



HAL
open science

Contribution à l'étude et à la modélisation du dépôt des suies lors d'un incendie

Louis Decoster

► **To cite this version:**

Louis Decoster. Contribution à l'étude et à la modélisation du dépôt des suies lors d'un incendie. Sciences de l'ingénieur [physics]. ED 353 Sciences pour l'ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique, 2017. Français. NNT: . tel-01619364

HAL Id: tel-01619364

<https://theses.hal.science/tel-01619364v1>

Submitted on 19 Oct 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Contribution à l'étude et à la modélisation du dépôt des suies lors d'un incendie

THÈSE DE DOCTORAT

présentée par **Louis DECOSTER** pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université d'Aix-Marseille

Ecole Doctorale 353

Sciences pour l'ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique
Spécialité : Mécanique et Physique des Fluides

Soutenue le 12/01/2017 devant le jury suivant

Rapporteurs

Denis Boulaud	Directeur de recherche à l'IRSN
Patrick Van Hees	Professeur à l'Université de Lund

Examineurs

Laurence Lecoq	Professeur à l'École des Mines de Nantes
Jean-Louis Consalvi	Maître de conférences à l'IUSTI ²
Pierre Carlotti	Directeur du LCPP ¹
Axel Bellivier	Ingénieur du LCPP ¹
Fabien Candelier	Maître de conférences à l'IUSTI ²
Olivier Vauquelin	Professeur à l'IUSTI ²

¹Laboratoire Central de la Préfecture de Police

²Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels

Résumé

Contribution à l'étude et à la modélisation du dépôt des suies lors d'un incendie

Ce travail est consacré à l'étude du dépôt des particules de suie transportées par des fumées d'incendie. L'étude de la littérature donne une synthèse des propriétés connues des particules de suie produites par un incendie ainsi qu'une revue de l'état de l'art des outils disponibles pour modéliser leur dépôt. Le code *Fire Dynamics Simulator*, outil numérique utilisé dans ce travail, permet depuis sa version 6 de simuler le dépôt de suie mais aucune étude expérimentale à échelle réelle ne fournit de données quantitatives de dépôt qui permettraient de valider les performances de l'outil dans ce domaine. Une première campagne expérimentale a donc été réalisée pour pouvoir évaluer FDS et les modèles fournis par la littérature dans le cas du dépôt à échelle réelle de particules de suie produites par la combustion d'heptane. Ces essais ont été suivis d'une seconde campagne expérimentale à échelle réelle avec pour objectif la prise en compte de l'écoulement des fumées le long de la paroi de dépôt et de sa vitesse. Les deux campagnes d'essais à échelle réelle ont enfin été complétées par le montage d'un banc expérimental à petite échelle permettant d'étudier l'influence de la vitesse d'écoulement sur le dépôt de particules produites par un petit foyer, à l'intérieur d'une conduite.

Mots-clé : Incendie, Suie, Dépôt, Fumée, Thermophorèse.

Abstract

Contribution to study and modelisation of soot deposition during fires

This work is devoted to the study of the deposit of soot particles transported by fire smoke. The literature review provides a summary of the known properties of soot particles produced by fire as well as a review of the state of the art tools to model their deposit. The CFD tool *Fire Dynamics Simulator* allows since version 6 to predict the deposition of soot. However no full scale experimental study provides quantitative data about thermophoretically driven soot deposition, making validation impossible. A first experimental campaign was conducted to evaluate FDS and modelling tools provided by the literature in the case of full-scale deposition of soot particles produced by the combustion of heptane. These tests were followed by a second full-scale experimental campaign with the aim of taking into account the flow of smoke along the wall and its speed. Both full scale campaigns were finally completed by a small-scale experimental bench mounted in order to study the influence of the flow rate on particle thermally driven deposition within a duct.

Keywords : Fire, Soot, Deposition, Smoke, Thermophoresis.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer de sincères remerciements à Messieurs Patrick Vanhees et Denis Boulaud qui m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de ce travail. Je remercie également Mme Laurence Lecoq, M Pierre Carlotti et M Jean Louis Consalvi pour leur participation au jury.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à mes directeurs de thèse Olivier Vauquelin et Fabien Candelier pour m'avoir aiguillé et soutenu à chaque étape de la thèse, et ce malgré la distance géographique qui nous séparait. Chacune de nos discussions, scientifique ou non, a été l'occasion d'apprendre et de m'enrichir.

Merci à Axel Belliver pour avoir initié ce travail et pour m'avoir confié ce projet qui lui tenait à cœur tout en gardant sur son déroulement un œil critique et avisé. Nos longs échanges et discussions ont façonné le déroulement de cette thèse du début à la fin.

Je remercie Patrick Pineau et Hervé Bazin pour la confiance qu'ils m'ont accordée et leur soutien.

Merci à toutes les personnes avec qui j'ai eu l'occasion de travailler, d'échanger ou de débattre au cours de ma thèse et qui ont eu la bienveillance de montrer de l'intérêt pour mon travail.

Je tiens à remercier tous les membres du LCPP qui m'ont apporté leur aide, en partageant avec moi leur bonne humeur et leur expérience tout au long de ces trois ans. Merci à Anne Thiry-Muller, Dominique Ilsbrock, Aurelien Leroy, Hervé Louvard, Anne Laure Gerard, Aurelien Dumas, Thomas Angely, Jean François Texier et tant d'autres, j'en oublie sûrement ...

Merci également aux membres de l'IUSTI qui m'ont accueilli lors de mes trop brefs séjours, pour leur aide, pour l'ambiance du bureau : Mehdi, Romain, Romain, Patricio, Raphaël et Frank.

Je ne remercierai jamais assez Aurelien Thiry-Muller, Mathieu Suzanne, Nicolas Dreuille, Adissa Traoré, Delphine Garcia, Sylvie Dupont, Manel Chaouchi, Eddy Faure, Christophe Csekaj et Giacomo Erez pour leur esprit critique, leur aide précieuse et leur soutien. Les moments, drôles ou intéressants, que nous avons partagés donnent à ces trois années ce petit goût de reviens-y.

Merci aux amis, aux vieux et aux très vieux qui sauront se reconnaître je pense si jamais il venaient à lire ces lignes.

Merci à Margaux.

Et je tiens enfin à exprimer ma profonde gratitude envers mes parents et ma soeur qui m'ont toujours soutenu et épaulé malgré parfois un indélicat manque de communication qu'ils m'ont, j'en suis sûr, déjà pardonné.

« The world is a thing of utter inordinate complexity and richness and strangeness that is absolutely awesome. »

Douglas N. Adams

Table des matières

Remerciements	v
Introduction	1
1 État de l'art sur les particules de suie et leur dépôt	5
1.1 Caractérisation des particules de suie d'incendie	7
1.1.1 La fumée et les particules de suie : définitions	7
1.1.2 Mécanismes de formation de particules dans une flamme	8
1.1.3 Morphologie des particules de suie	9
1.1.4 Composition chimique des particules de suie	13
1.1.5 Taux de production de suie d'un foyer	14
1.2 Approche théorique des écoulements à phase dispersée	16
1.2.1 Modélisation du transport d'aérosol	16
1.2.2 Régime de continuité d'une particule en suspension dans un gaz	19
1.2.3 Mécanismes intervenant dans le transport des particules	20
1.2.4 Le phénomène de thermophorèse	26
1.3 Dépôt : transfert de particules au voisinage d'une paroi	32
1.3.1 Adhésions des particules à une paroi	32
1.3.2 Modélisation du dépôt de particules	33
1.3.3 Application aux particules de suie	37
1.3.4 Études expérimentales du dépôt de particules de suie	40
1.4 Bilan sur l'état de l'art	42
2 Étude du dépôt à échelle réelle dans un local	45
2.1 Dispositif expérimental	47
2.1.1 Aménagement du local d'essai	47
2.1.2 Conditions initiales.	48
2.1.3 Foyer utilisé.	50
2.1.4 Mesures réalisées dans le local.	53
2.1.5 Mesure du dépôt et contrôle de la température des cibles.	62
2.1.6 Bilan des résultats expérimentaux	68
2.2 Prédiction du dépôt de suie par la simulation numérique.	69
2.2.1 Paramétrage de la simulation numérique	69
2.2.2 Prédiction de l'écoulement.	71
2.2.3 Prédiction du dépôt de suie.	73
2.3 Comparaison des résultats avec les modèles théoriques de dépôt.	75

2.3.1	Modélisation du dépôt de suie	75
2.3.2	Application du modèle de dépôt de FDS aux résultats expérimentaux	77
2.3.3	Amélioration du modèle utilisé dans FDS.	80
2.4	Conclusion	83
3	Influence de la vitesse sur le dépôt - Échelle réelle	87
3.1	Description et analyse du montage expérimental	89
3.1.1	Mise en œuvre des essais	91
3.1.2	Simulation numérique de l'essai	95
3.1.3	Bilan	100
3.2	Étude expérimentale du dépôt de suie	101
3.2.1	Instrumentation des essais	101
3.2.2	Exploitation des résultats expérimentaux	106
3.3	Conclusion	115
4	Influence de la vitesse sur le dépôt - Échelle réduite	117
4.1	Description de l'essai en conduite	119
4.1.1	Hypothèses et objectif	119
4.1.2	Réalisation d'une veine à section variable	120
4.1.3	Pré-dimensionnement par simulation numérique	121
4.2	Mise en œuvre du dispositif expérimental	124
4.2.1	Plan d'expériences	124
4.2.2	Source de fumée chaude	126
4.2.3	Instrumentation de la veine	128
4.3	Résultats expérimentaux	130
4.3.1	Pertes thermiques le long de la veine	130
4.3.2	Mesure du dépôt de suie	132
4.4	Bilan	134
	Conclusion	137
	A Coefficients tabulés pour le modèle de Beresnev	141
	B Mesure de concentration de suie grâce au Capteur Opacimétrique Différentiel	145
B.1	Présentation	147
B.2	Principe de mesure par extinction	147
B.3	Fonctionnement du capteur opacimétrique différentiel	148
	C Mesure de concentration massique de suie grâce au capteur PPS	151
C.1	Présentation	153
C.2	Principe de fonctionnement	153
C.3	Étalonnage par mesure filtre	155
	D Fichier d'entrée FDS pour la simulation des essais en local (chapitre 2)	157

E Fichier d'entrée FDS pour la simulation des essais en couloir (chapitre 3)	169
Bibliographie	185

Table des figures

1	Dépôt de particules de suie lors d'un incendie	1
2	Photographie du container maritime utilisé dans la première campagne d'essai.	2
3	Photographie de la structure dans laquelle le dispositif expérimental de la seconde campagne d'essai a été aménagé.	3
1.1	Processus de formation et d'évolution des agrégats de suie (HEBERT, 2012)	8
1.2	Clichés MET d'agrégats de suie produits par un moteur Diesel (WENTZEL <i>et al.</i> , 2003)	10
1.3	Distribution de taille des particules primaires pour des suies Palas (a) et Diesel (b) (WENTZEL <i>et al.</i> , 2003).	10
1.4	Morphologie d'agrégats en fonction de leur dimension fractale (LAZZARI <i>et al.</i> , 2016)	11
1.5	Structure de particules primaires de suie d'acétylène (SMITH, 1981; WAL <i>et al.</i> , 2003)	14
1.6	Illustration du phénomène de thermophorèse	27
1.7	Écoulement autour d'une particule en suspension dans un gaz	28
1.8	Vitesses de dépôt adimensionnées sur paroi verticale mesurées expérimentalement en fonction de l'inertie des particules (SIPPOLA <i>et al.</i> , 2002).	34
1.9	Comparaison entre la vitesse de dépôt mesurée par SIPPOLA <i>et al.</i> (2004) et celle prédite par simulation numérique FDS. (FLOYD <i>et al.</i> , 2016).	36
1.10	Comparaison des modes de dépôt ($\Delta T = 50^{\circ}C$)	37
1.11	Exemple d'agrégat numérique étudié par MACKOWSKI (2004)	38
1.12	Exemple d'agrégat produit par le CAST étudié par BRUGIÈRE <i>et al.</i> (2014)	38
1.13	Vitesse de thermophorèse expérimentale des agrégats comparées au modèle de Beresnev pour différentes façons de calculer la conductivité thermique de la particule (BRUGIÈRE <i>et al.</i> , 2014)	39
1.14	Dispositif de mesure du dépôt de suie utilisé par RIAHI <i>et al.</i> (2011)	41
1.15	Dépôt prédit par thermophorèse en fonction du dépôt mesuré pour trois combustibles. (RIAHI <i>et al.</i> , 2011)	42
2.1	Photographie du container maritime utilisé.	47
2.2	Vue du dessus de l'aménagement et de l'isolation du local d'essai.	48
2.3	Allumage du bac d'heptane	50
2.4	Emplacement du foyer et de la balance dans le local.	51
2.5	Mesure la masse de combustible au cours des essais.	52
2.6	Vitesse de perte de masse calculée pour un foyer moyen.	53

2.7	Instrumentation du local d'essai : vue en coupe verticale ($x = 0,17$ cm).	54
2.8	Instrumentation du local d'essai : vue en coupe horizontale ($z = 2,10$ cm).	54
2.9	Stratification des gaz en température à $z = 2,10$ m, $1,80$ m, $1,40$ m, $0,90$ m pour les trois essais.	56
2.10	Concentrations de suie mesurées à $z = 2,10$ m et $1,80$ m par les capteurs opacimétriques.	59
2.11	Concentration de suie mesurées à $z = 2,10$ m par les deux capteurs PPS : "mur" ($y = 0,80$ m) et "foyer" ($y = 3,00$ m) ainsi que par le capteur opacimétrique situé à cette hauteur pour comparaison.	60
2.12	Distribution en masse cumulée des diamètres aérodynamiques des particules de suie prélevées.	61
2.13	Distribution en masse des diamètres aérodynamiques des particules de suie prélevées.	61
2.14	Positionnement des cibles sur la paroi.	63
2.15	Positionnement des cibles par rapport au foyer.	63
2.16	Températures de surface des cibles mesurées par les thermocouples de contact plaqués aux supports.	64
2.17	Photographies des cibles prélevées après essai.	65
2.18	Masse de suie déposée sur chaque cible à la fin de chaque essai. L'erreur correspond à la dispersion des trois pesées.	66
2.19	Positionnement des capteurs en face des cibles sous plafond, dans le plan $y = 0,80$ m.	67
2.20	Photographie de l'instrumentation.	67
2.21	Reproduction de la géométrie dans FDS - visualisation Smokeview.	69
2.22	Vue en coupe du local d'essai et du découpage et maillage du domaine de calcul.	70
2.23	Concentration de suie simulée et mesurée aux cours des trois essais à $z = 2,10$ m	72
2.24	Température gaz simulée et mesurée aux cours des trois essais à $z = 2,10$ m	72
2.25	Vitesse d'écoulement au milieu de la porte simulée et mesurée aux cours des trois essais à $z = 0,60$ m	72
2.26	Vitesse de dépôt de suie sur chaque cible. On rappelle que les cibles 1 et 2 sont à $z = 1,80$ m tandis que les cibles 3 et 4 sont à $z = 2,10$ m et que les cibles 2 et 4 sont refroidies.	73
2.27	Masse de suie déposée sur chaque cible au cours de la simulation.	74
2.28	Vitesse d'écoulement calculée par FDS en face de chaque cible.	74
2.29	Gradient de température à la paroi calculé par FDS pour chaque cible grâce à la relation 2.17.	75
2.30	Représentation schématique de la modélisation du dépôt de suie utilisée.	75
2.31	Résultats de dépôt de suie donnés par la simulation numérique "FDS" et par l'utilisation directe du modèle de dépôt.	78

2.32	Moyenne sur les trois essais du dépôt expérimental et dépôt calculé par le modèle 1 (de FDS) ($K_{th,Beresnev}$ avec $k_g = 0.26$ et $d_p = 1 \mu\text{m}$)	79
2.33	Moyenne sur les trois essais du dépôt expérimental et dépôt calculé par le modèle 2 ($K_{th,Beresnev}$ avec $\alpha = k_{gaz}/0,26$ et $d_p = 1 \mu\text{m}$)	81
2.34	Coefficients de thermophorèse donnés par les modèles de TALBOT <i>et al.</i> , 1980 et BERESNEV <i>et al.</i> , 1989 en fonction du diamètre de particule (pour $\alpha = k_{gaz}/k_{suie} = 0,1$).	82
2.35	Coefficients de thermophorèse donnés par les modèles de TALBOT <i>et al.</i> , 1980 et BERESNEV <i>et al.</i> , 1989 en fonction du diamètre de particule (pour $\alpha = k_{gaz}/k_{suie} = 1$).	82
2.36	Moyenne sur les trois essais du dépôt expérimental et dépôt calculé par le modèle 3 ($K_{th,Beresnev}$ avec $\alpha = 1$ et $d_p = 1 \mu\text{m}$)	83
2.37	Moyenne sur les trois essais du dépôt expérimental et dépôt calculé par le modèle 4 ($K_{th,Beresnev}$ avec $\alpha = 1$ et $d_p = 2,55 \mu\text{m}$)	84
2.38	Moyenne sur les trois essais du dépôt expérimental et dépôt calculé par le modèle 5 ($K_{th,Beresnev}$ avec $\alpha = 1$ et $d_p = 0,035 \mu\text{m}$)	84
3.1	Photographie de la structure expérimentale du LCPP au fort de la Briche.	89
3.2	Installation du dispositif dans la structure expérimentale du LCPP.	90
3.3	Dimensions du local d'essai : vue du dessus et vue en coupe horizontale.	91
3.4	Photographie du foyer avant et pendant essai.	92
3.5	Pertes de masse des essais comparées à la perte de masse moyenne mesurée lors des essais en local présentés au chapitre précédent.	93
3.6	Position des arbres de thermocouples et hauteur de mesure de température.	94
3.7	Évolution de la puissance du foyer simulé.	96
3.8	Visualisation (grâce au logiciel Smokeview) du champ de température simulé numériquement dans le plan normal aux cibles, à 5 cm de la paroi.	97
3.9	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la stratification thermique dans chaque zone, en moyenne entre 500 s et 800 s.	97
3.10	Enveloppe expérimentale et simulation numérique de la vitesse d'entrée des gaz frais (à 0,70 m du sol).	98
3.11	Profil vertical de $u_{gaz,x}$ dans chaque zone calculée au centre du couloir, en moyenne entre 500 s et 800 s.	98
3.12	Visualisation (grâce au logiciel Smokeview) de $u_{gaz,x}$ à $t = 700$ s - Plan vertical à 5 cm de la paroi de dépôt.	99
3.13	Visualisation (grâce au logiciel Smokeview) de $u_{gaz,x}$ à $t = 700$ s - Plan horizontal à hauteur des cibles de dépôt.	99
3.14	Métrologie associée à chaque support de cibles.	101
3.15	Emplacement des cibles de dépôt sur la paroi sud du dispositif expérimental.	102
3.16	Photographie d'une cible plaquée sur son support et des thermocouples associés.	103

3.17 Photographie des deux cibles de la Zone 1, avant essai, et positionnement des deux thermocouples "gaz" correspondants.	105
3.18 Photographie d'un peigne de thermocouples et distance d des thermocouples de chaque peigne à la paroi.	105
3.19 Photographie du capteur opacimétrique différentiel associé aux cibles de la zone 2.	106
3.20 Masse de suie déposée sur les cibles non refroidie, en Zone 1 (écoulement lent) et en Zone 2 (écoulement rapide).	107
3.21 Concentration de suie mesurée par les capteurs opacimétriques différentiels en Zone 1 et en Zone 2.	110
3.22 Rapport des concentrations mesurées par les capteurs PPS dans la zone 1 et la zone 2 (signal perdu lors de l'essai 1 - 1).	111
3.23 Pertes thermiques en zone 2 par rapport à la zone 1 : $(T_{gaz,1} - T_{gaz,2})/T_{gaz,1}$	112
3.24 Rapport Zone 1 / Zone 2 de la différence de température gaz-paroi divisée par la température absolue des gaz $(\frac{\Delta T}{T})_1 / (\frac{\Delta T}{T})_2$	114
4.1 Schéma de la configuration théorique reproduite par cette série d'expériences.	120
4.2 Schéma de la vue en coupe du dispositif expérimental.	120
4.3 Maillage du réservoir de fumée et de la veine	121
4.4 Comparaison de la température au plafond de l'enceinte, mesurée lors des essais et calculée par simulation numérique. ($t = 0$ s correspond à l'allumage)	122
4.5 Simulation du champ de vitesse dans le réservoir de fumée et dans la veine. (à $t = 1600$ s)	123
4.6 Rapport des composantes longitudinales des vitesses d'écoulement $U_{x,r}$ évaluées par simulation numérique en zones 1 et 2 ($t = 0$ s correspond à l'ouverture de la trappe).	123
4.7 Rapport des concentrations de suie évaluées par simulation numérique en zones 1 et 2 ($t = 0$ s correspond à l'ouverture de la trappe).	124
4.8 Configurations expérimentales testées.	125
4.9 Réservoir de fumée et veine de mesure	126
4.10 Photographie de la face avant du réservoir de fumée et de la flamme du foyer.	127
4.11 Perte de masse du foyer mesurée lors d'un essai préliminaire. ($t = 0$ s correspond à l'allumage)	127
4.12 Température mesurée au plafond du réservoir de fumée durant les essais. ($t = 0$ s correspond à l'allumage)	128
4.13 Photographie d'une cible et d'un thermocouple installés sur le plafond de la veine avant essai.	129
4.14 Schema donnant l'emplacement des moyens de mesure sur le couvercle de la veine (cible et thermocouple).	130

4.15	Différence de température au centre de la veine entre les zones de mesure amont (1) et aval (2) dans la configuration 1 ($t = 0$ s correspond à l'ouverture de la trappe).	131
4.16	Différence de température au centre de la veine entre les zones de mesure amont (1) et aval (2) dans la configuration 2. $t = 0$ s correspond à l'ouverture de la trappe.	131
4.17	Différence de température au centre de la veine entre les zones de mesure amont (1) et aval (2) dans la configuration 3. $t = 0$ s correspond à l'ouverture de la trappe.	131
4.18	Masse de suie déposée dans chaque zone de mesure.	133
4.19	Différence de température gaz-paroi mesurée dans chaque zone de mesure.	133
4.20	Rapport de la masse de suie déposée en Zone 1 (amont) par la masse de suie déposée en Zone 2 (aval).	134
4.21	Configuration expérimentale des trois types d'essai réalisés et résultats qualitatifs.	135
A.1	Valeurs tabulées des coefficients $f_{i,j}$ en fonction de R (BERESNEV <i>et al.</i> , 1989).	143
A.2	Valeurs tabulées des coefficients $\phi_{i,j}$ en fonction de R (BERESNEV <i>et al.</i> , 1989).	143
B.1	Photographie du capteur opacimétrique différentiel utilisé par le LCPP .	147
B.2	Schéma de principe du capteur opacimétrique différentiel	148
C.1	Photographie du Pegasor Particle Sensor (PPS)	153
C.2	Principe de fonctionnement du PPS (??).	154

Liste des tableaux

1.1	Caractéristiques d'agrégats obtenues pour différents combustibles d'après OUF <i>et al.</i> (2008) et KÖYLÜ <i>et al.</i> (1992).	12
1.2	Taux de production de suie, mesurés à petite échelle pour différents combustibles (TEWARSON, 2002)	15
2.1	Caractéristiques thermiques des matériaux constituant les parois et le plafond.	48
2.2	Conditions initiales de chaque essai.	49
2.3	Durée et désenfumage pour chaque Essai.	49
2.4	Concentrations moyennes au cours d'un essai, obtenues par mesure Opacimétrique et par prélèvement sur filtre THE.	58
2.5	Référence, hauteurs et conditions initiales des cibles pour chaque essai.	62
2.6	Bilan des résultats de dépôt obtenus.	65
2.7	Valeurs moyennes calculées entre 0 et 1200 secondes des températures et concentrations de suie, mesurées et simulées.	71
2.8	Rapports entre le dépôt sur cible refroidie et le dépôt sur cible non refroidie - expérimental	79
2.9	Rapports entre le dépôt sur cible refroidie et le dépôt sur cible non refroidie - modèle de FDS	79
2.10	Paramètres choisis pour la modélisation du dépôt de suie.	80
3.1	Références, dates de réalisation, heure de début et heure de fin des six essais réalisés.	92
3.2	Moyenne entre 500 s et 800 s des températures données par les arbres de thermocouples	95
3.3	Vitesses d'écoulement calculées au voisinage des cibles, en moyenne entre 500 s et 800 s.	100
3.4	Températures des cibles refroidies ("F") et non refroidies ("NF") avant allumage de l'essai.	104
3.5	Masse de suie déposée sur les cibles non refroidies.	106
3.6	Masse de suie déposée mesurée pour la première série de trois essais sur les cibles "F" refroidies par un bain à 10 °C.	108
3.7	Masse de suie déposée mesurée pour la seconde série de trois essais sur les cibles "F" refroidies par un bain à 30 °C.	108
4.1	Propriétés des matériaux utilisés dans la simulation FDS.	121
4.2	Valeurs moyennes des composantes de la vitesse simulée numériquement	123

4.3	Durée et configuration de veine pour les 5 essais réalisés dans la configuration principale (section large en amont → section étroite en aval). . .	124
4.4	Durée et configuration de veine pour les 2 essais dans la configuration inversée (section étroite en amont → section large en aval).	125
4.5	Durée et configuration de veine pour les 2 essais réalisés sans rétrécissement de conduite.	125

Liste des symboles

INDICES

B	relatif au mouvement Brownien
g	propriétés du gaz porteur
t	relatif à la turbulence
p	propriétés d'une particule
pp	propriétés des particules primaires

EXPOSANTS

+	grandeur adimensionnée
'	dérivée première par rapport au temps
"	dérivée seconde par rapport au temps

LETTRES

ROMAINES

$C(\vec{x}, t)$	Champ de concentration massique	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
C_D	Coefficient de traînée	—
C_c	Coefficient de Cunningham	—
D	Diamètre	m
d_f	Dimension fractale	—
D_{pp}	Diamètre des particules primaires	m
D_{ae}	Diamètre aérodynamique	m
D_g	Diamètre de giration	m
D_{ve}	Diamètre du volume équivalent	m
$D_{\text{eff}} \equiv D_{\text{eff}} +$	Diffusivité effective des particules dans le gaz porteur	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
D_B		
D_B	Diffusivité brownienne des particules dans le gaz porteur	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
D_t	Diffusivité turbulente des particules dans le gaz porteur	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
\vec{E}	Champ électrique	$\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$
F	Force subie par une particule	N
h	Coefficient de transfert thermique par convection	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
k	Conductivité thermique	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
k_f	Préfacteur fractal	—
L	Longueur caractéristique	m
N_{pp}	Nombres de particules primaires	—
m	Masse	kg
n	Concentration moléculaire	m^{-3}

p	Porosité	—
q	Charge électrique	C
R_g	Rayon de giration	m
T	Température	K ou °C ¹ .
$\vec{u}(\vec{x}, t)$	Champ Eulérien de vitesse du gaz	m · s ⁻¹
V	Volume	m ³
$\vec{v}(t)$	Vitesse lagrangienne de déplacement d'une particule	m · s ⁻¹
y_s	Taux de production de suie	—

LETTRES

GRECQUES

α_t	Facteur d'accommodation thermique	—
α_m	Facteur d'accommodation dynamique	—
β	Dilatabilité du fluide ($\beta \approx 1/T_g$)	K ⁻¹
δ_{Kn}	Épaisseur de la couche de Knudsen	m
μ	Viscosité dynamique	m ² · s ⁻¹
ν	Viscosité cinématique	K
σ	diamètre des molécules de gaz	m
$\bar{\tau}$	Tenseur de contraintes	kg · m ⁻²
τ	Temps caractéristique	s
ρ	Masse volumique	kg · m ⁻³
λ	libre parcours moyen des molécules de gaz	m
ϕ	Flux massique	g · m ⁻² · s ⁻¹

NOMBRE

SANS DIMENSION

Bi	Nombre de Biot $\equiv \frac{hL}{k}$	—
Gr	Nombre de Grashov $\equiv \frac{g\beta\Delta TL^3\rho_g L}{\mu_g}$	—
Kn	Nombre de Knudsen $\equiv \frac{2\lambda}{D}$	—
Re	Nombre de Reynolds $\equiv \frac{u_g L}{\nu_g}$	—
Ri	Nombre de Richardson $\equiv \frac{Gr}{Re^2}$	—
Sc	Nombre de Schmidt $\equiv \frac{D}{\nu}$	—

1. On utilise des températures relatives, exprimées en °C en général car elles sont plus représentatives à l'échelle de l'incendie. Les températures absolues, en K, sont utilisées lorsque la température intervient dans un rapport comme $\frac{\Delta T}{T}$.

Introduction

Le Laboratoire Central de la Préfecture de Police intervient quotidiennement sur des scènes d'incendie dans le cadre de ses missions d'investigation et d'expertise. Les dégâts constatés sur les lieux sont souvent considérables et sont généralement aggravés par les actions d'extinction et de sécurisation nécessaires des sapeurs-pompiers. Cela implique la destruction d'un grand nombre de traces et indices utilisés par le LCPP dans le cadre des travaux d'analyse menés lors de son enquête sur l'origine et la cause du sinistre. Mais comme on peut le voir sur les photographies de la figure 1, les dépôts de suie qui ont lieu loin du feu sont une des rares traces qui soit épargnée à la fois par le sinistre et les actions d'extinction. Ils constituent donc des traceurs de choix qui renferment potentiellement un grand nombre d'informations sur les conditions initiales, les conditions limites et le déroulement de l'incendie. L'intérêt du LCPP pour les suies d'incendie s'est concrétisé depuis plusieurs années par une succession d'actions de recherche, rassemblées au sein du projet "Fumée", au sein duquel s'inscrit ce travail de thèse.

Dans le cadre de cette mission de soutien à la préfecture de police, que ce soit dans le domaine de l'investigation ou de la prévention, le Laboratoire Central de la Préfecture de Police peut avoir recours à la modélisation numérique. Le LCPP utilise pour cela le code Fire Dynamics Simulator (FDS) développé par le NIST qui, depuis la version 6 sortie en 2014, donne pour la première fois la possibilité de prendre en compte le dépôt des suies. Il reste encore à vérifier que les outils de modélisation utilisés par ce logiciel représentent effectivement la réalité.



FIGURE 1 – Dépôt de particules de suie lors d'un incendie

Quels sont les phénomènes qui interviennent dans la formation de ces dépôts que l'on peut observer après un incendie? Comment quantifier la suie déposée à la fin d'un sinistre et quelles conclusions en tirer sur la naissance et la dynamique de l'incendie? Ce travail a pour objectif de contribuer à répondre à ces questions en améliorant notre

compréhension des phénomènes physiques qui interviennent dans le dépôt. Cela doit permettre d'ouvrir la voie à la validation et à l'utilisation, par exemple à travers la simulation numérique, des modèles théoriques existants dans la littérature dans le cas spécifique du dépôt de suies lors d'un incendie. C'est donc naturellement un état de l'art de la littérature existant sur le sujet qui est le point de départ de notre réflexion. Les étapes suivantes, trois campagnes expérimentales, se sont alors imposées les unes après les autres à travers les questions ouvertes par l'analyse des données récoltées. Cette logique d'enchaînement des expériences nous a conduits à présenter les trois études expérimentales qui jalonnent ce travail dans l'ordre chronologique dans lequel elles ont été réalisées.

La première partie de ce manuscrit sera consacrée à un état de l'art de connaissances disponibles sur la fumée et la suie. La modélisation du dépôt de suie nécessite d'identifier les propriétés physiques des particules de suies d'incendie produites lors d'un incendie. Nous chercherons à savoir de quel type de particule il est question de façon à pouvoir détailler la physique sous jacente aux modèles présentés ensuite. Une fois ce contexte établi, nous aborderons de façon plus générale les méthodes de traitement des écoulements à phase dispersée, et dans une troisième partie l'étude expérimentale et la modélisation du dépôt de particules. Nous nous attarderons enfin dans une quatrième et dernière partie sur l'étude du transfert de particules à proximité des parois et dans des conditions d'incendie. Cela nous amènera à considérer plus spécifiquement le phénomène de migration de particules dans le sens opposé à un gradient de température, appelé thermophorèse, qui s'avère jouer un rôle prépondérant dans le dépôt des suies lors d'un incendie.



FIGURE 2 – Photographie du container maritime utilisé dans la première campagne d'essai.

L'état de l'art révèle l'absence de données permettant de juger de la qualité de l'utilisation de modèles de dépôt et de thermophorèse pour prédire le dépôt de suie à l'échelle qui nous intéresse : l'échelle réelle. C'est ce qui nous a poussé à lancer la première campagne d'essai à échelle réelle (voir figure 2.1) en Novembre 2014 qui est le sujet du second chapitre. L'objectif est de fournir une mesure quantitative du dépôt de suie sur paroi verticale à l'intérieur d'un local, dans la couche de fumée produite par un foyer simple et bien ventilé : cet essai permet de s'approcher de l'échelle réelle tout en

étant suffisamment académique pour être reproductible. Grâce aux données récoltées nous tenterons d'évaluer d'une part le logiciel de simulation numérique FDS et d'autre part les modèles que met à notre disposition la littérature pour prédire le dépôt de suie dans les conditions de l'essai.



FIGURE 3 – Photographie de la structure dans laquelle le dispositif expérimental de la seconde campagne d'essai a été aménagé.

La comparaison des résultats de cette première campagne expérimentale avec la modélisation nous invitera à nous interroger sur l'influence de la vitesse d'écoulement des fumées sur le dépôt de suie. Le dépôt par thermophorèse est en effet fortement dépendant du gradient de température à la paroi et donc du gradient de vitesse lorsque la convection forcée est dominante, ce qui est parfois le cas en situation d'incendie. L'objectif de cette nouvelle configuration expérimentale, dont les résultats compléteront et enrichiront la base de données déjà constituée grâce à la première campagne de mesure, est donc de mettre en évidence l'influence de la vitesse d'écoulement sur le dépôt de suie.

S'il est intéressant d'observer les phénomènes à échelle réelle, l'échelle laboratoire permet, elle, de mieux maîtriser l'environnement d'essai. Nous avons donc choisi dans ce quatrième chapitre de réaliser une troisième étude expérimentale, à échelle réduite cette fois. On souhaite de cette façon à faciliter la maîtrise des conditions d'essais, en particulier la direction et la vitesse de l'écoulement des fumées, qui nous intéressent toujours ici. Un banc expérimental a été monté en laboratoire pour répondre à cette problématique. Nous avons souhaité conserver deux aspects des campagnes d'essai précédentes malgré la réduction d'échelle : l'utilisation d'une flamme pour produire des particules de suie, et des conditions thermiques rendant prépondérant le dépôt par thermophorèse.

Chapitre 1

État de l'art sur les particules de suie et leur dépôt

2.1	Dispositif expérimental	47
2.1.1	Aménagement du local d'essai	47
2.1.2	Conditions initiales.	48
2.1.3	Foyer utilisé.	50
2.1.4	Mesures réalisées dans le local.	53
2.1.5	Mesure du dépôt et contrôle de la température des cibles.	62
2.1.6	Bilan des résultats expérimentaux	68
2.2	Prédiction du dépôt de suie par la simulation numérique.	69
2.2.1	Paramétrage de la simulation numérique	69
	Géométrie et Maillage	69
	Conditions initiales	70
	Conditions limites	70
	Propriétés des particules de suie	71
2.2.2	Prédiction de l'écoulement.	71
2.2.3	Prédiction du dépôt de suie.	73
2.3	Comparaison des résultats avec les modèles théoriques de dépôt.	75
2.3.1	Modélisation du dépôt de suie	75
2.3.2	Application du modèle de dépôt de FDS aux résultats expérimentaux	77
2.3.3	Amélioration du modèle utilisé dans FDS.	80
	Expression du coefficient de thermophorèse K_{th}	81
	Conductivité thermique effective des particules	81
	Diamètre effectif des particules	83
2.4	Conclusion	83

La première partie de cet état de l'art est consacrée à la caractérisation des particules auxquelles nous nous intéressons : les particules de suies produites lors d'un incendie. Nous aborderons de façon plus générale dans une deuxième partie les méthodes de traitement des écoulements à phase dispersée, et dans une troisième partie l'étude expérimentale et la modélisation du dépôt de particules. Nous nous attarderons enfin dans une quatrième et dernière partie sur l'étude du transfert de particules à proximité des parois et dans des conditions d'incendie. Nous considérerons enfin plus spécifiquement le phénomène de migration de particules dans le sens opposé à un gradient de température appelé thermophorèse qui s'avère jouer un rôle prépondérant dans le dépôt des suies.

1.1 Caractérisation des particules de suie d'incendie

Après avoir précisé ce que recouvrent généralement les termes "suie" et "fumée" dans la littérature, nous décrirons brièvement les phénomènes physiques qui interviennent dans la formation des particules de suie. Ce premier paragraphe explique l'origine de leur morphologie particulière ainsi que de leurs propriétés chimiques. Le contexte explicité par ces notions servira alors de fond pour aborder les parties suivantes sur le transport et le dépôt de particules en général.

1.1.1 La fumée et les particules de suie : définitions

La fumée est définie par MULHOLLAND (2002) comme "la part des produits de combustion sous forme de phase condensée ou d'aérosol" et de façon similaire par l'organisation internationale de normalisation (ISO) comme la "partie visible des effluents du feu". Ces deux définitions n'incluent ni les gaz et vapeur émis par le feu ni l'air qu'il entraîne. D'autres sources comme le SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (HURLEY, 2002) définissent au contraire la fumée comme "un mélange composé d'une phase condensée, elle-même constituée de particules de suie, de produits organiques semi-volatiles et de produits inorganiques solides, et d'une phase gazeuse constituée de produits organiques et inorganiques volatiles". Dans le cadre de ce travail, c'est cette dernière définition des fumées qui est utilisée. La phase condensée présente sous forme d'aérosol dans les fumées est donc constituée par deux types de particules : les particules de suie, qui nous intéressent, et des gouttelettes créées par refroidissement et condensation. Dans le cas d'incendies impliquant des combustibles solides, la fumée peut également transporter de petits morceaux de combustible qui n'ont pas entièrement brûlés. Le terme "suie" désigne donc seulement les particules carbonées produites dans les flammes par l'ensemble de mécanismes physiques décrits dans le paragraphe suivant, et transportées dans la fumée. C'est FARADAY (1885) qui attire le premier l'attention sur le rôle joué par les suies dans la luminosité des flammes. Le rayonnement thermique émis par les particules de suie lorsqu'elles atteignent de hautes températures contribue en effet à la lueur orangée des flammes mais une fois refroidie, dans les fumées, les particules de suie sont noires et atténuent la visibilité.

1.1.2 Mécanismes de formation de particules dans une flamme

Pour aborder la morphologie et la composition des particules de suie nous allons commencer par nous pencher sur leur processus de création. La formation des particules de suie met en jeu plusieurs mécanismes complexes (voir figure 1.1) qui sont encore aujourd'hui l'objet de nombreux travaux. Ce paragraphe en donne une description basique qui permettra de comprendre que la morphologie particulière de ces particules n'est pas due au hasard. Le lecteur intéressé pourra trouver des informations plus détaillées dans la littérature, par exemple l'article de VANHULLE (2002).

La formation des particules de suie est généralement décomposée en cinq mécanismes élémentaires principaux appelés nucléation, croissance de surface, coagulation, agglomération et agrégation, qui peuvent être successifs ou compétitifs et ont lieu à des moments précis de l'évolution de la particule dans la flamme.

Il est généralement admis que des réactions de combustion incomplètes conduisent à la formation de molécules appelées HAP¹. Ces molécules se regroupent et finissent par passer d'objets moléculaires à l'état de particules solides sphériques appelés nucléis, d'une taille de l'ordre du nanomètre (KENNEDY, 1997). Une fois formés les nucléis continuent de grossir par adsorption de molécules de HAP en phase gazeuse. Dans le même temps, le carbone sous forme de nucléis passe progressivement d'un état amorphe désorganisé à une structure en couches organisées, semblable à celle du graphite. Cette première étape de formation des nucléis mûrs est la nucléation.

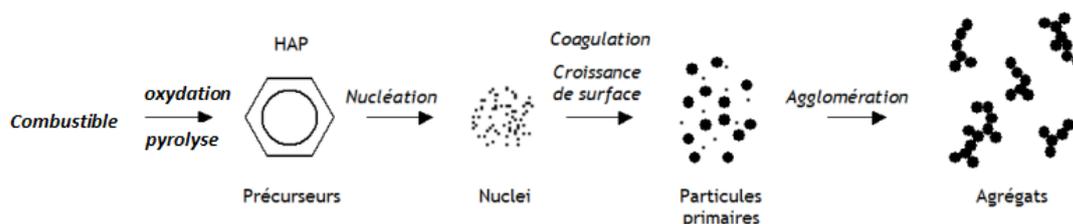


FIGURE 1.1 – Processus de formation et d'évolution des agrégats de suie (HEBERT, 2012)

Lors de la phase appelée croissance de surface, les nucléis fixent sur leur surface des molécules de la phase gaz, entraînant leur croissance, jusqu'à atteindre une forme sphérique d'un diamètre de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres. Ce mécanisme ne produit pas de nouvelles particules mais contribue à l'augmentation de la masse des particules déjà existantes.

