sont très émissives en poussières à l'origine de pathologies graves (notamment cancers de l'ethmoïde (sinus nasal)).

Afin de mener à bien cette étude, deux méthodes ont été développées :

— Une méthode applicable au régime **stationnaire** (cas où la source émet un débit constant de particules) ;

— Une méthode applicable au régime **instationnaire** (cas le plus souvent rencontré dans un procédé de type industriel où la source émet un débit variable dans le temps).

Tout d'abord, les deux méthodes font l'objet d'une hypothèse identique et importante qui stipule que les particules considérées ne perturbent pas l'écoulement du fluide porteur (il y a une linéarité entre le terme source et la concentration mesurée). En d'autres termes, les particules doivent être non ou très peu inertielles et la concentration en particules dans le milieu doit être faible (fraction volumique $< 10^{-6}$) (hypothèse traitée dans le chapitre 2). Ensuite, les deux méthodes se basent sur une/plusieurs mesure(s) en champ lointain, ce qui signifie que la distance entre la source et les points de mesure est telle que l'impact de l'injection source sur l'aéraulique n'est plus perceptible. A partir de cette hypothèse et de ce principe, les deux méthodes d'estimation ont été mises en place. Finalement, la méthode développée pour le cas de sources instationnaires est appliquée à l'émission de machines électroportatives.

Méthode en régime stationnaire

Le chapitre 4 a été l'objet de la première perception du problème d'estimation et il fut consacré au cas stationnaire (un cas qui ne se rencontre pas systématiquement lors d'une émission industrielle de polluant). Dans ce chapitre, une première partie a été dédiée à l'implémentation théorique (qui sera résumé dans l'annexe du manuscrit) de la méthode d'estimation ainsi qu'à l'élaboration d'une aide au positionnement des capteurs. La résolution de ces deux éléments se basent sur les moindres carrés linéaires ordinaires. La seconde partie a permis de valider,via CFD, l'estimation de la source en ayant un écart $\leq 0.1\%$ entre l'estimation et la programmation. Cet écart a été observé dans le cas d'une utilisation de 41 capteurs puis en réduisant ce nombre à partir de la méthode « d'aide au positionnement » à 5. L'application expérimentale, qui s'en est suivie, a montré que l'estimation d'une source « stationnaire » par les 5 capteurs positionnés préalablement s'effectue avec un écart, entre la réalité et l'estimation, d'environ 10%. Cet écart plus grand que le précédent a été imputé au fait justement que le cas numérique (CFD) est idéal alors que expérimentalement l'injection n'est pas parfaitement stationnaire. Finalement, une étude sur la robustesse de la méthode a été réalisée et elle nous a fourni ces limites :

— Lorsque plusieurs sources sont situées à proximité les unes des autres (cas traité par simulation CFD), il est impossible d'estimer chacune d'entre elles. Par contre, l'injection globale des sources (somme des débits) est évaluée correctement à 1.3% d'écart entre la programmation et l'estimation ;
— Lorsque plusieurs sources sont éloignées les unes des autres (cas traité par simulation CFD), alors dans ce cas, il est possible d'estimer les sources indépendamment à 7% maximum et globalement avec un écart $\leq 1\%$;
— Lorsque la source à estimer est aérauliquement différente de la source de référence (cas traité expérimentalement) cela devient plus complexe pour l'estimation. En effet, nous avons constaté que l'écart augmente pour atteindre 55% quand les 4 capteurs en fond de cabine et celui dans la conduite sont utilisés. Toutefois, lorsque l'on considère uniquement le capteur en conduite, l'estimation est de très bonne qualité puisqu'elle est $< 5\%$. Ce constat accrédite le fait qu'il est nécessaire d'utiliser une source de référence aérauliquement similaire à la source à estimer ou qu'il faut placer le/les capteur(s) dans des zones où la globalité du polluant se retrouve parfaitement mélangé malgré la différence aéraulique des sources.

Méthode en régime instationnaire

Le chapitre 5 décrit la méthode employée dans le cas d'une source de polluant instationnaire (plus couramment rencontrée dans les cas industriels). La première section de ce chapitre traite de la mise en place théorique de la méthode. Celle-ci fait appel à une approche convolutive du système physique général et à une discrétisation de cette approche. (La résolution de la méthode est résumée dans l'annexe du manuscrit). La déconvolution employée pour la résolution du problème utilise une décomposition en valeurs singulières tronquée (TSVD). Ensuite, la deuxième section est à l'image de celle faite dans le cas stationnaire. Elle a traité de la validation de la méthode mise en place d'un point de vue numérique (CFD) puis expérimental. Les résultats obtenus ont été très satisfaisants puisque l'allure temporelle des sources a été reconstruite fidèlement et que l'écart entre la dose émise réellement et estimée était de $5 \times 10^{-3}\%$ pour la simulation et de 0.6% expérimentalement. Une dernière section a permis d'analyser l'influence du bruit de mesure sur l'estimation. Trois niveaux de rapports signaux sur bruits ont été étudiés ($RSB_{L2} = 25$, $RSB_{L2} = 5$ et $RSB_{L2} = 2.5$). Il a été observé que plus le signal de concentration mesurée est bruité (RSB_{L2} faible) et plus la troncature lors de la déconvolution du problème est élevée. Pour le rapport $RSB_{L2} = 2.5$, la reconstruction temporelle devient incohérente et la dose de particules émises estimée est à un écart de 12% de la dose réellement programmée. Alors que dans le cas des deux autres rapports signaux sur bruits, l'allure temporelle estimée est juste et la dose estimée est obtenue à 6% près. Par conséquent, nous concluons dans ce cas que l'estimation de l'allure temporelle et celle de la dose sont correctes lorsque le bruit n'est pas trop élevé. De plus, si ce bruit est trop élevé, l'estimation devient de mauvaise qualité.

Application aux machines électroportatives

L'application directe de la méthode aux machines électroportatives a été considérée dans le chapitre 6. Cette application est totalement différente de celle effectuée dans le chapitre 5 puisque dans ce cas, l'émission de la source est réellement inconnue, alors que précédemment nous utilisions le système de génération contrôlable Palas RBG-1000. Un bilan massique global du procédé a donc été mis en place pour valider les estimations. Il se trouve que dans le cas des ponceuses, le bilan massique se vérifie à 5% en moyenne alors que pour les scies circulaires, l'erreur sur le bilan est légèrement supérieur tout en restant $< 10\%$ en moyenne. Par conséquent, la méthode peut être validée sur cette application concrète. Six ponceuses ont été soumises aux essais et un classement a pu en ressortir. Il a été évalué que les performances globales de toutes les ponceuses sont convenables. En effet, la proportion émise dans l'air par les ponceuses se situe entre 0.25% et 2.5% de la masse usinée. Toutefois, deux ponceuses sortent du lot avec des performances légèrement meilleures que les quatre autres. Il a donc été possible d'émettre une recommandation d'utilisation pour ces deux ponceuses.

Quatre scies circulaires ont été assujetties à un test constitué de 4 passes de découpes. Contrairement aux ponceuses, les scies présentent des performances bien moins bonnes. En effet, la proportion émise dans l'air est au minimum de 25% de la masse découpée et au maximum de 55%. Il y a donc un classement évident qui peut se faire. Dans notre cas, deux scies circulaires présentent des résultats fortement similaires et sont donc conseillées à l'utilisation alors que, les deux autres ne le sont pas.

L'ensemble du travail effectué dans ce doctorat a permis de mettre en évidence qu'il est possible d'estimer une source d'aérosol sous diverses conditions. La validation de ces méthodes a été réalisée avec succès pour chaque application et la discrimination des machines entre elles-mêmes a été concluante. En effet, il a été possible d'effectuer des recommandations d'utilisations sur deux catégories de machines usinant le bois d'une façon totalement différente (traitement de surface en ce qui concerne les ponceuses et découpe de matière pour les scies circulaires).

7.2 Perspectives

Les perspectives pour cette étude sont multiples. En effet, de nombreux points n'ont pas pu être abordés et il serait intéressant de les traiter. Nous pouvons citer en autres :

D'un point de vue théorique

La troncature utilisée dans la méthode est basée sur le principe de Morozov qui fait intervenir l'écart type sur la mesure. Or dans notre cas, il a été constaté lors de l'application de la méthode instationnaire aux machines électroportatives que le principe de Morozov ne convenait pas pour l'étape d'estimation de source. Par conséquent, un ordre de troncature empirique a été utilisé qui permet d'effectuer une reconstruction temporelle de l'injection source et une estimation de la dose émise cohérentes. Il serait donc intéressant d'approfondir le sujet en essayant de déterminer plus efficacement cet ordre de troncature. Une piste qui peut-être envisagée est d'analyser le rapport qui existe entre l'impédance, qui se situe dans le domaine temporel, et la décomposition TSVD, qui se situe dans le domaine spectral.

D'un point de vue expérimental

Expérimentalement, de nombreux essais peuvent être réalisés afin d'évaluer soit la robustesse de la méthode, soit la caractérisation des machines.

— La robustesse de la méthode peut-être effectuée avec la mise en place d'une seconde source ainsi que de multiples capteurs afin d'évaluer si, elle discerne les deux sources et si, les estimations restent convenables. Une généralisation de la méthode d'estimation à plusieurs sources et plusieurs capteurs est décrite en annexe.

— Une étude paramétrique sur les machines peut être effectuée afin d'évaluer si le classement de celles-ci reste identique selon tous les paramètres testés. En ce qui concerne les ponceuses, les paramètres à faire fluctuer peuvent être le bois à usiner, le grain du papier de ponçage ou la pression appliquée sur les machines. Pour les scies circulaires, cela peut aussi être le bois à découper ou les caractéristiques de la lame (la nature de la lame, le nombre de dents, ...).

— Un dernier point de perspective peut être soulevé sur le type du capteur utilisé pour l'estimation de l'émission des machines. En effet, la méthode se veut être applicable facilement avec un coût modéré. C'est pourquoi, il serait judicieux d'étudier les résultats obtenus par la méthode pour un capteur moins coûteux et moins complexe que l'APS. Le dataram PDR-1500 semble est un bon prétendant pour ce test.

Bibliographie

O M Alifanov. *Inverse heat transfer problems*. Springer Science & Business Media, 2012.

A J Annunzio, G S Young, and S E Haupt. Utilizing state estimation to determine the source location for a contaminant. *Atmospheric Environment*, 46 :580–589, 2012.

B Arnaudo, I Magaud-Camus, N Sandret, T Coutrot, MC Floury, N Guignon, S Hamon-Cholet, and D Waltisperger. Les expositions aux risques professionnels. *Les produits chimiques. Résultats SUMER*, 2003.