La coagulation a lieu en cas de collision entre plusieurs particules primaires récemment formées, dont la structure interne est encore mal organisée. Ces particules fusionnent alors en une particule plus grosse.

Les particules plus anciennes et mieux structurées qui se déplacent de façon indépendante et aléatoire sous l'effet de forces de diffusion peuvent alors entrer en collision

1. Hydrocarbure aromatique polycyclique : molécules constituées d'atomes de carbone et d'hydrogène mais dont la structure comprend au moins deux cycles aromatiques.

et ont alors tendance à ne pas fusionner mais à former des agrégats ou des agglomérats. Ce sont des chapelets de particules sphériques de différentes tailles qui s'interpénètrent (agrégats) ou pas (agglomérats). L'agglomération et l'agrégation ont lieu dans la flamme mais également dans les fumées et sont à l'origine de la morphologie complexe des particules. Ces deux mécanismes entraînent la diminution du nombre de particules par unité de volume et modifient la taille des particules mais ne modifie pas sa concentration massique.

Les particules de suie transportées dans les fumées sont donc le résultat d'une compétition entre plusieurs mécanismes qui contribuent à leur formation (nucléation, croissance, coagulation, agglomération) et la réaction d'oxydation qui tend à casser les agglomérats et à réduire la taille des particules primaires (NEOH *et al.*, 1981; PURI *et al.*, 1994). Les phénomènes décrits ci-dessus peuvent être consécutifs ou simultanés mais surviennent à des moments précis de la vie de la particule et dépendent à la fois du combustible (précurseurs et adsorbats disponibles) et des conditions ambiantes (température, taux d'oxygène ...). Les propriétés des particules produites, sont par conséquent fortement influencées par les conditions de combustion. On peut cependant généraliser certaines propriétés physiques et morphologiques à tous les types de suies.

1.1.3 Morphologie des particules de suie

Les particules de suie produites par l'ensemble des phénomènes décrits précédemment se présentent donc sous la forme d'un agrégat de particules primaires. La nature fractale de ce type de particules a été confirmée par KÖYLÜ *et al.* (1995) et MEGARIDIS *et al.* (1990) depuis les premiers travaux de WITTEN *et al.* (1981). Après avoir présenté les propriétés des particules primaires, nous détaillerons les propriétés morphologiques particulières de ces agrégats.

Particules primaires

La structure interne des particules primaires dépend de la nature du combustible et des conditions de ventilation dans la flamme. Il est généralement admis que les particules primaires sont quasi sphériques que leurs diamètres au sein d'un agrégat sont faiblement dispersés selon une distribution gaussienne autour d'une valeur moyenne. Cette dernière hypothèse a été vérifiée expérimentalement par WENTZEL *et al.* (2003) pour des suies Diesel et OUF *et al.* (2008) pour différents combustibles (Acétylène, Toluène, PMMA). Le tableau 1.1 donne des exemples de diamètres moyens de particules primaires mesurés pour des suies produites par différents combustibles. On voit qu'il varie généralement entre 15 et 50 nm et qu'il dépend fortement de la nature du combustible. Dans la suite et par souci de simplification on assimilera donc le diamètre des particules primaires d'un agrégat à cette valeur moyenne, notée D_{pp} . C'est en outre l'hypothèse qui est utilisée pour la plupart des analyses de clichés réalisés par microscope électronique à transmission (MET).

La masse volumique des particules primaires, supposées homogènes, peut être mesurée expérimentalement par prélèvement, centrifugation dans de l'éthanol et pesée du matériau ainsi récupéré. Elle est généralement comprise entre $1400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et $1900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (DOBBINS *et al.*, 1994; OUF *et al.*, 2008), donc inférieure à la masse volumique du graphite pur ($2200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Le nombre de particules primaires contenues dans un agrégat peut être évalué par prélèvement et analyse MET (Microscope Électronique à Transmission) d'un échantillon déposé sur une grille adaptée. Il dépend du lieu de prélèvement, dans la flamme ou hors de la flamme, et donc du processus de formation des suies.

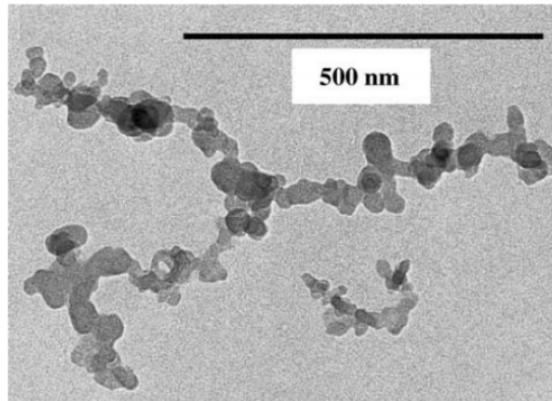


FIGURE 1.2 – Clichés MET d'agrégats de suie produits par un moteur Diesel (WENTZEL *et al.*, 2003)

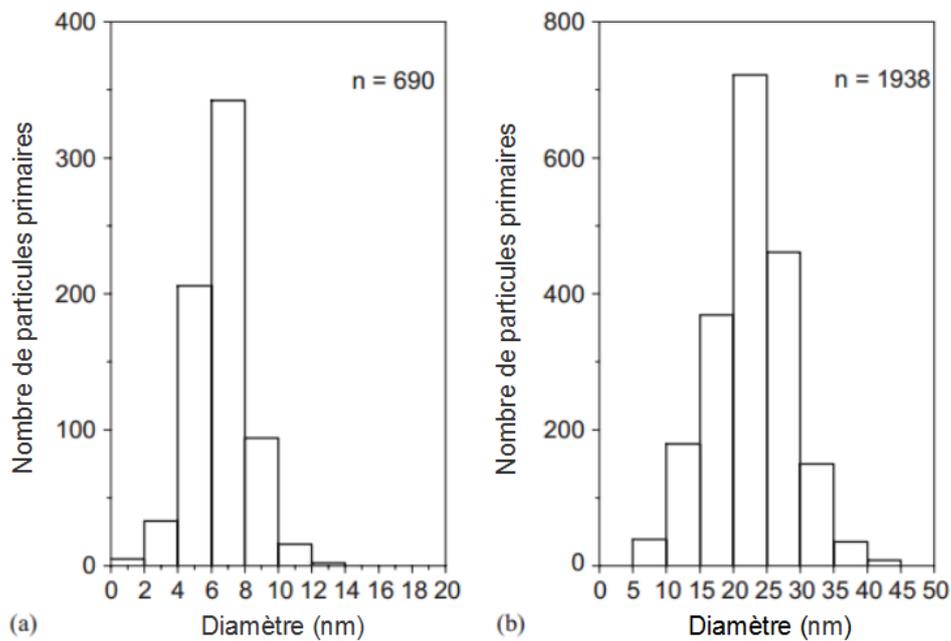


FIGURE 1.3 – Distribution de taille des particules primaires pour des suies Palas (a) et Diesel (b) (WENTZEL *et al.*, 2003).

Morphologie fractale

Grâce aux propriétés fractales des particules de suie il est possible d'utiliser des paramètres spécifiques à ce type d'objet pour les caractériser. Une dimension spatiale caractéristique de ce type d'objet est son rayon de giration noté R_g . C'est la moyenne quadratique des distances entre les particules primaires et le centre de masse. Cette longueur caractéristique représente donc la répartition spatiale des particules primaires autour du centre de masse de l'agrégat. Ce rayon de giration permet de définir un diamètre de giration D_g donné par la formule :

$$D_g = 2R_g = 2\sqrt{\frac{1}{N_{pp}} \sum_{i=1}^{N_{pp}} d_i^2}, \quad (1.1)$$

avec N_{pp} le nombre de particules primaires constituant l'agrégat et d_i la distance de la particule primaire i au centre de masse de l'agrégat. Il est également intéressant de considérer les agrégats de suie comme des particules fractales pour en tirer des paramètres morphologiques spécifiques. Deux paramètres sont propres à ce type d'objets : la dimension fractale d_f et le préfacteur fractal k_f . Ces deux paramètres sont reliés par la relation fractale :

$$N_{pp} = k_f \left(\frac{D_g}{D_{pp}} \right)^{d_f}, \quad (1.2)$$

où D_g est le diamètre de giration de l'agrégat et D_{pp} est le diamètre des particules primaires le composant. Si le préfacteur fractal est un paramètre secondaire, la dimension fractale donne une information importante sur la compacité de l'agrégat (voir figure 1.4). Une dimension fractale proche de 2 correspond à un agrégat assez aéré tandis qu'une dimension fractale de 3 correspond à un agrégat beaucoup plus compact.

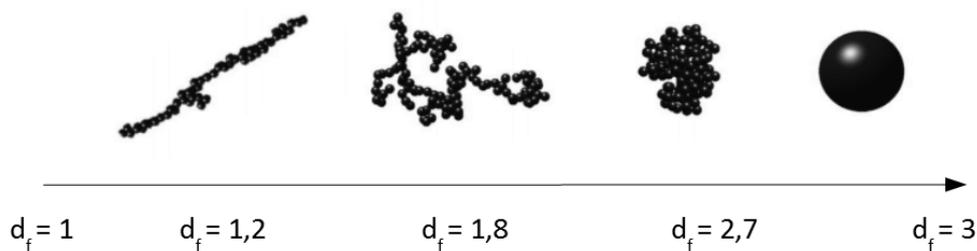


FIGURE 1.4 – Morphologie d'agrégats en fonction de leur dimension fractale (LAZZARI *et al.*, 2016)

La détermination de la dimension fractale, du pré-facteur fractal et du rayon de giration peut être réalisée pour des particules de suie par différentes méthodes : des techniques optiques, l'analyse aérodynamique ou plus directement par l'analyse de clichés MET. La dimension fractale des particules de suie a été mesurée pour plusieurs combustibles par OUF *et al.* (2008) ou encore KÖYLÜ *et al.* (1992). Celle-ci est généralement située entre 1,7 et 2 quel que soit le combustible dont sont issus les agrégats (voir tableau 1.1) ce qui traduit une compacité assez faible (voir figure 1.4). La notion de compacité

est importante lorsque l'on cherche à les assimiler à des sphères et qu'il est nécessaire de déterminer leurs propriétés physiques.

Combustible	Auteur	D_{pp} (nm)	d_f	k_f	R_g (nm)	N_{pp}
Acetylene	Ouf (2008)	64 - 66	1,85 - 1,93	1,68 - 2,31	227	73
	Köylü (1992)	47	1,79	-	472	417
Toluene	Ouf (2008)	52 - 65	1,73 - 1,78	1,89 - 2,66	260	102
	Köylü (1992)	51	1,73	-	807	526
PMMA	Ouf (2008)	42 - 54	1,74 - 1,78	2,63 - 2,84	-	-

TABLE 1.1 – Caractéristiques d'agrégats obtenues pour différents combustibles d'après OUF *et al.* (2008) et KÖYLÜ *et al.* (1992).

On peut également définir pour n'importe quelle particule, et en particulier pour un agrégat, des diamètres équivalents basés sur des propriétés physiques comme sa traînée ou sa masse volumique.

Modèle de sphère poreuse

Il est possible de considérer les agrégats comme des sphères ayant une porosité homogène. Ce modèle permet alors de calculer des propriétés effectives pour les particules, qui sont utilisées lors de la modélisation de leur transport et de leur dépôt. Plusieurs études, comme celles de ROSNER *et al.* (1994) ou encore KIM *et al.* (2005), considèrent les agrégats comme une sphère avec une porosité homogène. Pour un agrégat, la porosité peut être définie par la formule :

$$p = \frac{\rho_{pp} - \rho_p}{\rho_{pp}}, \quad (1.3)$$

où ρ_{pp} est la densité des particules primaires et $\rho_p = m_p/V_p$ est la masse volumique de la particule définie comme le rapport de sa masse m_p par son volume V_p . Il existe plusieurs façons de calculer le volume de la particule V_p , nous avons choisi d'utiliser le diamètre de giration D_g de l'agrégat. On suppose donc que le volume de notre sphère poreuse vaut

$$V_p = \frac{\pi}{6} D_g^3. \quad (1.4)$$

La masse de la particule quant à elle est la somme des masses des particules primaires composant l'agrégat. On a donc

$$m_p = N_{pp} \frac{\pi}{6} D_{pp}^3 \rho_{pp}. \quad (1.5)$$

La masse de la particule m_p peut également s'exprimer en fonction du diamètre en volume équivalent :

$$m_p = \frac{\pi}{6} \rho_{pp} D_{ve}^3 \quad (1.6)$$

C'est le diamètre de la sphère ayant le même volume que la particule considérée. Dans le cas d'un agrégat de sphères il est égal à la somme des volumes des particules primaires composant l'agrégat :

$$D_{ve} = N_{pp}^{1/3} D_{pp} \quad (1.7)$$

Où N_{pp} est le nombre de particules primaires composant l'agrégat et D_{pp} est le diamètre des particules primaires. Une particule de suie dont la dimension fractale est comprise entre 1,7 et 2 ne constitue pas un matériau poreux à proprement parler mais plusieurs études utilisent ce concept pour caractériser sa perméabilité. Cette notion permet en outre d'évaluer l'influence de la morphologie fractale sur la force de traînée. Ainsi des auteurs comme ROSNER *et al.* (1994) ou KIM *et al.* (2005) considèrent un agrégat comme une sphère pleine constituée d'un matériau de porosité p homogène.

On peut donc considérer les particules de suie comme des particules sphériques constituées d'un matériau homogène poreux, dont la porosité dépend des propriétés fractales de l'agrégat. Cette approche constitue le modèle "sphère poreuse". De la même façon que ce modèle permet de prendre en compte l'influence de la morphologie fractale sur sa traînée, il peut modifier la force de thermophorèse subie par la particule, car la porosité modifie la conductivité thermique de l'agrégat. Le calcul de la vitesse de thermophorèse, phénomène qui est le moteur principal du dépôt de suie lors d'un incendie, fait appel à la force de thermophorèse et à la traînée, c'est pourquoi on envisagera cette approche sphère poreuse comme un outil de modélisation de la thermophorèse des agrégats de suie dans la section dédiée à ce phénomène dans la suite de ce chapitre.

1.1.4 Composition chimique des particules de suie

La structure et la nature de la morphologie de la suie a été étudiée par prélèvement de particules dans des flammes et analyse des dépôts par différentes techniques. Les résultats montrent que la nature du combustible affecte la nature des particules jeunes, prélevées à la base de la flamme, mais que les particules finales émises dans les fumées ont une structure interne commune.

Les particules primaires de suie sont composées de deux domaines qui diffèrent par la façon dont les atomes de carbones sont structurés. Le premier domaine constitue la couche externe de la particule, dans laquelle le carbone est très organisé et forme des structures cristallines de type graphitiques. Les feuillets sont cependant arrangés de manières moins parfaites que dans le cas du graphite (voir figure 1.5), ce qui explique la masse volumique plus faible de la suie.

Le noyau des particules primaires (diamètre de l'ordre de 30 à 50 nm) est composé de plusieurs particules plus fines (diamètre de l'ordre de quelques nm). Ces particules fines sont liées aux premières particules formées au cours de la nucléation de la suie.

Ces deux domaines constituent la structure primaire des particules de suie, produite par les processus décrits dans le paragraphe précédent. Le carbone dont ils sont composés est appelé carbone élémentaire (EC).

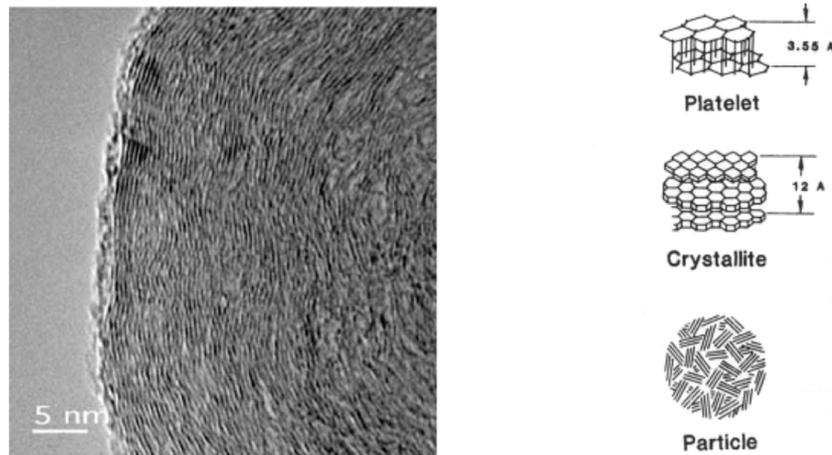


FIGURE 1.5 – Structure de particules primaires de suie d'acétylène (SMITH, 1981; WAL *et al.*, 2003)

L'analyse chimique de la suie permet de classer les composants principaux de la suie en deux catégories distinctes :

- carbone organique (CO) : elle est composée des fractions organiques solubles non-volatile et volatile.
- carbone élémentaire (CE) : il s'agit d'une matrice carbonée, qui est le constituant majoritaire de la suie.

La suie se compose donc majoritairement de carbone (>70% en masse) mais également d'hydrogène et de certains autres éléments (oxygène, azote). Dans le cas de particules de suie naissantes, les ratios molaires C/H peuvent être inférieurs à 1 tandis que des particules matures pourront avoir un ratio allant jusqu'à 10.

1.1.5 Taux de production de suie d'un foyer

Pour caractériser la capacité d'un foyer à produire de la suie on définit un paramètre appelé le taux de production de suie y_s . Le taux de production de suie (en anglais *soot yield*), aussi appelé facteur d'émission, est le rapport de la masse des particules produites par la masse du combustible brûlé et s'exprime sans dimension en gramme de suie par gramme de combustible.

Le taux de production de suie de flammes a été déterminé pour de nombreux combustibles mais uniquement grâce à des essais à petite échelle. Chaque foyer étudié est constitué d'un seul combustible, ce qui n'est pas représentatif de situations d'incendie réelles. On peut citer par exemple les bases de données de TEWARSON (2002) ou MULHOLLAND (2002). Le tableau 1.2 rassemble quelques exemples des facteurs d'émission obtenus dans ces conditions pour des combustibles variés.

Bien qu'il soit difficile d'extrapoler ces résultats à des foyers de grande taille (RASBASH *et al.*, 1979), ces mesures montrent qu'à petite échelle le taux de production de suie dépend fortement du combustible. Les produits contenant de l'oxygène, comme les alcools, ont les facteurs d'émission les plus bas, tandis que les hydrocarbures aromatiques ont les plus élevés.

1.1. Caractérisation des particules de suie d'incendie

Combustible	Taux de production de suie (-)
Ethane	0,013
Propane	0,024
Heptane	0,037
Acetylene	0,096
Toluene	0,178
Teflon	0,003
Bois (chêne rouge)	0,015
PMMA	0,022
Polyurethane (rigide)	0,104 - 0,130
Polyurethane (mousse)	0,131 - 0,227
Polystyrene	0,164
Polychorure de vinyle	0,172

TABLE 1.2 – Taux de production de suie, mesurés à petite échelle pour différents combustibles (TEWARSON, 2002)

Le rôle joué par la taille du foyer dans la production de suie est difficile à quantifier. Expérimentalement, EVANS *et al.* (1992) mesurent pour un feu de bac de pétrole que l'augmentation du diamètre du bac de 0,085 m à 2 m entraîne une augmentation du taux de production de suie, qui passe de 0,06 à 0,13 g · g⁻¹. D'un autre côté lors d'une étude à grande échelle menée avec du bois et du polyurethane rigide, MULHOLLAND *et al.* (1988) montrent une faible évolution du facteur d'émission entre petite et grande échelle.

La taille et la forme du foyer influencent les conditions d'oxygénation et les températures dans la flamme qui, comme on l'a vu précédemment, jouent sur les différents mécanismes intervenant dans la production des suies. On peut concevoir que la taille du foyer a une influence sur les températures atteintes dans la flamme et le temps de résidence des particules produites, et par conséquent joue sur la nature, les propriétés et la quantité de particules produites. Une flamme sous oxygénée génèrerait beaucoup d'espèces imbrûlées, précurseurs des particules de suie, ce qui augmenterait la quantité de suie produite. Il est logique que, au fur et à mesure de l'évolution d'un incendie, le facteur d'émission de suie varie en fonction des combustibles mis en jeu, de la taille du foyer et des conditions de ventilation.

A cause de la complexité et de la spécificité des mécanismes de production de suie, le facteur d'émission de suie est un paramètre qu'il est difficile de prévoir. Lorsqu'il est nécessaire d'évaluer ce paramètre, on utilise malgré tout et avec précautions, les valeurs de taux de production de suie mesurées à petite échelle disponibles dans la littérature.

1.2 Approche théorique des écoulements à phase dispersée

La phase condensée des produits de combustion, que constitue les particules de suie, peut être considérée comme un aérosol (terme introduit par SCHMAUSS (1922) désignant une suspension dans un milieu gazeux de particules solides ou liquides avec une vitesse de chute négligeable). Nous verrons que le transport des particules de suie dans les fumées est un problème de transport d'aérosol, ou encore d'écoulement diphasique à phase solide dispersée, problème abordé par de nombreuses études.

Nous décrirons d'abord différentes approches de modélisation pour ces écoulements qui entrent dans la catégorie des écoulements diphasiques dispersés. Nous nous intéresserons ensuite aux paramètres nécessaires à la caractérisation de particules évoluant à l'intérieur d'un gaz. Cela nous permettra enfin de décrire les différents phénomènes qui interviennent dans le transport d'aérosol.

1.2.1 Modélisation du transport d'aérosol

Dans toute la suite nous considérons que la phase solide dispersée est diluée. Cette hypothèse est admise pour des fractions volumiques en particules inférieures à 10^{-6} particules par mètre cube comme indiqué dans l'ouvrage d'OESTERLE (2006). Dans ce cas, les collisions et l'agrégation entre particules, ainsi que l'influence de la phase dispersée sur la phase continue sont négligées (on se borne à un couplage simple prenant en compte l'effet du gaz porteur sur les particules).

Quelle que soit l'approche de modélisation d'écoulement à phase dispersée choisie, il faut d'abord résoudre numériquement l'écoulement du gaz porteur grâce aux équations de Navier-Stokes. Étant donné que l'écoulement est dispersé, les méthodes applicables sont les mêmes que pour un écoulement monophasique : méthode RANS (Moyennes de Reynolds), méthode LES (Simulation des grandes échelles) ou encore DNS (Simulation Numérique Directe). La méthode utilisée par le logiciel FDS est la simulation des grandes échelles : la LES. Seule cette approche sera donc brièvement décrite par la suite.

L'approche LES consiste à simuler les écoulements turbulents en définissant une taille de coupure au-delà de laquelle les mouvements tourbillonnaires sont pris en compte par un modèle. L'écoulement à l'échelle des plus gros tourbillons est donc calculé directement par résolution des équations de Navier-Stokes (ils sont physiquement visibles dans le domaine de calcul) tandis que l'influence sur l'écoulement des plus petites structures est modélisée. Quand on souhaite analyser un système du point de vue de la LES, tout champ physique Φ peut alors être décomposé en

$$\Phi = \bar{\Phi} + \Phi', \quad (1.8)$$

où Φ est le champ filtré et Φ' est le champ de sous-filtre. L'opérateur de filtration qui transforme Φ en $\bar{\Phi}$ est tel que

$$\bar{\Phi} = \int G(x - x')\Phi(x')dx', \quad (1.9)$$

où la fonction G est une fonction propre au filtre. L'opérateur de filtration doit être linéaire, commuter avec la dérivation, et conserver les constantes. Le filtre le plus courant est celui utilisé dans le logiciel FDS : le filtre boîte, qui est défini par

$$G(x - x') = \begin{cases} \frac{1}{\Delta^3} & \text{si } |x - x'| \leq \frac{\Delta}{2} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}, \quad (1.10)$$

où Δ est la longueur de coupure du filtre. Lorsque la longueur de coupure du filtre est égale à la taille de maille, comme c'est le cas dans FDS, on appelle Φ' le champ de sous-maille.

En appliquant l'opérateur de filtration aux équations de Navier-Stokes on obtient les équations suivantes pour les grandeurs non filtrées :

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_{g,i}}{\partial x_i} = 0 & \text{Continuité} \\ \frac{\partial \bar{u}_{g,i}}{\partial t} + \bar{u}_{g,j} \frac{\partial \bar{u}_{g,i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_g} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu_g \frac{\partial^2 \bar{u}_{g,i}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} & \text{Quantité de mouvement} \end{cases}, \quad (1.11)$$

où $u_{g,i}$ sont les composantes de la vitesse du gaz, ρ_g est sa masse volumique et ν_g est sa viscosité cinématique. Les modèles de sous maille sont contenus dans le tenseur de contraintes de sous maille $\bar{\tau}_{ij} = \overline{u_{g,i}u_{g,j}} - \overline{u_{g,i}}\overline{u_{g,j}}$.

Une fois l'écoulement de la phase continue traité, il existe deux approches principales pour modéliser le transfert de la phase dispersée : l'approche Lagrangienne et l'approche Eulérienne.

L'approche Lagrangienne est aussi appelée méthode de suivi de particules. Les trajectoires des particules sont calculées individuellement en fonction du bilan des forces qu'elles subissent. Il est alors nécessaire de prendre en compte un nombre élevé de particules pour qu'elles puissent représenter statistiquement le comportement de l'aérosol, ce qui est coûteux en temps de calcul. Le traitement du problème du dépôt est très simple si l'écoulement en proche paroi est complètement résolu (DNS) puisque connaissant la trajectoire de la particule il suffit alors d'imposer une condition d'adhésion lorsque celle-ci touche une paroi. En LES, il est nécessaire d'utiliser un modèle de proche paroi qui prend la main sur le suivi lagrangien lorsque les particules sont transportées près d'un solide. L'équation de base Lagrangienne est la conservation de la quantité de mouvement d'une particule et s'écrit :

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \sum \vec{F}_i, \quad (1.12)$$

où m_p est la masse de la particule, \vec{v}_p est sa vitesse et les $\sum \vec{F}_i$ est la somme des forces

subies par la particule. Toutes les forces à prendre en considération dans le membre de droite sont décrits dans le paragraphe 1.2.3. Cette équation est fondamentale et, sous réserve de la résolution complète du champ fluide, elle permet de calculer la trajectoire d'une particule en suspension dans un gaz. La turbulence est généralement prise en compte en supposant que les particules rencontrent une série aléatoire de tourbillons. Il est donc nécessaire de calculer les trajectoires d'un nombre de particules statistiquement représentatif, ce qui accroît le temps de calcul nécessaire aux simulations de façon rédhibitoire par rapport aux applications laboratoire central. Plus les particules sont petites, plus le nombre de trajectoires à simuler augmente étant donné que les particules entre en interaction avec des échelles spatiales de turbulence de plus en plus petites qu'il faut prendre en compte (voir paragraphe 1.2.3).

Le principe de l'approche Eulérienne est de considérer la phase dispersée comme un milieu continu. Les équations de conservations de la masse et de la quantité de mouvement peuvent donc être résolues pour la phase dispersée, comme pour le gaz porteur. Les grandeurs obtenues pour la phase dispersée sont alors des grandeurs moyennes décrivant les propriétés d'un ensemble de particules. On peut ainsi avoir accès à un champ de concentration de particules (massique ou en nombre) mais pas aux trajectoires de chacune d'entre elles. L'approche Eulérienne est la moins coûteuse en termes de temps de calcul et la plus adaptée à des particules petites, peu inertielles, comme le sont les particules de suie. C'est pour cela qu'elle a été choisie pour modéliser le transport de la suie dans FDS et c'est donc à cette approche que nous allons nous intéresser par la suite. Nous considérerons donc l'aérosol suie comme un champ de concentration en masse $C(\vec{x}, t)$ ou en nombre $N(\vec{x}, t)$.

Il existe différentes méthodes pour obtenir des équations eulériennes pour la phase dispersée détaillées par des auteurs comme DREW (1983), ELGHOBASHI *et al.* (1983), ZHAO *et al.* (2008) ou encore ZAICHIK (1999). Le modèle le plus simple est appelé "Drift Flux Model" et est établi de manière intuitive sur la base de la conservation de la concentration massique comme un scalaire passif. Le terme convectif de l'équation de conservation de la concentration massique d'aérosol est modifié en ajoutant à la vitesse de la phase gaz u_g une vitesse de glissement (ou "drift") qui représente le décalage de la phase dispersée par rapport à la phase continue causé par la sédimentation des particules. L'équation de transport filtrée (voir équation 1.10) de la concentration massique de particules notée C a la forme suivante :

$$\frac{\partial C(\vec{x}, t)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot ((\vec{u}_g + \vec{u}_{sed})C(\vec{x}, t)) = \vec{\nabla} \cdot (D_{eff} \vec{\nabla} C(\vec{x}, t)) , \quad (1.13)$$

où \vec{u}_{sed} est la vitesse de sédimentation et D_{eff} la diffusivité effective des particules, grandeurs décrites dans le paragraphe suivant prenant en compte la diffusivité brownienne et la diffusivité turbulente. La description de particules très fines ne pose pas de problème puisqu'il est compris dans le terme D_{eff} qui est la somme des diffusivités brownienne et turbulente des particules dans le gaz porteur (ces termes sont détaillés dans le paragraphe 1.2.3). C'est un modèle très simplifié, qui ne prend pas en compte

tous les mécanismes intervenants dans le transport des particules listés dans le paragraphe 1.2.3. Le "Drift Flux Model" est un modèle qui est souvent utilisé pour simuler la dispersion d'aérosols dans des locaux ventilés par exemple par ZHAO *et al.* (2008) et LAI *et al.* (2008). C'est en outre le modèle qui est utilisé dans le code de simulation incendie FDS pour le transport de toute espèce désignée par l'utilisateur comme un aérosol, en particulier les particules de suie.

1.2.2 Régime de continuité d'une particule en suspension dans un gaz

Les particules qui nous intéressent sont de très faibles dimensions (de la dizaine de nanomètre pour les particules primaires au micromètre pour les plus gros agrégats), ce qui nous oblige à considérer le gaz environnant comme un milieu discret composé de molécules soumises au mouvement brownien causé par l'agitation thermique. Ce phénomène entraîne des chocs entre les molécules de gaz, mais également entre ces molécules et les particules en suspension. Ces collisions aléatoires sont responsables de la diffusion des particules. Pour simplifier l'analyse, il est admis dans la suite que les molécules de gaz sont toutes identiques et sphériques, que leur mouvement est rectiligne et uniforme et que leurs chocs sont élastiques.

Le libre parcours moyen λ des molécules de gaz est la distance moyenne que peut parcourir une molécule avant d'en rencontrer une autre et de changer de trajectoire. Comme indiqué dans l'ouvrage de BOULAUD *et al.* (1998) on calcule que

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2n}, \quad (1.14)$$

où σ est le diamètre des molécules et n est la concentration moléculaire. On remarque que le libre parcours moyen est inversement proportionnel à la concentration moléculaire. Cette relation s'exprime également, grâce à la loi des gaz parfaits, sous la forme

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 P}, \quad (1.15)$$

où $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ est la constante de Boltzman, T est la température absolue et P est la pression. Si on suppose que la pression varie peu par rapport à la pression ambiante et que le diamètre des molécules de gaz est constant on peut calculer le libre parcours moyen grâce à la relation

$$\lambda = \lambda_a \frac{T}{T_a}, \quad (1.16)$$

où T est la température absolue, et λ_a est le libre parcours moyen de l'air à la température T_a et à pression atmosphérique. Le libre parcours moyen de l'air à 25 °C et à pression atmosphérique vaut $\lambda_a = 68 \text{ nm}$ comme l'indique par exemple JENNINGS (1988).

Le nombre de Knudsen sert à déterminer le régime de continuité dans lequel on se

situé. C'est le rapport entre le libre parcours moyen du gaz et une dimension caractéristique du problème, ici le rayon de la particule :

$$Kn = \frac{2\lambda}{D}, \quad (1.17)$$

où λ est le libre parcours moyen dans le gaz et D est le diamètre de la particule pour une particule sphérique. En fonction de la valeur du nombre de Knudsen on définit deux domaines extrêmes et un domaine intermédiaire. Ces trois régimes de continuité sont appelés :

- Régime continu ($Kn \rightarrow 0$). La particule est grosse par rapport au libre parcours moyen des molécules de gaz : le gaz peut être considéré comme un milieu continu.
- Régime moléculaire ($Kn \rightarrow \infty$). La particule est suffisamment petite pour que son comportement s'apparente à celui d'une très grosse molécule.
- Régime de transition ($0,1 < Kn < 10$), lorsque la dimension des particules est de l'ordre du libre parcours moyen, aucune des approches asymptotiques citées ci-dessus ne convient.

L'effet de la raréfaction du milieu gazeux est généralement pris en compte lorsque la particule entre dans le régime de transition grâce au coefficient de correction de Cunningham, qui est décrit dans le paragraphe 1.2.3.

Typiquement, selon la dimension caractéristique choisie, on peut considérer que les particules de suie ont une taille comprise entre 100 et 1000 nm. À température ambiante leur nombre de Knudsen est donc de l'ordre de 0,1 pour les particules les plus grosses et de l'unité pour les plus petites. L'augmentation de la température tends à augmenter le nombre de Knudsen, les particules de suie rencontrées en situation d'incendie sont donc vraisemblablement situées dans le régime de transition.

1.2.3 Mécanismes intervenant dans le transport des particules

Ce qui suit présente les phénomènes qui influencent le transport de particules et s'appuie largement sur la revue bibliographique de SIPPOLA *et al.* (2002). Comme précédemment, les formules analytiques sont valables pour des particules sphériques de diamètre D . Dans la suite nous décrivons les mécanismes de transport soit comme une force subie par la particule, soit directement comme un flux de concentration de particules, conséquence d'une force subie par les particules.

Force de traînée

La force de traînée est la force qui s'oppose au mouvement relatif entre le fluide et la particule. C'est donc cette force qui est à l'origine du transport d'un aérosol par un fluide en mouvement : les particules composant l'aérosol, sous l'effet de la force de traînée, vont avoir tendance à suivre l'écoulement gazeux. L'expression de la force de

traînée sur une particule sphérique dans un milieu gazeux est

$$\vec{F}_t = C_D \frac{\pi D^2}{8} \rho_g \|\vec{v}_p - \vec{u}_g\| (\vec{v}_p - \vec{u}_g), \quad (1.18)$$

où ρ_g est la densité du gaz, u_g est la vitesse du gaz, v_p est la vitesse de la particule et C_D est un coefficient de traînée qui varie en fonction du régime d'écoulement du fluide autour de la particule. Il dépend donc du nombre de Reynolds particulaire Re_p qui est défini comme

$$Re_p = \frac{D \rho_g \|\vec{v}_p - \vec{u}_g\|}{\mu_g}, \quad (1.19)$$

avec μ_g la viscosité dynamique du gaz. Pour une particule solide sphérique, l'expression du coefficient de traînée C_D varie selon le régime d'écoulement étudié. On distingue trois régimes d'écoulement relatif fluide-particule : le régime de Stokes ($Re_p \ll 1$), le régime intermédiaire ($1 < Re_p < 1000$) et le régime de Newton ($Re_p \gg 1000$).

Dans le cas qui nous intéresse, les particules sont petites et peu inertielles, elles sont donc rapidement amenées à suivre l'écoulement, ce qui se traduit par une vitesse relative de la particule par rapport au fluide $\|\vec{v}_p - \vec{u}_g\|$ faible. C'est donc le régime de traînée de Stokes qui nous intéresse, dans lequel le coefficient de traînée est inversement proportionnel au nombre de Reynolds particulaire :

$$C_D = \frac{24}{Re_p}. \quad (1.20)$$

Cette expression de la force de traînée n'est à priori valable que dans le cas où l'écoulement du gaz par rapport à la particule est laminaire, ce qui est quasiment toujours pour de très petites particules. La loi de Stokes est valable dans le cadre de la mécanique des milieux continus et les très petites particules subissent des effets liés à la raréfaction du gaz porteur. Pour étendre le domaine de validité de la loi de Stokes, elle peut être corrigée par le coefficient de Cunningham (CUNNINGHAM, 1910) déterminé empiriquement :

$$C_c = 1 + Kn \left[1, 257 + 0, 4 e^{(-1,1/Kn)} \right], \quad (1.21)$$

où Kn est le nombre de Knudsen. La dimension caractéristique des particules qui nous intéresse étant de l'ordre de 50 nm à 1 μm , le facteur de correction a une valeur comprise entre 1 et 5. La force de traînée exercée par le gaz sur la particule est donc proportionnelle à la vitesse relative du fluide par rapport à la particule et est donnée par :

$$\vec{F}_t = \frac{-3\pi D \mu_g (\vec{v}_p - \vec{u}_g)}{C_c}. \quad (1.22)$$

Sédimentation

Les particules plus denses que le gaz ambiant tombent sous l'effet de la gravité. Dans le cas de particules solides, on peut négliger la poussée d'Archimède ($\rho_p \gg \rho_{gaz}$)

et la force de gravitation s'exprime alors pour une particule sphérique sous la forme

$$\vec{F}_g = \frac{\pi}{6} \rho_p D^3 \vec{g}, \quad (1.23)$$

où ρ_p est la densité du matériau constituant la particule et \vec{g} est l'accélération gravitationnelle. Une particule en régime stationnaire en suspension dans un gaz immobile, soumise uniquement à la force de traînée et à la force de gravitation, acquiert une vitesse de chute appelée vitesse de sédimentation. En égalant les formules 1.22 et 1.23 on obtient cette vitesse sous la forme :

$$\vec{v}_g = C_c \frac{m_p}{3\pi\mu_g D} \vec{g} = C_c \frac{\rho_p D^2}{18\mu_g} \vec{g}, \quad (1.24)$$

où m_p est la masse de la particule. La vitesse de sédimentation est d'autant plus faible que les particules sont petites. À titre d'exemple, pour des particules de diamètre $D = 1 \mu\text{m}$ et de masse volumique $\rho_p = 1900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ on obtient une vitesse de sédimentation de l'ordre de $35 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Diffusion Brownienne et Turbulente

Les particules en suspension dans un gaz sont soumises aux chocs avec les molécules de gaz qui se déplacent aléatoirement sous l'effet de l'agitation moléculaire, ce qui se traduit par une force subie par ces particules. Le mouvement Brownien tend à rendre la concentration en particules uniforme. Les particules vont donc se déplacer naturellement des régions de forte concentration vers les régions de faible concentration. Tout gradient de concentration en particule produit un flux de particules $\vec{\phi}$, conséquence de la diffusion brownienne, qui est modélisé par la loi de Fick :

$$\vec{\phi} = -D_B \vec{\nabla} C, \quad (1.25)$$

où D_B est la diffusivité brownienne massique des particules dans le gaz. Cette diffusivité est donnée par la relation de Stokes-Einstein, corrigée par le coefficient de Cunningham C_c pour tenir compte des effets de raréfaction décrits auparavant :

$$D_B = C_c \frac{k_B T}{3\pi\mu_g D}, \quad (1.26)$$

où k_B est la constante de Boltzman, T est la température absolue et C_c est le coefficient de Cunningham. La diffusion Brownienne n'engendre un flux de particules que si un gradient de concentration existe.

Dans un écoulement turbulent, les variations rapides et irrégulières du mouvement du fluide contribuent au mélange, autrement dit à la diffusion des particules. On écrit le champ de concentration massique de particules $C(\vec{x}, t)$ comme la somme d'une valeur moyenne (ou filtrée) \bar{C} et d'un terme fluctuant (ou de sous maille) C' tels que

$$C = \bar{C} + C'. \quad (1.27)$$

En introduisant cette décomposition dans l'équation de conservation de la masse et après l'application du filtre adapté (spatial ou temporel), on obtient un flux de particules par diffusion de la forme

$$\vec{\phi} = -D_B \vec{\nabla} \bar{C} - \overline{\vec{u}'C'} , \quad (1.28)$$

où \vec{u}' est le terme fluctuant de la vitesse locale. Le terme $\overline{\vec{u}'C'}$ est habituellement modélisé, en supposant la turbulence homogène, comme

$$\overline{\vec{u}'C'} = D_t \vec{\nabla} \bar{C} , \quad (1.29)$$

où D_t est la diffusivité turbulente des particules. On peut approximer la diffusivité totale $D_B + D_t$ par

$$D_B + D_t \approx \frac{\nu + \nu_t}{Sc_t} , \quad (1.30)$$

où Sc_t est le nombre de Schmidt turbulent, souvent supposé constant, ν est la viscosité cinématique du fluide et $\nu_t = \mu_t/\rho$ est la viscosité cinématique turbulente donnée en pratique par un modèle de fermeture. Comme pour la diffusion brownienne, la diffusion turbulente ne crée pas de flux de particules s'il n'y a pas de gradient de concentration.