J Atmadja and A C Bagtzoglou. State of the art report on mathematical methods for groundwater pollution source identification. *Environmental Forensics*, 2(3) :205–214, 2001.

M Bady, S Kato, and H Huang. Identification of pollution sources in urban areas using reverse simulation with reversed time marching method. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 8(1) :275–282, 2009.

C H Barcenas, G L Delclos, R El-Zein, G Tortolero-Luna, L W Whitehead, and M R Spitz. Wood dust exposure and the association with lung cancer risk. *American journal of industrial medicine*, 47(4) :349–357, 2005.

James V Beck, Ben Blackwell, and Charles R St Clair Jr. *Inverse heat conduction : Ill-posed problems*. James Beck, 1985.

JC Bokar and MN Özisik. An inverse analysis for estimating the time-varying inlet temperature in laminar flow inside a parallel plate duct. *International journal of heat and mass transfer*, 38(1) :39–45, 1995.

Barbe-Le Borgne et al. *Etude expérimentale et théorique de la coagulation des aérosols liquides*. PhD thesis, Paris 12, 1987.

J Boussinesq. Théorie de l'écoulement tourbillonnant, mémoire présenté par la division savante, 1877.

R Braconnier and F Bonthoux. A numerical method of reconstructing the pollutant concentration field in a ventilated room. *The Annals of occupational hygiene*, 51(3) :311–25, April 2007. ISSN 0003-4878.

Olivier CALVEZ. Point de repère : Exposition professionnelle aux poussières de bois. résultat de la campagne nationale 2008. *HST*, 2009.

Alan Echt Chaolong Qi and Michael G. Gressel. On the characterization of the generation rate and size dependent crystalline silica content of the dust from cutting fiber cement siding. *Annal Occupational Hygiene*, pages 1–11, 2015.

Jean Charuau. Etude du depot des particules dans les conduits, optimisation des tubes de prelevement des aerosols radioactif. *Rapport CEA*, 1982.

Fangzhi Chen, CM Simon, and Alvin CK Lai. Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift–flux model. *Atmospheric Environment*, 40(2) :357–367, 2006.

KY Kenneth Chung, R John Cuthbert, Graham S Revell, Sara G Wassel, and Nick Summers. A study on dust emission, particle size distribution and formaldehyde concentration during machining of medium density fibreboard. *Annals of Occupational Hygiene*, 44(6) :455–466, 2000.

JW Cleaver and B Yates. A sub layer model for the deposition of particles from a turbulent flow. *Chemical Engineering Science*, 30(8) :983–992, 1975.

JT Davies. A new theory of aerosol deposition from turbulent fluids. *Chemical engineering science*, 38(1) :135–139, 1983.

MS El-Shobokshy. Experimental measurements of aerosol deposition to smooth and rough surfaces. *Atmospheric Environment (1967)*, 17(3) :639–644, 1983.

S Elghobashi. On predicting particle-laden turbulent flows. *Applied Scientific Research*, 52(4) : 309–329, 1994.

Donald A Enarson and Moira Chan-Yeung. Characterization of health effects of wood dust exposures. *American journal of industrial medicine*, 17(1) :33–38, 1990.

Fa-Gung Fan and Goodarz Ahmadi. A sublayer model for turbulent deposition of particles in vertical ducts with smooth and rough surfaces. *Journal of Aerosol Science*, 24(1) :45–64, 1993.

J-R Fontaine, J-P Muller, M-C Braud, P Brouté, R Accart, D Pinsard, G Marmoret, J-P Bayle, and P Bourges. Evaluation des performances de captage de trois types de machines à bois portatives. *HST*, 2010.

Amaya Franco-Uría, Cristina López-Mateo, Enrique Roca, and Maria Luisa Fernández-Marcos. Source identification of heavy metals in pastureland by multivariate analysis in nw spain. *Journal of hazardous materials*, 165(1) :1008–1015, 2009.

SK Friedlander. *Smoke, Dust and Hase : Fundamentals O Aerosol Behavior*. Wiley, 1977.

SK Friedlander and HF Johnstone. Deposition of suspended particles from turbulent gas streams. *Industrial & Engineering Chemistry*, 49(7) :1151–1156, 1957.

Martin Harper and Brian S Muller. An evaluation of total and inhalable samplers for the collection of wood dust in three wood products industries. *J. Environ. Monit.*, 4(5) :648–656, 2002.

Richard B Hayes, Michel Gerin, Jan W Raatgever, and Arry de Bruyn. Wood-related occupations, wood dust exposure, and sinonasal cancer. *American journal of epidemiology*, 124(4) : 569–577, 1986.

Benoît Hervé-Bazin. *Les nanoparticules : Un enjeu majeur pour la santé au travail ?* L'Editeur : EDP Sciences, 2007.

Sture Holmberg and Yuguo Li. Modelling of the indoor environment particle. *Indoor air*, (January) :113–122, 1998.

CH Huang and MN Özisik. Inverse problem of determining unknown wall heat flux in laminar flow through a parallel plate duct. *Numerical Heat Transfer*, 21(1) :55–70, 1992.

Cheng-Hung Huang and Wei-Chung Chen. A three-dimensional inverse forced convection problem in estimating surface heat flux by conjugate gradient method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(17) :3171–3181, 2000.

Jack C Hwang and Robert M Koerner. Groundwater pollution source identification from limited monitoring well data : Part 1 theory and feasibility. *Journal of hazardous materials*, 8(2) : 105–119, 1983.

Y Jarny, MN Ozisik, and JP Bardon. A general optimization method using adjoint equation for solving multidimensional inverse heat conduction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34(11) :2911–2919, 1991.

W. P Jones and B. E Launder. k-e model of turbulence.pdf. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15 :301–314, 1972.

Timo Kauppinen, Raymond Vincent, Tuula Liukkonen, Michel Grzebyk, Antti Kauppinen, Irma Welling, Pedro Arezes, Nigel Black, Frank Bochmann, Filipe Campelo, et al. Occupational exposure to inhalable wood dust in the member states of the european union. *Annals of Occupational Hygiene*, 50(6) :549–561, 2006.

A Kirsch. An introduction to mathematical theory of inverse problems springer. *New York*, 1996.

T Kneen and W Strauss. Deposition of dust from turbulent gas streams. *Atmospheric Environment (1967)*, 3(1) :55–67, 1969.

Alvin C.K. Lai, K. Wang, and F.Z. Chen. Experimental and numerical study on particle distribution in a two-zone chamber. *Atmospheric Environment*, 42(8) :1717–1726, March 2008.

P Lascaux and R Theodor. Analyse numerique matricielle apliquee a l'art de l'ingenieur, 1987.

C. L Lawson and R. J Hanson. Solving least squares problems. *SIAM*, 1974.

Benjamin YH Liu and Jugal K Agarwal. Experimental observation of aerosol deposition in turbulent flow. *Journal of Aerosol Science*, 5(2) :145–155, 1974.

Di Liu, Fu-Yun Zhao, and Han-Qing Wang. History recovery and source identification of multiple gaseous contaminants releasing with thermal effects in an indoor environment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(1) :422–435, 2012.

Di Liu, Fu-Yun Zhao, Han-Qing Wang, and Ernst Rank. History source identification of airborne pollutant dispersions in a slot ventilated building enclosure. *International Journal of Thermal Sciences*, 64 :81–92, 2013.

FB Liu and MN Ozisik. Estimation of inlet temperature profile in laminar duct flow. *Inverse Problems in engineering*, 3(1-3) :131–143, 1996.

Xiang Liu and Zhiqiang John Zhai. Prompt tracking of indoor airborne contaminant source location with probability-based inverse multi-zone modeling. *Building and Environment*, 44 (6) :1135–1143, 2009.

HA Machado and Helcio RB Orlande. Inverse analysis for estimating the timewise and spacewise variation of the wall heat flux in a parallel plate channel. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 7(7) :696–710, 1997.

HA Machado and HRB Orlande. Inverse problem for estimating the heat flux to a non-newtonian fluid in a parallel plate channel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, 20(1) :51–61, 1998.

D Maillet, Y Jarny, and D Petit. Problemes inverses en diffusion thermique, partie 3 : Outils specifiques de conduction inverse et de regularisation. *Technique de l'Ingenieur, Paris, a paraitre, page traité BE8267*, 2011.

James R Martin and David M Zalk. Comparison of total dust/inhalable dust sampling methods for the evaluation of airborne wood dust. *Applied occupational and environmental hygiene*, 13(3) :177–182, 1998.

A Moutsoglou. An inverse convection problem. *Journal of heat transfer*, 111(1) :37–43, 1989.

Philippe Nerisson. Modélisation du transfert des aérosols dans un local ventilé. 2009.

Philippe Nerisson, Olivier Simonin, Laurent Ricciardi, Alexandre Douce, and Javaraly Fazileabasse. Improved cfd transport and boundary conditions models for low-inertia particles. *Computers & Fluids*, 40(1) :79–91, 2011.

Leena A Nylander and John M Dement. Carcinogenic effects of wood dust : review and discussion. *American journal of industrial medicine*, 24(5) :619–647, 1993.

Benoit Oesterlé. Ecoulements multiphasiques. *Hermes-Lavoisier, Paris*, 2006.

PG Papavergos and AB Hedley. Particle deposition behaviour from turbulent flows. *Chemical engineering research & design*, 62(5) :275–295, 1984.

HM Park and OY Chung. An inverse natural convection problem of estimating the strength of a heat source. *International journal of heat and mass transfer*, 42(23) :4259–4273, 1999a.

HM Park and OY Chung. Inverse natural convection problem of estimating wall heat flux using a moving sensor. *Journal of heat transfer*, 121(4) :828–836, 1999b.

Stephen B Pope. *Turbulent flows*. Cambridge university press, 2000.

W. H Press, S. A Teukolsky, W. T Vetterling, and B.P Flannery. *Numerical recipes 3rd edition : The art of scientific computing*. Cambridge university press, 2007.

M Prud'Homme and T Hung Nguyen. Whole time-domain approach to the inverse natural convection problem. *Numerical Heat Transfer, Part A Applications*, 32(2) :169–186, 1997.

MW Reeks. The transport of discrete particles in inhomogeneous turbulence. *Journal of aerosol science*, 14(6) :729–739, 1983.

André Renoux and Denis Boulaud. *Les aérosols : physique et métrologie*. Tec/Doc-Lavoisier, 1998.

A Rubinowicz. Radiometerkräfte und ehrenhaftsche photophorese. *Annalen der Physik*, 367 (16) :691–715, 1920.

Bert Scheeper, Hans Kromhout, and Jan SM Boleij. Wood-dust exposure during wood-working processes. *Annals of Occupational Hygiene*, 39(2) :141–154, 1995.