Turbophorèse

Dans le cas d'un écoulement dans lequel l'intensité de la turbulence varie fortement, par exemple dans le cas d'une couche limite turbulente au voisinage d'une paroi, on observe (REEKS, 1976) que les particules ont tendance à migrer dans la direction opposée au gradient d'énergie cinétique turbulente et à s'accumuler près de la paroi. L'intensité de ce phénomène dépend fortement de l'inertie des particules : la vitesse des particules qui ont suffisamment d'inertie peut se découpler de celle du gaz porteur à cause du retard de réaction de la particule aux fluctuations de vitesse dans le gaz liées à la turbulence. Celles-ci vont alors être éjectées préférentiellement des zones fortement turbulentes vers les zones moins turbulentes. Cette asymétrie crée un flux de particules dans le sens opposé au gradient d'intensité turbulente, c'est à dire vers la paroi dans le cas d'une couche limite turbulente. CAPORALONI *et al.* (1975) donnent une expression du flux de particules créé par la turbophorèse confirmée par REEKS (1976) :

$$\vec{\phi} = -\tau_p \vec{\nabla} \overline{u_p'^2} , \quad (1.31)$$

où u_p' est la composante fluctuante de la vitesse de la particule. La turbophorèse est un phénomène distinct de la diffusion turbulente : un flux de particules causé par la turbophorèse existerait même dans une situation où la concentration en particules serait homogène. Ce phénomène entrerait alors en concurrence avec la diffusion brownienne et turbulente qui tend à homogénéiser la concentration des particules .

Thermophorèse

Lorsque des particules sont en suspension dans un gaz où le champ de température n'est pas homogène, on observe une migration de celles-ci dans le sens opposé au gradient de température (des zones chaudes vers les zones froides). Ce phénomène est important dès lors que l'écoulement présente de forts gradients de température, comme c'est le cas par exemple dans la couche limite thermique lorsque l'on s'approche d'une paroi. La force de thermophorèse peut être calculée par plusieurs méthodes. En considérant une particule en régime stationnaire soumise uniquement à la force de thermophorèse et à la force de traînée on obtient une vitesse de thermophorèse :

$$\vec{v}_{th} = -\frac{K_{th\nu}}{T}\vec{\nabla}T \quad (1.32)$$

Comme on le verra, ce phénomène est prépondérant dans le dépôt de particules lors d'un incendie et sera détaillé dans la troisième section de ce chapitre.

Force électrostatique

Des ions présents dans le gaz porteur peuvent transférer aux particules des charges électriques. Ces particules subissent alors une force de Coulomb due au champ électrique environnant :

$$\vec{F}_C = q\vec{E}, \quad (1.33)$$

où q est la charge de la particule et \vec{E} est le champ électrique environnant. La force électrostatique dans la direction normale à la paroi \vec{y} , s'appliquant à une particule chargée près d'une surface conductrice peut être trouvée dans la littérature (LI *et al.*, 1993) et est donnée par la formule suivante :

$$F_e = qE - \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 y^2} + \frac{qED^3}{16y^3} - \frac{3\pi\epsilon_0 D^6 E}{128y^4}, \quad (1.34)$$

où ϵ_0 est la permittivité de l'air et y est la distance de la particule à la paroi. Les termes du membre de droite sont appelés respectivement force de Coulomb, force image, force diélectrique et force dipôle-dipôle. D'après LI *et al.* (1993), les forces diélectriques et dipôle-dipôle sont négligeables et la force de Coulomb domine dès lors qu'un champ électrique existe. En l'absence d'un champ électrique significatif, la seule composante de la force électrostatique est la force image, qui est dirigée vers la paroi et qui est d'une intensité forte seulement à petite distance de la paroi (évolution en $1/y^2$). Nous garderons donc à l'esprit que des charges accumulées sur une paroi isolée électriquement peuvent créer un champ électrique et influencer le dépôt des particules, mais nous choisirons de négliger ce phénomène dans nos applications.

Autres phénomènes

D'autres forces qui ont théoriquement une influence sur le transport des particules existent mais celles-ci sont en pratique négligeables dans notre cas d'aérosol solide

porté par de l'air. La force de portance due au cisaillement, la force d'histoire, la force d'Archimède, le gradient de pression existant dans le gaz, et la correction de Faxen pour des écoulements non uniformes sont autant d'effets considérés comme négligeables et ignorés ici.

Lorsque l'on modélise le dépôt de particules par une approche Eulerienne, les contributions des différents mécanismes de transport de particules sont supposées s'additionner. Cette hypothèse s'est avérée valide pour la plupart des applications pratiques.

Temps de relaxation et diamètres équivalents

Dans l'étude du mouvement de particules en suspension dans un fluide, un paramètre souvent rencontré est le temps de relaxation des particules. Ce paramètre, caractéristique de l'inertie des particules, correspond au temps de réponse dynamique d'une particule dans un fluide donné. L'équation du mouvement d'une particule sphérique de rayon R et de masse volumique très grande devant celle du gaz porteur, soumise uniquement à la résistance du fluide, s'écrit :

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_t, \quad (1.35)$$

où F_t est la force de traînée et m_p est sa masse. Le temps de relaxation τ_p d'une particule est alors défini par la relation :

$$\tau_p = \frac{m_p}{F_t |\vec{v}_p - \vec{u}_g|}, \quad (1.36)$$

Pour une particule dans le régime de Stokes, en utilisant la correction de Cunningham, (voir équation 1.22) on a donc :

$$\tau_p = C_c \frac{\rho_p D^2}{18\mu_g}, \quad (1.37)$$

où ρ_p est la masse volumique de la particule, C_c est le coefficient de Cunningham et μ_g est la viscosité dynamique du gaz porteur. Le temps de relaxation d'une particule sert à la classer selon son inertie et en particulier à évaluer sa réactivité par rapport à un écoulement donné. Lorsque l'on s'intéresse à des écoulements turbulents en proche paroi, il est courant d'utiliser le temps de relaxation adimensionné τ^+ des particules, en rapportant leur temps de relaxation au temps moyen de vie des plus petits tourbillons τ_t . Ce dernier peut être estimé par

$$\tau_t = \frac{\nu}{u_*'^2}, \quad (1.38)$$

où ν est la viscosité cinématique du gaz et u^* est la vitesse de frottement². Le temps de relaxation adimensionné est donc donné par la formule suivante :

$$\tau^+ = \frac{\tau_p}{\tau_t} = \frac{C_c \rho_p^2 D^2 u^{*2}}{18 \mu_g^2}. \quad (1.39)$$

Ce temps de relaxation sans dimension permet d'évaluer la réactivité des particules par rapport à l'écoulement. Si $\tau^+ \ll 1$ alors la particule suit parfaitement même les plus petites structures de l'écoulement malgré leurs durées de vie très courtes. Au contraire si $\tau^+ \gg 1$, la particule ne sera affectée que par les plus grosses structures qui n'existent qu'à plus grande distance de la paroi.

Pour pouvoir étudier des particules de géométrie quelconque, on les considère généralement comme sphériques en corrigeant certaines de leurs propriétés. Pour cela on définit les diamètres caractéristiques suivants :

- Le diamètre aérodynamique D_{ae} d'une particule correspond au diamètre d'une sphère ayant la même vitesse de sédimentation que la particule et une masse volumique $\rho_0 = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
- Le diamètre de Stokes D_{st} d'une particule correspond au diamètre d'une sphère ayant la même vitesse de sédimentation que la particule et une masse volumique égale à celle du matériau constituant la particule.

Par exemple, pour une particule de suie qui est un agrégat fractal dont les particules primaires ont une masse volumique ρ_{pp} , on peut écrire la vitesse de sédimentation u_{sed} de deux façons différentes grâce à ces deux diamètres caractéristiques :

$$\vec{u}_{sed} = C_c \rho_{pp} \frac{D_{st}^2}{18 \mu_g} = C_c \rho_0 \frac{D_{ae}^2}{18 \mu_g}. \quad (1.40)$$

1.2.4 Le phénomène de thermophorèse

Ce phénomène a été observé pour la première fois au 19^{ème} siècle par TYNDALL (1870), qui constate dans une chambre remplie d'air chargé de poussière que des zones sans particules se forment autour d'éléments chauffants. Les molécules venant de la surface chaude étaient porteuses d'une plus grande quantité d'énergie cinétique que les molécules venant du côté froid, il en résulte une force subie par la particule appelée force de thermophorèse. La vitesse de migration ainsi créée est appelée vitesse de thermophorèse.

Du fait de son importance pratique, ce phénomène a fait l'objet de nombreuses études. Théoriquement, la force de thermophorèse pourrait être calculée par résolution de l'équation de Boltzmann pour une distribution de vitesse des molécules de gaz correspondant à un gradient de température. L'intégration sur la surface de la particule de la quantité de mouvement reçu par collision avec les molécules de gaz donnerait alors la

2. La vitesse de frottement u^* permet d'exprimer la contrainte de cisaillement dans l'écoulement sous la forme d'une vitesse. Par définition $u^* = \sqrt{\tau/\rho}$ avec τ la contrainte de cisaillement et ρ la densité du gaz.

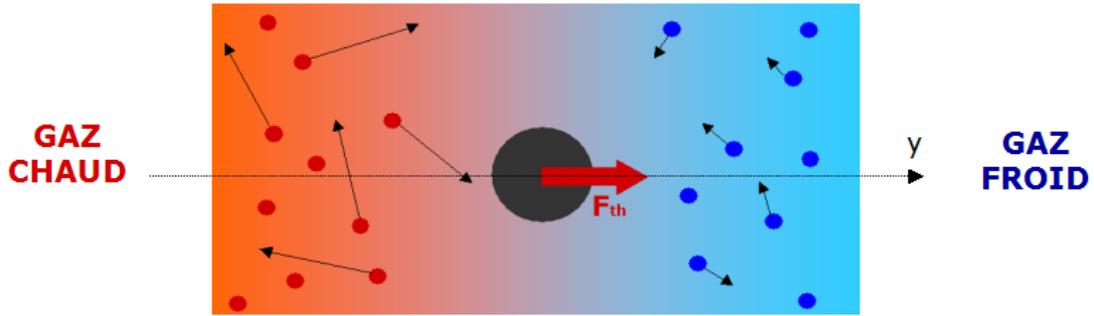


FIGURE 1.6 – Illustration du phénomène de thermophorèse

force de thermophorèse. Cependant la nature non-linéaire de l'équation de Boltzmann ainsi que l'impossibilité de connaître de nombreux paramètres nécessaires à cette résolution nous empêche d'accéder à une expression exacte de la force de thermophorèse. Il est cependant possible d'en trouver des expressions approchées, présentées dans la suite en fonction des hypothèses restrictives émises quant à la taille des particules.

Les données expérimentales mettent en évidence une forte dépendance de la force de thermophorèse au nombre de Knudsen, défini auparavant, qui représente le régime de continuité à considérer. Dans le régime continu ($Kn \rightarrow 0$) on peut assimiler le gaz à un milieu continu tandis que dans le régime moléculaire ($Kn \rightarrow +\infty$) le rôle de la particule s'apparente à celui d'une molécule de grande taille. Dans chacun de ces cas extrêmes, la théorie de la thermophorèse peut être simplifiée de façon à obtenir des expressions de la force subie par la particule. En revanche dans le régime de transition situé entre les deux, il est plus difficile d'obtenir une solution théorique.

Domaine continu : expression de Brock

La thermophorèse étant le résultat de l'impact des molécules de gaz sur la particule, le phénomène dépend beaucoup de l'interaction entre ces molécules et la surface de la particule. Les coefficients d'accommodation dynamique α_m et thermique α_t permettent de qualifier la nature de l'interaction moléculaire à la surface de la particule. Ils expriment l'efficacité moyenne d'échange d'énergie, et de quantité de mouvement respectivement, par la collision entre les molécules gaz et la surface. Ils sont définis comme

$$\alpha_t = \frac{E_i - E_e}{E_i - E_s} ; \alpha_m = \frac{M_i - M_e}{M_i - M_s}, \quad (1.41)$$

où E (et M) représente le flux d'énergie moyen (et la composante tangentielle moyenne de la quantité de mouvement) d'une molécule respectivement incidente (*i*), émise (*e*) ou émise après équilibre avec la surface (*s*). La nature de l'interaction entre des molécules de gaz et une surface se situe entre deux modèles extrêmes : la réflexion spéculaire, qui correspond au cas $\alpha_t = \alpha_m = 1$ et la réflexion diffuse, où $\alpha_t = \alpha_m = 0$. On parle de réflexion spéculaire lorsqu'une molécule de gaz incidente est émise dans le même état, sans transfert d'énergie ou de quantité de mouvement à la particule : la collision est

complètement élastique. La réflexion diffuse correspond quant à elle au cas dit d'accommodation complète, où une molécule de gaz incidente entre en équilibre avec la surface de la particule avant d'être émise.

On suppose une particule sphérique de rayon R_p dont le centre a pour coordonnées (x_p, y_p, z_p) dans le repère fixe $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ et $r = 0$ dans le repère sphérique lié à la particule $(\vec{r}, \vec{\theta}, \vec{\phi})$. On cherche à déterminer la force F_{th} subie par la particule en présence d'un gradient de température $(\nabla T_g)_x$ supposé uniforme et constant dans la direction \vec{x} . On écrit le champ de température du gaz $T_g(r, \theta, \phi)$ dans le champ lointain sous la forme :

$$(T_g)_{r \gg d_{Kn}/2} = T_g(x_p, y_p, z_p) + (\nabla T_g)_x r \sin(\theta), \quad (1.42)$$

où les coordonnées sphériques (r, θ) ont pour origine le centre la particule et θ est pris à partir de l'axe \vec{x} . Dans le régime continu, on peut utiliser les équations de Navier-Stokes combinées à des conditions limites appropriées qui permettent de prendre en compte la thermophorèse. Ces conditions limites doivent représenter le fait que, dans une mince couche autour de la particule (la couche de Knudsen d'épaisseur δ_{Kn} de quelques libres parcours moyens) représentée sur la figure 1.7, le gaz ne peut pas être traité comme un milieu continu. On distingue ainsi le champ proche correspondant à $r \rightarrow R_p$ et le champ lointain lorsque $r \rightarrow +\infty$.

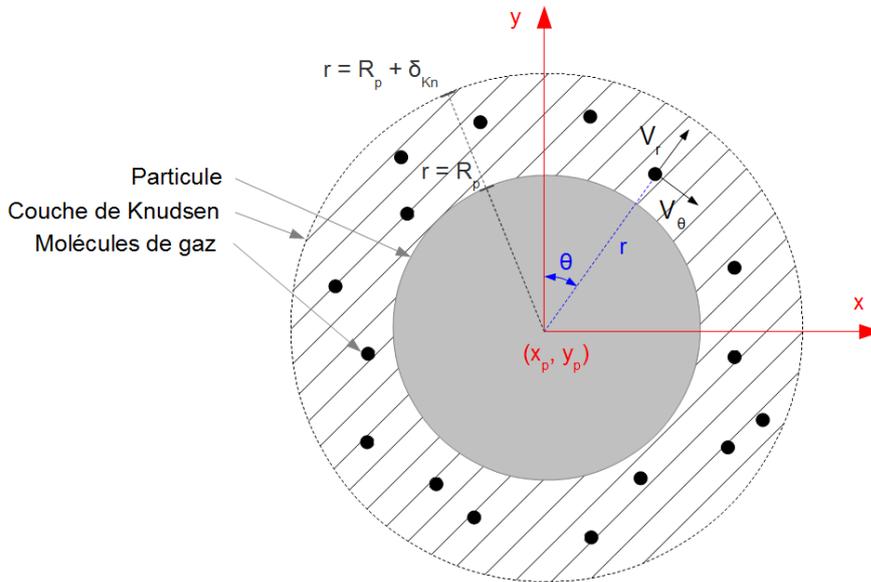


FIGURE 1.7 – Écoulement autour d'une particule en suspension dans un gaz

Cette approche a été utilisée par (EPSTEIN, 1929) et affinée ensuite par (BROCK, 1962). Pour obtenir cette expression de la force de thermophorèse en régime continu, Brock choisit des conditions limites en $r = R_p$ adaptées au problème en utilisant les coefficients C_s , C_m et C_t , dérivés des coefficients d'accommodation α_t et α_e . Ces conditions limites sont les suivantes.

D'abord, le flux de chaleur est supposé continu à la surface de la particule sphérique. On peut donc écrire simplement l'égalité suivante :

$$k_g \left(\frac{dT_g}{dr} \right)_{r \rightarrow R_p} = k_p \left(\frac{dT_p}{dr} \right)_{r=R_p}, \quad (1.43)$$

où T_g et k_g (respectivement T_p et k_p) sont les températures et la conductivité thermique du gaz (respectivement de la particule).

Ensuite le champ de température influence la vitesse des molécules de gaz au voisinage de la particule. Le gaz possède donc une vitesse non nulle dans la direction tangente à la surface de la particule par opposition à la condition de non glissement habituellement utilisée aux interfaces gaz-solide. Ce qui se traduit par la condition limite suivante :

$$(V_\theta)_{r \rightarrow R_p} = C_m k_g \left[r \frac{d}{dr} \left(\frac{V_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{dV_r}{d\theta} \right]_{r=R_p} + C_s \frac{\mu_g}{\rho T_g} Kn \left(\frac{dT_g}{d\theta} \right)_{r=R_p}, \quad (1.44)$$

où ρ et μ_g sont la densité et la viscosité du gaz, T est la température locale et V_r et V_θ sont les composantes de la vitesse du gaz à la surface de la particule. Les coefficients C_m et C_s permettent de définir la vitesse de glissement des molécules de gaz dans la couche de Knudsen de la particule. Le coefficient de glissement thermique C_s (pour "slip") dépend du système gaz-particule. DERJAGUIN *et al.* (1976) détermine une valeur du coefficient de glissement thermique de $C_s = 1, 1 \pm 0, 1$ à partir de plusieurs méthodes expérimentales. Ce résultat est en accord avec la valeur de $C_s = 1, 17$ obtenu dans le cas d'une accommodation complète ($\alpha_t = 1$) grâce à la formule dérivée par IVCHENKO *et al.* (1971) :

$$C_s = \frac{3}{2} \left(\frac{0, 6264 + 0, 3736 \alpha_t}{1, 2528 + 0, 0306 \alpha_t} \right), \quad (1.45)$$

où α_t est facteur d'accommodation thermique. Le coefficient de transfert de quantité de mouvement C_m est également déterminé par la théorie cinétique des gaz. La valeur la plus largement utilisée est $C_m = 1, 14$ déterminée par LOYALKA. *et al.* (1967) dans le cas d'une accommodation complète.

Enfin on suppose qu'il existe une discontinuité du champ de température à la surface de la particule ($r = R_p$). La température du gaz T_g à l'interface fluide/particule n'est donc pas celle de la particule. La condition limite associée est :

$$T_g(r \rightarrow R_p) - T_p(r = R_p) = C_t k_g \left(\frac{dT_g}{dr} \right)_{r=R_p}. \quad (1.46)$$

La valeur du coefficient de saut de température C_t est données par LOYALKA (1968) en fonction du facteur d'accommodation thermique α_t :

$$C_t = \frac{15}{8} \left(\frac{2 - \alpha_t}{\alpha_t} (1 + 0, 1621 \alpha_t) \right), \quad (1.47)$$

ce qui donne $C_t = 2, 18$ dans le cas d'une accommodation complète ($\alpha_t = 1$).

L'expression de la force de thermophorèse obtenue par BROCK (1962) en utilisant ces conditions limites est la suivante :

$$F_{th,B} = -6\pi\mu_g R_p \left[\frac{2C_s(\alpha + C_t Kn)}{(1 + 3C_m Kn)(1 + 2\alpha + 2C_t Kn)} \right] \frac{\nu}{T_g} (\nabla T)_x . \quad (1.48)$$

Celle-ci dépend du nombre de Knudsen Kn , du rapport des conductivités thermiques du gaz et de la particule $\alpha = k_g/k_p$ ainsi que des trois coefficients utilisés dans les conditions limites C_s , C_t et C_m . Les valeurs utilisées pour ces coefficients et rappelées ici ont été obtenues théoriquement dans le cas d'une accommodation complète ($\alpha_t = \alpha_e = 1$) et sont celles qui sont utilisées dans le code de calcul FDS.

$$C_s = 1,17 \quad ; \quad C_t = 2,18 \quad \text{et} \quad C_m = 1,14 . \quad (1.49)$$

Domaine moléculaire : expression de Waldman

Lorsque $Kn \rightarrow \infty$ la vitesse des molécules de gaz qui entrent en collision avec la particule n'est plus affectée par la présence de celle-ci. La distribution de vitesse des molécules de gaz peut donc être obtenue par la théorie cinétique des gaz. WALDMAN (1961) a été le premier à déterminer la force de thermophorèse subie par une particule sphérique dans ces conditions :

$$F_{th,W} = -\frac{32}{15} \frac{R_p^2 k_g}{\bar{c}} (\nabla T_g)_x . \quad (1.50)$$

où k_g est la conductivité thermique du gaz, $(\nabla T_g)_x$ est le gradient de température, $\bar{c} = \sqrt{8k_B T_g / \pi m}$ est la vitesse moyenne à l'équilibre des molécules de masse m à la température T_g avec k_B la constante de Boltzmann. On obtient donc

$$F_{th,W} = -\frac{16}{15} \sqrt{\frac{\pi m}{2k_B T_g}} R_p^2 k_g (\nabla T_g)_x , \quad (1.51)$$

où T_g est la température du gaz à l'emplacement de la particule. Cette expression a été déterminée dans le cas d'un gaz monoatomique mais peut être étendue aux gaz poly-atomiques en remplaçant la conductivité thermique k_g par sa composante translationnelle $k_{g,tr}$ donnée par la formule suivante :

$$k_{g,tr} = \frac{15}{4} \frac{k_B}{m} \mu_g . \quad (1.52)$$

Ce qui donne

$$F_{th,W} = -4 \sqrt{\frac{\pi}{2T_g} \frac{k_B}{m}} R_p^2 k_g (\nabla T_g)_x \mu_g , \quad (1.53)$$

Il est intéressant de remarquer que l'expression de la force de thermophorèse dans le domaine moléculaire ne dépend pas des coefficients d'accommodation. Les résultats expérimentaux ont montré que la force de thermophorèse tend en effet vers l'expression de Waldmann lorsque le nombre de Knudsen augmente.

Domaine intermédiaire : expressions générales

Parmi les expressions de la force de thermophorèse valables quel que soit le régime de continuité, le modèle le plus utilisé est celui de TALBOT *et al.* (1980). Ce dernier remarque que la limite lorsque Kn tend vers l'infini de l'expression de la force de thermophorèse établie par BROCK (1962) (valable pour $Kn \rightarrow 0$) est proportionnelle à l'expression de WALDMAN (1961) (valable pour $Kn \rightarrow \infty$).

$$\lim_{Kn \rightarrow \infty} F_{th,B} = \left(\frac{C_s}{C_m} \right) F_{th,W}. \quad (1.54)$$

En utilisant les données disponibles pour C_s et C_m , il calcule que la constante de proportionnalité vaut 1,03 ce qui est très proche de l'unité. Il suggère donc d'extrapoler l'expression de Brock à tous les régimes de continuité en supposant qu'on commet alors une erreur de seulement 3% dans l'évaluation de la force de thermophorèse. La force de thermophorèse donnée par Talbot s'exprime alors sous la forme

$$F_{th,T} = -6\pi\mu_g R_p \left[\frac{2C_s(\alpha + C_t Kn)}{(1 + 3C_m Kn)(1 + 2\alpha + 2C_t Kn)} \right] \frac{\nu}{T_g} (\nabla T)_x, \quad (1.55)$$

où C_s, C_t, C_m sont les coefficients décrits auparavant.

Récemment, la résolution approchée des équations de la mécanique statistique a permis d'obtenir des expressions de la force de thermophorèse valables dans le régime de transition, comme celles de SONE *et al.* (1983) ou encore BERESNEV *et al.* (1989). Il est néanmoins encore nécessaire de linéariser l'équation de Boltzmann autour d'un état d'équilibre avant d'envisager la résolution numérique. L'expression calculée par BERESNEV *et al.* (1989) a l'avantage d'être valable quel que soit le nombre de Knudsen et de prendre en compte à la fois les coefficients d'accommodation et le rapport des conductivités thermiques gaz/particule. Dans le cas d'une accommodation complète ($\alpha_e = \alpha_t = 1$) la force de thermophorèse donnée par BERESNEV *et al.* (1989) s'exprime sous la forme

$$F_{th,B\&C} = -\frac{16}{15} \left[\frac{\alpha f_{11} + f_{21}}{\alpha f_{31} + \left(\alpha + \frac{15PrKn}{4}\right) f_{41}} \right] \sqrt{\frac{\pi m}{2k_B T_g}} R_p^2 k_g (\nabla T)_x, \quad (1.56)$$

où α est le rapport de la conductivité thermique du gaz par celle de la particule, Pr est le nombre de Prandtl et les f_{ij} sont des coefficients tabulés dépendants de Kn le nombre de Knudsen.

Coefficient et vitesse de thermophorèse

Quelle que soit l'approche, on peut utiliser un coefficient sans dimension appelé coefficient de thermophorèse pour exprimer la force de thermophorèse sous la forme compacte suivante :

$$F_{th} = -6\pi\mu_g R_p \frac{K_{th}\nu}{T_g} (\nabla T)_x, \quad (1.57)$$

où K_{th} est le coefficient de thermophorèse qui dépend du nombre de Knudsen Kn , du rapport des conductivités thermiques gaz/particules α et des coefficients d'accommodation α_e et α_m , selon le modèle utilisé.

En écrivant l'équilibre entre la force de thermophorèse et la force de traînée de Stokes corrigée par le coefficient de Cunningham on peut alors calculer la vitesse de thermophorèse d'une particule. La force de traînée subie par une particule se déplaçant à la vitesse v_p dans un fluide au repos s'écrit :

$$F_T = -\frac{6\pi\mu_g R_p v_p}{C_c}, \quad (1.58)$$

où C_c est le coefficient de Cunningham décrit dans le paragraphe précédent qui sert à prendre en compte l'effet de la raréfaction du gaz sur la force de traînée et μ_g est la viscosité dynamique du gaz. En écrivant l'égalité entre les équations 1.57 et 1.58 on obtient l'expression de la vitesse u_{th} d'une particule soumise uniquement à la thermophorèse et à la traînée :

$$u_{th} = -\frac{K_{th}\nu}{\rho} \frac{(\nabla T)_x}{T_g}. \quad (1.59)$$

Cette vitesse de thermophorèse est donc la vitesse propre d'une particule se déplaçant sous l'effet de la thermophorèse dans un gradient de température uniforme $(\nabla T)_x$ dans la direction \vec{x} . Dans le cas d'un gradient non nul dans plusieurs directions toutes les formules précédentes peuvent évidemment être extrapolées à des formes vectorielles, mais dans le cas du dépôt il existe une direction privilégiée dans laquelle le gradient de température est prépondérant : la direction normale à la paroi.

1.3 Dépôt : transfert de particules au voisinage d'une paroi

Lorsqu'une particule entre en contact avec une paroi on observe le phénomène d'adhérence : la particule se fixe fortement sur la surface. Le phénomène de dépôt tel qu'il nous intéresse ici, est l'ensemble des mécanismes qui amènent les particules du cœur de l'écoulement jusqu'à une paroi solide.

1.3.1 Adhésions des particules à une paroi

Les forces qui permettent à une particule de rester fixée à une paroi avec laquelle elle est entrée en contact sont appelées des forces d'adhésion. Deux forces sont citées par BOULAUD *et al.* (1998) comme contribuant à l'adhésion d'une particule à une surface sèche : les forces de van der Waals et les forces électrostatiques.

Les principales forces d'adhésion pour les petites particules sur des surfaces sèches sont les forces de van der Waals. Ce sont les liaisons interatomiques ou intermoléculaires qui assurent la cohésion des matériaux. Des particules de moins de $1 \mu\text{m}$ de diamètre peuvent être retenue sur une paroi par des forces de plus de $0,1 \text{ N}$, ce qui correspond à 10^6 fois la force exercée par la pesanteur sur ces particules. Toutes les forces inter atomiques ou inter moléculaires sont au départ causées par les comportements

des composants des atomes constituant la matière. Il est cependant difficile d'aborder le problème des forces d'adhésion de ce point de vue car trop peu de données sont disponibles. L'approche la plus simple est celle qui décrit les forces qui régissent l'attraction d'un atome ou d'une molécule par un autre atome ou molécule, quel que soit le matériau ou la géométrie. En utilisant cette approche, HAMAKER (1937) dérive l'expression de la force d'attraction entre une particule sphérique de diamètre D et une surface plane :

$$F_{vdW} = \frac{A D}{12 y^2} \quad (1.60)$$

où A est la constante d'Hamaker et y est la distance de séparation entre la particule et la paroi. L'utilisation de cette équation est limitée car les valeurs de y et A sont inconnues en pratique.

On l'a vu précédemment, une particule portant des charges peut subir une force électrostatique lorsqu'elle est placée dans un champ électrique. Ces forces électrostatiques dont l'expression est donnée dans le paragraphe précédent peuvent également jouer un rôle significatif dans l'adhésion des particules à une paroi.

D'autres facteurs affectent l'adhésion des particules à une surface, comme la surface de contact déterminée par les géométries de la particule et de la paroi, ou encore l'humidité ambiante. Mais l'adhésion et le ré-entraînement des aérosols n'est pas l'objet de cette étude, aussi ces effets ne sont pas détaillés ici. On suppose que les particules adhèrent définitivement à la paroi dès qu'elles entrent en contact avec celle-ci et nous nous concentrerons sur l'étude des mécanismes qui amènent les particules au contact de la surface de dépôt.

1.3.2 Modélisation du dépôt de particules

On définit la vitesse de dépôt u_{dep} , aussi appelée efficacité de dépôt, comme le rapport du flux massique de particules vers la surface ϕ_{dep} par la concentration massique de particules dans l'écoulement C :

$$u_{dep} = \frac{\phi_{dep}}{C} . \quad (1.61)$$

Ce paramètre a bien la dimension d'une vitesse. Il est courant de normaliser la vitesse de dépôt par la vitesse de frottement en paroi pour obtenir une vitesse de dépôt sans dimension, souvent utilisée dans la littérature pour présenter des résultats expérimentaux :

$$u_{dep}^+ = \frac{u_{dep}}{u^*} . \quad (1.62)$$

Plusieurs des mécanismes intervenants dans le transport de particules décrits précédemment se trouvent amplifiés au voisinage des parois, du fait de la présence de forts gradients, et jouent donc un rôle important dans le dépôt des particules. Nous négligerons, afin de simplifier notre étude, les forces électrostatiques dont l'influence sur le dépôt peut être importante, notamment pour des particules portant plusieurs

charges électriques comme on peut en trouver en situation d'incendie. La sédimentation contribue fortement au dépôt sur les surfaces horizontales, surtout pour les plus grosses particules, mais elle intervient à de plus grandes échelles temporelles que celles de l'incendie. Nous nous concentrons ici sur dépôt sur des parois verticales. Nous séparerons notre analyse en deux parties, d'une part tous les mécanismes contribuant au dépôt dans des conditions isothermes, d'autre part le dépôt en présence d'un gradient de température à l'interface gaz-paroi entraîné par le phénomène de thermophorèse.

Dépôt en conditions isotherme

Plusieurs catégories de travaux s'intéressent au dépôt d'aérosols en paroi, SIPPOLA *et al.* (2002) recense différentes études expérimentales qui ont été menées sur le dépôt isotherme de particules, dont les résultats sont rassemblés dans la figure 1.8.

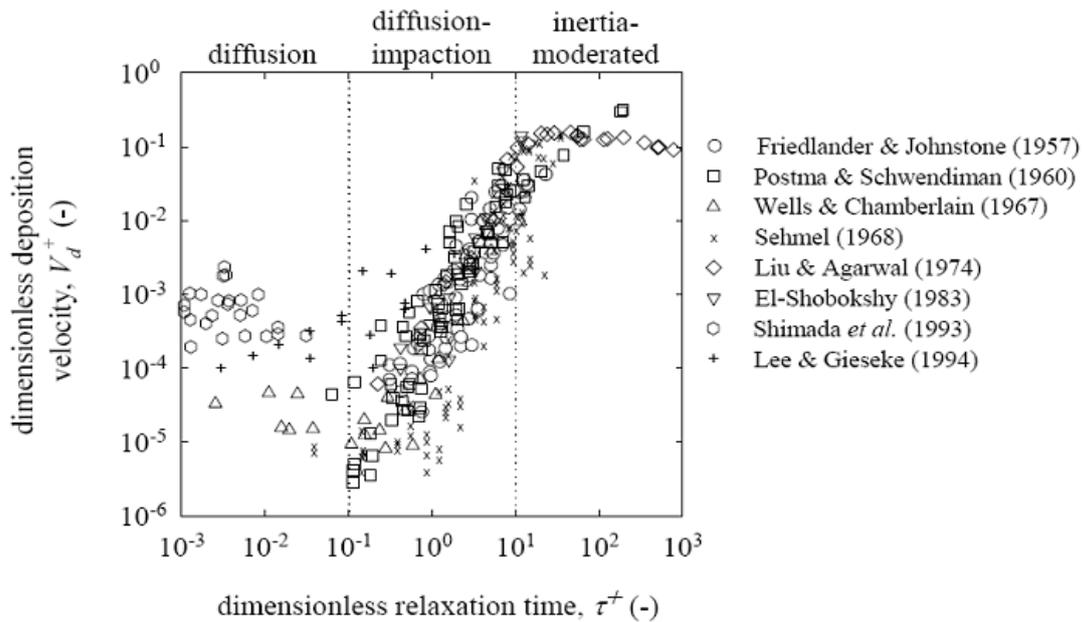


FIGURE 1.8 – Vitesses de dépôt adimensionnées sur paroi verticale mesurées expérimentalement en fonction de l'inertie des particules (SIPPOLA *et al.*, 2002).

On distingue ainsi trois régimes de dépôt, identifiables sur la figure 1.8, en fonction de la taille des particules considérées et des conditions d'écoulement. Chaque modèle (ou une corrélation de dépôt) est généralement adapté à un certain régime de dépôt, dépendant de la taille des particules et des vitesses d'écoulement d'air (par l'intermédiaire de la vitesse de frottement à la paroi). Les trois régimes de dépôt sont les suivants :

Le régime de diffusion correspond à $\tau^+ < 0, 1$. On remarque que les résultats expérimentaux sont très dispersés dans cette zone de la figure 1.8. Grâce à leur très faible inertie les particules sont soumises principalement à la diffusion turbulente puis à la diffusion brownienne qui leur permettent de traverser d'abord la couche turbulente puis la sous-couche visqueuse de l'écoulement pariétal. De nombreux modèles ont été développés pour prendre en compte ces deux phénomènes. Dans ce régime la vitesse

de dépôt ne dépend plus de l'inertie des particules mais de leur nombre de Schmidt $Sc_B = \nu/D_B$ qui est le rapport de la viscosité cinématique du gaz par la diffusivité des particules. Les corrélations pour la vitesse de dépôt adimensionnée dans ce régime sont de la forme

$$u_{dep,dt}^+ = k_1 Sc_B^{-\beta}, \quad (1.63)$$

où k_1 et β sont des constantes déterminées empiriquement par chaque auteur.

Le régime de diffusion-impaction correspond à $0, 1 < \tau^+ < 1$. Dans ce régime de dépôt, la diffusion joue encore un rôle mais les particules ne sont plus assez légères pour suivre complètement les structures turbulentes de l'écoulement. Certaines particules peuvent donc recevoir assez d'énergie pour être projetées sur la paroi à travers la sous-couche visqueuse sans subir de phénomène de diffusion brownienne. Dans ce régime, en conduite cylindrique verticale, les modèles de vitesse de dépôt adimensionnée sont de la forme

$$u_{dep,dt}^+ = k_2 \tau_p^{+2} \quad (1.64)$$

où k_2 est une constante déterminée empiriquement.

Le régime inertiel dans le cas $\tau^+ > 1$. Dans ce cas, le moteur principal du dépôt est la projection des particules par des structures tourbillonnaires de la zone logarithmique de l'écoulement, là où la turbulence est pleinement développée. On observe une vitesse de dépôt d'aérosol constante en fonction de l'inertie des particules ce qui donne une loi de type :

$$u_{dep,dt}^+ = k_3 \quad (1.65)$$

où k_3 est une constante déterminée empiriquement.

On donne à titre d'exemple le modèle de dépôt utilisé par le logiciel FDS pour la vitesse de dépôt dans les régimes de diffusion, inertiel et de diffusion-impaction. C'est le modèle empirique proposé par MCCOY *et al.* (1977) d'après la mesure de taux de dépôt de gouttelettes dans un écoulement diphasique annulaire. La vitesse de dépôt est donnée par :

$$u_{dep,dt}^+ = \begin{cases} 0,086 Sc_B^{-0,7} & \text{si } \tau^+ < 0,2 \\ 3,5 \times 10^{-4} \tau^{+2} & \text{si } \tau^+ \in [0,2 ; 22,9] \\ 0,17 & \text{si } \tau^+ > 22,9 \end{cases} . \quad (1.66)$$

C'est un modèle classique qui respecte les canons décrits dans les paragraphes précédents des modèles de dépôt existants pour chaque régime. L'utilisation de ce modèle de dépôt isotherme dans le code de simulation numérique FDS a été comparé par FLOYD *et al.* (2016) aux essais réalisés par SIPPOLA *et al.* (2004) au cours desquels le dépôt de particules a été mesuré dans une conduite de ventilation. La figure 1.9 montre que la vitesse de dépôt en conditions isotherme est sous estimée de 45%.

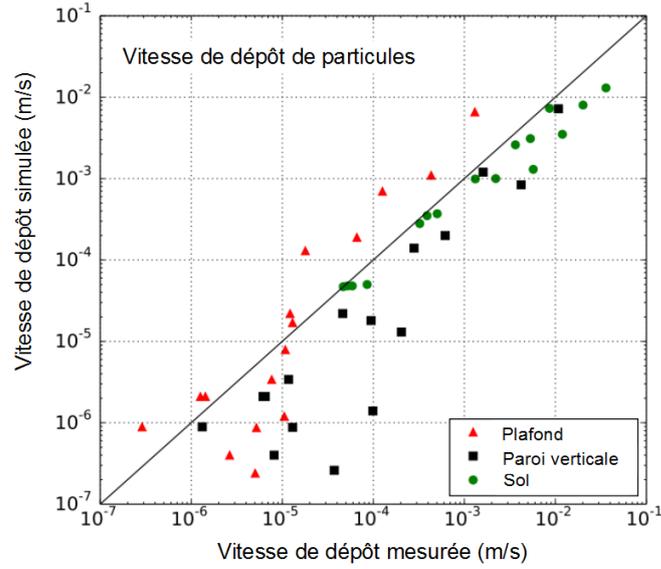


FIGURE 1.9 – Comparaison entre la vitesse de dépôt mesurée par SIP-POLA *et al.* (2004) et celle prédite par simulation numérique FDS. (FLOYD *et al.*, 2016).

Dépôt en présence d'un gradient de température

Dans des situations d'écoulement non isothermes, le phénomène de thermophorèse décrit dans le paragraphe précédent apparaît. Dans le cas où le gaz est plus chaud que la paroi, ce qui est le cas dans les situations d'incendie, il existe alors un gradient de température dans la direction normale à celle-ci. Le phénomène de thermophorèse, qui crée une force sur les particules dans la direction contraire au gradient de température, contribue alors au dépôt des particules. Nous allons voir que les gradients de température mis en jeu par un incendie rendent la thermophorèse prépondérante dans le dépôt des particules sur toutes les surfaces verticales.

L'analyse de BATCHELOR *et al.* (1985) que l'on peut considérer que la vitesse de dépôt liée à la thermophorèse est identique à vitesse de thermophorèse, calculée en considérant une particule en régime stationnaire soumise uniquement à la force de thermophorèse et à la force de traînée, dans la direction normale à la paroi. La vitesse de dépôt par thermophorèse vaut donc :

$$u_{dep,th} = \vec{v}_{th} \cdot \vec{n} = -\frac{K_{th}\nu}{T_{gaz}} \left(\vec{\nabla}T_{gaz} \cdot \vec{n} \right)_{paroi}, \quad (1.67)$$

où \vec{n} est la direction normale à la paroi, ν est la viscosité cinématique du gaz et T_{gaz} est la température du gaz au voisinage de la paroi et K_{th} est le coefficient de thermophorèse calculé grâce au modèle adapté et fonction des propriétés des particules considérées.

Contribution de tous les phénomènes au dépôt de particules

Si on fait l'hypothèse que les différents phénomènes de dépôt sont indépendants et additionnels, on peut comparer leur influence respective dans des conditions thermiques représentatives d'une situation d'incendie. La figure 1.10 représente les vitesses de dépôt adimensionnées calculées pour

$$\Delta T = T_{gaz} - T_{paroi} = 50\text{ }^{\circ}\text{C} \quad u_{gaz} = 1\text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad u^* = 0,1\text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (1.68)$$

Dans les gammes de diamètres représentatifs des diamètres de giration des particules de suie, soit de 50 nm à 2 μm la vitesse de dépôt par thermophorèse est supérieure à la vitesse de dépôt isotherme, due ici au phénomène de diffusion, d'un facteur 10 à 100. Le phénomène de thermophorèse est donc bien largement prépondérant dans le dépôt de particules lors d'un incendie, c'est donc ce mode de dépôt sur le quel nous nous attarderons dans la suite.

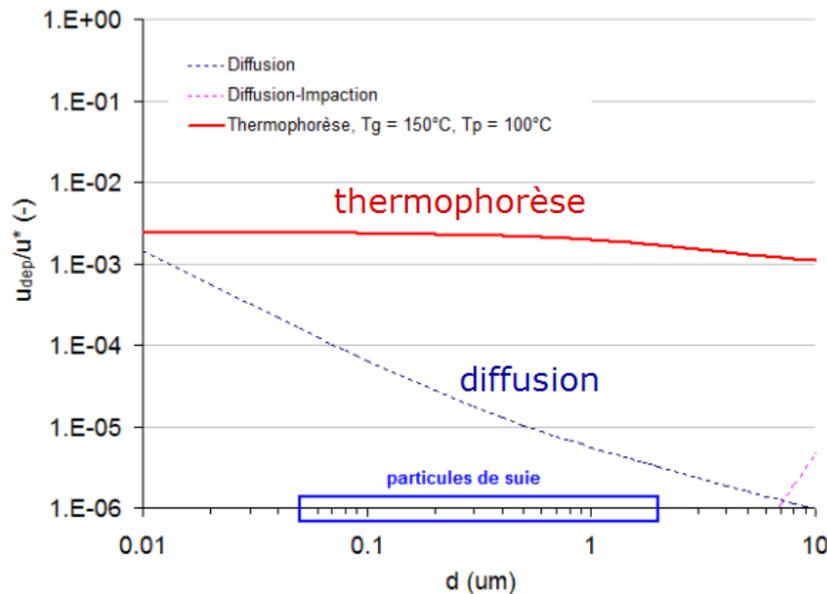


FIGURE 1.10 – Comparaison des modes de dépôt ($\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$)

1.3.3 Application aux particules de suie

On souhaite savoir dans quelle mesure il est possible d'appliquer les modèles de thermophorèse, développés et validés pour des sphères, à des particules de suies dont la morphologie, décrite dans la première partie de ce chapitre, se rapproche plus de celle d'un agrégat fractal.

Des mesures de vitesse de thermophorèse pour des agrégats quasi-monodispersés et pour des tailles de diamètre de mobilité électrique allant de 30 nm à 600 nm issus du générateur CAST ont été effectuées par BRUGIÈRE *et al.* (2014). En comparant les vitesses de thermophorèse d'agrégats de diamètres de mobilité électrique allant de 30 à

600 nm à celles obtenues avec les billes de latex, on remarque un écart significatif, pouvant atteindre 65 % entre une bille de latex et un agrégat de 500 nm. De plus, à l'inverse des sphères, la vitesse de thermophorèse des agrégats augmente lorsque leur taille augmente. Cette différence de comportement est attribuable à la morphologie fractale des agrégats issus du CAST, semblables à des particules de suie. On constate que la vitesse de thermophorèse est fortement dépendante du nombre de particules primaires de l'agrégat, auquel elle est reliée par une loi de type puissance.

Les mesures de vitesse de thermophorèse réalisées par SUZUKI *et al.* (2009) semblent confirmer la dépendance de la vitesse de thermophorèse d'un agrégat à la taille et au nombre de ses particules primaires. D'après ses travaux, la vitesse de thermophorèse augmente en effet avec la taille des agrégats, jusqu'à atteindre la valeur de vitesse obtenue dans le domaine moléculaire grâce à l'équation de Waldman. Il est cependant impossible de distinguer grâce à ces mesures l'influence de la taille des particules primaires de celles de la masse volumique de l'agrégat.

Les résultats numériques de MACKOWSKI (2004) ont montré que bien qu'elle soit indépendante de la dimension fractale de l'agrégat, la vitesse de thermophorèse augmentait avec le nombre de particules primaires. Cet effet pouvant être justifié d'après lui par l'augmentation du nombre de réflexion moléculaire sur un agrégat composé d'un plus grand nombre de particules primaires. Les résultats de BRUGIÈRE *et al.* (2014) et ceux de MACKOWSKI (2004) présentent un léger écart qui peut être attribué aux deux hypothèses utilisées par ce dernier, qui considère que l'orientation de l'agrégat est constante, fixée aléatoirement, et que les particules primaires composant l'agrégat ne peuvent pas se recouvrir (contact ponctuel, voir figure 1.12).

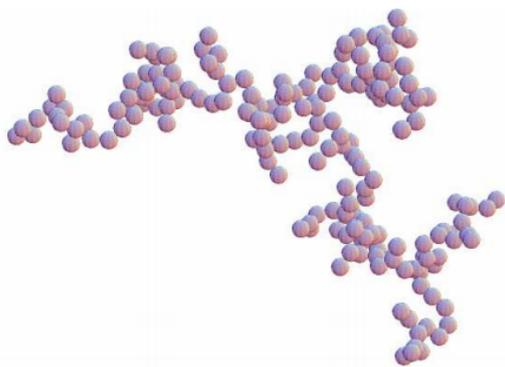


FIGURE 1.11 – Exemple d'agrégat numérique étudié par MACKOWSKI (2004)

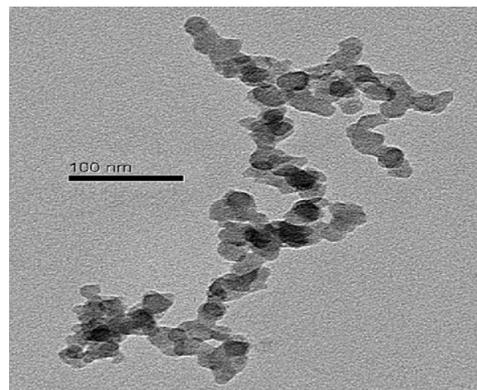


FIGURE 1.12 – Exemple d'agrégat produit par le CAST étudié par BRUGIÈRE *et al.* (2014)

Ces résultats sont confirmés par les coefficients de thermophorèse obtenus expérimentalement par MESSERER *et al.* (2003) sur des agrégats issus du générateur PALAS, qui montrent également une augmentation de la vitesse de thermophorèse des agrégats sous forme de loi de puissance. On observe un bon accord entre les résultats de BRUGIÈRE *et al.* (2014) et ceux de MESSERER *et al.* (2003) malgré la différence de la taille

des particules primaires entre les agrégats produits par le CAST et ceux produits par le PALAS. Cet accord irait de plus dans le sens d'une non influence de la taille des particules primaires, pour des d_{pp} inférieurs à 20 nm, sur la vitesse de thermophorèse des agrégats.

Les trois paramètres influent sur la vitesse de thermophorèse d'une particule sont l'interaction molécules de gaz et la surface de la particule, le ratio de la conductivité thermique du gaz sur celle de la particule et la force de traînée de la particule. Si dans le cadre d'un agrégat l'interaction molécule/particule peut se traduire par une augmentation de du nombre de réflexion moléculaire sur l'agrégat lorsque son nombre de particules primaires augmente (MACKOWSKI, 2004), on peut s'interroger sur l'influence de la prise en compte de la morphologie fractale de la particule lors de l'évaluation de sa conductivité thermique et de sa force de traînée.

La prise en compte de la morphologie des agrégats dans la force de traînées, en utilisant des méthodes de modélisation disponible dans la littérature, BRUGIÈRE *et al.* (2014) ne parvient pas à justifier l'écart observé entre les billes de latex et les agrégats.

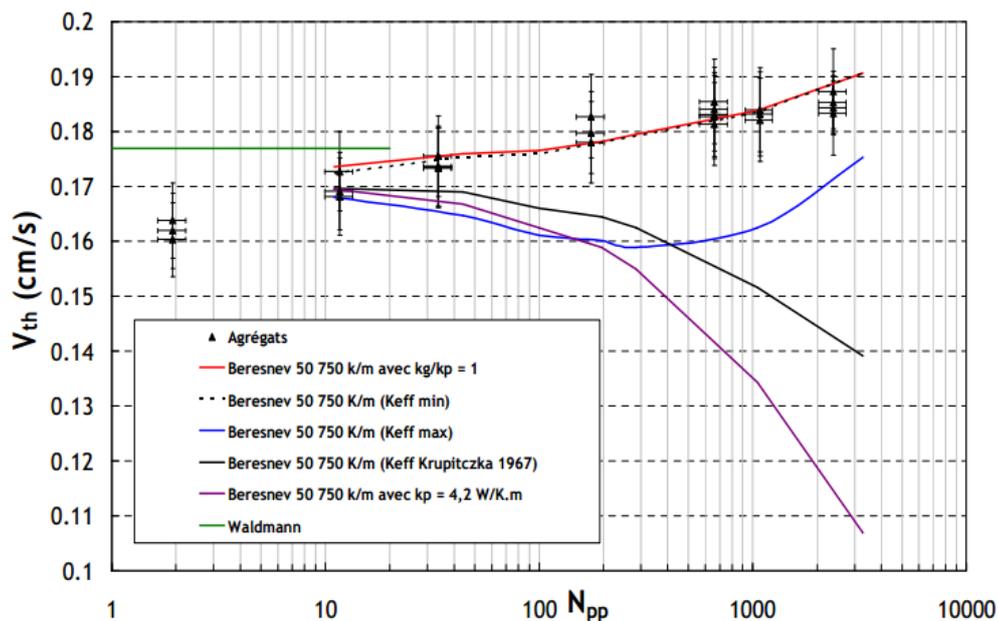


FIGURE 1.13 – Vitesse de thermophorèse expérimentale des agrégats comparées au modèle de Beresnev pour différentes façons de calculer la conductivité thermique de la particule (BRUGIÈRE *et al.*, 2014)

En utilisant les relations de TAVMAN (1996) et KRUPITCZKA (1967) il est possible, en considérant un agrégat comme une particule sphérique avec une porosité homogène, de calculer une conductivité thermique effective de la particule. Le modèle de Beresnev associé à la faible conductivité thermique effective ainsi obtenue permet d'obtenir une bonne estimation de la vitesse de thermophorèse des agrégats dans le cas des mesures effectuées par BRUGIÈRE *et al.* (2014). Cela suggère que la conductivité thermique des particules primaires a peu d'influence sur la vitesse de thermophorèse d'un agrégat. Dans le cadre de l'estimation de la vitesse de thermophorèse, il peut donc sembler justifié d'assimiler la conductivité thermique des agrégats de suie à celle du gaz ambiant,

compte tenu de leur faible compacité. Dans ce cas on a un rapport des conductivités thermiques gaz/particule $\alpha = k_g/k_p$ qui vaut 1.

Les rares travaux expérimentaux sur le sujet ne sont pas suffisants pour comprendre complètement le phénomène de thermophorèse appliqué aux agrégats. Ainsi, l'étude expérimentale de SUZUKI *et al.* (2009) montre une augmentation de la vitesse de thermophorèse d'agrégats en fonction de leur taille pour des particules supérieures à $1 \mu\text{m}$ et sans une étude de la morphologie fractale des agrégats. Pour le régime intermédiaire, MESSERER *et al.* (2003) montrent lors d'une étude de dépôt par thermophorèse des agrégats que le coefficient de thermophorèse augmente légèrement avec la taille des agrégats (diamètre de mobilité électrique) et est très proche de la valeur du coefficient de Waldmann. Les auteurs en concluent que le coefficient de thermophorèse est indépendant de la taille des agrégats mais sans faire d'étude morphologique des agrégats. Par exemple, les auteurs ne donnent aucune information sur le nombre de particules primaires, ni élément direct permettant de calculer le nombre de particules primaires N_{pp} .

1.3.4 Études expérimentales du dépôt de particules de suie

Les données expérimentales sur le dépôt de particules de suie transportées par des fumées de combustion dans des conditions où la thermophorèse est dominante existent mais sont pour l'instant limitées à des études expérimentales à petite échelle.

L'étude préliminaire de BELLIVIER *et al.* (2012), effectuée dans le cadre du projet "fumée" du LCPP en collaboration avec l'IRSN, a permis de récolter des données expérimentales sur le dépôt de particules de suies produites par un brûleur acétylène sur des parois verticales, dans des conditions thermiques mesurées. La comparaison du dépôt obtenu sur trois cibles à trois températures de parois différentes ont permis de mettre en évidence expérimentalement l'importance de la thermophorèse sur le dépôt des suies.

Une seconde étude expérimentale réalisée par RIAHI *et al.* (2011) avait pour objectif d'étudier le dépôt de suie par thermophorèse dans la couche de fumée produite par différents combustibles (PMMA, Essence, Polypropylene). Des filtres en fibre de verre plaqués sur les parois verticales d'une hotte ont ainsi été utilisés pour récolter les dépôts de suie et mesurer par une méthode gravimétrique la valeur de $m''_{measured}$ en $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$.

Ces mesures ont ensuite été comparées à la valeur $m_{predicted}$ prédite par le modèle suivant, qui considère la thermophorèse comme unique moteur de dépôt :

$$m_{predicted} = \int_0^t V_{th}(t)C_s(t)dt, \quad (1.69)$$

où C_s est la concentration de suie dans les fumées mesurées à l'extraction de la hotte par une méthode optique. La vitesse de dépôt par thermophorèse V_{th} est calculée en supposant que les particules se situent dans le cas limite $Kn \rightarrow +\infty$ de la formule de Waldman. Il écrit donc :

$$V_{th}(t) = \frac{0,55\nu}{T} \frac{dT}{dx}. \quad (1.70)$$

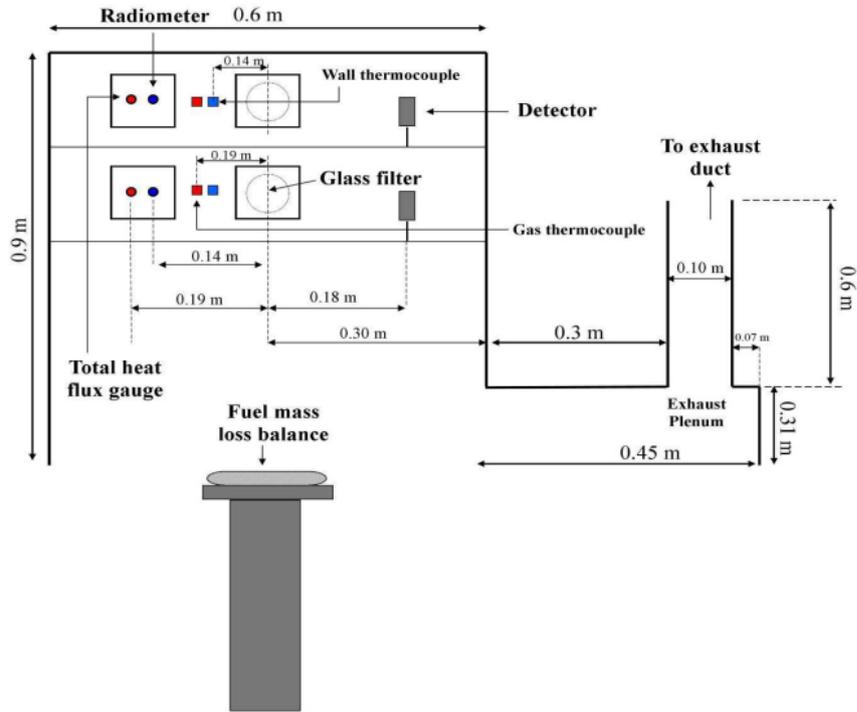


FIGURE 1.14 – Dispositif de mesure du dépôt de suie utilisé par RIAHI *et al.* (2011)

La température T utilisée est la température de film, c'est à dire la température moyenne entre la température de paroi et la température des fumées, et le gradient de température à la paroi dT/dx est évalué expérimentalement de façon précise grâce à la mesure du flux thermique radiatif q''_{rad} et total q''_{total} reçus par la paroi. On a ainsi :

$$V_{th}(t) = \frac{0,55\nu}{T} \frac{(\dot{q}''_{total} - \dot{q}''_{rad})(T_{gaz} - T_{paroi})}{k_{gas}(T_{gaz} - T_{fluxmetre})}, \quad (1.71)$$

où $T_{fluxmetre}$ est la température du fluxmètre radiatif, refroidi à l'eau, k_{gas} est la conductivité thermique de l'air à T .

Grâce à ce modèle, RIAHI *et al.* (2011) obtient un très bon accord entre ses données de dépôt expérimentales et le dépôt prédit comme le montre la figure 1.15.

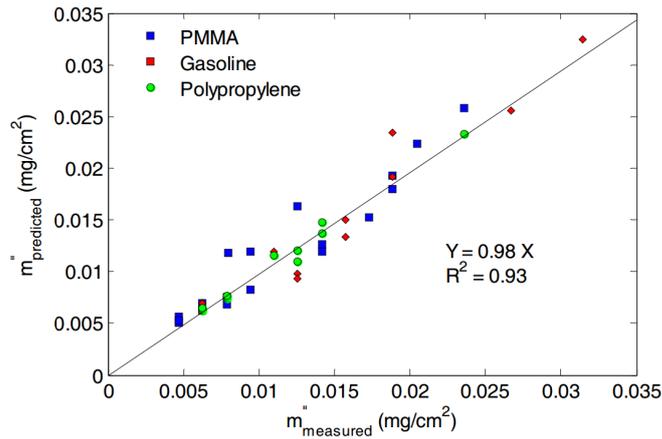


FIGURE 1.15 – Dépôt prédit par thermophorèse en fonction du dépôt mesuré pour trois combustibles. (RIAHI *et al.*, 2011)

1.4 Bilan sur l'état de l'art

Nous avons d'abord fait la synthèse des connaissances disponibles sur la nature et les propriétés spécifiques aux particules de suie. Si des caractéristiques communes à tous les types de suies ont été identifiées, leurs propriétés physiques et leur morphologie varient en fonction du combustible et des conditions de combustion dont elles sont issues. Contrairement aux particules de suie produites par des moteurs par exemple, la suie d'incendie a été l'objet de moins d'études et ses propriétés sont moins connues, ce qui rend plus difficile la modélisation de phénomènes physiques subis par ces particules.

Une fois ce contexte posé nous sommes intéressés aux outils donnés par la littérature pour comprendre et modéliser le transport des particules en général. La plupart des études et modèles ont été développés pour le cas de particules sphériques. Ces modèles mêmes s'ils sont à première vue inadaptés aux particules de suie qui ne sont pas sphériques, nous ont permis de dégager des tendances et d'identifier les phénomènes physiques dont l'effet est prépondérant sur le dépôt dans des conditions propres à l'incendie (forts gradients de température, échelles de temps relativement courtes ...).

Nous avons centré la troisième et dernière partie de cette revue bibliographique sur le mécanisme principal qui contribue au dépôt de suie sur les parois verticales et horizontales orientées vers le bas : la thermophorèse créée par les gradients de température. Après avoir présenté les méthodes de modélisation de la contribution de ce phénomène au dépôt de particules nous avons vu les moyens fournis par la littérature pour les appliquer aux particules de suie.

Malgré le nombre d'études consacrées au dépôt d'une part et aux particules de suie d'autre part, peu de travaux se consacrent spécifiquement au dépôt de suie. Nous avons en outre constaté qu'aucune étude expérimentale ne fournit de données quantitatives de dépôt de suie à échelle réelle, ce qui empêche de valider les modèles vus dans ce paragraphe et le précédent dans le cas de l'incendie. C'est finalement ce qui a motivé la

1.4. Bilan sur l'état de l'art

réflexion sur une première campagne expérimentale qui permettrait d'évaluer la capacité des modèles de l'état de l'art à prédire le dépôt de suie.

Chapitre 2

Étude du dépôt à échelle réelle dans un local

3.1	Description et analyse du montage expérimental	89
3.1.1	Mise en œuvre des essais	91
	Planification des expériences	91
	Foyer utilisé	91
	Caractérisation expérimentale de la couche de fumée	93
3.1.2	Simulation numérique de l'essai	95
	Maillage, parois et terme source	95
	Hauteur de la couche de fumée	96
	Vitesse d'entrée des gaz frais	97
	Évaluation numérique de la vitesse d'écoulement des fumées	98
3.1.3	Bilan	100
3.2	Étude expérimentale du dépôt de suie	101
3.2.1	Instrumentation des essais	101
	Cibles de dépôt	101
	Température des cibles	103
	Température des fumées au voisinage des cibles	104
	Concentration de suie dans les fumées au voisinage des cibles	105
3.2.2	Exploitation des résultats expérimentaux	106
	Dépôt de suie sur cibles non refroidies	106
	Dépôt de suie sur cibles refroidies	107
	Dilution des fumées entre la zone 1 et la zone 2	108
	Pertes thermiques entre la zone 1 et la zone 2	111
3.3	Conclusion	115

2.1. Dispositif expérimental

Comme nous l'avons vu dans l'état de l'art, de nombreux travaux ont été effectués sur le dépôt de particules et sur les suies d'incendie. Cependant, peu d'études abordent le sujet du dépôt des particules de suie lors d'un incendie. Si des modèles existent, l'absence de données à échelle réelle empêche de valider leur utilisation pour prédire le dépôt de suie. C'est ce qui nous a poussé à lancer cette première campagne d'essai en Novembre 2014. L'objectif est de mesurer le dépôt de suie sur une paroi verticale à l'intérieur d'un local, dans la couche de fumée produite par un foyer simple et bien ventilé : cet essai permet de s'approcher de l'échelle réelle tout en étant suffisamment académique pour être reproductible.



FIGURE 2.1 – Photographie du container maritime utilisé.

La première partie de ce chapitre décrit l'essai, la position des capteurs, et présente les résultats expérimentaux obtenus. Dans une seconde partie, la simulation numérique de l'essai sera détaillée, ses paramètres d'entrée et ses résultats. Nous analyserons ensuite les résultats expérimentaux sous deux angles différents. Nous nous intéresserons d'abord à la comparaison des champs de température, des champs de concentration de suie et des masses de suie déposées aux résultats de la simulation numérique réalisée grâce au logiciel Fire Dynamics Simulator (version 6.1.1). Dans la troisième et dernière partie nous nous intéresserons aux résultats donnés par d'autres modèles de dépôts, en utilisant les données expérimentales de concentration et de température comme paramètres d'entrée.

2.1 Dispositif expérimental

2.1.1 Aménagement du local d'essai

Le local d'essai a été aménagé dans un caisson maritime de 20 pieds (dimensions extérieures normalisées 6 m x 2,4 m x 2,6 m) en acier. Un local, représenté sur la figure 2.2 étant réservé à la métrologie, la longueur efficace de la zone d'essai est de 4 m. Celle-ci a

donc une surface au sol de 11 m² et une hauteur sous plafond de 2,20 m. L'aménagement intérieur du container est représenté schématiquement sur la figure 2.2.

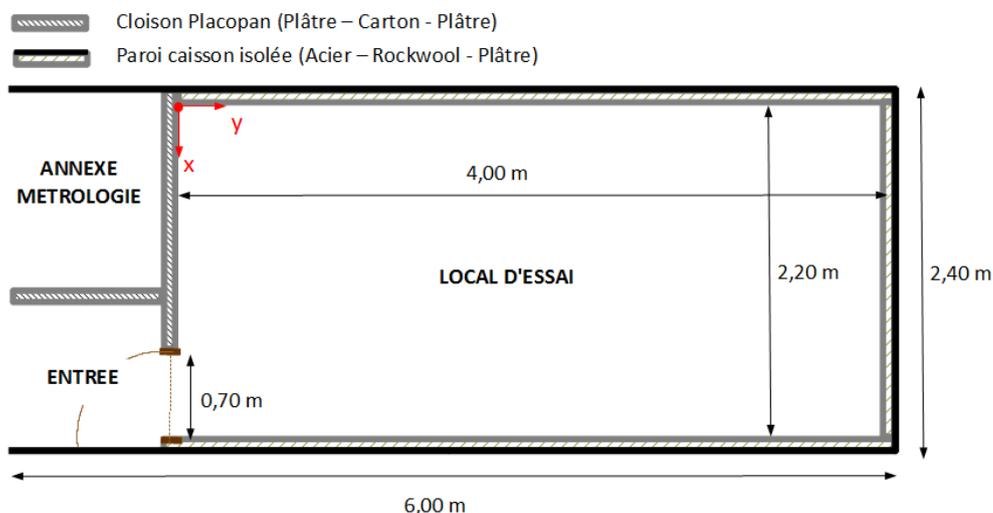


FIGURE 2.2 – Vue du dessus de l'aménagement et de l'isolation du local d'essai.

Les parois métalliques du caisson sont protégées à l'intérieur par 13 mm de plâtre (BA13) et 50 mm d'isolant thermique (laine de roche Rockwool®). Le sas entre le local d'essai et l'annexe métrologie est construit en cloison Placopan® : un panneau d'épaisseur totale 50 mm constitué de deux plaques de plâtre épaisses de 10 mm séparées par une structure cartonnée alvéolaire. Le tableau 4.1 donne les caractéristiques thermiques des matériaux constituant les parois et le plafond.

Matériaux	Epaisseur m	Masse volumique kg/m ³	Conductivité thermique W/(m.K)	Chaleur spécifique kJ/(kg.K)
Plâtre	0,013	850	0,25	0,8
Laine de roche	0,050	70	0,042	1,0
Placopan®	0,050	360	-	-

TABLE 2.1 – Caractéristiques thermiques des matériaux constituant les parois et le plafond.

La porte installée entre le local et l'entrée est ouverte, laissant une ouverture de 0,7 m de large par 1,6 m de haut. Le linteau de l'ouverture a été abaissé à 0,60 m sous le plafond par l'ajout d'un imposte amovible pour favoriser la formation d'une couche de fumée dans le local. Cet élément réduisant la hauteur de la porte de 0,50 m (voir figure 2.1) a été enlevé à la fin de chaque essai pour accélérer le désenfumage du local et permettre à un opérateur de pénétrer sans risque à l'intérieur du local.

2.1.2 Conditions initiales.

L'essai est répété trois fois afin de compenser la difficulté de contrôler complètement les conditions ambiantes. C'est couramment le cas lors de campagnes d'essais

2.1. Dispositif expérimental

à échelle réelle ayant lieu en extérieur par exemple celles réalisées par BELLIVIER *et al.* (2013) ou encore JOHANSSON *et al.* (2015). Les résultats obtenus lors des trois essais nous donnent une enveloppe expérimentale à partir de laquelle il est possible d'évaluer les résultats donnés par simulation numérique, ou par la modélisation théorique du dépôt décrite dans le premier chapitre. On estime ainsi prendre en compte l'incertitude liée à la variabilité de ces conditions ambiantes (pression atmosphérique, température, vent, ...).

Pour des raisons d'organisation, les trois essais ont été réalisés à la suite au cours d'une même journée (à 11h33, 13h52 et 15h16 respectivement). Le local d'essai n'a donc pas eu le temps de refroidir complètement entre chaque essai. Les conditions initiales des trois essais ne sont par conséquent pas totalement identiques et sont précisées pour chaque essai dans le tableau 2.2. Pour atténuer l'écart, le local a été préchauffé avant le premier essai par un foyer identique à celui utilisé lors des essais. On observe que la température dans le local est stratifiée dès le début des essais avec une différence de température entre la zone chaude et la zone froide de 14 à 20 °C.

		Essai 1	Essai 2	Essai 3
T gaz (°C)	$z = 2,10\text{ m}$	29	33,7	42,3
	$z = 1,10\text{ m}$	15,2	18,5	21,8
Masse de combustible (kg)		1,42	1,41	1,42

TABLE 2.2 – Conditions initiales de chaque essai.

L'instant $t = 0$ correspond à l'allumage du foyer (instantané au contact de la flamme de la torche). Un essai est considéré comme terminé lorsque un opérateur notifie qu'aucune flamme n'est plus visible. La durée de chaque essai, ainsi que le moment de l'enlèvement du panneau obstruant le haut de la porte pour accélérer le désenfumage, est reportée sur le tableau 2.3. Le moment de l'extinction concorde avec la mesure d'une masse de combustible nulle (voir figure 2.5). La différence de durée observée entre les trois feux (environ 30 secondes de moins à chaque essai) ainsi que les différences de températures observées peuvent s'expliquer par la différence de conditions initiales entre chaque essai : une température ambiante plus élevée à $t = 0$ entraîne une consommation plus rapide du combustible et un dégagement de chaleur plus important lors de la combustion.

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
$t_{\text{extinction}}$	1285 s	1255 s	1220 s
	21 min 25 s	20 min 54 s	20 min 20 s
$t_{\text{désenfumage}}$	1405 s	1375 s	1320 s
	23 min 25 s	22 min 55 s	22 min 00 s

TABLE 2.3 – Durée et désenfumage pour chaque Essai.

Malgré ces conditions initiales qui diffèrent entre chaque essai, le paragraphe suivant montre que l'activité du foyer utilisé est répétable d'un essai à l'autre.

2.1.3 Foyer utilisé.

Dimensionnement du foyer.

Le foyer utilisé lors de ces essais consiste en 2 L d'heptane liquide combustible versés dans un bac métallique rond de 22,5 cm de diamètre et 10 cm de haut (voir figure 2.3). Le bac est installé au fond du local d'essai sur une balance protégée thermiquement par de la laine de roche et du plâtre. Il est donc légèrement surélevé, le centre de la surface de combustible étant situé à 35 cm du sol, 1,1 m des parois latérales et 0,90 m du fond du local comme le montre la figure 2.4. L'énergie d'activation est apportée par la flamme d'une torche en tissu qui a été au préalable imbibée du même heptane et enflammée par un briquet. Ce foyer présente l'avantage d'avoir une surface combustible quasiment constante au cours du temps et d'être bien documenté dans la littérature.



FIGURE 2.3 – Allumage du bac d'heptane

La surface $A = 0,04 \text{ m}^2$ du foyer est suffisamment grande pour que le taux de perte de masse du foyer soit donné par la relation de BABRAUSKAS (2002) pour un combustible liquide :

$$\dot{m}_{th} = m''_{\infty} A (1 - e^{-kD}), \quad (2.1)$$

où D est le diamètre du bac. Le coefficient d'extinction corrigé k et le taux de perte de masse par unité de surface asymptotique (pour un diamètre de bac infini) m''_{∞} sont des constantes empiriques dépendantes du combustible. On trouve pour l'heptane dans la littérature :

$$\dot{m}''_{\infty} = 0,101 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{et} \quad k = 1,1 \text{ m}^{-1}. \quad (2.2)$$

Ce qui nous permet de calculer le taux de perte de masse théorique du foyer :

$$\dot{m}_{th} = 0,88 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (2.3)$$

En utilisant 2 L d'heptane liquide de densité de $710 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, soit 1,42 kg de combustible,

2.1. Dispositif expérimental

on s'attend donc à des essais d'une durée de l'ordre de 26 min. En supposant le foyer bien ventilé et les conditions de combustion optimales, on déduit du taux de perte de masse la puissance du foyer :

$$\dot{q}_{th} = \Delta h_c \dot{m}_{th} , \quad (2.4)$$

où $\Delta h_c = 44,6 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ est la chaleur dégagée par la combustion de l'heptane donnée par la littérature. Dans le cas de notre foyer de 22,5 cm de diamètre, ces corrélations nous permettent de prévoir que notre foyer a une puissance théorique estimée à

$$\dot{q}_{th} = 40 \text{ kW} . \quad (2.5)$$

Ces estimations supposent que la puissance du foyer est constante au cours du temps, or on observe en pratique que la puissance d'un feu de bac évolue en trois phases. Après une croissance rapide, le foyer atteint un régime établi suivi d'un bref pic de puissance avant l'extinction qui correspond à la disparition de la totalité du combustible.

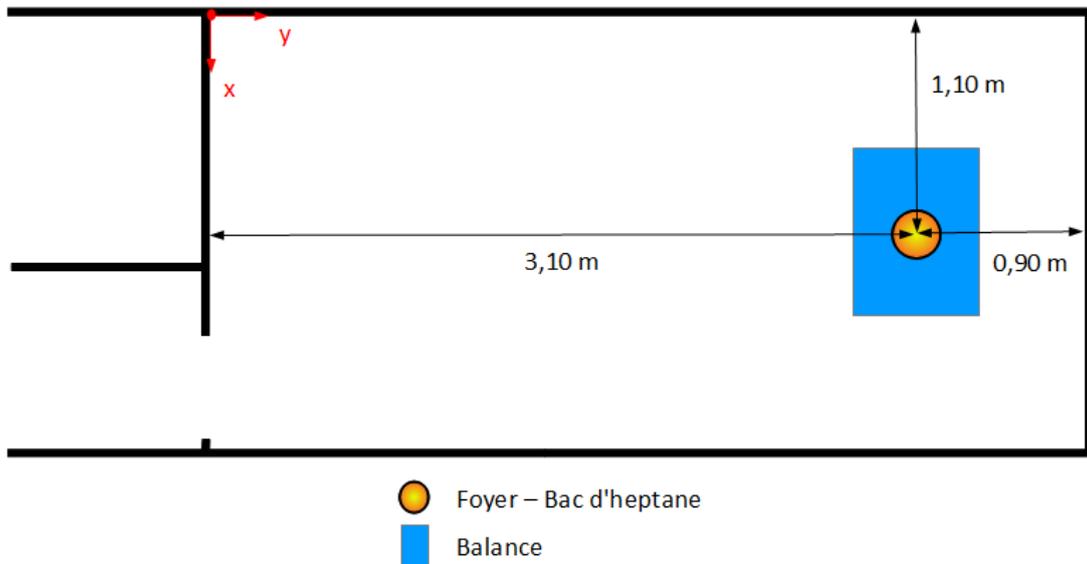


FIGURE 2.4 – Emplacement du foyer et de la balance dans le local.

Puissance du foyer mesurée expérimentalement.

Au cours de chaque essai, l'évolution de la masse du foyer a été mesurée par la balance sur laquelle est installé le bac de combustible. La mesure de perte de masse lors de l'essai 2 a été perdue à cause d'une défaillance matérielle, seules les mesures de masse de combustible réalisées lors des essais 1 et 3 seront présentées par la suite et incorporées dans les grandeurs moyennes. La balance a une sensibilité de 10 g. Cette faible résolution donne une masse qui diminue en paliers de 10 g, comme le montre la figure 2.5. Grâce à cette mesure il est possible de calculer la vitesse de perte de masse de combustible m_{exp} obtenue expérimentalement pour la relier à la puissance du foyer grâce à la formule 2.4. La vitesse de perte de masse, représentée en moyenne des essais

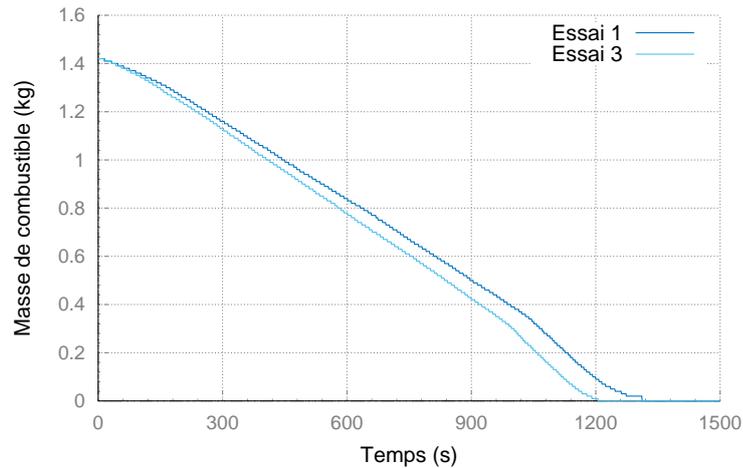


FIGURE 2.5 – Mesure la masse de combustible au cours des essais.

1 et 3 sur la figure 2.6, est supérieure à la vitesse de perte de masse prévue par la théorie $\dot{m}_{th} = 0,88 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui est cohérent avec la durée des essais, plus courte que les 26 minutes attendues. La puissance mesurée est donc supérieure à celle estimée théoriquement du fait du rayonnement des parois non pris en compte dans notre estimation, qui considère le feu de bac en milieu libre.

La puissance du foyer (proportionnelle à sa vitesse de perte de masse), est plus élevée pour l'essai 1 que pour l'essai 3, à quantité initiale de combustible et surface de foyer identique, ce qui est cohérent avec la diminution de la durée des essais. L'essai 3 étant plus chaud à l'état initial, il est logique que le combustible reçoive un flux de chaleur plus important qui entraîne une vaporisation plus rapide du combustible.

Le premier palier de vitesse de perte de masse est proche d'un essai à l'autre essais ($0,112 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ et $0,119 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ respectivement). Il commence dès 240 s après l'allumage et dure 720 s soit 50 % de la durée totale de l'essai. Le second palier en fin d'essai est plus élevé ($0,00164 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ et $0,00162 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ respectivement pour l'essai 1 et l'essai 3). Ce dernier est atteint 1000 s après l'allumage et dure environ 200 s avant que la puissance ne chute rapidement jusqu'à l'extinction qui a lieu au bout d'environ 1250 s.

Les quatre phases précédentes correspondent respectivement à la phase de croissance du feu, la phase de régime établi, le pic de croissance et la phase de décroissance suivie par l'extinction du feu. La combustion et la vaporisation de l'heptane sont entretenues tout au long de l'essai par le flux reçu de la flamme, des parois du local mais également des parois métalliques du bac d'heptane. Lorsque le niveau du liquide diminue, le flux reçu venant des bords du bac augmente et induit ce pic de puissance.

Malgré les légères différences citées précédemment liées aux conditions initiales, l'évolution de la perte de masse représentée sur la figure 2.5 montre que l'activité du foyer est répétable entre les essais.

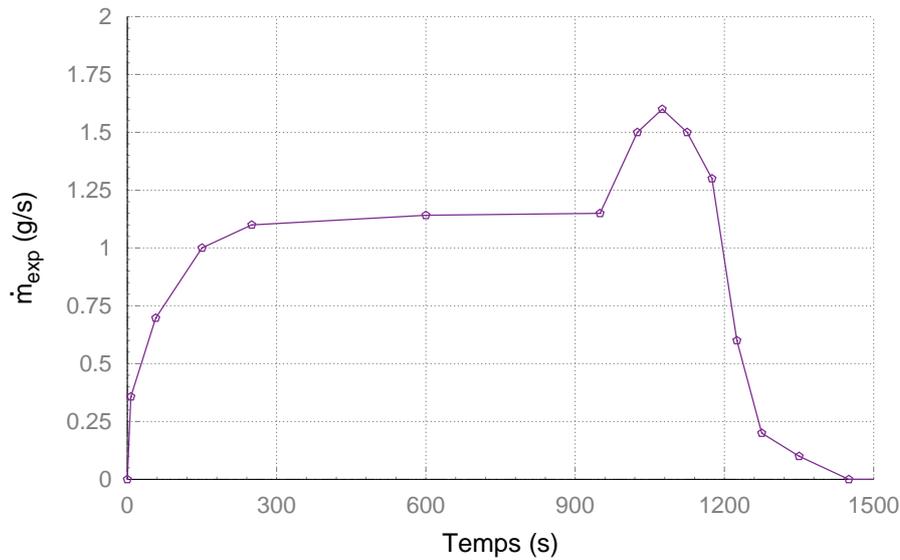


FIGURE 2.6 – Vitesse de perte de masse calculée pour un foyer moyen.

2.1.4 Mesures réalisées dans le local.

L'essai a été instrumenté de façon à mesurer d'une part les températures et la concentration de suie dans la couche de fumée qui donnera lieu au dépôt et d'autre part la température dans le panache. De cette façon, on obtient un jeu de données complet pour la confrontation avec la simulation numérique de l'essai. La disposition des capteurs dans le local d'essai est représentée sur les figures 2.7 et 2.8.

Mesure de températures

Quatre thermocouples positionnés sur un axe vertical et un thermocouple placé au-dessus du foyer permettent de contrôler les conditions de température dans le local. Les thermocouples utilisés sont de type K (Chromel/Alumel) et ont un diamètre 1,5 mm. Les quatre altitudes de mesure de l'arbre de thermocouples sont représentées sur la vue en coupe de l'instrumentation (figure 2.7). Tous les thermocouples sont disposés sur le même axe vertical, en $x = 0,07$ m et $y = 0,80$ m, ils sont donc tous proches de la paroi $x = 0,02$ m sur laquelle sont installées les cibles de dépôt. Le dernier thermocouple est installé à la verticale du foyer et donne la température au droit du panache.