L Schiller and A Naumann. A drag coefficient correlation. *Vdi Zeitung*, 77(318) :51, 1935.

GA Sehmel. Particle deposition from turbulent air flow. *Journal of Geophysical Research*, 75 (9) :1766–1781, 1970.

George A Sehmel. Aerosol deposition from turbulent airstreams in vertical conduits. Technical report, Battelle-Northwest, Richland, Wash. Pacific Northwest Lab., 1968.

MH Shamssain. Pulmonary function and symptoms in workers exposed to wood dust. *Thorax*, 47(2) :84–87, 1992.

Tsan-Hsing Shih, Jiang Zhu, and John Leask Lumley. *A realizable Reynolds stress algebraic equation model*, volume 105993. National Aeronautics and Space Administration, 1993.

Mark R Sippola and William W Nazaroff. Particle deposition from turbulent flow : Review of published research and its applicability to ventilation ducts in commercial buildings. *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 2002.

Joseph Smagorinsky. General circulation experiments with the primitive equations : I. the basic experiment*. *Monthly weather review*, 91(3) :99–164, 1963.

Ton Spee, Esther Van De Rijdt-Van Hoof, Wouter Van Hoof, Dook Noy, and Hans Kromhout. Exposure to wood dust among carpenters in the construction industry in the netherlands. *Annals of occupational hygiene*, 51(3) :241–248, 2007.

P B Stark, Berkeley Ca, and R L Parker. Bounded-Variable Least-Squares : an Algorithm and Applications. *Computational Statistics*, 10 :129–141, 1995.

Kurt Straif, Lamia Benbrahim-Tallaa, Robert Baan, Yann Grosse, Béatrice Secretan, Fatiha El Ghissassi, Véronique Bouvard, Neela Guha, Crystal Freeman, Laurent Galichet, et al. A

review of human carcinogens part c : metals, arsenic, dusts, and fibres. *The lancet oncology*, 10(5) :453–454, 2009.

A Thorpe and RC Brown. Measurements of the effectiveness of dust extraction systems of hand sanders used on wood. *Annals of Occupational Hygiene*, 38(3) :279–302, 1994.

AC Wells and AC Chamberlain. Transport of small particles to vertical surfaces. *British Journal of Applied Physics*, 18(12) :1793, 1967.

Klaus Willeke. Temperature dependence of particle slip in a gaseous medium. *Journal of Aerosol Science*, 7(5) :381–387, 1976.

NB Wood. A simple method for the calculation of turbulent deposition to smooth and rough surfaces. *Journal of aerosol Science*, 12(3) :275–290, 1981.

V Yakhot, SA Orszag, S Thangam, TB Gatski, and CG Speziale. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A : Fluid Dynamics (1989-1993)*, 4(7) :1510–1520, 1992.

LI Zaichik, NI Drobyshevsky, AS Filippov, RV Mukin, and VF Strizhov. A diffusion-inertia model for predicting dispersion and deposition of low-inertia particles in turbulent flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(1) :154–162, 2010.

Zhiqiang John Zhai, Xiang Liu, Haidong Wang, Yuguo Li, and Junjie Liu. Experimental verification of tracking algorithm for dynamically-releasing single indoor contaminant. In *Building Simulation*, volume 5, pages 5–14. Springer, 2012.

Changbo Zhang, Longhua Wu, Yongming Luo, Haibo Zhang, and Peter Christie. Identifying sources of soil inorganic pollutants on a regional scale using a multivariate statistical approach : role of pollutant migration and soil physicochemical properties. *Environmental Pollution*, 151(3) :470–476, 2008.

Tengfei Zhang and Qingyan Chen. Identification of contaminant sources in enclosed spaces by a single sensor. *Indoor air*, 17(6) :439–449, 2007a.

Tengfei Tim Zhang, Shi Yin, and Shugang Wang. An inverse method based on cfd to quantify the temporal release rate of a continuously released pollutant source. *Atmospheric Environment*, 77 :62–77, 2013.

TF Zhang and Q Chen. Identification of contaminant sources in enclosed environments by inverse cfd modeling. *Indoor air*, 17(3) :167–177, 2007b.

Bin Zhao, Caiqing Yang, Xudong Yang, and Shuangke Liu. Particle dispersion and deposition in ventilated rooms : testing and evaluation of different eulerian and lagrangian models. *Building and Environment*, 43(4) :388–397, 2008.

Xiaoping Zheng and Zengqiang Chen. Back-calculation of the strength and location of hazardous materials releases using the pattern search method. *Journal of hazardous materials*, 183 (1) :474–481, 2010.

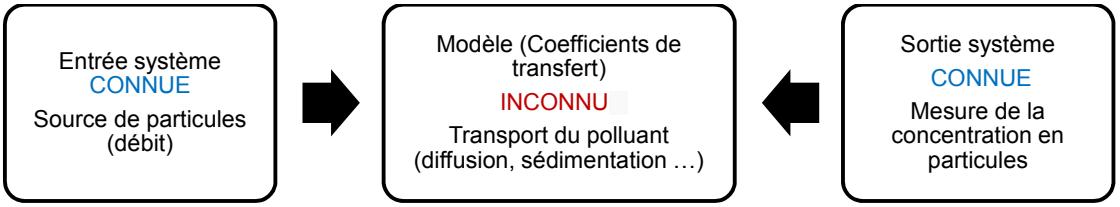
Chapitre 8

Annexes

8.1 Annexe 1 : Résumé de la méthode dans le cas stationnaire

Cette annexe est destinée à expliquer l'implémentation de la méthode d'estimation dans le cas où la/les source(s) est(sont) stationnaire(s).