Les résultats des mesures de température sont représentés sur la figure 2.9. La stratification thermique dans la couche de fumée est faible : seul le point de mesure le plus bas ($z = 0,90$ m) est significativement plus froid que les autres. Les trois thermocouples les plus hauts sont dans la couche chaude tandis que celui du bas est dans la couche froide : ces deux zones semblent bien distinctes. L'accélération de perte de masse en fin d'essai décrite au paragraphe précédent se traduit par une augmentation rapide des températures en fin d'essai, en particulier dans la zone chaude. Les ruptures de pentes

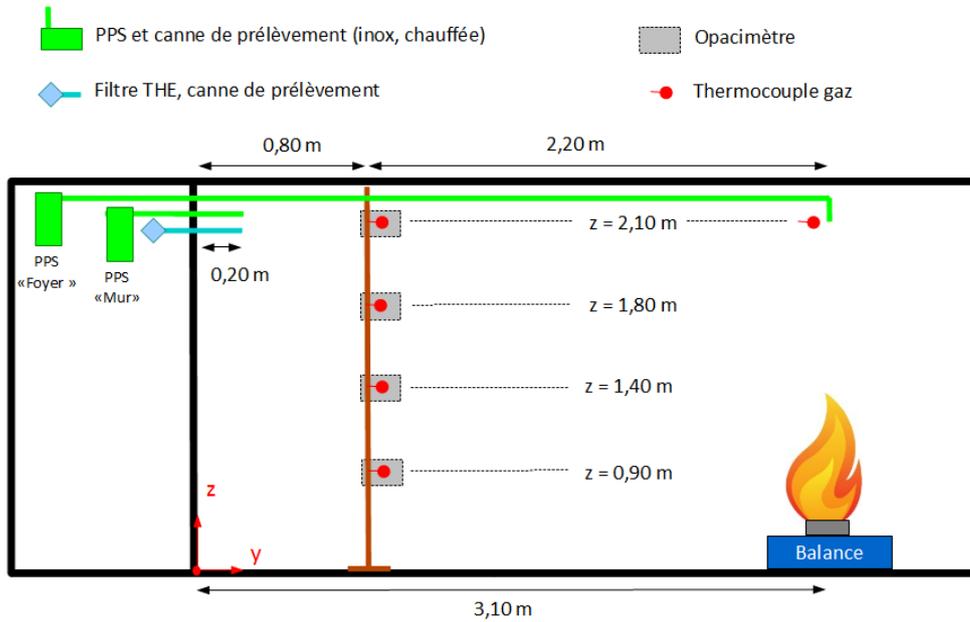


FIGURE 2.7 – Instrumentation du local d'essai : vue en coupe verticale ($x = 0,17$ cm).

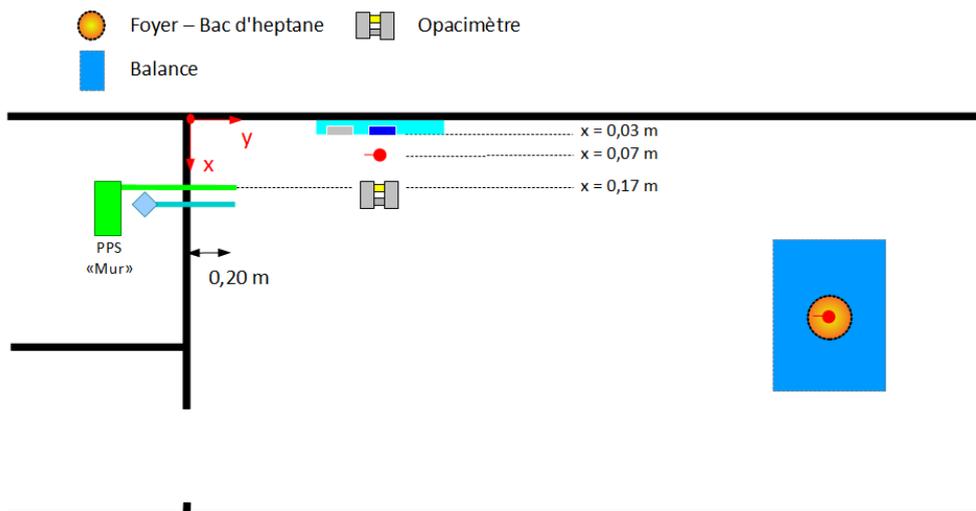


FIGURE 2.8 – Instrumentation du local d'essai : vue en coupe horizontale ($z = 2,10$ cm).

qui ont lieu pour les trois capteurs les plus hauts entre 1200 et 1500 secondes lors du refroidissement sont attribuées à l'enlèvement du panneau obstruant la porte, ce qui comme prévu accélère la sortie des gaz chauds.

Mesure de concentration de suie dans les fumées.

Trois principes de mesure différents ont été utilisés pour mesurer la concentration de suie dans les fumées. Chacun de ces moyens de mesure est décrit avec plus de détails dans les annexes B et C, à la fin de ce manuscrit : les Capteurs Opacimétriques Différentiels, les capteurs de particules Pegasor[®] et le prélèvement sur filtre THE en fibre de quartz.

Le prélèvement sur filtre THE (Très Haute Efficacité) sert à étalonner les mesures PPS et permet également, par pesée pré et post-essai du filtre et connaissance du débit de prélèvement, d'obtenir une estimation de la concentration moyenne en particule au cours de l'essai. Cette concentration C_{filtre} est obtenue pour chaque essai en calculant le rapport de la masse cumulée d'aérosol prélevé par le volume total de mélange de gaz et d'aérosol aspiré.

$$C_{\text{filtre}} = \frac{M_{\text{filtre}}}{Q_{\text{filtre}} t_{\text{désenfumage}}}, \quad (2.6)$$

où M_{filtre} est la masse de particules récoltée sur le filtre, $Q_{\text{filtre}} = 2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ est le débit de prélèvement, réglé au niveau de la pompe, et $t_{\text{désenfumage}}$ est le temps écoulé entre l'allumage du foyer et l'enlèvement de l'imposte de désenfumage.

Les capteurs opacimétriques différentiels (ou opacimètres), développés au LCPP, mesurent l'efficacité de transmission d'un signal lumineux parcourant 0,05 m dans les fumées. C'est un moyen de mesure peu intrusif, qui ne perturbe pas l'écoulement si ce n'est par sa taille, étant donné qu'il est entièrement plongé dans les fumées. La même mesure, effectuée sur un signal lumineux identique mais ne traversant pas les fumées, permet de corriger l'erreur liée au chauffage des composants électroniques qui sont soumis à une température qui peut aller jusqu'à 150 °C. La concentration massique de suie $C_{s,OPA}(t)$ est alors donnée par la loi de Beer-Lambert,

$$C_{s,OPA}(t) = \frac{\ln(I_0/I)}{\sigma_s L}, \quad (2.7)$$

qui permet de relier la concentration à la transmittance I_0/I du signal lumineux par l'intermédiaire du chemin optique $L = 0,05 \text{ m}$ et du coefficient d'extinction massique σ_s pris égal à $8,7 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, d'après MULHOLLAND (2002). La transmittance est le rapport de l'intensité lumineuse transmise par l'intensité lumineuse effectivement reçue de l'autre côté du chemin optique (parcouru par la lumière à travers les fumées).

Les PPS (pour Pegasor[®] Particle Sensor) mesurent le courant de fuite créé par les particules d'aérosol auxquelles il transmet une charge produite par effet couronne. Le prélèvement est effectué dans les fumées grâce à une canne en inox chauffée à 200 °C (pour limiter le dépôt à l'intérieur) et perturbe l'écoulement des fumées. C'est pourquoi

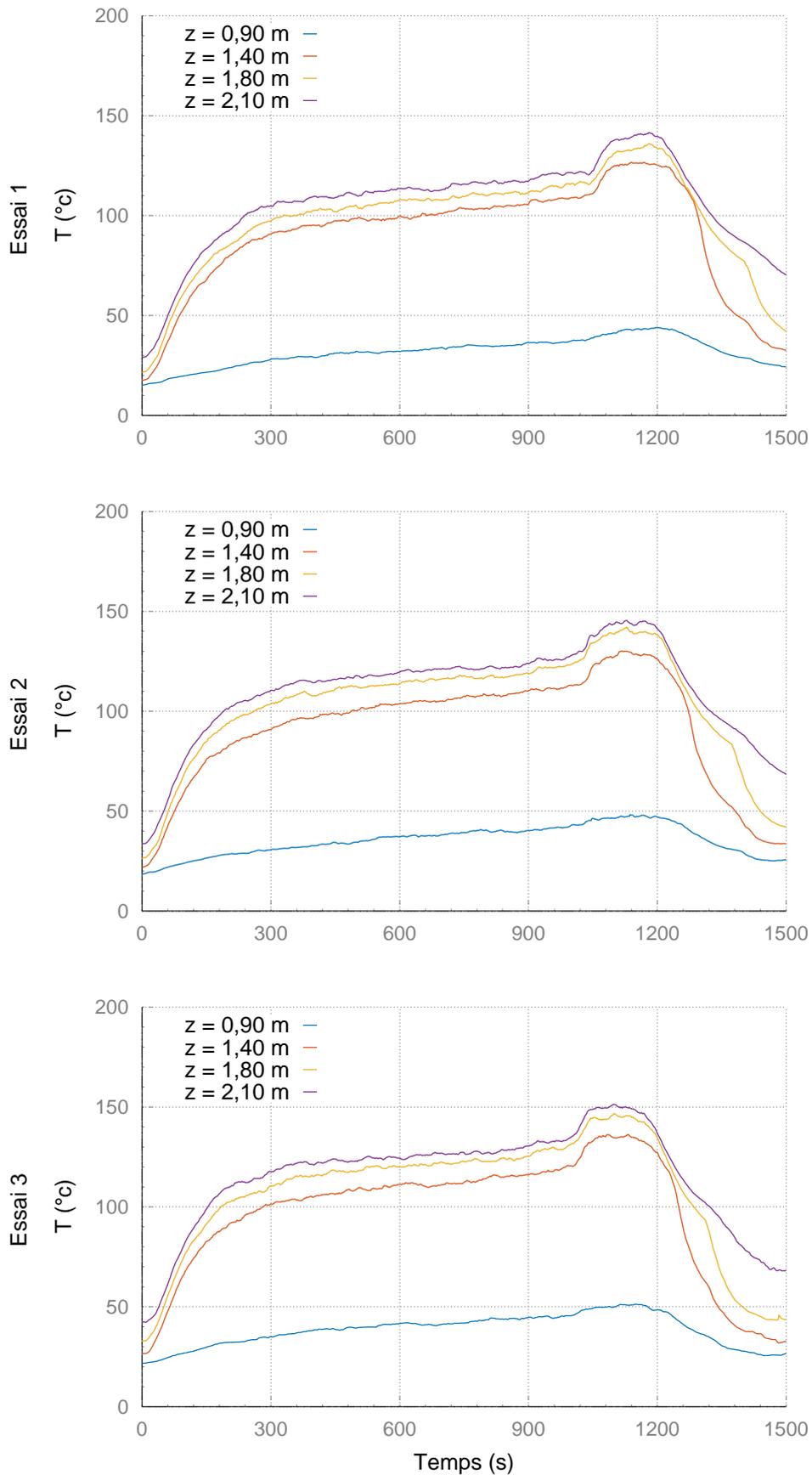


FIGURE 2.9 – Stratification des gaz en température à $z = 2,10$ m, 1,80 m, 1,40 m, 0,90 m pour les trois essais.

2.1. Dispositif expérimental

les points de mesure PPS sont plus éloignés des cibles de dépôt. Cet appareil, dont l'application à l'incendie est relativement récente, est étalonné par son fabricant pour des suies produites par un moteur diesel. On a donc choisi d'étalonner la mesure PPS grâce à la mesure sur filtre THE, en faisant l'hypothèse que les particules sont identiques tout au long d'un essai. La mesure étalonnée $C_{s,PPS}$ qui est présentée dans la suite est calculée comme :

$$C_{s,PPS}(t) = C_{PPS}(t) \frac{M_{\text{filtre}} Q_{PPS}}{M_{PPS} Q_{\text{filtre}}}, \quad (2.8)$$

où C_{PPS} est la mesure de concentration donnée par le PPS, M_{filtre} (respectivement M_{PPS}) est la masse de particules récoltée sur le filtre après l'essai (respectivement traversant le PPS au cours de l'essai) et Q_{filtre} est le débit d'aspiration de la pompe en aval du filtre (respectivement du PPS). Le débit PPS est mesuré à chaque début d'essai pour chaque appareil et varie légèrement en fonction de l'appareil et de l'installation entre $3,5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ et $5,5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. La masse de particules mesurée par le PPS au cours d'un essai M_{PPS} est calculée à partir de la mesure PPS comme :

$$M_{PPS} = \int_0^T C_{PPS}(t) Q_{PPS} dt, \quad (2.9)$$

où $T = t_{\text{désenfumage}}$ est la durée de l'essai.

Ces mesures sont complémentaires et permettront de vérifier la fiabilité de notre évaluation de la concentration massique de suie dans les fumées. Comme les thermocouples, les capteurs opacimétriques sont installés en arbre sur le même axe vertical, en $x = 0,05 \text{ m}$ et $y = 0,80 \text{ m}$, proche de la paroi $x = 0$.

Le zéro des capteurs opacimétriques étant fait au début de l'essai lorsque l'imposte en partie haute de la porte est encore en place, on mesure alors une transmittance supérieure à 100% (ce qui correspond à des concentrations négatives) après l'enlèvement de l'imposte pour désenfumer le local en fin d'essais. La mesure opacimétrique ne doit pas être prise en compte après ce moment. Au cours des essais, la concentration massique de suie évolue qualitativement de la même façon que les températures. On observe deux paliers : un premier entre 300 et 1000 s suivit d'une augmentation rapide en fin d'essai qui correspond à l'augmentation de la puissance du foyer. On remarque que les valeurs de transmittance sont toujours supérieures à 94% pour l'ensemble des mesures, ce qui correspond à des fumées peu opaques.

Les résultats des PPS sont présentés sur la figure C.2. Les deux points de mesure permettent de visualiser les phénomènes de palier et l'augmentation rapide de concentration liée à la combustion rapide avant l'extinction. Il est difficile de conclure quant à l'origine de la différence de concentration mesurée par les PPS au niveau du foyer et au niveau du mur. Elle peut être causée par un effet de dilution lié à l'entraînement d'air frais par les fumées chaudes ou par le dépôt de particules sur les parois intérieures de la canne de prélèvement, la canne de mesure « foyer » étant beaucoup plus longue (3 m) que la canne de prélèvement « mur » (0,60 m), même si nous avons tenté de limiter cet effet en chauffant les cannes de prélèvement à $200 \text{ }^\circ\text{C}$. On constate également que les PPS réagissent au désenfumage en fin d'essai, ce qui se traduit par une baisse subite

des concentrations mesurées entre 1300 et 1500 s pour chaque essai.

La mesure par opacimétrie semble cohérente avec les concentrations moyennes mesurées sur filtre THE, présentées dans le tableau 2.4.

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
$C_{S,OPA}$ (g/m ³)	0,105	0,109	0,094
$C_{S,filtré}$ (g/m ³)	0,106	0,109	0,118

TABLE 2.4 – Concentrations moyennes au cours d'un essai, obtenues par mesure Opacimétrique et par prélèvement sur filtre THE.

Les points de mesure PPS à $y = 0,20$ m et opacimètre à $z = 2,10$ m sont relativement proches et donc les valeurs de concentration obtenues devraient être comparables. Il s'avère que les résultats obtenus par mesure PPS sont en bon accord avec ceux des Opacimètres (figure C.2) : on observe un écart relatif entre les deux mesures inférieur à 25% sur tous les essais. La sensibilité des capteurs opacimétriques à la lumière ambiante et à celle du foyer nous amène à privilégier la mesure PPS lorsque les fumées sont peu opaques comme ici ou lorsque la lumière extérieure risque de perturber la réponse des opacimètres, comme ici en fin d'essai.

Granulométrie des particules de suie.

Un impacteur en cascade est installé dans les fumées au niveau du plafond, à proximité des cibles de dépôt. Cet appareil, associé à une pompe à air aspirant à $Q_{v,i} = 2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ (soit $3,33 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) prélève la fumée et classe les particules aspirées par une méthode inertielle : chaque étage de l'impacteur a un diamètre aérodynamique de coupure, correspondant à une inertie au-delà de laquelle les particules seront incapables de suivre l'écoulement et se déposeront sur un support de masse à vide connue. La pompe est arrêtée à la fin de chaque essai et remise en route au début de l'essai suivant et chaque support est prélevé et pesé à la fin des trois essais. On obtient ainsi la masse de particules appartenant à chaque classe de diamètre aérodynamique, classes prédéfinies par la géométrie de l'impacteur.

Au total, l'impacteur a récolté $m_i = 0,01255$ g de particules de suies au cours des trois essais. En utilisant la relation 2.10, il est possible de calculer une concentration massique de particules $C_{s,i} = 0,092 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$. Cette valeur est cohérente avec les mesures opacimétriques et par prélèvement sur filtre (voir tableau 2.4).

$$C_{s,i} = \frac{m_i}{Q_{v,i} T_{\text{total}}}, \quad (2.10)$$

où $Q_{v,i}$ est le débit de la pompe, qui est fixe, et T_{total} est la durée totale de prélèvement qui est la somme des durées des trois essais, données par le tableau 2.3. La distribution granulométrique des particules est présentée en masse cumulée sur la figure 2.12 et en masse par étage sur la figure 2.13. Sur la masse totale de particules prélevées, 95 % a un diamètre aérodynamique inférieur à $3,5 \mu\text{m}$ et seulement 22 % a un diamètre aérodynamique inférieur à $1 \mu\text{m}$. Le diamètre de coupure rassemblant 50 % de la masse de

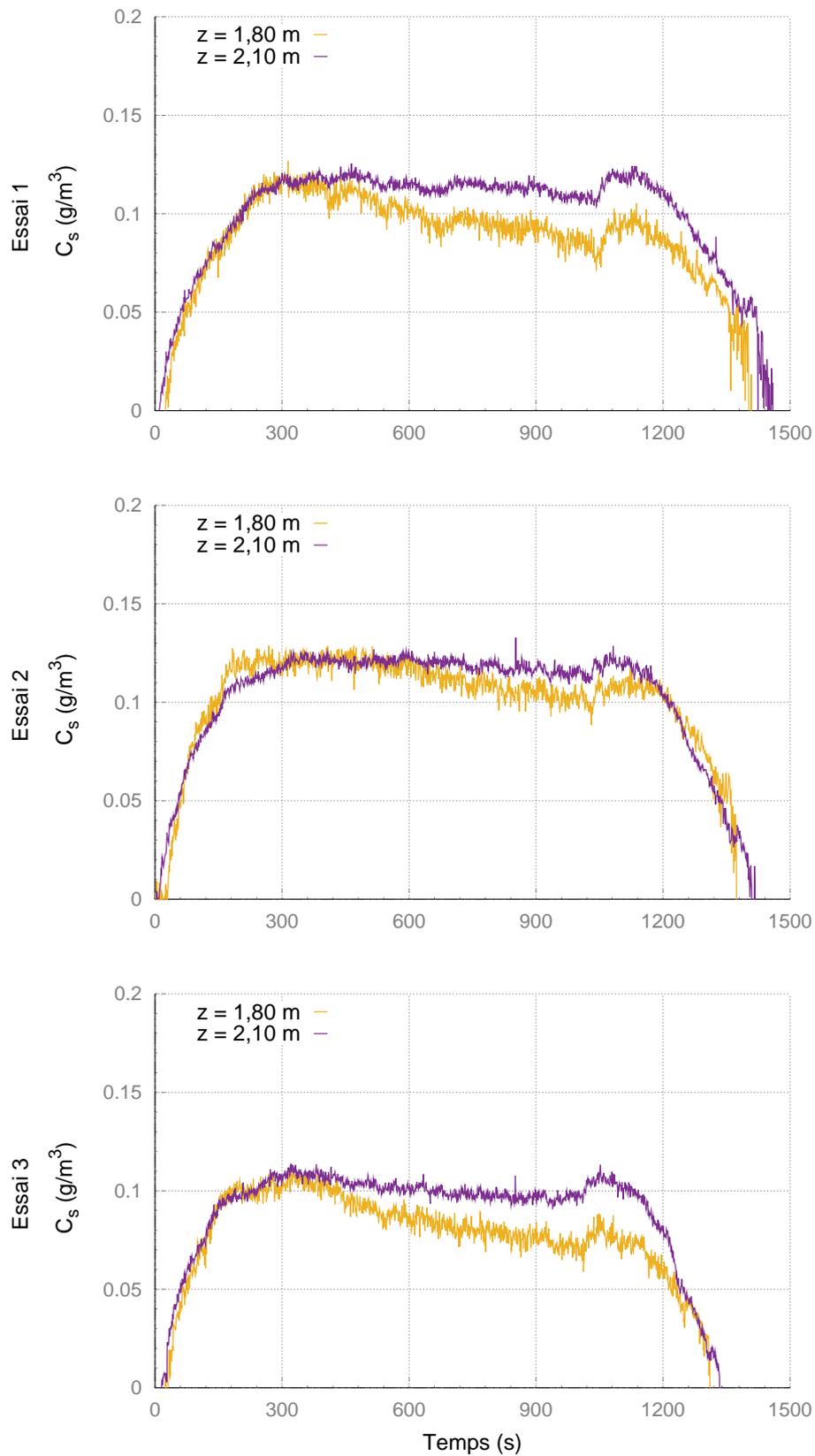


FIGURE 2.10 – Concentrations de suie mesurées à $z = 2,10$ m et $1,80$ m par les capteurs opacimétriques.

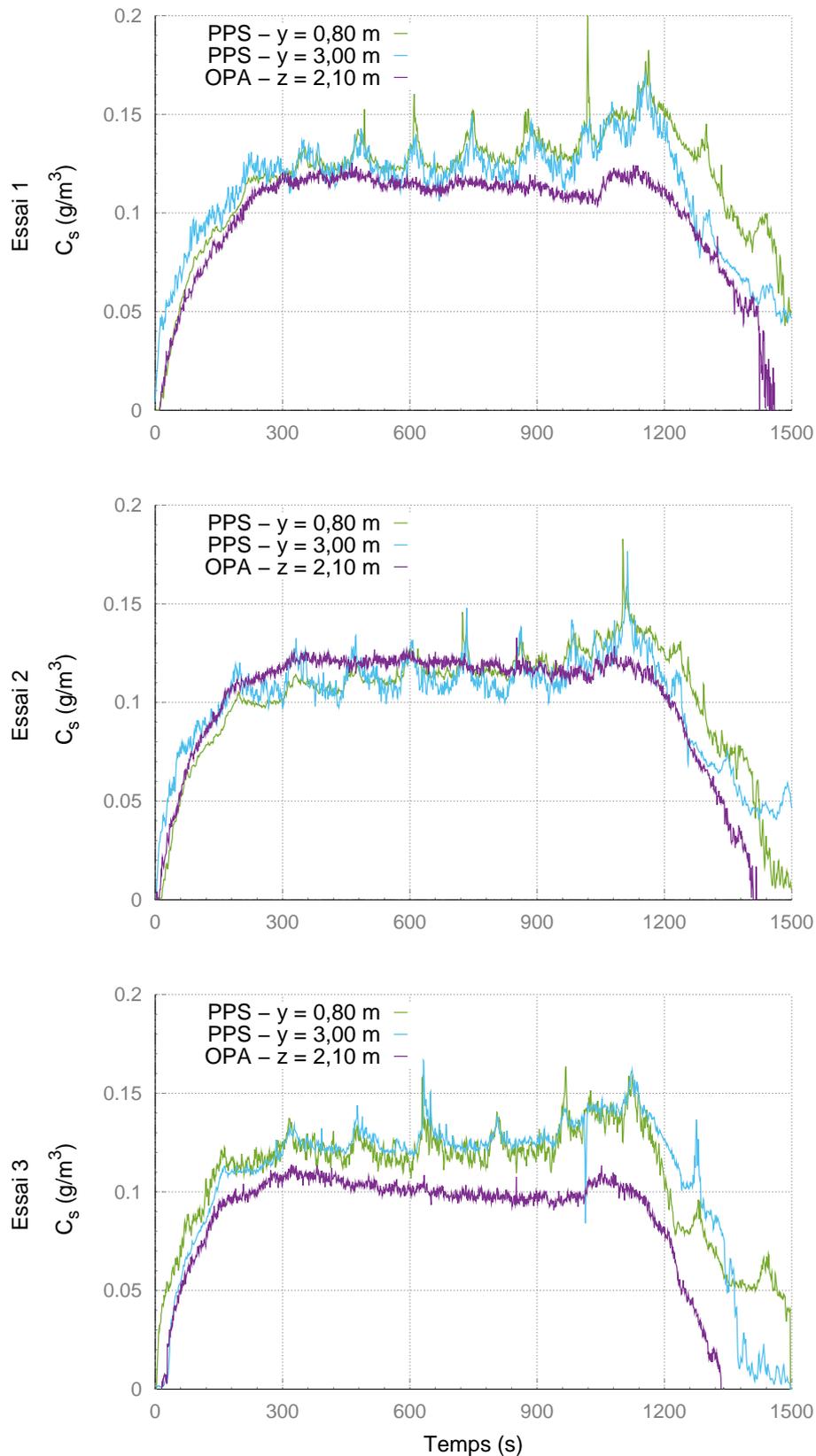


FIGURE 2.11 – Concentration de suie mesurées à $z = 2,10$ m par les deux capteurs PPS : "mur" ($y = 0,80$ m) et "foyer" ($y = 3,00$ m) ainsi que par le capteur opacimétrique situé à cette hauteur pour comparaison.

2.1. Dispositif expérimental

particules se situe entre 1,6 et 3,5 μm . On constate cependant que 71% de la masse de suie prélevée s'est déposé sur l'étage correspondant à un diamètre aérodynamique situé entre 1,6 et 3,5 μm . Si l'aérosol formé par les particules de suie devait être approximé par un aérosol monodispersé, il pourrait être intéressant de choisir un diamètre aérodynamique de l'ordre de 2,55 μm , qui est le diamètre médian des particules capturées par cet étage.

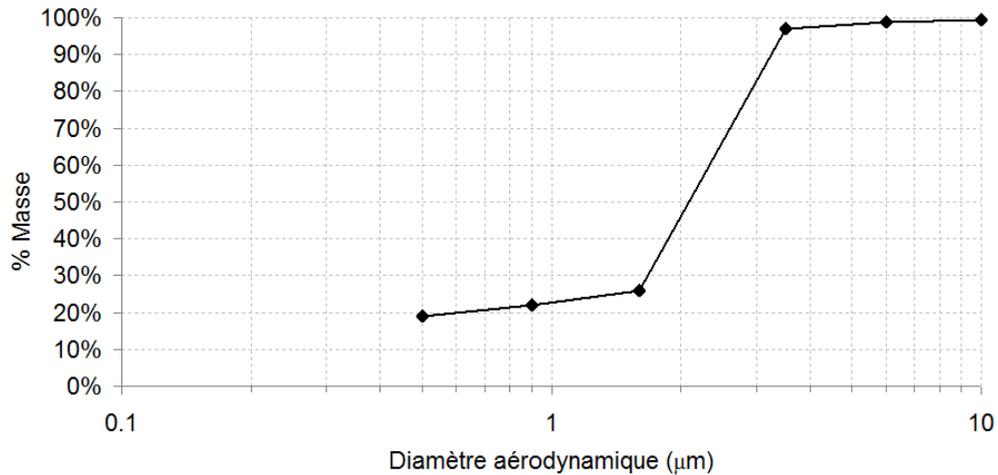


FIGURE 2.12 – Distribution en masse cumulée des diamètres aérodynamiques des particules de suie prélevées.

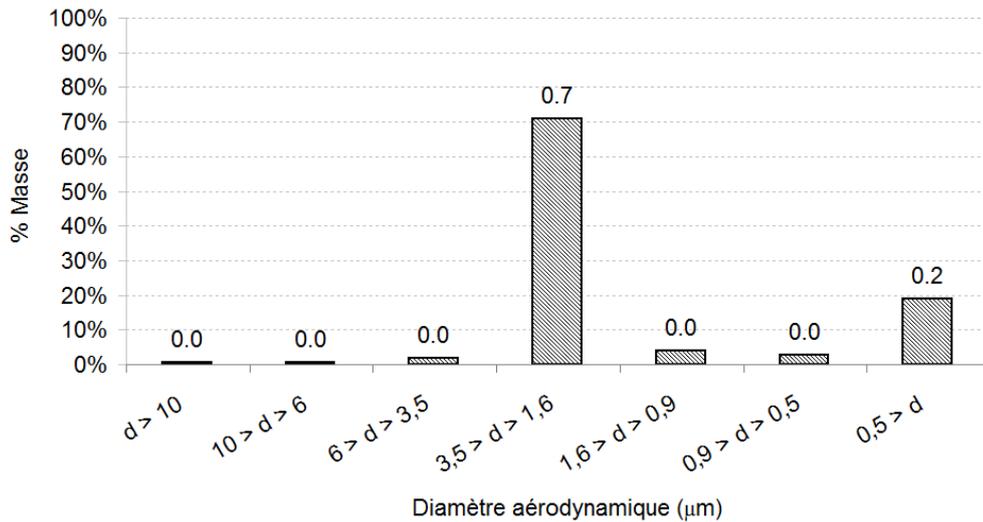


FIGURE 2.13 – Distribution en masse des diamètres aérodynamiques des particules de suie prélevées.

2.1.5 Mesure du dépôt et contrôle de la température des cibles.

Quatre cibles de dépôt ont été installées sur deux plaques fixées à la paroi du local, en $x = 0$. Les deux plaques sont situées à la même distance $y = 0,80$ m de la paroi du local métrologie, mais à deux altitudes différentes $z = 1,80$ m et $z = 2,10$ m. Chaque cible de dépôt est une plaque d'aluminium carrée fine de 70 mm de côté et 0,5 mm d'épaisseur pesant en moyenne (pour les quatre cibles utilisées) 3,676 g. Deux des quatre cibles, CB1 et CB2, sont placées à 1,80 m du sol et deux autres, CB3 et CB4, sont à 2,10 m du sol. Les cibles sont plaquées verticalement sur des supports en aluminium carrés de 150 mm de côté et de 10 mm d'épaisseur.

Deux des quatre supports, ceux des cibles CB2 ($z = 1,80$ m) et CB4 ($z = 2,10$ m), ont été refroidis pour mettre en évidence l'effet sur le dépôt de suie de la différence de température entre le fluide et la paroi, qui est la cause du phénomène de thermophorèse. Le tableau 2.5 résume les conditions d'installation pour chaque cible. La masse cumulée de suie déposée au cours d'un essai sur chaque cible a été mesurée après chaque essai par une méthode de pesée différentielle.

Les supports en aluminium refroidis sont parcourus par un serpentin de cuivre dans lequel un liquide caloporteur, thermostaté par un bain réfrigérant à 10 °C, circule, agissant comme un puits de chaleur. Les températures de ces supports ne sont pas constantes et ont donc été mesurées tout au long des essais pour pouvoir être exploitées lors de l'analyse des résultats de dépôt. Les températures de surface des cibles refroidies sont bien à chaque instant inférieures à celles des cibles non refroidies. La comparaison des résultats de dépôt entre deux cibles situées à une même altitude permet, en supposant que la température fluide est identique en face de ces deux cibles, de mettre en évidence l'influence qu'a sur le dépôt de suie, à travers le phénomène de thermophorèse, la différence de température gaz-paroi.

La température de consigne du bain thermostaté est fixée à 8 °C, température minimum permettant de ne pas observer de condensation sur les cibles avant le début de l'essai. La température en surface de chaque cible a été mesurée par un thermocouple de contact, soudé à une pastille de cuivre plaquée au support. Le tableau 2.5 indique les références et les conditions initiales correspondant à chaque cible de dépôt et pour chacun des trois essais.

Nom de la cible	Hauteur (m)	Refroidissement	T _{paroi} initiale (°C)		
			Essai 1	Essai 2	Essai 3
CB1	1,80	Non	19,9	20	28,8
CB2	1,80	Oui	12,4	12,7	15,0
CB3	2,10	Non	23,6	24,5	36,3
CB4	2,10	Oui	14,2	14,8	18,8

TABLE 2.5 – Référence, hauteurs et conditions initiales des cibles pour chaque essai.

La figure 2.17 est un exemple de l'état des cibles prélevées après un essai. Sur le plan qualitatif, les cibles 3 et 4 semblent visuellement plus foncées que les cibles 1 et 2,

2.1. Dispositif expérimental

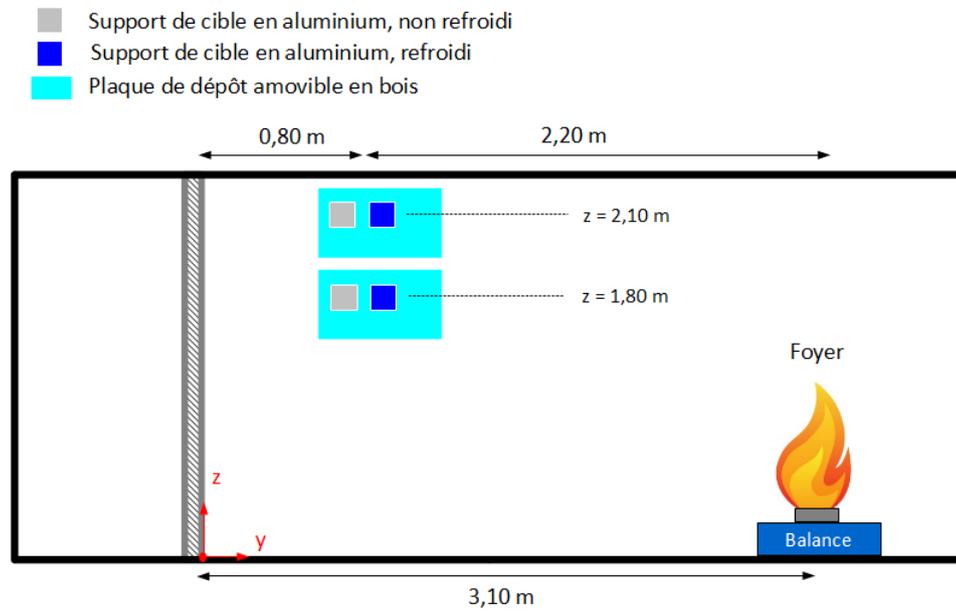


FIGURE 2.14 – Positionnement des cibles sur la paroi.

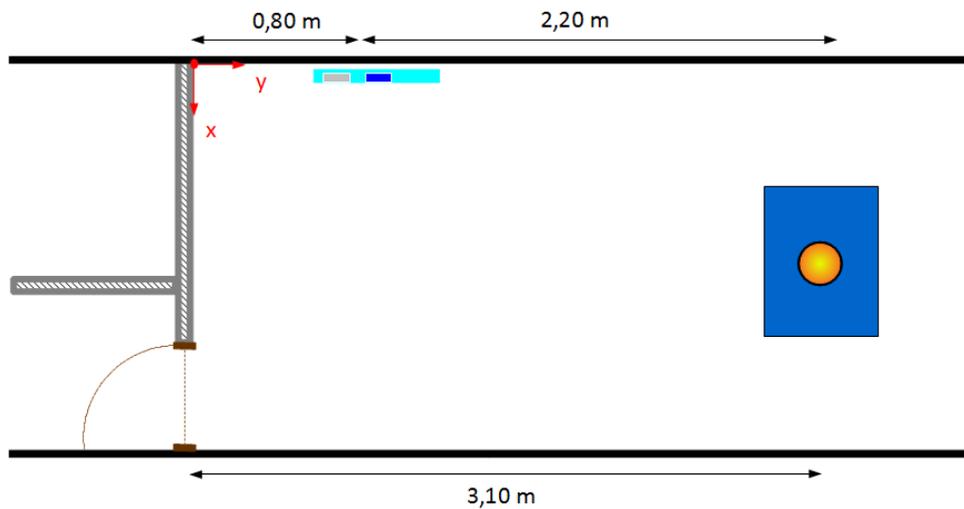


FIGURE 2.15 – Positionnement des cibles par rapport au foyer.

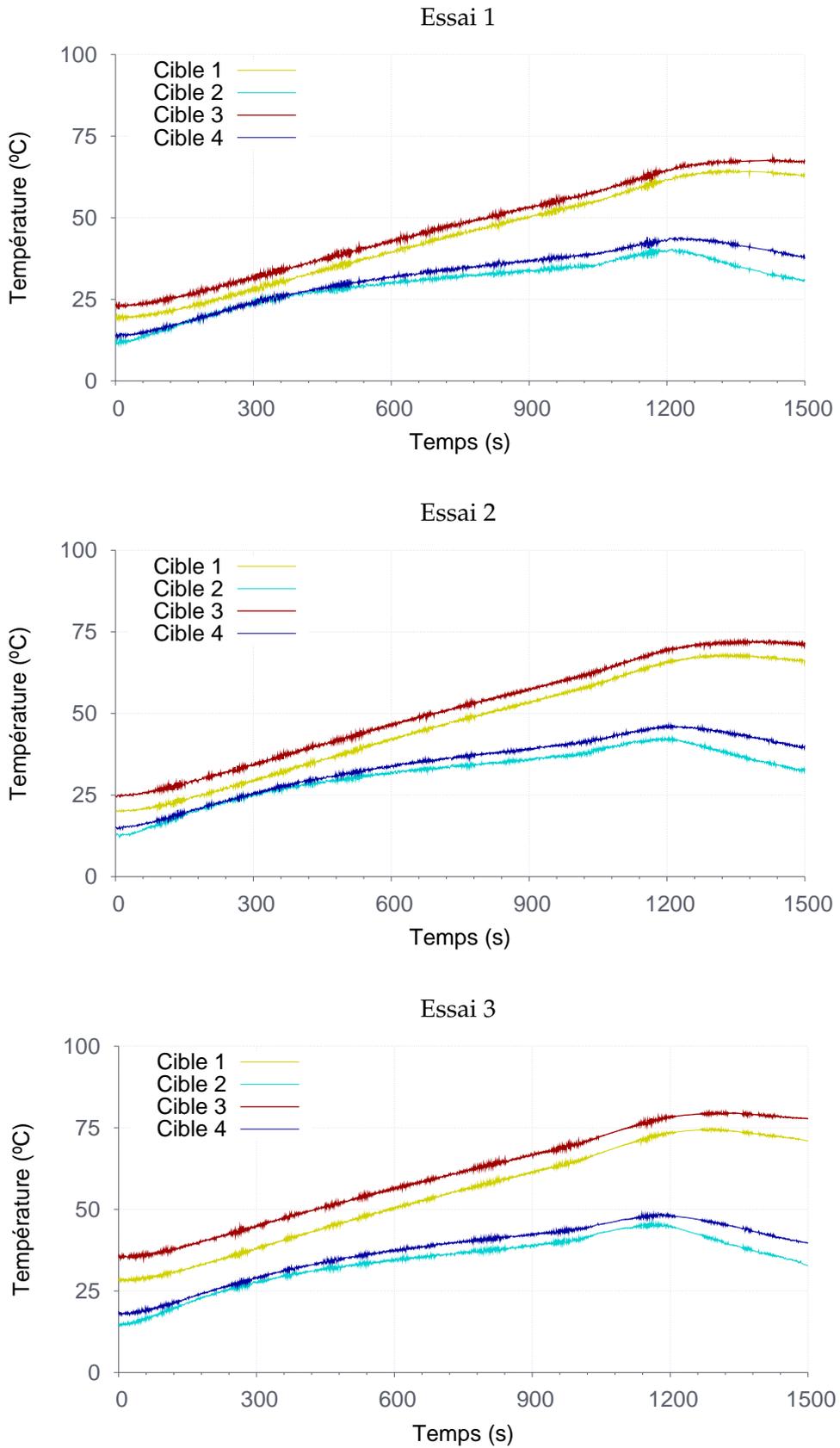


FIGURE 2.16 – Températures de surface des cibles mesurées par les thermocouples de contact plaqués aux supports.

2.1. Dispositif expérimental

traduisant un dépôt plus important.

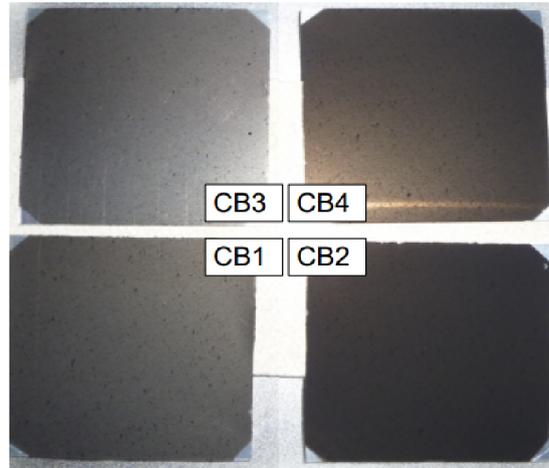


FIGURE 2.17 – Photographies des cibles prélevées après essai.

Après chaque essai, les quatre cibles ont été détachées de leurs supports et transportées jusqu'à une microbalance pour être pesées. Chaque résultat de dépôt est une valeur moyenne calculée par rapport à trois pesées réalisées directement après les essais. Ces pesées répétées présentent une très faible dispersion (inférieure à 3%) par rapport à la pesée moyenne retenue.

La masse de suie mesurée par différence entre la pesée pré-essai et la pesée post-essai est en moyenne de 0,52 mg. Nous sommes donc bien supérieurs à la limite de détection de la balance, qui est précise à 10^{-3} mg dans ces conditions d'utilisation.

La figure 2.18 illustre la reproductibilité de l'expérience. Quand on considère le dépôt sur une même cible, l'écart type entre les résultats obtenus pour trois essais atteint une valeur maximum de 0,08 mg, soit seulement 15% du dépôt moyen mesuré. On estime donc avoir une bonne répétabilité des résultats.

Dans des conditions thermiques équivalentes, la cible la plus haute ne reçoit pas notablement plus de suie que la cible la plus basse. Cela peut s'expliquer par la très faible stratification dans la couche chaude de la concentration de suie et de la température (voir paragraphes précédents) : les deux altitudes de prélèvement sont trop proches pour pouvoir obtenir des résultats de dépôt discriminants selon la hauteur de prélèvement.