$1^{ère}$ étape : calibration des coefficients de transfert



Dans cette première étape, le(s) débit(s) source(s) est(sont) **connu(s)** et la concentration mesurée en un point « i » se définit par :

$$C_{point\,i} = f_i + \sum_{j=1}^{N} S_j \Lambda_{ij},$$

1. Dans un premier temps, une mesure de la concentration de calibration à chaque point lorsque que les sources sont connues et actives individuellement doit être réalisée. L'ensemble des concentrations mesurées peut-être organisé dans la matrice $\mathbf{C_{cal}}$ suivante :

$$C_{cal} = \begin{bmatrix} C_{point\,1}^{source\,1} & C_{point\,1}^{source\,2} & \cdots & C_{point\,1}^{source\,N} \\ C_{point\,2}^{source\,1} & C_{point\,2}^{source\,2} & \cdots & C_{point\,2}^{source\,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{point\,M}^{source\,1} & C_{point\,M}^{source\,2} & \cdots & C_{point\,M}^{source\,N} \end{bmatrix} \text{ avec } M \geq N,$$

2. A partir de la mesure des concentrations, des débits sources de calibration connus ($S_{cal\,j}$) et de l'erreur sur le point de mesure $\sigma_{point\,i}^{source\,j}$, il est possible de calculer les coefficients $\lambda_{point\,i}^{source\,j}$ de la matrice de transfert Λ :

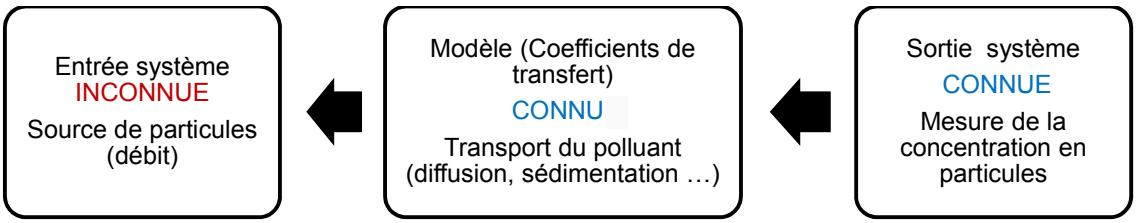
$$\lambda_{point\,i}^{source\,j} = \frac{C_{point\,i}^{source\,j} - f_i}{S_{cal\,j} \times \sigma_{point\,i}^{source\,j}},$$

3. Il est donc possible de disposer les différentes valeurs de coefficients de transfert dans un matrice similaire à celle de la concentration de calibration, telle que :

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{point\,1}^{source\,1} & \lambda_{point\,1}^{source\,2} & \cdots & \lambda_{point\,1}^{source\,N} \\ \lambda_{point\,2}^{source\,1} & \lambda_{point\,2}^{source\,2} & \cdots & \lambda_{point\,2}^{source\,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{point\,M}^{source\,1} & \lambda_{point\,M}^{source\,2} & \cdots & \lambda_{point\,M}^{source\,N} \end{bmatrix}.$$

L'étape de calibration est terminée, tous les coefficients de transfert correspondant aux différentes sources et aux différents points de mesures sont organisés. La seconde étape peut donc s'appliquer.

2^{nd} étape : estimation de débits inconnus



Dans cette seconde étape de la méthode, le(s) débit(s) source(s) est(sont) **inconnu(s)** et la concentration mesurée en un point « i » se définit par une relation similaire à celle de la première étape :

$$C_{point\,i} = f_i + \sum_{j=1}^{N} S_j^{inconnu} \Lambda_{ij},$$

1. Les mesures de la concentration résultantes de(s) débit(s) source(s) inconnu(s) peuvent s'organiser dans une matrice C_{mesure} qui se construit de la même façon que $\mathbf{C_{cal}}$.
2. A partir de la matrice des coefficients de transfert Λet de la matrice des mesures C_{mesure}, il est possible d'estimer le(s) débit(s) source(s) inconnu(s) en minimisant (par la méthode des moindres carrés ordinaire) la quantité χ^2 telle que :

$$\chi^2(S_{MCO}) = \sum_{i=1}^{M} \left[\left(\sum_{j=1}^{N} S_j^{inconnu} \Lambda_{ij} \right) - \frac{C_{mesure\,i}}{\sigma_{point\,i}} \right]^2,$$

3. Lorsque le(s) débit(s) source(s) inconnu(s) est(sont) estimé(s), il est possible de calculer la variance sur l'estimation de la manière suivante :

$$var(S_j^{inconnu}) = s^2 \sum_{k=1}^{N} \left(\frac{V_{jk}}{W_{kk}} \right)^2 \text{ avec } s^2 = \frac{1}{M-N} \times \chi^2(S_{MCO}),$$