Hauteur	Refroidissement	Cible	Dépôt (mg/m ²)			Rapport froid/chaud		
z = 1,80 m	NON	CB1	67,3	98,0	83,7	2,21	1,35	1,66
	OUI	CB2	149,0	132,7	138,8			
z = 2,10 m	NON	CB3	85,7	93,9	73,15	1,24	1,41	1,39
	OUI	CB4	106,1	132,7	102,0			

TABLE 2.6 – Bilan des résultats de dépôt obtenus.

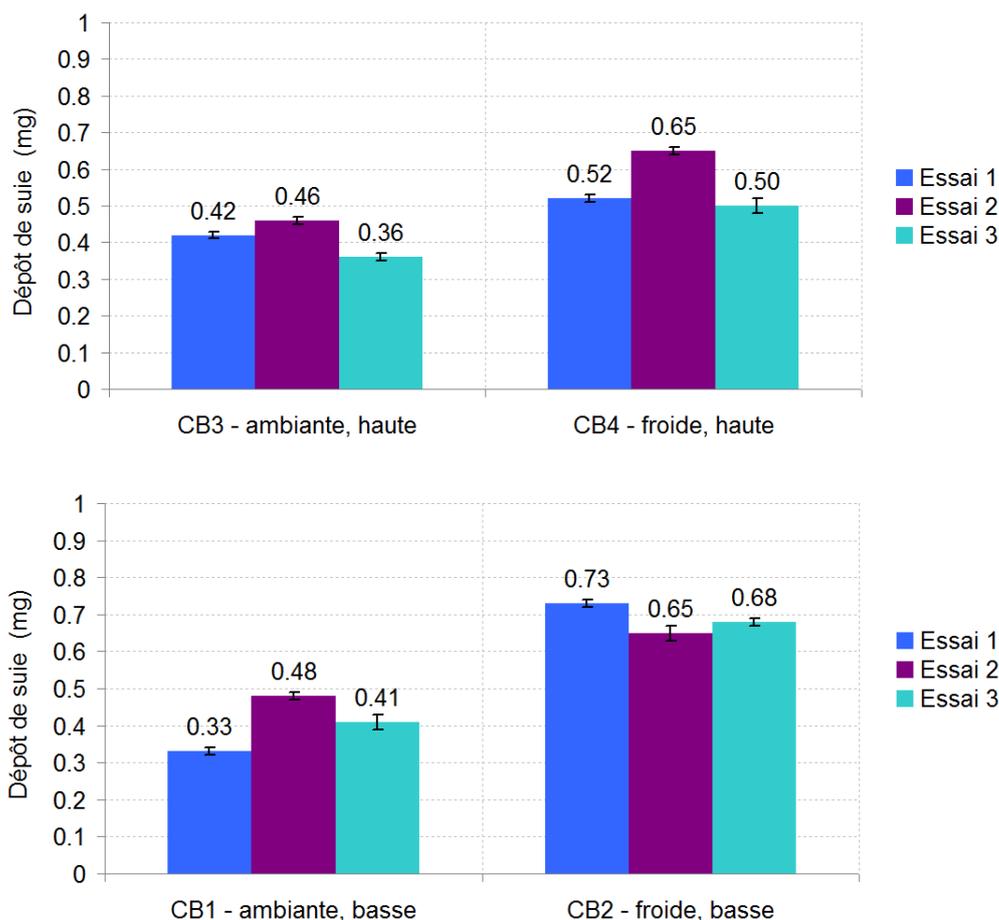


FIGURE 2.18 – Masse de suie déposée sur chaque cible à la fin de chaque essai. L'erreur correspond à la dispersion des trois pesées.

L'effet de la thermophorèse est bien mis en évidence par ces mesures (voir tableau 2.6 : à une altitude donnée les cibles refroidies ont récolté respectivement 34% ($z = 2,10\text{ m}$) et 68% ($z = 1,80\text{ m}$) de suie en plus par rapport aux cibles non refroidies. Cette différence chaud/froid confirme la tendance observée visuellement sur la figure 2.17.

Etant donné que l'on s'intéresse à la modélisation du dépôt de suie sur les cibles, l'essentiel de la métrologie est concentré autour de ces éléments. Ces résultats seront utilisés comme données d'entrée pour la validation des modèles de dépôt. Ainsi, chaque altitude de prélèvement est instrumentée avec un capteur opacimétrique différentiel et un thermocouple gaz, comme le montre le schéma 2.19. Le montage représenté par la figure 2.19 et visible sur la photographie 2.20 permet de mesurer en temps réel au cours d'un essai les grandeurs suivantes :

- Température de surface des cibles
- Température de gaz devant les cibles
- Concentration de suie devant les cibles

Sur l'arbre cité au paragraphe 2.1.4, les deux thermocouples et les deux opacimètres les plus hauts sont installés de façon à correspondre aux deux altitudes de prélèvement 1,80 m et 2,10 m. On mesure ainsi la température des gaz et la concentration de suie en face des cibles de dépôt. Les extrémités des thermocouples sont placées à 0,05 m de la

2.1. Dispositif expérimental

paroi et les points de mesure de concentration sont situés à 0,15 m, à cause de la taille des capteurs opacimétriques différentiels. Le schéma 2.19 précise le positionnement des capteurs à hauteur par exemple des cibles les plus proches du plafond : CB3 et CB4. La seconde plaque de dépôt (CB1 et CB2 à 1,80 m de hauteur) a également été associée à un thermocouple gaz et un opacimètre. Chaque cible est en outre équipée d'un thermocouple de type pastille qui mesure sa température de surface.

Il est possible de comparer pour chaque cible, la différence de température entre le gaz et la paroi ΔT au cours de chaque essai. La valeur de ΔT est comprise entre 60 °C et 90 °C au cours d'un essai.

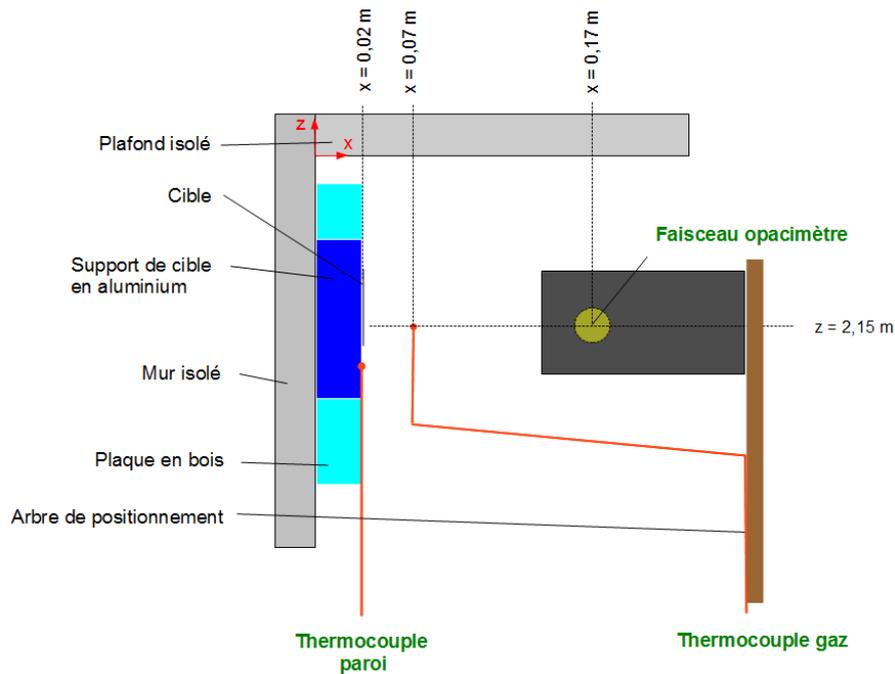


FIGURE 2.19 – Positionnement des capteurs en face des cibles sous plafond, dans le plan $y = 0,80$ m.



FIGURE 2.20 – Photographie de l'instrumentation.

2.1.6 Bilan des résultats expérimentaux

À partir des données d'un essai à grande échelle répété trois fois, nous essayons de répondre du mieux possible à plusieurs questions. L'objectif était d'une part de vérifier qu'il est possible de prélever et mesurer des dépôts de suie dans des situations d'incendie en milieu confiné, et d'autre part d'obtenir les premiers éléments de validation des modèles existants. En utilisant le couplage des mesures de température et de concentration de suie et en refroidissant certaines surfaces de dépôt, nous voulions également évaluer expérimentalement à échelle réelle l'influence de la thermophorèse sur le dépôt de suie.

Les quantités de suies pesées sont significatives et l'efficacité de notre méthode de mesure est attestée. Les résultats sont cohérents et semblent vérifier nos hypothèses quant à l'importance de la thermophorèse. En moyenne sur les trois essais on a mesuré de 35% à 70% de suie déposée en plus sur les plaques refroidies. Plusieurs paramètres n'ont pas pu être pris en compte, comme la condensation sur les cibles de dépôt ou l'existence d'un champ électrique qui pourrait intervenir dans le dépôt de suie. Ces effets, difficile à contrôler et à évaluer, seront mis de côté et supposés négligeables dans la suite de notre analyse.

Grâce à l'étalonnage par filtre, les résultats des PPS présentent un bon accord avec ceux donnés par les capteurs opacimétriques, l'écart relatif entre les deux mesures étant inférieur à 25%. Dans ces conditions d'essai les deux techniques de mesure rendent compte de la même façon de la dynamique du phénomène de transport des particules de suie, cependant seuls les PPS permettraient une mesure de concentration dans des fumées plus chaudes (jusqu'à 600 °C). On considère donc que ces mesures sont assez fiables pour pouvoir d'une part être confrontées à une simulation FDS et d'autre part servir de données d'entrée à des modèles théoriques de dépôt.

2.2 Prédiction du dépôt de suie par la simulation numérique.

2.2.1 Paramétrage de la simulation numérique

Le code utilisé pour la simulation numérique de l'essai est le code Fire Dynamics Simulator (FDS) dans sa version 6.1.1. Nous avons choisi de paramétrer la simulation numérique en utilisant comme conditions initiales et aux limites les conditions moyennes des trois essais réalisés, qui définiront un essai moyen. Nous comparerons ensuite les résultats de la simulation à l'enveloppe expérimentale formée par cet essai répété trois fois.

Géométrie et Maillage

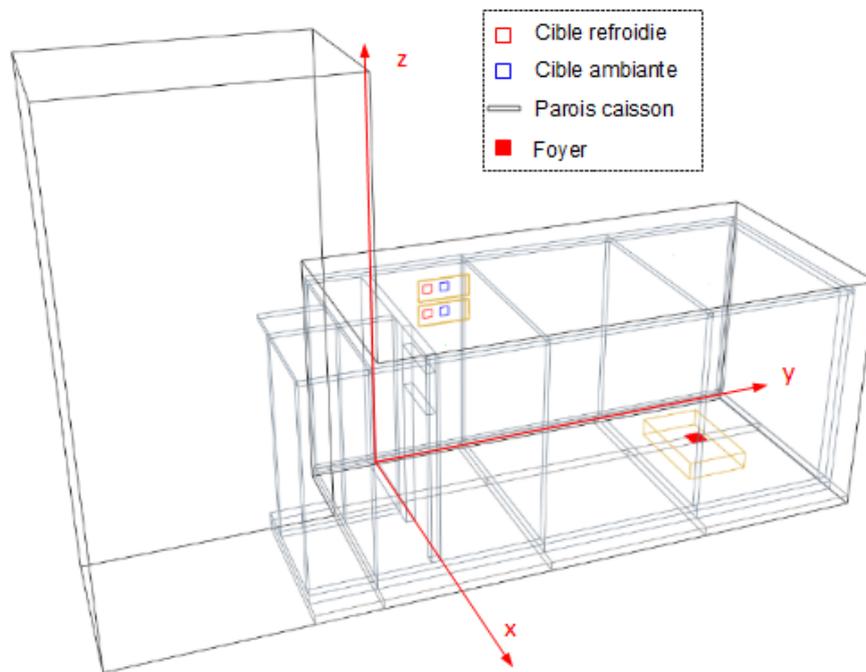


FIGURE 2.21 – Reproduction de la géométrie dans FDS - visualisation Smokeview.

Les coordonnées utilisées pour la simulation numérique sont les mêmes que celles utilisées dans le paragraphe précédent lors de l'essai. La géométrie implémentée dans FDS reproduit fidèlement la configuration expérimentale (voir figure 2.21). Le domaine de calcul a été découpé en quatre sous domaines (voir figure 2.22) :

- Un maillage uniforme composé de mailles cubiques de 5 cm de côté dans la zone du foyer, entre $y = 2,9$ m et $y = 4,7$ m.
- Un maillage uniforme composé de mailles cubiques de 5 cm de côté au milieu du local, entre $y = 1,1$ m et $y = 2,9$ m.
- Un maillage uniforme composé de mailles cubiques de 5 cm de côté dans la zone où sont installées les cibles, entre $y = -0,7$ m et $y = 1,1$ m.

- Un maillage uniforme composé de mailles cubiques de 10 cm de côté dans la zone extérieure, de $y = -3,4$ m à $y = -0,7$ m, et de $z = 0$ à $z = 5,2$ m.

Le domaine maillé dépasse largement les limites du caisson, afin de s'affranchir des effets de bords perturbateurs. Les limites de tous les domaines de calcul sont ouvertes.



FIGURE 2.22 – Vue en coupe du local d'essai et du découpage et maillage du domaine de calcul.

Conditions initiales

On choisit donc de fixer les conditions initiales à des valeurs correspondant à la moyenne des conditions initiales des trois essais.

- La température de l'air ambiant, à l'extérieure du caisson, est fixée à 12 °C
- La pression ambiante et initiale est homogène et vaut 101 360 Pa.
- La température initiale de l'air à l'intérieur du caisson est fixée à 35 °C en partie haute ($z > 1,20$ m) et 20 °C en partie basse.

Conditions limites

Le foyer est modélisé par une surface carrée de 0,20 m de côté dont l'aire de 0,040 m² correspond à celle d'un bac de circulaire de 0,225 m de diamètre. Cette surface est à l'emplacement du foyer réel et introduit dans le domaine de calcul un flux surfacique d'heptane gazeux correspondant à la perte de masse mesurée en moyenne au cours des essais 1 et 3.

On utilise une chaleur de combustion ΔH_c , un facteur d'émission de suie y_{suie} et un facteur d'émission de monoxyde de carbone y_{CO} trouvés dans la littérature. On utilise les paramètres mesurés à petite échelle par TEWARSON (2002) pour un feu d'heptane dans des conditions bien ventilées :

$$\Delta H_c = 44,6 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1} \quad y_{suie} = 0,042 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \quad y_{CO} = 0,012 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \quad (2.11)$$

2.2. Prédiction du dépôt de suie par la simulation numérique.

Les températures des cibles sont également entrées comme paramètres dans la simulation, de façon à limiter les sources d'erreur liées à la prédiction de la température de paroi par le code. Chacune des cibles voit sa température de surface prescrite à la moyenne des valeurs de températures de surface mesurées au cours des trois essais de répétabilité.

On associe enfin à toutes les parois des propriétés réalistes correspondant aux matériaux utilisés lors de l'essai et données dans le tableau 4.1.

Propriétés des particules de suie

La suie est définie comme un aérosol formé de particules de diamètre $1 \mu\text{m}$ qui se déposent par thermophorèse mais aussi par diffusion-impaction et par sédimentation d'après les modèles contenus dans le code et décrits dans l'annexe correspondante.

Si on réussit à reproduire numériquement de façon satisfaisante les champs de température et de concentration de suie, les températures de paroi étant prescrites, il sera possible de comparer les résultats de dépôt prédits par la simulation numérique, aux résultats donnés par les trois essais pour évaluer l'efficacité du modèle implémenté dans le code FDS.

2.2.2 Prédiction de l'écoulement.

Avant de s'intéresser au dépôt de suie, on veut vérifier que la simulation reproduit des niveaux de température et de concentration massique de suie dans les fumées qui sont cohérents avec les résultats de l'essai. Les figures 2.23, 2.24 et 2.25 permettent de comparer la simulation à l'enveloppe expérimentale formée par les résultats des trois essais.

		Essai 1	Essai 2	Essai 3	FDS
Concentration (g/m^3)	$z = 1,40 \text{ m}$	0,16	0,18	0,18	0,10
	$z = 1,80 \text{ m}$	0,09	0,11	0,08	0,11
	$z = 2,10 \text{ m}$	0,11	0,11	0,09	0,11
Température ($^{\circ}\text{C}$)	$z = 0,90 \text{ m}$	31,4	35,8	39,5	42,3
	$z = 1,40 \text{ m}$	94,2	98,0	105,1	91,7
	$z = 1,80 \text{ m}$	101,0	108,4	114,8	98,8
	$z = 2,10 \text{ m}$	107,4	113,8	120,3	100,7

TABLE 2.7 – Valeurs moyennes calculées entre 0 et 1200 secondes des températures et concentrations de suie, mesurées et simulées.

Le code Fire Dynamics Simulator prédit relativement correctement les champs de concentration et de température obtenus par la mesure lors des essais. Les valeurs de température simulées sont inférieures de 20 % à celle de l'essai moyen et les concentrations massiques sont supérieures de 30% à celles de l'essai moyen.

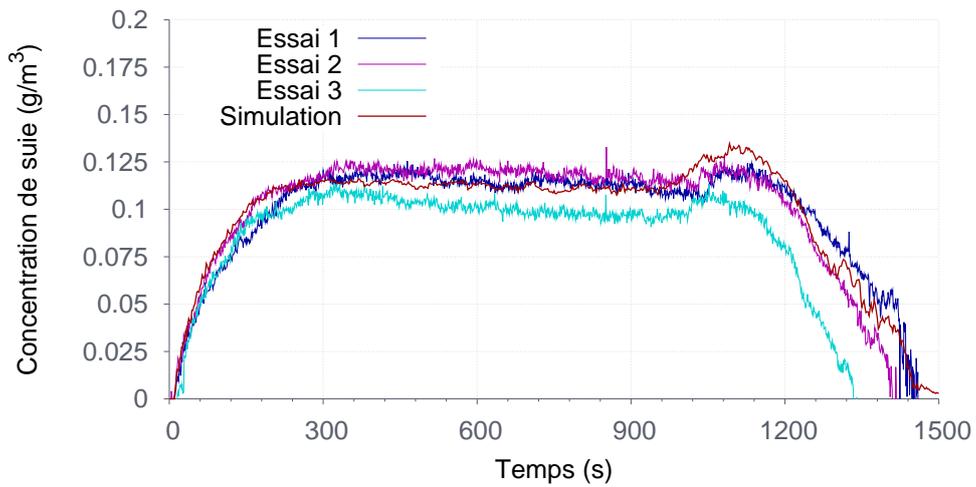


FIGURE 2.23 – Concentration de suie simulée et mesurée aux cours des trois essais à $z = 2,10$ m

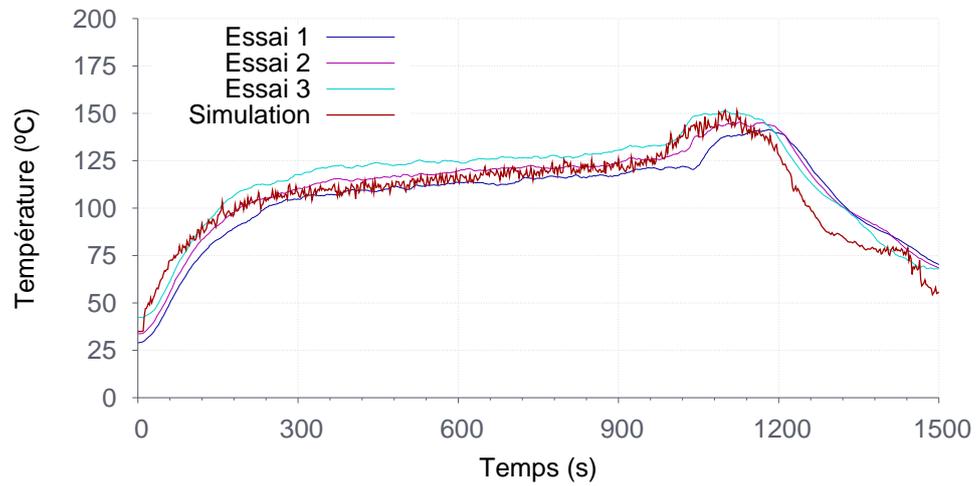


FIGURE 2.24 – Température gaz simulée et mesurée aux cours des trois essais à $z = 2,10$ m

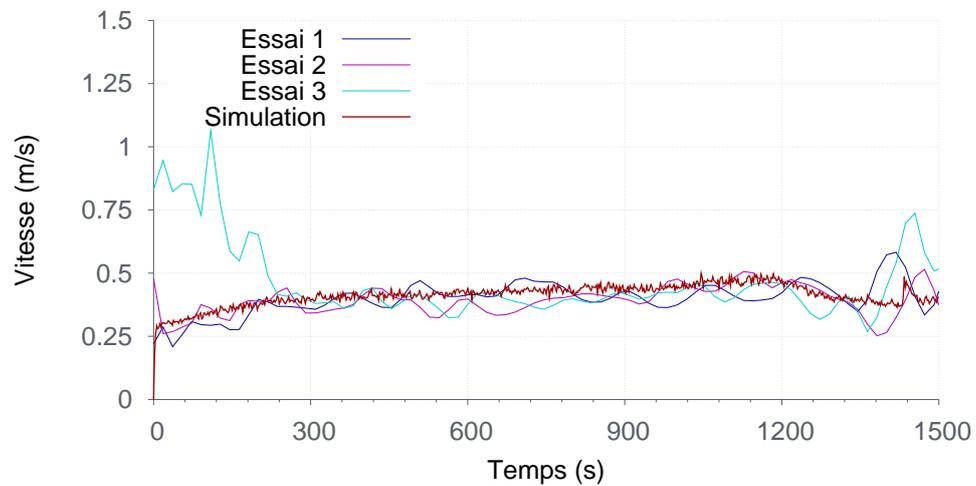


FIGURE 2.25 – Vitesse d'écoulement au milieu de la porte simulée et mesurée aux cours des trois essais à $z = 0,60$ m

2.2.3 Prédiction du dépôt de suie.

On rappelle que le dépôt de suie prédit par FDS au cours d'un essai est une efficacité de dépôt qui correspond par définition au rapport de la masse de suie reçue par la paroi par seconde et par unité de surface \dot{m}''_{dep} , par la concentration de suie C_s dans la cellule adjacente à la paroi.

$$v_{dep}(t) = \frac{\dot{m}''_{dep}(t)}{C_s(t)}. \quad (2.12)$$

La simulation de l'essai telle que décrite précédemment permet d'obtenir les vitesses de dépôt de suie représentées par la figure 2.26 à l'emplacement de chaque cible. On rappelle que les cibles 1 et 2 sont à $z = 1,80$ m tandis que les cibles 3 et 4 sont à $z = 2,10$ m et que les cibles 2 et 4 sont refroidies.

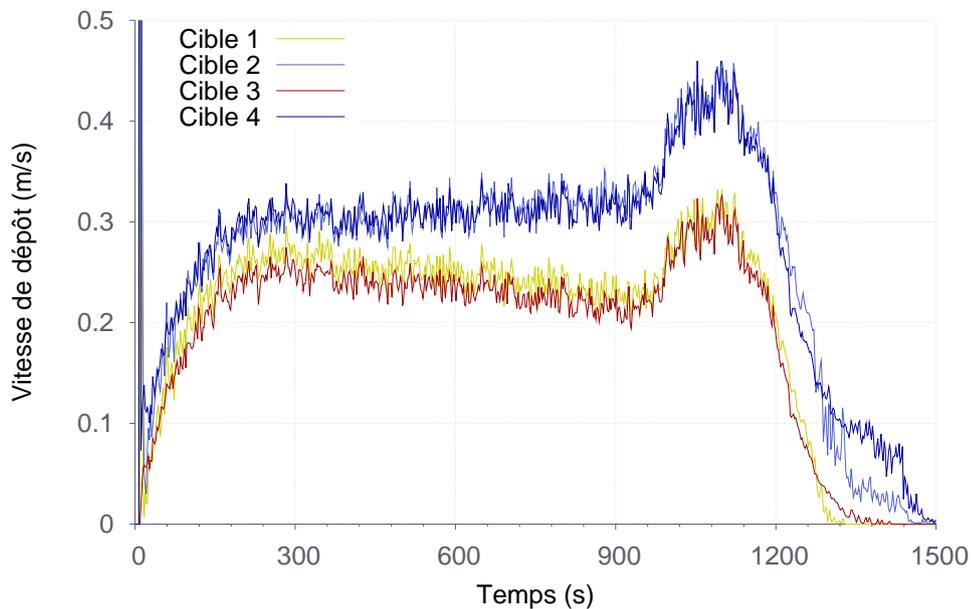


FIGURE 2.26 – Vitesse de dépôt de suie sur chaque cible. On rappelle que les cibles 1 et 2 sont à $z = 1,80$ m tandis que les cibles 3 et 4 sont à $z = 2,10$ m et que les cibles 2 et 4 sont refroidies.

Pour comparer les résultats de la simulation numérique aux résultats expérimentaux, nous nous intéresserons au dépôt par unité de surface sur les cibles, exprimé en $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$. On considère donc que le dépôt est homogène sur la surface exposée des cibles soit $S_{\text{cible}} = 0,49 \text{ m}^2$. L'influence de la température de paroi sur le dépôt de suie est également mise en évidence dans la simulation, comme on pouvait s'y attendre vu les modèles utilisés par le code. La vitesse de dépôt est plus élevée sur les cibles refroidies (cibles 2 et 4) que sur les cibles non refroidies (cibles 1 et 3). En utilisant FDS pour simuler l'essai, on obtient des résultats en termes de dépôt de suie sur les cibles qui sont 70 à 75 % en dessous des résultats expérimentaux moyens (voir figure 2.27).

En pratique, si on s'intéresse aux valeurs de la vitesse d'écoulement calculées par FDS devant les cibles, il s'avère que ces dernières ne dépassent jamais $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (voir figure 2.28). Dans ces conditions de température et d'écoulement, FDS n'utilise donc

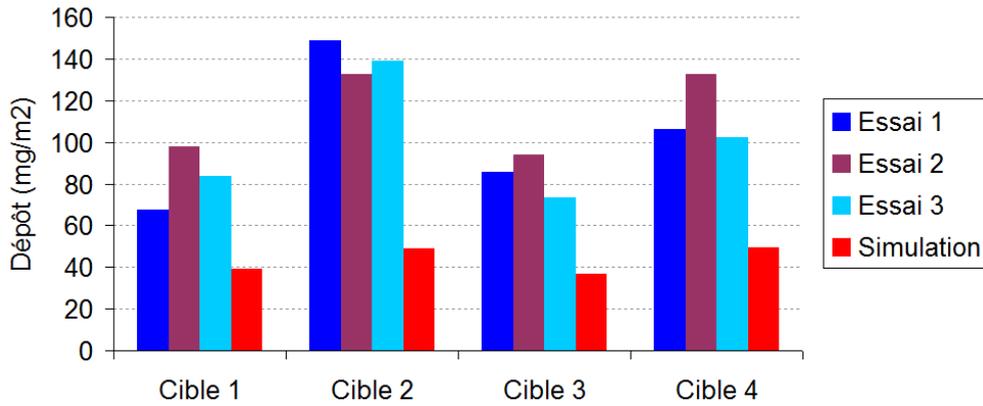


FIGURE 2.27 – Masse de suie déposée sur chaque cible au cours de la simulation.

que l'expression du coefficient de transfert thermique par convection correspondant à la convection naturelle qui n'est donc pas du tout dépendant de la vitesse d'écoulement des fumées. Le gradient de température à la paroi calculé par le code est représenté pour chaque cible sur la figure 2.29.

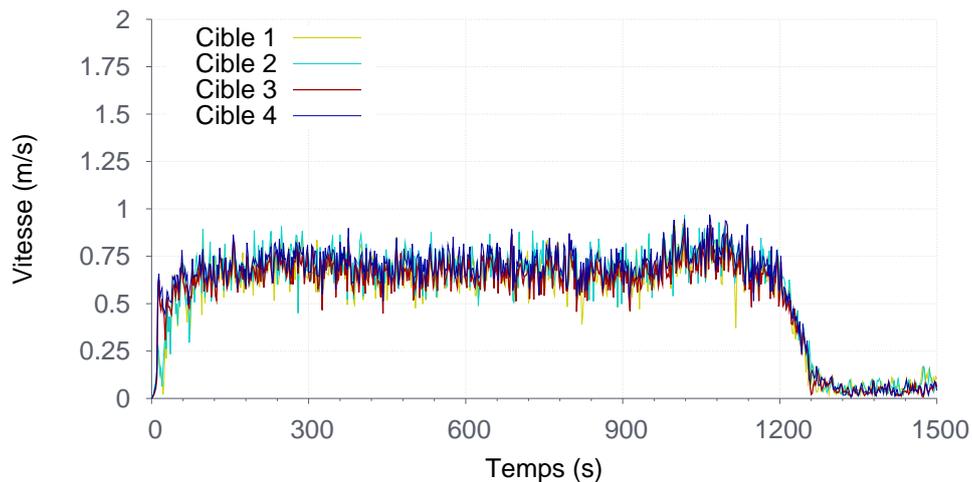


FIGURE 2.28 – Vitesse d'écoulement calculée par FDS en face de chaque cible.

Il est évident que les écarts obtenus entre la simulation et les mesures pour les champs de température et de concentration de suie se répercutent sur la comparaison des résultats de dépôt. Cependant l'écart observé entre la simulation et les mesures de dépôt de l'ordre de 70% est bien supérieur à celui obtenu pour les températures et les concentrations de l'ordre de 20%. Ce constat nous pousse à vouloir comparer les résultats donnés directement par les modèles de dépôt, en s'affranchissant ainsi des erreurs liées à la prédiction de la température et de la concentration. On appliquera donc dans le paragraphe suivant le modèle de dépôt de suie par thermophorèse de FDS en utilisant comme données d'entrée les résultats expérimentaux de température et de concentration de suie, dans le but d'évaluer leur capacité à prédire le dépôt de suie.

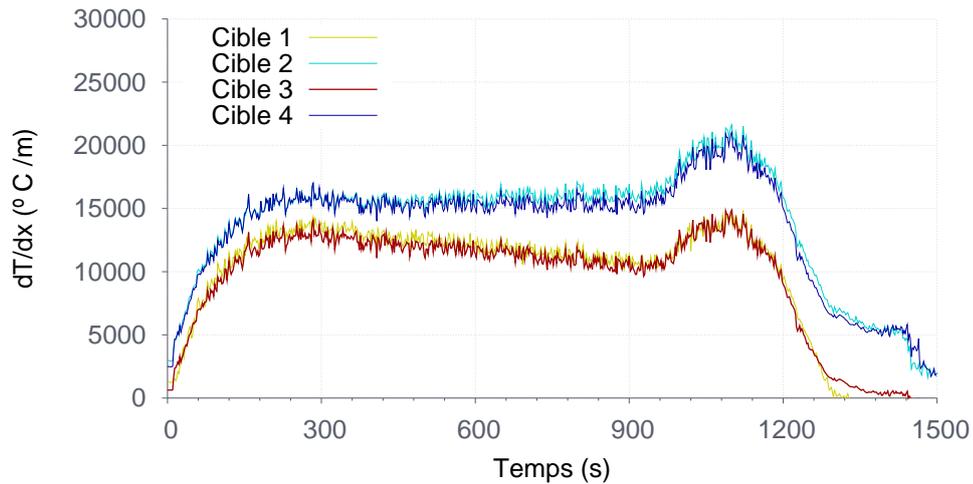


FIGURE 2.29 – Gradient de température à la paroi calculé par FDS pour chaque cible grâce à la relation 2.17.

2.3 Comparaison des résultats avec les modèles théoriques de dépôt.

2.3.1 Modélisation du dépôt de suie

Étant donné que des mesures de température et de concentration de suie ont été faites durant chaque essai, il est possible d'utiliser ces valeurs comme données d'entrée pour tester la modélisation théorique de la vitesse de dépôt de suie en utilisant les outils vus au chapitre 1 et de comparer les résultats obtenus en termes de dépôt aux résultats expérimentaux. Pour calculer théoriquement le dépôt de suie, on se place dans la configuration décrite par la figure 2.30. Chaque cible est considérée comme une surface de température uniforme $T_{\text{paroi}}(t)$, qui correspond à la température mesurée par les thermocouples de surface. Elle est exposée au gaz transportant la suie à température $T_{\text{gaz}}(t)$, mesurée par un thermocouple à 5 cm de la paroi. La fumée contient une concentration massique de suie $C_s(t)$ donnée par les mesures d'opacité effectuées à 15 cm de la paroi. On suppose que la suie se dépose de façon uniforme sur la surface d'une cible ($S_{\text{cible}} = 4,9 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ formant un dépôt de masse par unité de surface $m''_{\text{dep}}(t)$ en $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$. Les

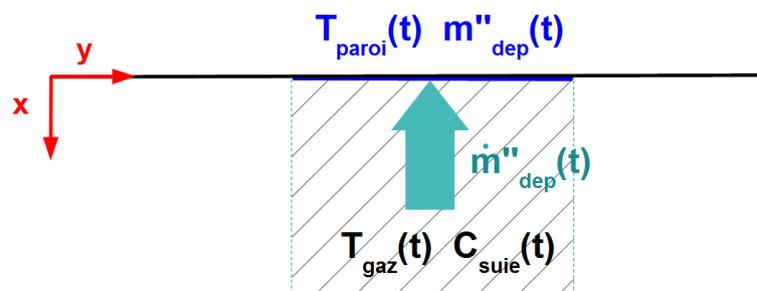


FIGURE 2.30 – Représentation schématique de la modélisation du dépôt de suie utilisée.

mesures de température et d'opacité sont enregistrées toutes les $\Delta t = 1$ s, la masse de particule déposée à l'emplacement de la cible après chaque pas de temps est calculée en fonction des données expérimentales comme :

$$m''_{\text{dep}}(t + \Delta t) = m''_{\text{dep}}(t) + \dot{m}''_{\text{dep}}(t)\Delta t, \quad (2.13)$$

où $\dot{m}''_{\text{dep}}(t)$ est le flux de masse déposé par unité de surface. La masse m_{dep} de particules déposées sur une cible à un instant t vaut alors :

$$m_{\text{dep}}(t) = S_{\text{cible}} m''_{\text{dep}}(t) = S_{\text{cible}} \int_0^t \dot{m}''_{\text{dep}}(\tau) d\tau. \quad (2.14)$$

Le flux par unité de surface de masse de suie déposée s'exprime par définition de la vitesse de dépôt v_{dep} sous la forme suivante :

$$\dot{m}''_{\text{dep}}(t) = C_s(t) v_{\text{dep}}(t). \quad (2.15)$$

On assimile la vitesse de dépôt v_{dep} à la vitesse de thermophorèse v_{th} , en négligeant les autres modes de dépôt, on a donc :

$$v_{\text{dep}}(t) = v_{\text{th}}(t) = \frac{K_{\text{th}}\nu}{T_{\text{gaz}}} \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0}, \quad (2.16)$$

où ν est la viscosité cinématique du gaz. Il est donc nécessaire d'évaluer le gradient de température à la paroi $\left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0}$ et le coefficient de thermophorèse K_{th} . Plusieurs modèles existent pour évaluer la vitesse de thermophorèse et en particulier le coefficient K_{th} . Ces modèles sont rappelés dans le chapitre 1.

Pour calculer le gradient de température à la paroi avec les données à notre disposition (température gaz et température de paroi) nous faisons le choix d'utiliser le modèle implémenté dans FDS. L'équation de la chaleur à la paroi permet d'exprimer le gradient de température en fonction du coefficient de transfert thermique :

$$k_{\text{gaz}} \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = h(T_{\text{gaz}} - T_{\text{paroi}}) \quad (2.17)$$

où le coefficient de transfert thermique h ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) est calculé comme le maximum entre le résultat donné par une corrélation empirique adaptée à un régime de convection naturelle et celui donné par une autre corrélation adaptée à un régime de convection forcée. On a donc :

$$h = \max \left\{ \begin{array}{l} h_{\text{nat}} = 1,31 |T_{\text{gaz}} - T_{\text{paroi}}|^{1/3} \\ h_{\text{for}} = \frac{k_g}{L} (0,037 Re^{0,8} Pr^{0,33}) \end{array} \right\}, \quad (2.18)$$

où k_g est la conductivité thermique de l'air. Le nombre de Reynolds $Re = \rho u L / \mu$ est fonction de la masse volumique du gaz, de la viscosité dynamique du gaz et de la valeur de la vitesse calculée par simulation numérique dans la maille adjacente à la

2.3. Comparaison des résultats avec les modèles théoriques de dépôt.

cible. Les propriétés du gaz sont évaluées à la température de film $(T_{\text{gaz}} + T_{\text{paroi}})/2$ et en assimilant le gaz à de l'air. La valeur de L correspond à une distance caractéristique de l'écoulement et est fixée à $L = 1$ m. Le nombre de Prandtl Pr est également fixé et vaut $Pr = 0,7$. Ces valeurs correspondent aux paramètres par défaut utilisés dans FDS. La vitesse de dépôt s'exprime donc en fonction du coefficient de transfert thermique par convection h comme :

$$v_{\text{dep}}(t) = \frac{K_{\text{th}}\nu}{T_{\text{gaz}}} \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = \frac{K_{\text{th}}\nu}{k_{\text{gaz}}} h(Re, Pr, \Delta T) \frac{\Delta T}{T_{\text{gaz}}}, \quad (2.19)$$

si on note $\Delta T = T_{\text{gaz}} - T_{\text{paroi}}$ la différence de température entre le gaz et la paroi.

En utilisant la série de modèles décrits ci-dessus, on peut calculer à chaque seconde le dépôt de suie à la paroi en fonction de l'ensemble des données d'entrée $(T_{\text{gaz}}(t), T_{\text{paroi}}(t), C_t(t))$ mesurées dans les fumées pour chaque cible, respectivement par un thermocouple, un thermocouple de contact et un capteur opacimétrique. Les choix de modélisation consisteront à sélectionner le modèle pour calculer le coefficient de thermophorèse K_{th} ainsi que les propriétés physiques des particules de suie : leur diamètre et leur conductivité thermique.

La valeur de la température utilisée pour calculer la vitesse de thermophorèse est choisie dans FDS comme la température de la cellule gaz adjacente. C'est la température que nous avons mesurée lors de nos essais à 5 cm de la paroi de dépôt. Cependant BATCHELOR *et al.* (1985) expriment la vitesse de dépôt par thermophorèse, c'est à dire le rapport du flux surfacique de masse de suie qui se dépose \dot{m}''_{dep} par la concentration massique de suie dans le gaz C_s , en fonction de la température de paroi :

$$v_{\text{dep}} = \frac{\dot{m}''_{\text{dep}}}{C_s} = \frac{K_{\text{th}}}{\nu} \left(\frac{1}{T} \frac{dT}{dx} \right)_{x=0}. \quad (2.20)$$

L'utilisation pour T de la température absolue fait que l'écart créé par l'utilisation de la température de gaz T_{gaz} , de la température de paroi T_{paroi} ou de la température de film $T_f = (T_{\text{gaz}} + T_{\text{paroi}})/2$ est très faible, en particulier ici vu les faibles températures atteintes par les fumées.

2.3.2 Application du modèle de dépôt de FDS aux résultats expérimentaux

Le logiciel FDS utilise l'expression du coefficient de thermophorèse K_{th} donnée par TALBOT *et al.* (1980) et rappelée ici :

$$K_{\text{th}} = \frac{2C_s(\alpha + C_tKn)C_c}{(1 + 3C_mKn)(1 + 2\alpha + 2C_tKn)}, \quad (2.21)$$

où $C_s = 1,17$ est le coefficient de glissement thermique, $C_m = 1,14$ est le coefficient d'accommodation de quantité de mouvement, $C_t = 2,18$ est le coefficient d'accommodation thermique et $\alpha = k_g/k_{\text{suie}}$ est le rapport de la conductivité thermique de l'air par celle de la suie, toutes deux prises à la température T_{gaz} . Le nombre de Knudsen Kn est

calculé comme dans FDS par :

$$Kn = \frac{2\lambda}{d_{\text{suie}}} \frac{T_{\text{gaz}}}{T_{\text{amb}}}, \quad (2.22)$$

où $\lambda = 0,065 \mu\text{m}$ est le libre parcours moyen des molécules de gaz à la température $T_{\text{amb}} = 25^\circ\text{C}$ et à pression atmosphérique et d_{suie} est le diamètre des particules de suie. On s'intéresse dans un premier temps aux valeurs par défaut des propriétés des particules de suie dans FDS, qui sont indépendantes de la température, soit

$$\begin{aligned} d_{\text{suie}} &= 1 \mu\text{m} \\ \rho_{\text{suie}} &= 1800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \\ k_{\text{suie}} &= 0,26 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Ces résultats peuvent directement être comparés avec les valeurs de dépôt mesurées expérimentalement à la fin de chaque essai. On voit qu'en utilisant directement un modèle de dépôt identique à celui qui est contenu dans FDS, on obtient des résultats supérieurs de 7 à 44 % avec les résultats donnés par la simulation numérique de l'essai.