Les matrice **V** et **W** sont obtenus par une décomposition en valeurs singulières (SVD). A partir de la variance, l'écart type de(s) estimation(s) se traduit par :

$$\sigma_{S_j^{inconnu}} = \sqrt{var(S_j^{inconnu})}.$$

8.2 Annexe 2 : Résumé de la méthode dans le cas instationnaire (1 source, 1 capteur)

Cette annexe est destinée à expliquer l'implémentation de la méthode d'estimation dans le cas où la/ source est instationnaire. La méthode appliquée dans le cas instationnaire se base sur une approche convolutive du problème. C'est à dire que la relation entre la concentration mesurée $C_{point\,i}(t)$ et le débit source $S(t)$ peut s'écrire de la façon suivante en faisant intervenir l'impédance $Z(t)$:

$$C(t) = \int_0^t Z(t-t')S(t)dt',$$

la discrétisation de cette relation avec un pas de temps constant Δt s'écrit de la manière suivante :

$$C_i = \Delta t \sum_{j=1}^{m} Z_{i-j}S_j,$$

ce qui permet d'établir la forme matricielle commutative telle que :

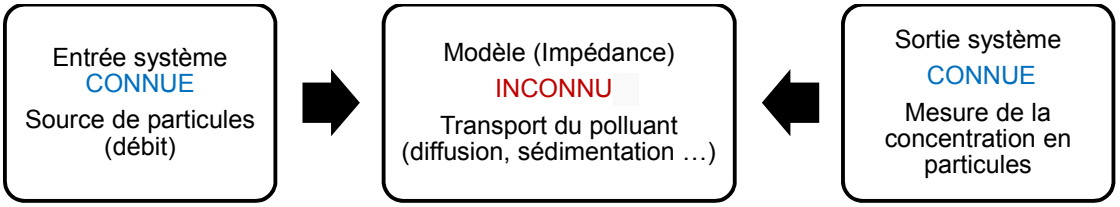
$$C = \mathbf{M}(Z) \times S \Leftrightarrow C = \mathbf{M}(S) \times Z$$

avec $\mathbf{M}(...)$ les matrices de Toeplitz qui s'écrivent telles que :

$$\mathbf{M}(Z) = \Delta t \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ Z_2 & Z_1 & 0 & \cdots & \vdots \\ Z_3 & Z_2 & Z_1 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ Z_m & Z_{m-1} & Z_{m-2} & \cdots & Z_1 \end{bmatrix} \text{ et } \mathbf{M}(S) = \Delta t \begin{bmatrix} S_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ S_2 & S_1 & 0 & \cdots & \vdots \\ S_3 & S_2 & S_1 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ S_m & S_{m-1} & S_{m-2} & \cdots & S_1 \end{bmatrix}.$$

La déconvolution des formes commutatives s'effectue à partir de la TSVD (Décomposition en Valeurs Singulières Tronquées) d'ordre de troncature α. La détermination de l'ordre de troncature peut-être réalisée de diverses manières présentées soit dans le chapitre 5 (Principe de Morozov), soit dans le chapitre 6 (Troncature dite « Post-Pic »).

$1^{ère}$ étape : calibration de l'impédance



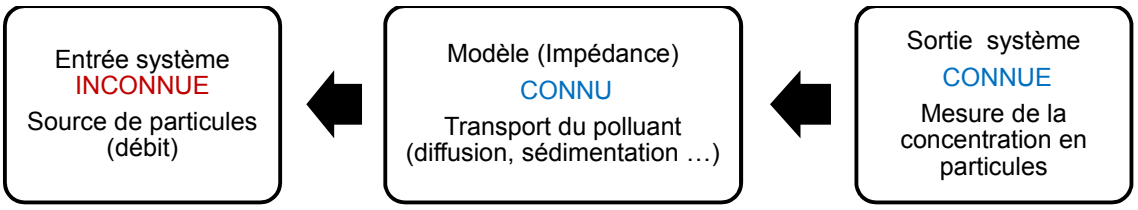
L'estimation de l'impédance $Z_{\alpha_1}^{estim}$ (ordre de troncature $\alpha_1$de la matrice $\mathbf{M}(S)$) s'effectue à partir d'un débit de particules connu S_{cal} et d'une concentration mesurée C_{cal} :

$$Z_{\alpha_1}^{estim} = \mathbf{M}_{\alpha_1}(S_{cal})^{-1} \times C_{cal},$$

le calcul de la dose de l'impédance peut s'effectuer de deux façons (soit l'intégrale sous la courbe de l'impédance, soit le rapport des intégrales sous les courbes de la concentration et du débit) :

$$D^{\int}_{Z_{\alpha_1}^{estim}} = \Delta t \sum (Z_{\alpha_1}^{estim}) \text{ ou } D^{\int}_{Z_{\alpha_1}^{estim}} = \frac{D^{\int}_{C_{cal}}}{D^{\int}_{S_{cal}}}.$$

2^{nd} étape : estimation du débit inconnu



L'estimation du débit inconnu $S_{\alpha_2}^{inconnu^{estim}}$ (ordre de troncature $\alpha_2$de la matrice $\mathbf{M}(Z_{\alpha_1}^{estim})$) s'effectue à partir d'une concentration mesurée $C_{mesurée}$ et de l'impédance estimée $Z_{\alpha_1}^{estim}$:

$$S_{\alpha_2}^{inconnu^{estim}} = \mathbf{M}_{\alpha_2}(Z_{\alpha_1}^{estim})^{-1} \times C_{mesurée},$$

le calcul de la dose du débit estimé peut s'effectuer de deux façons (soit l'intégrale sous la courbe du débit estimé, soit le rapport des intégrales sous les courbes de la concentration et de l'impédance) :

$$D^{\int}_{S_{\alpha_2}^{inconnu^{estim}}} = \Delta t \sum (S_{\alpha_2}^{inconnu^{estim}}) \text{ ou } D^{\int}_{S_{\alpha_2}^{inconnu^{estim}}} = \frac{D^{\int}_{C_{mesurée}}}{D^{\int}_{Z_{\alpha_1}^{estim}}}.$$

8.3 Annexe 3 : Généralisation de la méthode d'estimation du cas instationnaire à « n » sources et « m » capteurs

Le processus de la méthode d'estimation reste exactement le même que celui de l'annexe 2. Par conséquent, cette annexe à pour unique objectif de présenter le système matriciel associé à une telle situation.

$$\begin{bmatrix} C_{point\,1}(t) \\ C_{point\,2}(t) \\ \vdots \\ C_{point\,m}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}(Z_1(t)) & \mathbf{M}(Z_1(t)) & \cdots & \mathbf{M}(Z_1(t)) \\ \mathbf{M}(Z_2(t)) & \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \mathbf{M}(Z_m(t)) & \mathbf{M}(Z_m(t)) & \cdots & \mathbf{M}(Z_m(t)) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ \vdots \\ S_n(t) \end{bmatrix},$$

La relation précédente étant commutative, il est possible d'écrire :

$$\begin{bmatrix} C_{point\,1}(t) \\ C_{point\,2}(t) \\ \vdots \\ C_{point\,m}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}(S_1(t)) & \mathbf{M}(S_2(t)) & \cdots & \mathbf{M}(S_n(t)) \\ \mathbf{M}(S_1(t)) & \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \mathbf{M}(S_1(t)) & \mathbf{M}(S_2(t)) & \cdots & \mathbf{M}(S_n(t)) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Z_1(t) \\ Z_2(t) \\ \vdots \\ Z_m(t) \end{bmatrix}.$$

Les matrices $\mathbf{M}(...)$ sont les matrices Toeplitz des impédances Z_m (avec « m » le nombre de points de mesure) ou des débits S_n (avec « n » le nombre de sources présentes). Ces matrices sont répétées à l'identique soit « n » fois sur la même ligne dans le cas de la première relation et soit « m » fois sur la même colonne dans le cas de la seconde relation. Les concentrations $C_{point\,i}(t)$, les impédances $Z_i(t)$ et les sources $S_j(t)$ se discrétise en t_f pas de temps telle que :

$$C_{point\,i}(t) = \begin{bmatrix} C_{point\,i}(1) \\ C_{point\,i}(2) \\ \vdots \\ C_{point\,i}(t_f) \end{bmatrix} ; Z_i(t) = \begin{bmatrix} Z_i(1) \\ Z_i(2) \\ \vdots \\ Z_i(t_f) \end{bmatrix} ; S_j(t) = \begin{bmatrix} S_j(1) \\ S_j(2) \\ \vdots \\ S_j(t_f) \end{bmatrix}.$$

La résolution des deux étapes de la méthode, s'effectue de la même manière que dans l'annexe 2.

RÉSUMÉ : ESTIMATION PAR MÉTHODES INVERSES DES PROFILS D'ÉMISSION DES MACHINES À BOIS ÉLECTROPORTATIVES

Cette thèse est dédiée à l'estimation de l'intensité d'une source de polluant de type particulaire par inversion de signaux de concentration mesurés avec un nombre fini de capteurs placés loin de la source. Cette méthode d'estimation inclut deux étapes distinctes. La première étape consiste à déterminer les paramètres du modèle d'inversion en utilisant une source d'aérosol connue et les mesures de concentration en particules correspondantes. Dans une seconde étape, une source d'aérosol inconnue est reconstruite à partir de l'inversion du modèle et des mesures de la concentration. Ce manuscrit traite dans un premier temps du cas stationnaire. L'approche théorique exposée permet de proposer un placement optimal des capteurs en plus de la méthode d'estimation de la source. Dans un second temps, on considère le cas où la source inconnue d'aérosol est instationnaire. La méthode d'estimation repose sur une approche convolutive du système, en introduisant la notion d'impédance source/capteur. Après une présentation de la technique d'inversion propre à la méthode d'estimation, elle est appliquée expérimentalement au cas des machines à bois éléctroportatives, dans le but de les discriminer en fonction de leur caractère émissif.

Mot-clés : Estimation de source, Problème inverse, Aérosol, CFD, Simulation numérique, Suivi de particules, Outils de régularisation, Bilan de matière, Poussières de bois

ABSTRACT : EMISSION PROFILES CHARACTERIZATION BY INVERSE METHOD FOR HAND-HELD WOOD WORKING MACHINES

This thesis is dedicated to the determination of unknown aerosol sources emission profiles from aerosol concentration measurements in the far-field. This procedure includes two distinct steps. The first step consists in determining the model linking the aerosol source and the concentration measurements using a known source of aerosols and the corresponding dust measurements. In a second step, the unknown source of aerosols is reconstructed by inverting the model for the measured aerosol concentrations. This manuscript deals in a first time with the stationary case. The exposed theoretical approach allows to suggest an optimal sensors placement in addition to the source estimation method. In a second time, we consider the case where the unknown aerosol source is unsteady. The estimation method is then based on a convolutive system approach, introducing the concept of source/sensor impedance. After a presentation of the numerical inversion technique, the method is applied experimentally to the real case of hand-held wood working machines so as to classify the machines with respect to their emission rate.

Keywords : Source estimation, Inverse problem, Aerosol transport, CFD, Numerical simulation, Regularisation tools, Material balance, Wood dust