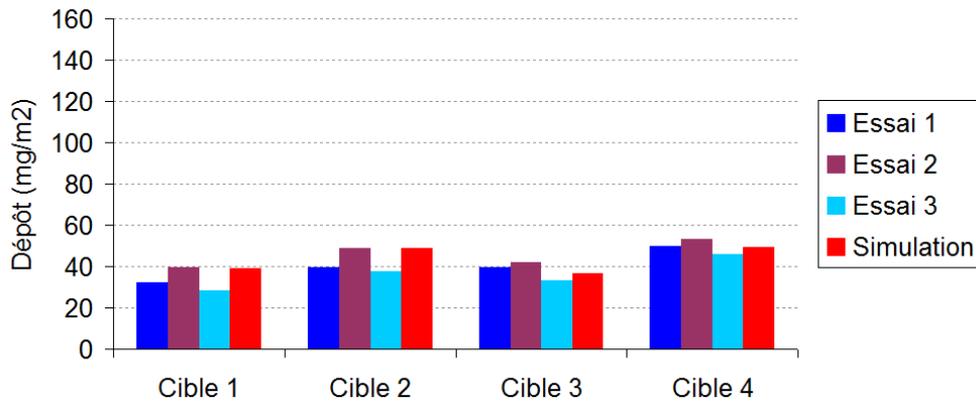


FIGURE 2.31 – Résultats de dépôt de suie donnés par la simulation numérique "FDS" et par l'utilisation directe du modèle de dépôt.

La seule source possible de cet écart, étant donné que le modèle utilisé est identique à celui qui est implémenté dans FDS, est l'écart entre les champs de température et de concentration simulés et les valeurs mesurées.

Malgré tout, dans notre configuration expérimentale, ce modèle sous estime fortement le dépôt de suie. On obtient en effet un écart relatif entre les mesures et les résultats donnés par le modèle qui varie entre 52 et 73 % selon l'essai.

Pour une même altitude de prélèvement, il est intéressant de considérer le rapport entre le dépôt sur la cible refroidie et le dépôt sur la cible non refroidie, qui est représentatif de l'importance de la thermophorèse. Comme on peut le voir dans le tableau 2.9, ce rapport est mieux prédit pour les cibles situées à $z = 2,10 \text{ m}$ que pour les cibles situées à $z = 1,80 \text{ m}$.

2.3. Comparaison des résultats avec les modèles théoriques de dépôt.

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Dépôt _{CB2} / Dépôt _{CB1}	2,21	1,35	1,66
Dépôt _{CB4} / Dépôt _{CB3}	1,24	1,41	1,39

TABLE 2.8 – Rapports entre le dépôt sur cible refroidie et le dépôt sur cible non refroidie - expérimental

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Dépôt _{CB2} / Dépôt _{CB1}	1,24	1,23	1,32
Dépôt _{CB4} / Dépôt _{CB3}	1,26	1,27	1,40

TABLE 2.9 – Rapports entre le dépôt sur cible refroidie et le dépôt sur cible non refroidie - modèle de FDS

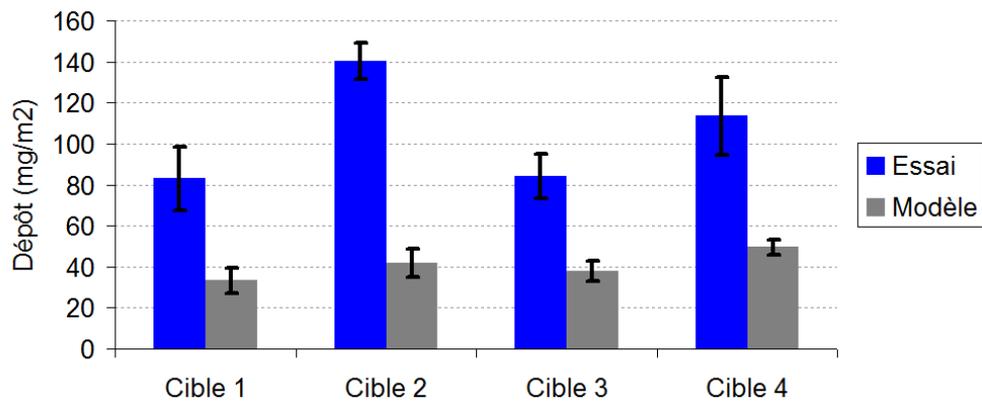


FIGURE 2.32 – Moyenne sur les trois essais du dépôt expérimental et dépôt calculé par le modèle 1 (de FDS)
 ($K_{th, Beresnev}$ avec $k_g = 0.26$ et $d_p = 1 \mu\text{m}$)

2.3.3 Amélioration du modèle utilisé dans FDS.

La littérature (ZHENG, 2002) s'accorde sur le fait que la formule d'interpolation de TALBOT *et al.* (1980) n'est pas celle qui présente le meilleur accord avec les nombreuses données expérimentales existant sur la thermophorèse de particules sphériques dans le régime intermédiaire ($0,1 < Kn < 10$). En particulier il a été montré que le modèle de BERESNEV *et al.* (1989), plus récent et issu de la résolution des équations de Boltzmann, est plus précis dans ce domaine. Il a également été montré par BRUGIÈRE *et al.* (2014) que considérer les particules de suie qui sont des agrégats fractals comme des particules sphériques, de diamètre égal à leur diamètre de giration, dont la conductivité thermique et la densité sont uniformes et égales à celle du carbone, ne permet pas de retrouver théoriquement les résultats expérimentaux sur leur vitesse de thermophorèse.

- Le modèle utilisé pour le calcul du coefficient de thermophorèse K_{th} . Les meilleurs résultats dans le cas d'agrégats ou de particules sphériques ont été trouvés en utilisant le modèle développé par BERESNEV *et al.* (1989), qui est valable quel que soit le nombre de Knudsen Kn des particules.
- La valeur de la conductivité thermique des particules de suie k_{suie} utilisée pour le calcul du coefficient de thermophorèse. Il a en effet été montré que la conductivité thermique effective d'un agrégat fractal peu compact, comme c'est le cas des suies, est inférieure à celle du matériau dont sont composées les particules primaires. Dans le cas le plus extrême, la conductivité thermique effective tendrait à être identique à celle du gaz environnant, rendant alors le rapport $\alpha = k_{gaz}/k_{suie}$ égal à 1.
- La valeur du diamètre utilisé pour le calcul du nombre de Knudsen est fixée arbitrairement à $1 \mu\text{m}$ alors que plusieurs sources indiquent que ce diamètre n'est pas adapté aux particules produites ici. D'une part les données disponibles dans la bibliographie pour des feux d'heptane de tailles diverses (KÖYLÜ *et al.*, 1995) indiquent un diamètre de giration des agrégats de 630 nm, d'autre part la mesure effectuée par l'impacteur indique que 71% de la masse des particules a un diamètre aérodynamique compris entre 1,6 et $3,5 \mu\text{m}$.

Nom de l'essai	Coefficient de thermophorèse	Conductivité thermique k_{suie}	Diamètre D_{suie}
Modèle - 1	Talbot	$0,26 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$1 \mu\text{m}$
Modèle - 2	Beresnev & Chernyak	$0,26 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$1 \mu\text{m}$
Modèle - 3	Beresnev & Chernyak	$k_{suie} = k_{gaz}$	$1 \mu\text{m}$
Modèle - 4	Beresnev & Chernyak	$k_{suie} = k_{gaz}$	$2,55 \mu\text{m}$
Modèle - 5	Beresnev & Chernyak	$k_{suie} = k_{gaz}$	$0,035 \mu\text{m}$

TABLE 2.10 – Paramètres choisis pour la modélisation du dépôt de suie.

Expression du coefficient de thermophorèse K_{th}

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, le modèle de thermophorèse qui est le plus en accord avec les données expérimentales récentes sur la thermophorèse est le modèle de BERESNEV *et al.* (1989).

Comme on s'y attend en comparant les coefficients de thermophorèse donnés par les deux modèles (voir figure 2.34), le passage du modèle de Talbot au modèle de Beresnev, en gardant tous les paramètres utilisés par défaut dans FDS, diminue la masse de suie déposée. En fixant la conductivité thermique des particules à $k_{suiie} = 0,26 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, on obtient en effet un paramètre $\alpha = k_{gaz}/k_{suiie}$ de l'ordre de 0,1. Dans ces conditions, quel que soit le diamètre utilisé (mais c'est d'autant plus marqué pour un diamètre de l'ordre de $1 \mu\text{m}$), l'utilisation du modèle de BERESNEV *et al.* (1989) à la place du modèle de TALBOT *et al.* (1980) entraîne une diminution du coefficient de thermophorèse K_{th} pouvant aller jusqu'à 40 % selon le diamètre de la particule considérée. La réduction de K_{th} réduit le dépôt dans la même proportion, la vitesse de dépôt étant proportionnelle à ce coefficient.

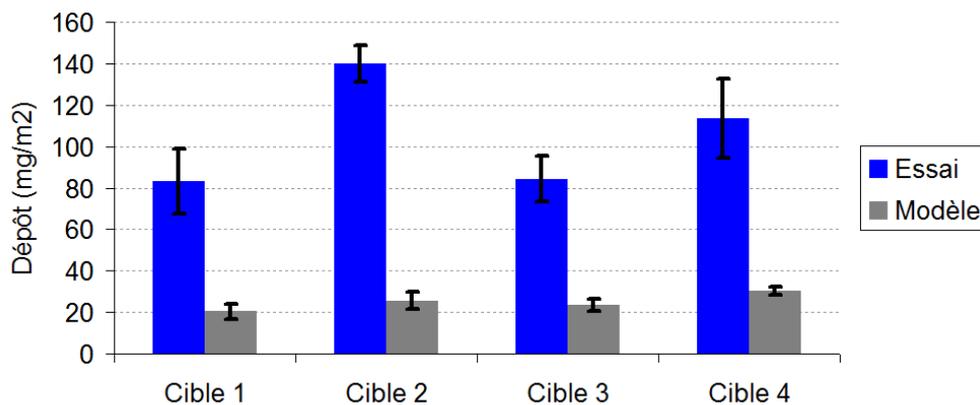


FIGURE 2.33 – Moyenne sur les trois essais du dépôt expérimental et dépôt calculé par le modèle 2 ($K_{th,Beresnev}$ avec $\alpha = k_{gaz}/0,26$ et $d_p = 1 \mu\text{m}$)

Conductivité thermique effective des particules

Lorsque l'on choisit de fixer le rapport des conductivités thermiques $\alpha = k_{gaz}/k_{suiie}$ à 1, supposant alors que la porosité de la particule rend sa conductivité thermique identique à celle du gaz environnant, le dépôt obtenu augmente de 150 %. C'est également une conséquence directe de la variation du coefficient de thermophorèse K_{th} en fonction de α . Comme on l'a vu dans l'état de l'art, l'utilisation d'une valeur de α proche de 1 change la dépendance du coefficient de thermophorèse au diamètre de la particule : K_{th} augmente lorsque le diamètre augmente. Si l'écart relatif entre le coefficient de thermophorèse à $\alpha = 0,1$ et $\alpha = 1$ est faible pour le modèle de TALBOT *et al.* (1980) (de l'ordre de 40%), il est beaucoup plus important pour le modèle de BERESNEV *et al.* (1989)

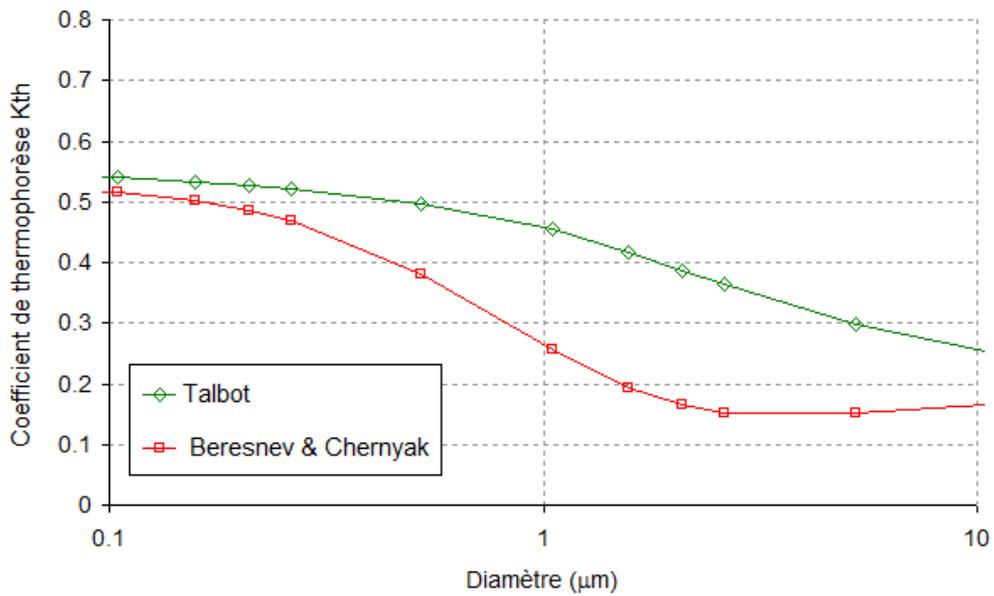


FIGURE 2.34 – Coefficients de thermophorèse donnés par les modèles de TALBOT *et al.*, 1980 et BERESNEV *et al.*, 1989 en fonction du diamètre de particule (pour $\alpha = k_{gaz}/k_{suie} = 0,1$).

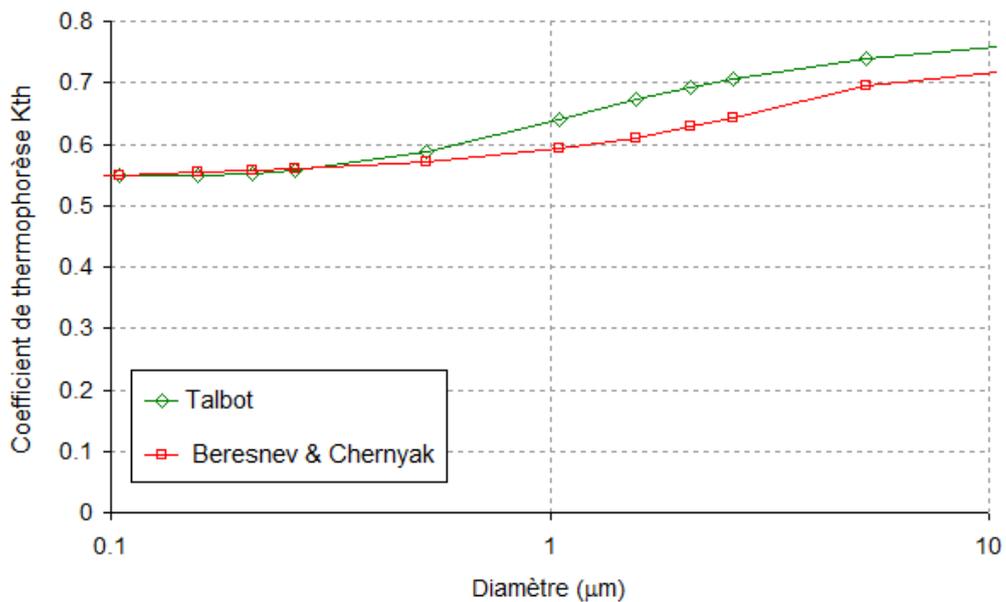


FIGURE 2.35 – Coefficients de thermophorèse donnés par les modèles de TALBOT *et al.*, 1980 et BERESNEV *et al.*, 1989 en fonction du diamètre de particule (pour $\alpha = k_{gaz}/k_{suie} = 1$).

(de l'ordre de 140 %). La figure 2.36 représente le dépôt prédit grâce au modèle de thermophorèse de Beresnev & Chernyak pour un rapport de conductivité thermique égal à 1.

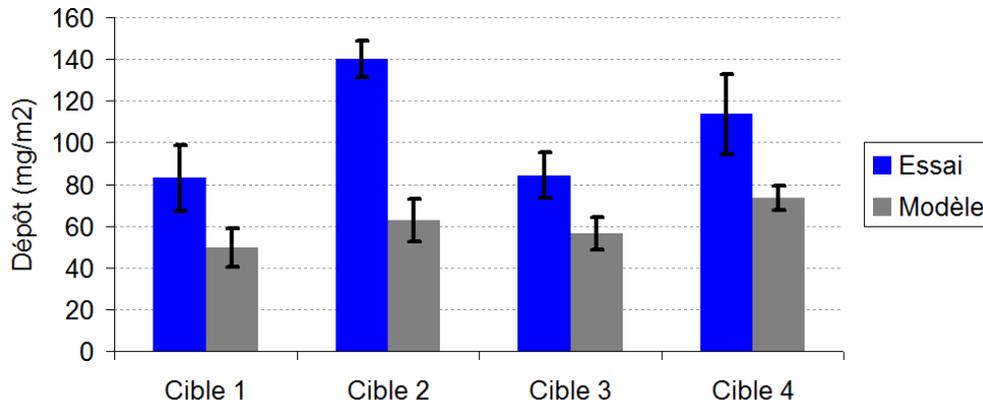


FIGURE 2.36 – Moyenne sur les trois essais du dépôt expérimental et dépôt calculé par le modèle 3 ($K_{th,Beresnev}$ avec $\alpha = 1$ et $d_p = 1 \mu\text{m}$)

Diamètre effectif des particules

Si on suppose que $\alpha = 1$, le coefficient de thermophorèse devient une fonction croissante du diamètre de particule (voir figure 2.35), mais il en devient beaucoup moins dépendant. Il est cependant intéressant de vérifier l'influence de l'utilisation d'une valeur de diamètre effectif pour les particules de suie qui soit en accord avec la littérature. KÖYLÜ *et al.* (1995) trouve à petite échelle que les agrégats produits par des feux d'heptane sont des particules fractales peu compactes (dimension fractale de 1,74) composées de monomères de diamètre 35 nm et de diamètre de giration 630 nm. On mesure expérimentalement que 70 % de la masse des particules a un diamètre aérodynamique moyen de 2,55 μm . Les résultats présentés sur la figure 2.37 sont obtenus grâce au modèle de Beresnev & Chernyak en supposant que le diamètre des particules vaut 2,55 μm .

On peut également, comme le suggère SUZUKI *et al.* (2009) supposer que le coefficient de thermophorèse dépend du diamètre des particules primaires. Le dépôt calculé par le modèle 5 et représenté sur la figure 2.38 résulte d'un diamètre effectif des particules d_p fixé à 35 nm. Le coefficient K_{th} , comme le dépôt final qui lui est proportionnel, diminue de seulement 10 % quand le diamètre de la particule passe de 1 μm à 100 nm.

2.4 Conclusion

L'objectif de cette campagne expérimentale était d'une part de récolter des données à échelle réelle sur le dépôt des particules de suie produites par des flammes et d'autre part de tester la validité des méthodes de simulation numérique et de modélisation du dépôt de suie disponibles.

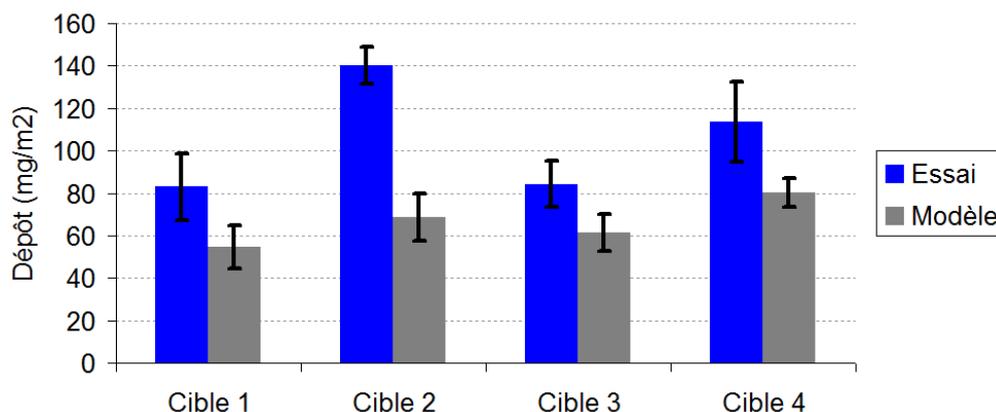


FIGURE 2.37 – Moyenne sur les trois essais du dépôt expérimental et dépôt calculé par le modèle 4 ($K_{th,Beresnev}$ avec $\alpha = 1$ et $d_p = 2,55 \mu\text{m}$)

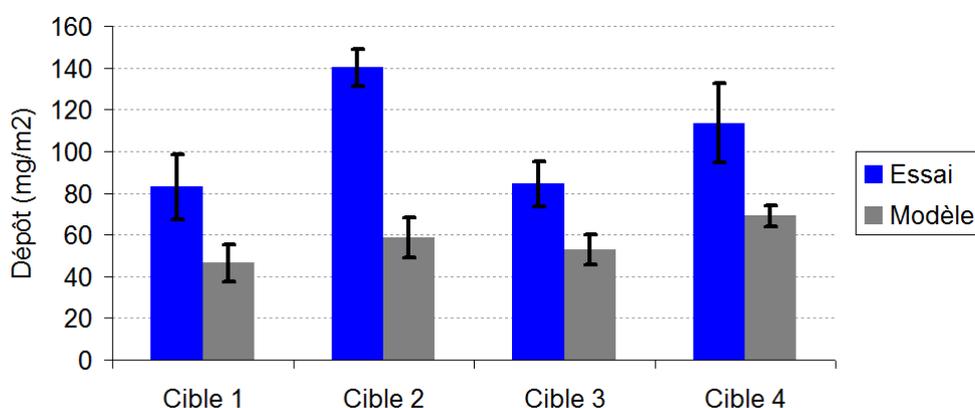


FIGURE 2.38 – Moyenne sur les trois essais du dépôt expérimental et dépôt calculé par le modèle 5 ($K_{th,Beresnev}$ avec $\alpha = 1$ et $d_p = 0,035 \mu\text{m}$)

On a ainsi mis en place un dispositif expérimental à échelle réelle dans lequel il est possible de récolter la suie déposée sur des éléments de parois verticales et d'en mesurer la quantité. Les mesures effectuées sont cohérentes avec l'analyse des modèles existants dans la littérature et mettent comme prévu en évidence l'importance de la thermophorèse comme mécanisme de dépôt des particules de suie.

On a effectué plusieurs simulations numériques de l'essai grâce au logiciel FDS en prescrivant les températures des surfaces de dépôt pour éviter des erreurs liées à la prédiction du transfert thermique aux parois. Cette simulation permet de reproduire les champs de température et de concentration de suie mais sous estime le dépôt de suie d'un facteur 2 à 3.

En mesurant les températures de paroi, de gaz ainsi que les concentrations de suie dans les fumées, on se donne les moyens de comparer ces résultats expérimentaux à des modèles théoriques de dépôt par thermophorèse. Aucun ne permet de prédire efficacement la quantité de suie déposée de façon efficace. Le modèle classique, utilisé

en particulier dans FDS, sous-estime le dépôt d'un facteur 2 à 3. L'utilisation de modèles plus récents, couvrant une plus large gamme de taille de particules, ou la prise en compte de la morphologie aérée des particules de suie, ne permet pas d'obtenir des résultats satisfaisants.

On utilise cependant un modèle de thermophorèse qui rend le dépôt dépendant de la vitesse d'écoulement, par l'intermédiaire du calcul du gradient thermique. Or ni la configuration d'essai utilisée, ni le modèle de calcul du coefficient de transfert thermique par convection utilisé dans FDS ne permettent de prendre en compte la vitesse d'écoulement des fumées comme paramètre du dépôt de suie. Nous avons donc besoin de compléter cette étude grâce à une campagne d'essais à échelle réelle dont l'objectif est cette fois de vérifier l'influence de ce nouveau paramètre dans le dépôt de suie lors d'un incendie.

Chapitre 3

Étude à échelle réelle de l'influence de la vitesse d'écoulement sur le dépôt

4.1	Description de l'essai en conduite	119
4.1.1	Hypothèses et objectif	119
4.1.2	Réalisation d'une veine à section variable	120
4.1.3	Pré-dimensionnement par simulation numérique	121
	Simulation numérique du dispositif	121
	Terme source	122
	Champs de vitesse	122
	Concentration de suie	123
4.2	Mise en œuvre du dispositif expérimental	124
4.2.1	Plan d'expériences	124
4.2.2	Source de fumée chaude	126
4.2.3	Instrumentation de la veine	128
	Cibles de dépôt	128
	Températures	129
4.3	Résultats expérimentaux	130
4.3.1	Pertes thermiques le long de la veine	130
4.3.2	Mesure du dépôt de suie	132
	Configuration principale : section lente → section rapide	132
	Effet du changement de configuration	133
4.4	Bilan	134

3.1. Description et analyse du montage expérimental

Lors de la campagne d'essais présentée dans le chapitre 2, l'endroit où les mesures de dépôt de suie ont été réalisées rendait difficile l'estimation de la vitesse d'écoulement des fumées. Il est cependant logique de penser que la vitesse moyenne d'écoulement hors couche limite influence le dépôt. En effet nous avons vu que le dépôt de suie, dans ce cas, était majoritairement dû à la thermophorèse qui est directement liée au gradient de température à la paroi. Or le champ de température en proche paroi est lui même dépendant du gradient de vitesse, lorsque la convection forcée est dominante. L'objectif de cette nouvelle campagne d'essais, dont les résultats apporteront de nouvelles données quantitatives sur le dépôt, est donc de mettre en évidence l'influence de la vitesse d'écoulement sur le dépôt de suie.

Ce chapitre est construit en deux parties. Nous décrirons d'abord le dispositif expérimental mis en œuvre lors de ces essais. Nous vérifierons ensuite, grâce à une simulation numérique validée par rapport aux mesures réalisées dans la couche de fumée, dans quelle mesure les mesures de dépôt nous permettent effectivement de caractériser l'influence de la vitesse d'écoulement. Nous analyserons enfin ces résultats de manière à quantifier l'influence de ce paramètre.

3.1 Description et analyse du montage expérimental

Nous avons choisi pour ces essais d'ajouter à un local semblable à celui utilisé lors de la première campagne d'essais un couloir plus étroit, de façon à créer une zone d'accélération des fumées sortantes. Ce dispositif expérimental a été aménagé dans une partie de la structure expérimentale dédiée à l'incendie du LCPP (voir figure 3.1).



FIGURE 3.1 – Photographie de la structure expérimentale du LCPP au fort de la Briche.

Seule une partie de la structure expérimentale du fort de la Briche a été utilisée pour ces essais (voir figure 3.2). L'utilisation de la seule circulation, qui est constituée

de caissons maritimes identiques à celui dans lequel la première campagne d'essai s'est déroulée, permet de se placer dans une configuration semblable à celle des essais en local présentés dans le chapitre 2.

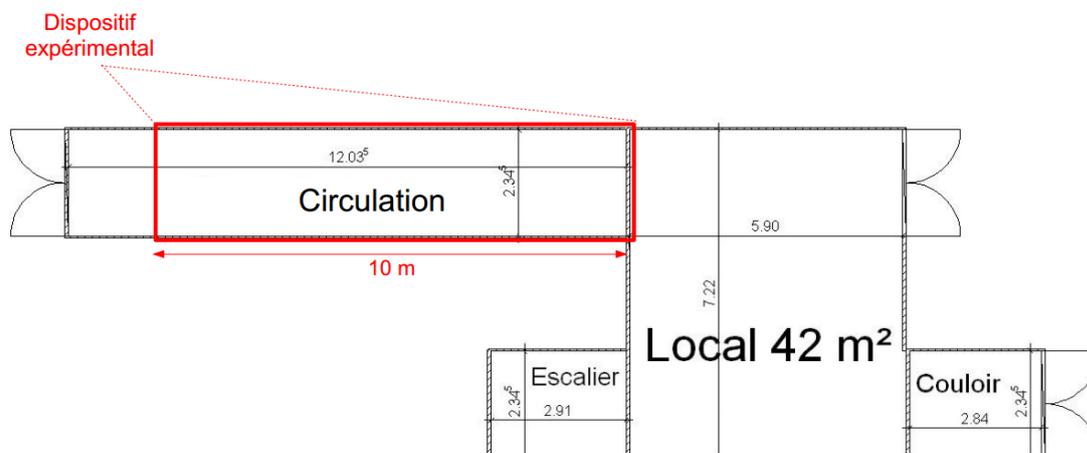


FIGURE 3.2 – Installation du dispositif dans la structure expérimentale du LCPP.

Le dispositif expérimental est représenté sur la figure 3.3. Il consiste en un local de 6 m de long et 2 m de large, prolongé dans sa longueur par une portion de couloir dont la largeur diminue progressivement de 2 m à 0,85 m suivi d'un couloir de 0,83 m de large et 2,5 m de long donnant sur l'extérieur. La hauteur sous plafond est imposée à la fois par l'isolation et par la hauteur du sol qui sont variables dans la longueur du couloir (voir figure 3.3). Elle passe de 2,07 m dans le local à 2,20 m entre le local et la marche puis à 2,40 m après la marche.

Étant donné que les fumées sont incompressibles, la réduction de la largeur du couloir permet, par conservation du débit, d'augmenter la vitesse des fumées en partie haute qui s'écoulent vers l'extérieur. On passe ainsi d'un couloir de 2 m de large à un couloir de 0,85 m de large. En réduisant la largeur d'un facteur 2,4, on espère augmenter la vitesse dans des proportions comparables.

On s'intéresse donc au dépôt de suie sur la paroi sud du dispositif, aux endroits indiqués sur la figure 3.3 par l'emplacement des supports. On mesure le dépôt dans deux zones : la zone 1 est située en amont de la réduction de largeur et la zone 2 est située en aval, dans le couloir de largeur réduite.

La réduction de la largeur du couloir est progressive grâce à l'inclinaison de 45° de la paroi du couloir. Les mesures de dépôt dans le couloir sont en outre effectuées le plus loin possible en aval du convergent de manière à laisser le temps à l'écoulement des fumées de se redresser. On vérifiera grâce à la simulation numérique que ce convergent vertical n'entraîne pas une trop grande déviation de l'écoulement par rapport à l'axe \vec{x} au niveau des zones de mesure du dépôt.

3.1. Description et analyse du montage expérimental

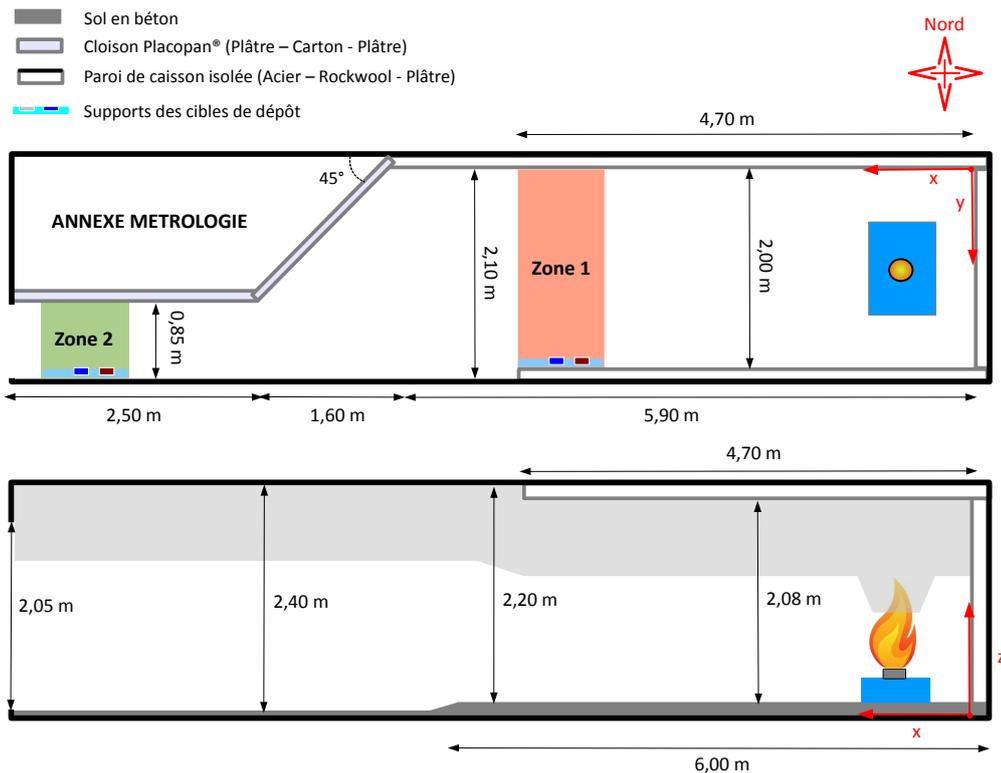


FIGURE 3.3 – Dimensions du local d’essai : vue du dessus et vue en coupe horizontale.

3.1.1 Mise en œuvre des essais

Planification des expériences

Au total six essais ont été réalisés dans ce dispositif expérimental. Le tableau 3.1 donne les références, dates de réalisation, heure de début et heure de fin pour chacun des essais. Ceux-ci ont été réalisés sur plusieurs jours, à des heures différentes, ce qui implique des conditions extérieures variables d’un essai à l’autre. Comme dans le chapitre 1, la répétition de l’essai permet de prendre en compte l’incertitude liée aux conditions ambiantes, difficiles à contrôler lors de campagnes d’essais à échelle réelle ayant lieu en extérieur (BELLIVIER *et al.*, 2013). Les résultats forment une enveloppe expérimentale représentative de l’incertitude liée à la variabilité de ces conditions ambiantes (pression atmosphérique, température, vent, ...).

Foyer utilisé

Le foyer est identique à celui qui avait été utilisé lors de la première série d’essai : un bac circulaire de dimensions 0,225 m de diamètre par 5 cm de haut. On verse dans le bac au début de chaque essai 2 L, soit 1,4 kg, d’heptane technique liquide.

Le bac est positionné à l’extrémité du dispositif opposée à l’ouverture, sur une balance qui mesure la perte de masse d’heptane au cours de l’essai. Il est ventilé naturellement par la seule ouverture, située à l’extrémité opposée du couloir d’essai, de 0,75 m de large par 2,00 m de haut. Le bac est surélevé de 60 cm par rapport au sol, car il est

Nom de l'essai	Date de l'essai	Heure de début	Heure de fin
Essai 1-1	19/11/2015	14h42	15h00
Essai 1-2	19/11/2015	16h27	16h46
Essai 1-3	20/11/2015	12h33	12h53
Essai 2-1	20/11/2015	15h10	15h30
Essai 2-2	20/11/2	16h42	17h02
Essai 2-3	23/11/2015	11h31	11h52

TABLE 3.1 – Références, dates de réalisation, heure de début et heure de fin des six essais réalisés.

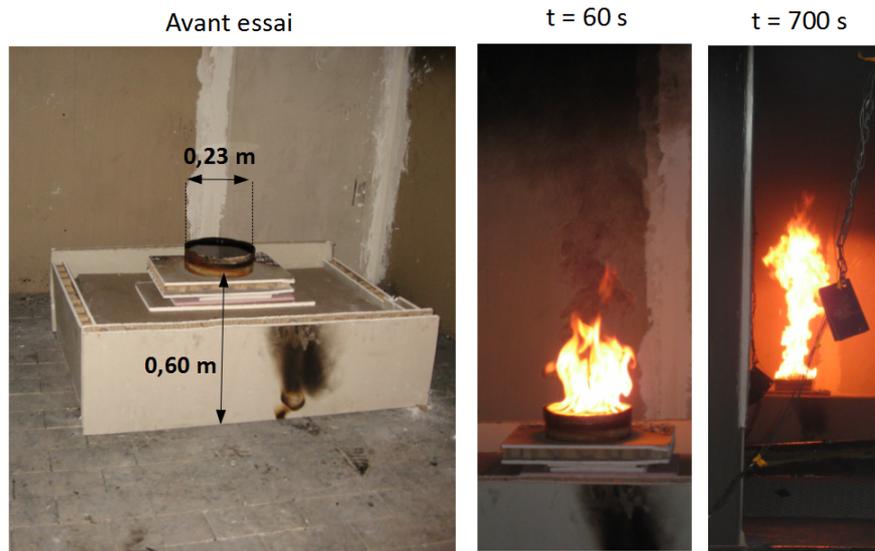


FIGURE 3.4 – Photographie du foyer avant et pendant l'essai.

installé sur une balance protégée thermiquement. En ajoutant la hauteur du bac (5 cm), l'injection de combustible gazeux dans le local, qui correspond à la base de la flamme, est située à 65 cm du sol. Cette surélévation augmente la hauteur libre de fumée et donc diminue l'épaisseur de la couche de fumée. Ainsi, la température et la concentration de suie est augmentée, ce qui permet d'accroître la quantité de suie qui se dépose sur les cibles. Nous utilisons le même foyer pour tous les essais sachant que nous avons vérifié que la perte de masse mesurée est reproductible d'un essai à l'autre.

Il est possible d'estimer sa puissance d'après la formule suivante, en supposant que le foyer est toujours dans des conditions bien ventilées :

$$\dot{q} = \Delta h_c \dot{m}_{\text{foyer}} , \quad (3.1)$$

où \dot{q} est la puissance du foyer et $\Delta h_c = 44,6 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ est la chaleur de combustion de l'heptane, donnée dans la littérature (TEWARSON, 2002).

Bien que le foyer soit identique à celui de la première configuration d'essai, il est ici soumis à des conditions de ventilation et de confinement différentes. La dynamique de perte de masse du foyer mesurée lors de ces essais varie donc par rapport à la première campagne d'essais (voir figure 3.5).

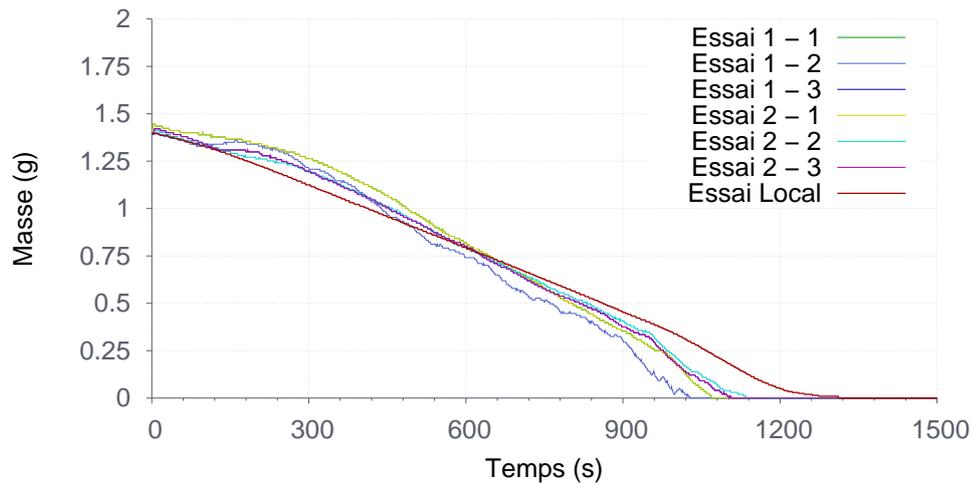


FIGURE 3.5 – Pertes de masse des essais comparées à la perte de masse moyenne mesurée lors des essais en local présentés au chapitre précédent.

Ce foyer met plus de temps à atteindre son régime quasi-stationnaire que celui de la première campagne d'essais. Pendant ce régime établi, entre 400 s et 920 s, le foyer a une puissance stable de 67 kW. A la fin de l'essai, la puissance du feu de bac augmente brièvement, atteignant 90 kW, avant son extinction au bout de 1110 s. On constate que les essais sont plus courts dans cette configuration que dans la précédente campagne expérimentale, où les essais durent entre 1220 et 1285 s.

Caractérisation expérimentale de la couche de fumée

Deux arbres de thermocouple et un anémomètre 2D, dont les positions sont indiquées sur la figure 3.6, ont été installés dans le dispositif expérimental. Les données fournies par ces capteurs permettent de valider les résultats de la simulation numérique visant à vérifier les propriétés locales de l'écoulement dans les zones de mesure.

Deux arbres de six thermocouples sont installés à 0,4 m en amont des supports de dépôt, un dans chaque zone de mesure. Chaque arbre comporte six thermocouples installés sur un même axe vertical disposés comme indiqués sur la figure 3.6.

Les deux arbres de thermocouples permettent de constater la stratification thermique de l'écoulement : les fumées chaudes restent en partie haute et s'écoulent vers la sortie, tandis que les gaz frais sont aspirés par le foyer en partie basse. S'il est difficile de déterminer d'après ces mesures la hauteur libre de fumée, il est néanmoins possible d'évaluer grossièrement la hauteur de l'interface entre les deux couches, dans laquelle le gradient de température vertical est fort (voir tableau 3.9). Cette couche de transition est plus épaisse dans la zone 2 (environ 80 cm) que dans la zone 1 (environ 50 cm). Cependant on observe le même écart de 60 °C entre la couche chaude et la couche froide dans les deux zones.

La vitesse d'écoulement des gaz frais entrant dans le couloir est mesurée par un anémomètre à ultrason identique à celui utilisé lors de la précédente campagne d'essai.

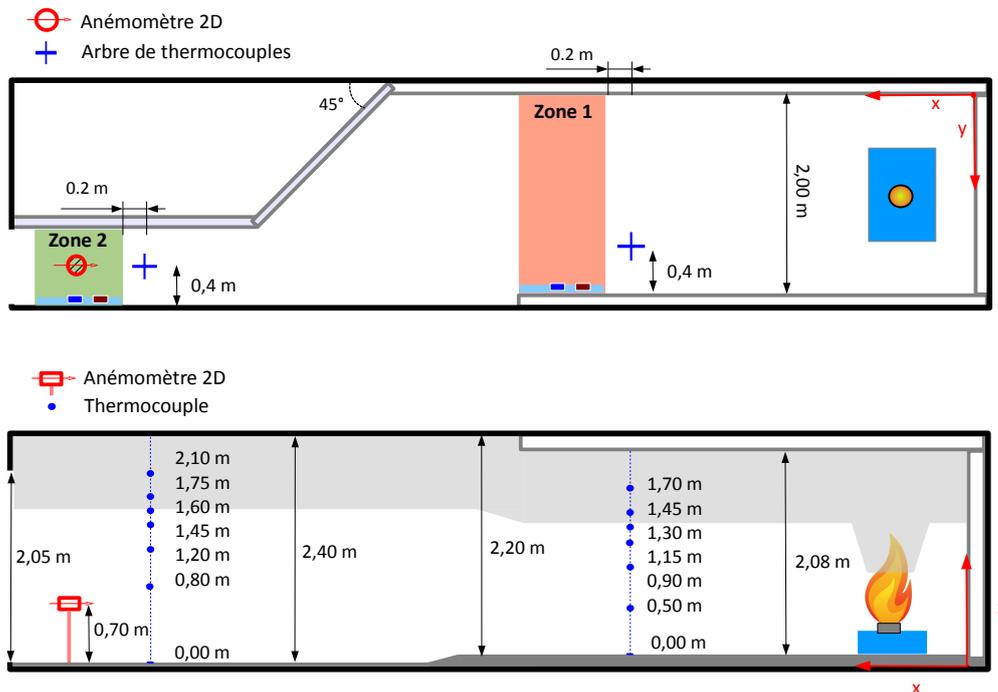


FIGURE 3.6 – Position des arbres de thermocouples et hauteur de mesure de température.

Le capteur est installé dans la zone de mesure 1 à 70 cm du sol (voir figure 3.6). Cet anémomètre est bidirectionnel et mesure deux composantes de la vitesse d'écoulement dans le plan (\vec{x}, \vec{y}) . On vérifie ainsi que l'écoulement en partie basse du couloir n'est pas dévié par rapport à la direction longitudinale du couloir \vec{x} . Cette mesure sera en outre comparée à la vitesse d'entrée des gaz frais simulée numériquement.

Même si le signal donné par l'anémomètre est bruité du fait de la sensibilité de l'appareil, on peut vérifier que la vitesse d'entrée des gaz frais est bien reproduite d'un essai à l'autre. En lissant les courbes à l'aide d'une moyenne mobile sur des intervalles de 30 s, on distingue bien les phases d'activité du foyer : la montée en régime suivie d'un palier quasi stationnaire et enfin d'une montée en puissance avant extinction. Les moyennes calculées entre 500 s et 800 s (sur le palier qui représente le régime quasi stationnaire du foyer) de la vitesse d'écoulement des gaz frais sont comprises entre 0,28 et 0,37 m/s sur les six essais.

Zone 1 (Ecoulement lent)		Zone 2 (Ecoulement rapide)	
z (m)	\bar{T} (°C)	z (m)	\bar{T} (°C)
0,50	20,4	0,70	21,9
0,90	27,0	1,10	45,4
1,15	49,2	1,35	64,11
1,30	70,5	1,55	81,4
1,45	86,3	1,65	86,4
1,70	91,0	1,90	90,3

TABLE 3.2 – Moyenne entre 500 s et 800 s des températures données par les arbres de thermocouples

3.1.2 Simulation numérique de l'essai

Nous avons pu vérifier dans le chapitre 2 que dès lors que l'évolution temporelle de la puissance du foyer est prescrite d'après la mesure de sa perte de masse réelle, FDS permet de reproduire de façon satisfaisante les conditions thermiques dans un local de ce type. La simulation numérique est donc un outil qui nous servira ici pour analyser le champ de vitesse qui est inaccessible expérimentalement.

Maillage, parois et terme source

Les conditions régnant à l'extérieur du dispositif expérimental, ainsi que les conditions initiales en termes de pression de température et d'humidité de l'air sont fixées dans la simulation aux valeurs mesurées en moyenne lors des six essais. Le domaine de calcul est maillé de façon homogène. Nous avons choisi un maillage cubique de 5 cm de côté de la même façon que dans la simulation de l'essai précédent, excepté dans les zones voisines des parois où est mesuré le dépôt. Le maillage dans ces deux zones a été raffiné : les mailles sont cubiques de 1 cm de côté. Ce maillage raffiné nous permet de mieux caractériser l'écoulement dans ces zones d'intérêt privilégiées.

Pour les besoins de la simulation numérique, la géométrie a été légèrement simplifiée. Il est en effet nécessaire d'ajuster les limites des objets implémentés au maillage utilisé. Le maillage cubique de 5 cm limite la résolution de la représentation dans FDS de notre géométrie.

Les propriétés thermiques implémentées dans FDS pour les matériaux constituant les parois du dispositif expérimental sont les mêmes que celles utilisées dans le chapitre 2. On distingue trois types de parois :

- Les parois simplement isolées en acier, auxquelles on a ajouté sur la face intérieure un tissu isolant thermique, similaire à de la laine de roche, d'épaisseur 0,5 cm.
- Les parois de caisson fortement isolées, dont la face intérieure est protégée par 1,3 cm de plâtre et 5 cm de laine de roche.
- Les cloisons intérieures, qui forment le convergent et la paroi nord du couloir, sont des cloisons Placopan commerciales. Elles sont constituées d'un cœur en

carton alvéolé de 3 cm d'épaisseur entouré sur chaque face d'une plaque de plâtre de 1 cm d'épaisseur.

Le foyer est représenté dans FDS par une surface carrée de 0,20 m de côté. À travers celle-ci un débit de gaz combustible, prescrit comme la perte de masse moyenne mesurée au cours des six essais, est introduit dans le domaine de calcul. Le combustible gazeux brûle alors selon les modèles de combustion implémentés dans FDS (voir MCGRATTAN *et al.*, 2014). Les propriétés (chaleur de combustion, taux de production de suie et taux de production de CO) utilisées dans la simulation numérique pour l'heptane sont identiques à celles utilisées dans le chapitre 2.

L'évolution de la puissance du foyer simulé numériquement est représentée sur la figure 3.7. On constate que sa puissance est bien proportionnelle à la perte de masse mesurée, ce qui indique qu'il est bien ventilé tout au long de la simulation.

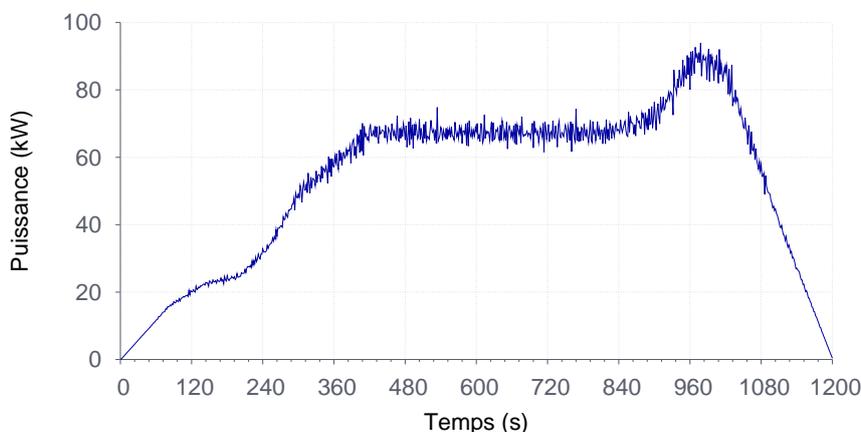


FIGURE 3.7 – Évolution de la puissance du foyer simulé.

Hauteur de la couche de fumée

On peut vérifier que les profils de température simulés numériquement en zones 1 et 2 sont cohérents avec les mesures effectuées par les arbres de thermocouple. En effet, la stratification verticale de la température est représentative de la hauteur de la couche de fumée, qui influe donc sur leur vitesse d'écoulement. La figure 3.8 représente le champ de température simulé à $t = 800$ s dans un plan vertical à 5 cm des cibles.

La figure 3.9 représente les valeurs moyennes calculées entre 500 et 800 s des températures mesurées expérimentalement par les arbres de thermocouple et calculées par la simulation numérique, en fonction de l'altitude. On constate que la stratification thermique est bien reproduite par la simulation numérique dans cette configuration. Les résultats de la simulation numérique sont suffisamment proches des résultats expérimentaux moyens sur les six essais pour valider la prédiction numérique de la stratification thermique et donc de la hauteur de la couche de fumées chaudes.

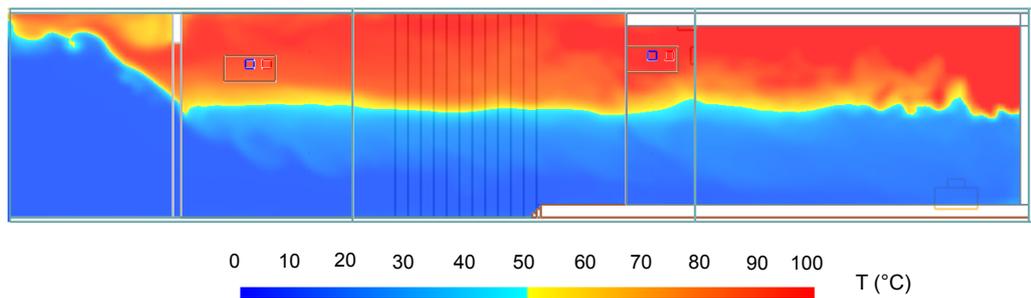


FIGURE 3.8 – Visualisation (grâce au logiciel Smokeview) du champ de température simulé numériquement dans le plan normal aux cibles, à 5 cm de la paroi.

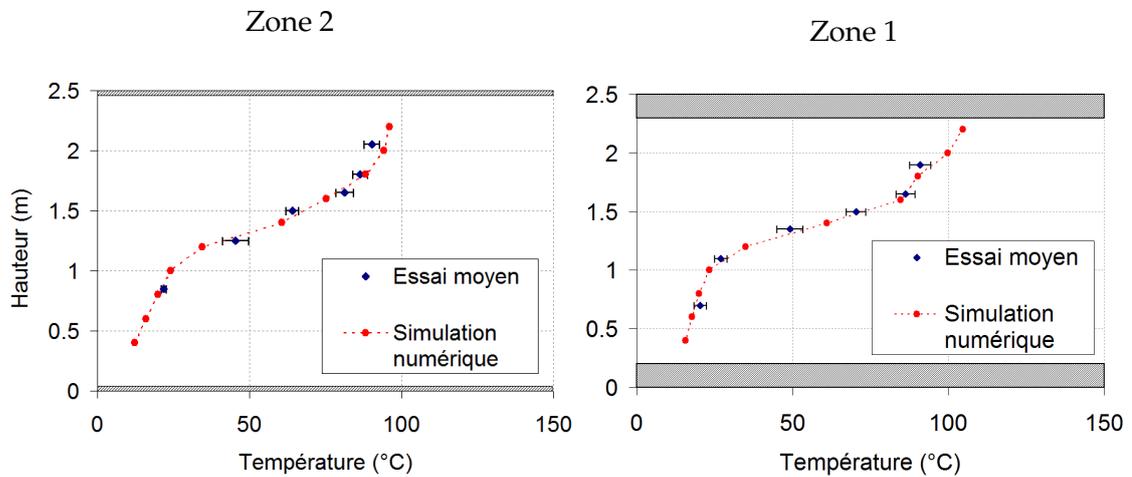


FIGURE 3.9 – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la stratification thermique dans chaque zone, en moyenne entre 500 s et 800 s.

Vitesse d'entrée des gaz frais

Comme le montre la figure 3.10, la vitesse d'entrée des gaz frais simulée en partie basse du couloir, à 70 cm du sol et 1 m de la porte, correspond à la vitesse mesurée par l'anémomètre à ultrason lors des essais.

Nous estimons que les résultats de la simulation numérique sont suffisamment proches de l'enveloppe expérimentale formée par les mesures réalisées sur six essais pour valider la prédiction numérique de la vitesse d'écoulement des gaz frais en partie basse, et donc de la quantité d'air entraînée par le foyer.

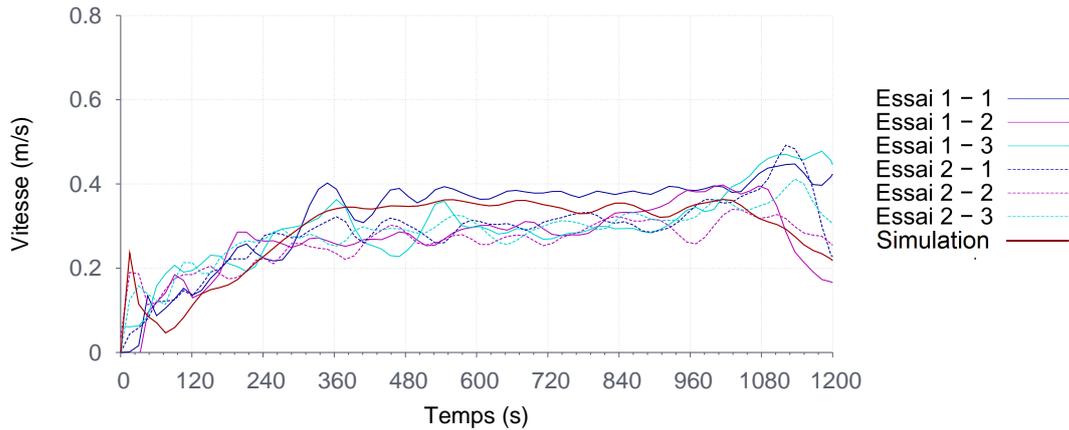


FIGURE 3.10 – Enveloppe expérimentale et simulation numérique de la vitesse d’entrée des gaz frais (à 0,70 m du sol).

Évaluation numérique de la vitesse d’écoulement des fumées

Maintenant que la simulation numérique est validée par comparaison avec les données expérimentales, nous nous intéressons au champ de vitesse d’écoulement des gaz prédit par celle-ci.

La simulation FDS de l’essai permet d’abord de vérifier dans quelle mesure la géométrie choisie entraîne bien l’accélération de l’écoulement des fumées dans la zone 2. Les images de la figure 3.11 représentent les vitesses d’écoulement simulées numériquement dans le plan horizontal à hauteur des cibles de dépôt et dans le plan vertical en face des cibles. La figure 3.11 rend compte de la stratification de la vitesse au centre

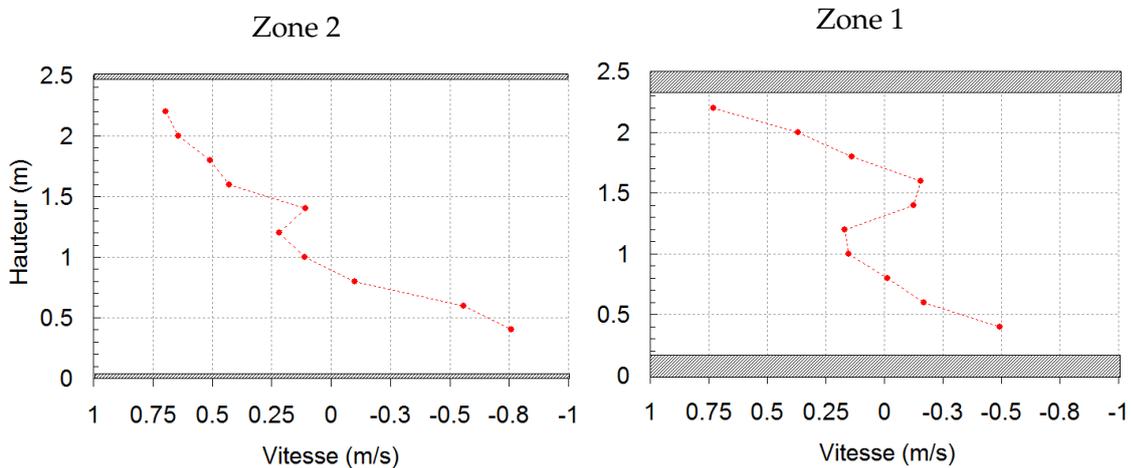


FIGURE 3.11 – Profil vertical de $u_{gaz,x}$ dans chaque zone calculée au centre du couloir, en moyenne entre 500 s et 800 s.

de chaque zone. On constate que l’augmentation de la vitesse d’écoulement causée par la réduction de section du couloir est proche du facteur 2,3 prévu par simple calcul du rapport des largeurs. Les variations peuvent être liées à la dynamique du foyer et à la variation de la hauteur sous plafond dans le couloir. Cependant, l’accélération des

3.1. Description et analyse du montage expérimental

fumées par la réduction de largeur du couloir s'accompagne d'une modification des profil verticaux et horizontaux de vitesse.

La vitesse d'écoulement calculée au centre de la section de passage n'est pas représentative de la vitesse des gaz vue par les cibles, au voisinage de la paroi de dépôt. Les figures 3.12 et 3.13 représentent des vues en coupe de la composante longitudinale $u_{gaz,x} = \vec{u}_{gaz} \cdot \vec{x}$ de la vitesse d'écoulement dans le plan horizontal de prélèvement. Le profil de vitesse est relativement homogène sur toute la largeur du couloir de la zone 2. Cependant dans la zone 1, on distingue une zone (en bleu sur la figure 3.13) où $u_{gaz,x}$ est négative. Ces propriétés fortement tridimensionnelles et la conservation du débit à travers la section totale de la zone 1 oblige ainsi l'écoulement à accélérer de part et d'autre de cette zone. De plus, les supports en bois sur lesquels sont disposées les cibles font 1 cm d'épaisseur et sont placés à 2 cm de la paroi, ce qui complexifie l'écoulement.

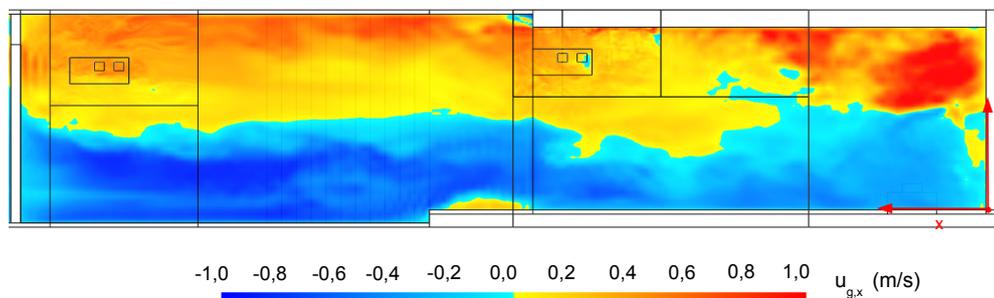


FIGURE 3.12 – Visualisation (grâce au logiciel Smokeview) de $u_{gaz,x}$ à $t = 700$ s - Plan vertical à 5 cm de la paroi de dépôt.

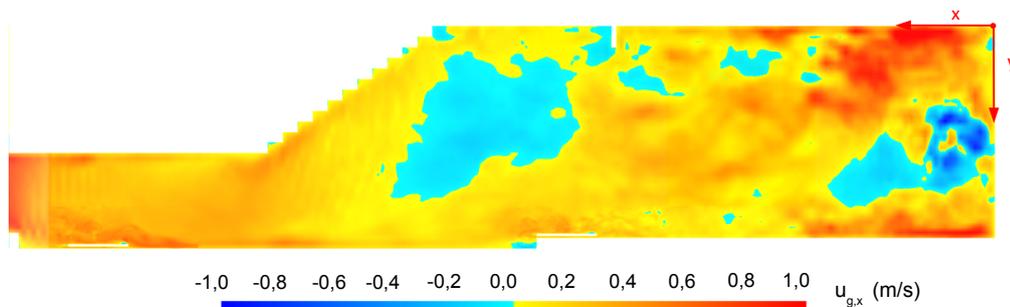


FIGURE 3.13 – Visualisation (grâce au logiciel Smokeview) de $u_{gaz,x}$ à $t = 700$ s - Plan horizontal à hauteur des cibles de dépôt.

La simulation numérique nous permet de considérer directement les vitesse d'écoulement calculées au voisinage de chaque cible de dépôt. Nous avons calculé la vitesse d'écoulement à 1 cm, 2 cm et 5 cm de chaque cible. Dans chaque zone, la cible non refroidie est située en amont de l'écoulement, plus proche du bord du support en bois que la cible refroidie. Le tableau 3.3 montre la valeur moyenne de la vitesse, calculée sur le plateau quasi stationnaire de l'essai (entre 500 s et 800 s). On constate que la vitesse simulée à proximité des cibles, en prenant en compte la vitesse moyenne entre la cible

F et la cible NF dans chaque zone, est augmentée d'un facteur 1,6 entre la zone 1 et la zone 2.

Distance à la paroi	Zone 1 (Amont)		Zone 2 (Aval)	
	Cible NF (Amont)	Cible F (Aval)	Cible NF (Amont)	Cible F (Aval)
1 cm	0,23 m/s	0,15 m/s	0,51 m/s	0,53 m/s
3 cm	0,27 m/s	0,27 m/s	0,48 m/s	0,50 m/s
5 cm	0,27 m/s	0,29 m/s	0,44 m/s	0,46 m/s

TABLE 3.3 – Vitesses d'écoulement calculées au voisinage des cibles, en moyenne entre 500 s et 800 s.

3.1.3 Bilan

Grâce à la simulation numérique et aux données expérimentales obtenues nous avons pu caractériser l'écoulement de fumée obtenu dans le dispositif expérimental. Par comparaison avec les mesures de vitesse d'entrée des gaz frais et de température nous avons validé la simulation numérique de façon à pouvoir s'appuyer sur ses résultats pour estimer la vitesse d'écoulement des fumées dans chacune des zones de mesure du dépôt de suie. Si on considère la vitesse moyenne débitante de l'écoulement, la configuration choisie permet de créer une zone d'accélération des fumées avec une valeur moyenne de $u_{gaz,2}/u_{gaz,1} = 1,8$. Cependant, cela ne concerne que l'écoulement moyen, or le dépôt est un phénomène pariétal, c'est donc l'écoulement dans ces zones qui nous intéresse. La simulation numérique, réalisée avec des conditions limites et initiales réalistes, permet en effet de constater les propriétés fortement 3D de l'écoulement. L'analyse des profils verticaux et horizontaux de vitesse dans chaque zone est donc nécessaire. D'après la simulation numérique la vitesse de l'écoulement vu par les cibles, à quelques centimètres de celles-ci, est également augmentée d'un facteur 1,6 entre les deux zones de mesure.

3.2 Étude expérimentale du dépôt de suie

3.2.1 Instrumentation des essais

Maintenant que l'écoulement des fumées est bien caractérisé, on s'intéresse à la mesure et à l'analyse du dépôt de suie sur parois verticales. Dans chaque zone de mesure, deux cibles sont plaquées sur deux supports permettant de mesurer le dépôt de suie au cours des essais. On associe à chaque support de cible, celui de la zone 1 et celui de la zone 2, un certain nombre de capteurs, semblables à ceux utilisés dans la campagne d'essai décrite dans le chapitre 2. La figure 3.14 décrit la position des différents capteurs utilisés. La disposition des capteurs est la même dans chaque zone de mesure. L'objectif de cette instrumentation est de contrôler les conditions de dépôt de suie pour chaque cible. On mesure donc au cours de chaque essai la concentration de suie dans les fumées, la température des gaz au voisinage des zones de dépôt et la température de chaque cible ainsi que le gradient de température dans la direction normale à la paroi sur lesquelles sont installées les cibles.

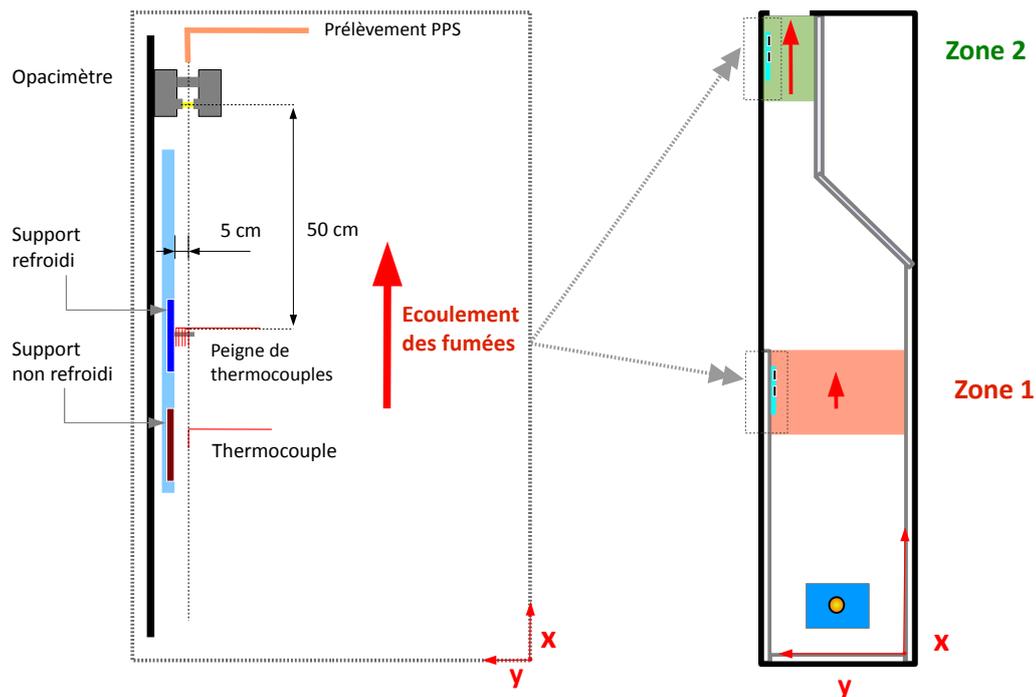


FIGURE 3.14 – Métrologie associée à chaque support de cibles.

Cibles de dépôt

On utilise en tout quatre cibles de dépôt. Dans chaque zone, une cible est refroidie et l'autre non (voir figure 3.15). On rappelle que chaque cible de dépôt est une plaque d'aluminium carrée fine de 70 mm de côté et 0,5 mm d'épaisseur pesant en moyenne (pour les quatre cibles utilisées) 3,676 g, plaquée sur un support en aluminium carré de

150 mm de côté et 5 mm d'épaisseur qui peut selon le cas être refroidi par circulation d'un liquide caloporteur venant d'un bain thermostaté.

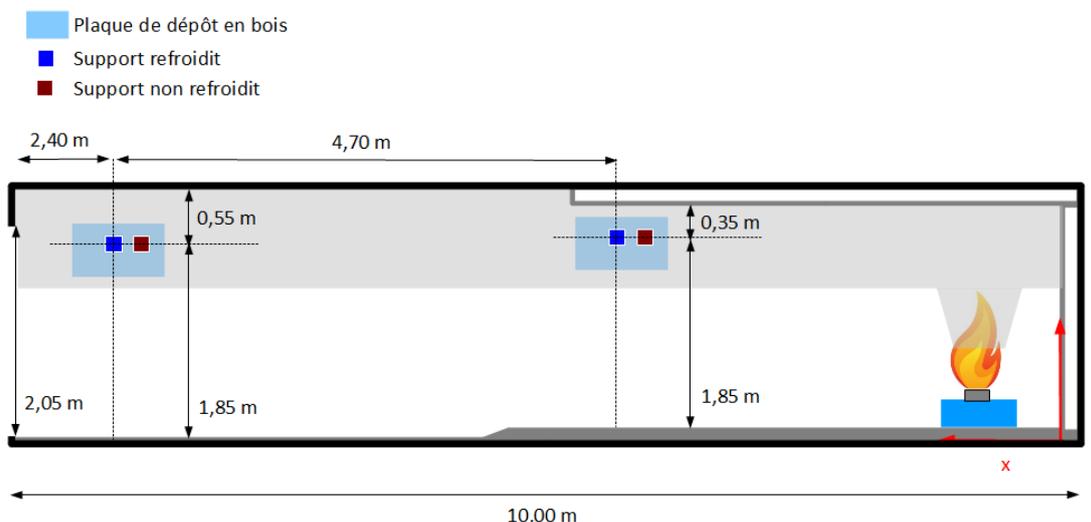


FIGURE 3.15 – Emplacement des cibles de dépôt sur la paroi sud du dispositif expérimental.

La température de consigne du bain thermostaté est un paramètre que nous avons choisi de faire varier entre deux séries de 3 essais. Chacune (voir tableau 3.1) est fixée à 10 °C lors de la première série de trois essais et 30 °C lors de la deuxième série de trois essais. Grâce à ces températures de consigne, on multiplie le nombre de valeurs testées en termes de différence de température gaz-paroi. 10 °C est la température minimum permettant de ne pas observer de condensation sur les cibles avant le début de l'essai. Dans la suite on notera "F" les cibles refroidies et "NF" les cibles installées sur un support en aluminium non refroidies.

Après nettoyage et pesée, les cibles propres sont plaquées aux supports grâce à de l'aluminium adhésif (voir figure 3.16). Celui-ci résiste aux faibles températures rencontrées lors des essais et est facile à enlever sans risquer d'altérer le dépôt, lors du prélèvement à la fin des essais.

Chacune des cibles est pesée avant essai sur une microbalance proche de la structure expérimentale. Après chaque essai, les quatre cibles sont détachées de leur support et transportées dans une pièce proche pour être pesées de nouveau sur la même microbalance. La différence, pour chaque cible, entre la moyenne m_1 des pesées avant essai et la moyenne m_2 des pesées après essai, donne la masse de suie déposée. L'erreur de mesure sur la masse de suie déposée est évaluée comme la somme des écarts-types ϵ_1 des trois pesées avant essai, et ϵ_2 des trois pesées après essai. On a donc, dans le cas des pesées avant essai :

$$m_1 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 m_{1,i} \text{ et } \epsilon_1 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 |m_1 - m_{1,i}|, \quad (3.2)$$

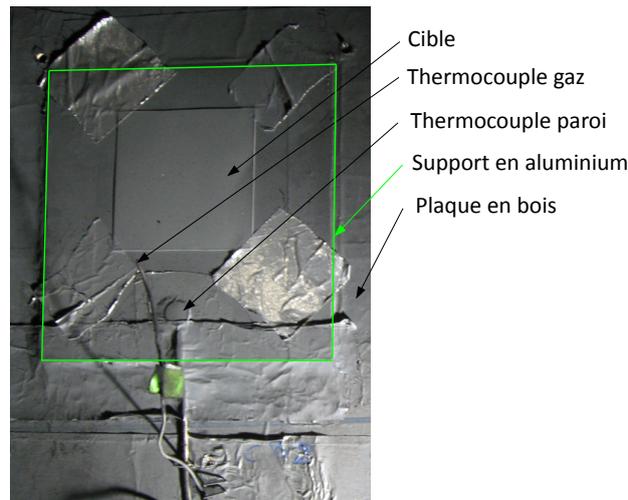


FIGURE 3.16 – Photographie d’une cible plaquée sur son support et des thermocouples associés.

de même après essais pour m_2 et ϵ_2 . Les masses de suie déposées sont alors présentées en mg sous la forme $m_{dep} \pm \epsilon$ où

$$m_{dep} = m_2 - m_1, \epsilon = \epsilon_2 + \epsilon_1. \quad (3.3)$$

Sur les vingt-quatre pesées réparties sur six essais, les masses de suie pesées varient entre 0,14 et 0,32 mg. Les résultats des pesées répétées présentent une très faible dispersion, inférieure à 3% de la pesée moyenne retenue.

Température des cibles

Comme lors de la première campagne d’essai, la température de surface des supports de chaque cible, notée T_{paroi} , a été mesurée au cours des essais. Les thermocouples utilisés sont des thermocouples de type K dont la soudure est faite sur un petit disque de cuivre de 5 mm de diamètre et 0,5 mm d’épaisseur. Ils mesurent donc la température moyenne de ce petit élément. L’élément de cuivre étant fin et plaqué contre le support de dépôt de la même façon que les cibles, on suppose que les cibles et la pastille de cuivre ont le même comportement thermique : ces deux éléments peuvent être considérés comme thermiquement minces ($Bi = he/k_s \ll 0,1$). Il est donc cohérent de supposer que la température donnée par un thermocouple pastille est identique à la température de la cible de dépôt correspondante. Le tableau 3.4 résume les positions et les conditions initiales correspondant à chaque cible de dépôt et pour chacun des trois essais.

Le refroidissement du liquide par le bain thermostaté est asservi par rapport à la température du liquide dans ce bain, les températures des supports refroidis ne sont donc pas constantes au cours des essais. On remarque également que les températures

Nom de l'essai	Zone 1 (Ecoulement lent)		Zone 2 (Ecoulement rapide)	
	T ₀ cible F (°C)	T ₀ cible NF (°C)	T ₀ cible F (°C)	T ₀ cible NF (°C)
Essai 1-1	29,1	31,0	29,7	26,3
Essai 1-2	29,5	29,9	29,8	22,4
Essai 1-3	27,6	24,4	27,9	17,4
Essai 2-1	12,2	18,4	11,9	23,3
Essai 2-2	14,1	26,9	12,6	21,1
Essai 2-3	12,8	23,4	11,1	29,1

TABLE 3.4 – Températures des cibles refroidies ("F") et non refroidies ("NF") avant allumage de l'essai.

initiales des supports de cibles reliés au bain ne sont pas exactement les températures du liquide. Cela est dû à la longueur des tuyaux qui acheminent le liquide de refroidissement du bain aux supports de cible et à l'équilibre thermique qui existe avant même le début de l'essai entre l'air du local et la surface des supports. Le réglage de la température du bain thermostaté (10 °C pour la première série d'essais ou 30 °C pour la seconde série d'essais) entraîne un écart de température moyen de 28 °C à la surface des cibles refroidies.

Température des fumées au voisinage des cibles

A chaque cible est associé un thermocouple de type K qui mesure la température des fumées à une distance de 5 cm de la paroi verticale. Le thermocouple associé à la cible refroidie est plus fin, de diamètre 0,25 mm, tandis que le thermocouple associé à la cible non refroidie est classique, de diamètre 1 mm.

Les légères variations de température captées par le thermocouple le plus fin sont d'une amplitude négligeable et on peut considérer que les températures données par les thermocouples de deux cibles d'une même zone sont identiques. La température des fumées à cette distance (5 cm) de la paroi n'est donc pas affectée par le refroidissement ou non du support de cible.

Dans chaque zone de dépôt, la mesure de température des gaz en face de la cible refroidie est complétée par cinq thermocouples installés en peigne (voir figure 3.18 et disposé sur l'axe normal à la paroi (voir figure 3.18). Chaque peigne est constitué de cinq thermocouples de type K (chromel - alumel) de 0,25 mm de diamètre, plus fins que les autres thermocouples utilisés pour ces essais, et fixés sur un support rigide pour les maintenir en place. Alignés sur l'axe normal aux cibles de dépôt, ils permettent de mesurer la décroissance de la température dans la couche limite thermique, depuis la température de l'écoulement, à $d = 5$ cm de la paroi, jusqu'à $d = 2$ mm de la paroi.

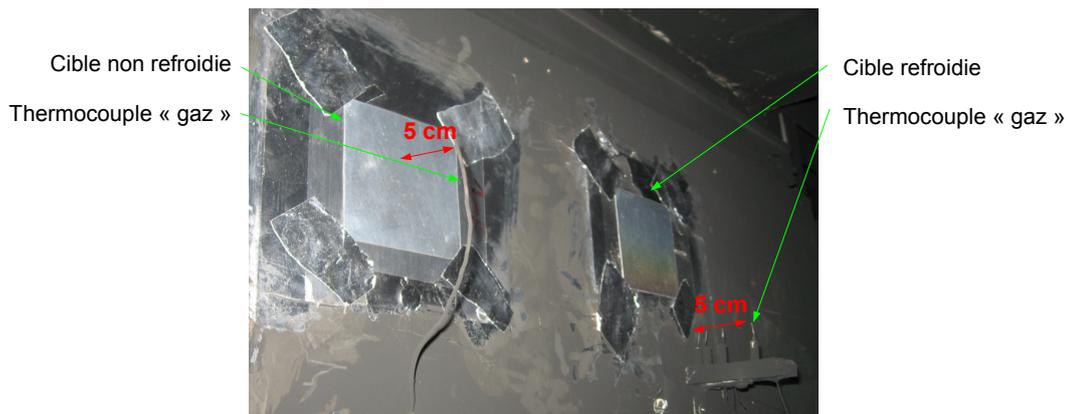


FIGURE 3.17 – Photographie des deux cibles de la Zone 1, avant essai, et positionnement des deux thermocouples "gaz" correspondants.

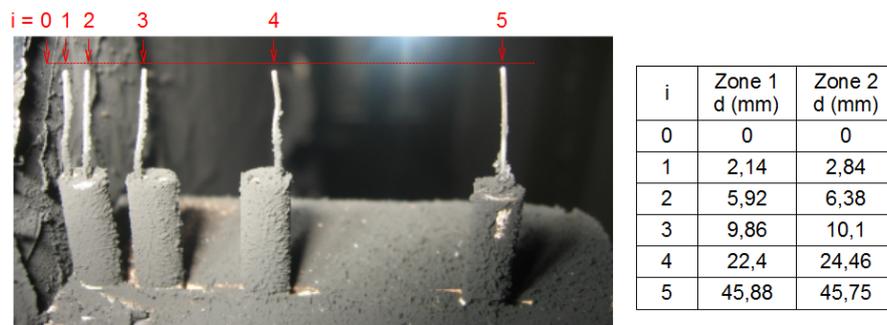


FIGURE 3.18 – Photographie d'un peigne de thermocouples et distance d des thermocouples de chaque peigne à la paroi.

Concentration de suie dans les fumées au voisinage des cibles

La concentration de suie est mesurée dans chaque zone par un capteur opacimétrique et un capteur PPS, identiques à ceux utilisés dans la première campagne d'essai. Le point de prélèvement PPS est très proche du faisceau de mesure de l'opacimètre correspondant, 20 cm en aval des cibles de dépôt (voir figures 3.14 et 3.19). Le point de mesure, défini par l'emplacement du faisceau, est placé dans chaque zone à 10 cm en aval de la plaque sur laquelle sont fixés les supports des cibles.

Le doublon des capteurs nous permet de parer au risque de l'impossibilité d'exploiter les résultats donnés par la mesure opacimétrique à cause de l'influence potentielle de la lumière extérieure. En effet même si les deux capteurs sont dans la couche de fumée, celui qui équipe la zone 2 (couloir) est proche de la sortie et pourrait être perturbé par la lumière extérieure. Si, au contraire des opacimètres, les capteurs PPS ne permettent pas d'obtenir une estimation quantitative de la concentration de suie dans les fumées, ils réagissent néanmoins de la même façon à un type de particules données. En supposant que les particules de suie transportées par la fumée sont identiques entre la zone 1 et la zone 2, la mesure PPS nous permettra donc de vérifier la concentration de particules d'une zone par rapport à l'autre.

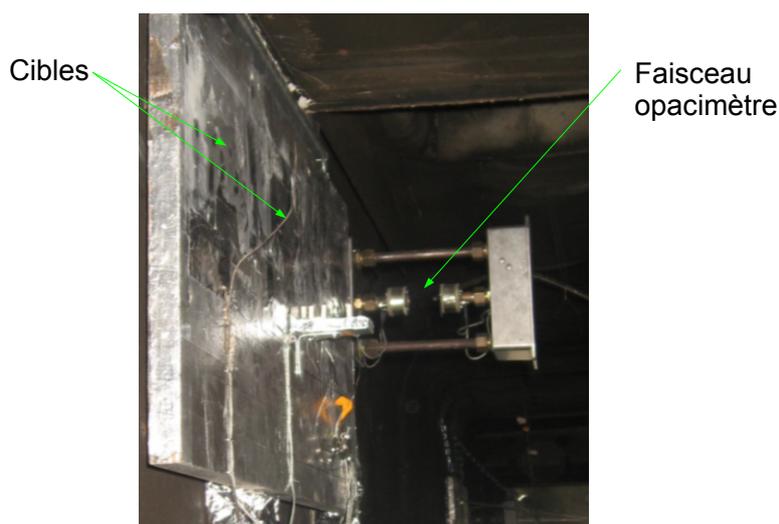


FIGURE 3.19 – Photographie du capteur opacimétrique différentiel associé aux cibles de la zone 2.

3.2.2 Exploitation des résultats expérimentaux

Dépôt de suie sur cibles non refroidies

Pour vérifier l'influence de la vitesse d'écoulement sur le dépôt de suie, nous comparons dans un premier temps directement la quantité de suie déposée sur les cibles non refroidies. Du point de vue de ces cibles, les six essais sont identiques dans les limites de la répétabilité. Le tableau 3.5 rappelle les valeurs de dépôt obtenues pour ces cibles après chacun des essais.

	Zone 1 (Écoulement lent)	Zone 2 (Écoulement rapide)
Nom de l'essai	Dépôt (mg)	Dépôt (mg)
Essai 1-1	0,14 ± 0,02	0,25 ± 0,03
Essai 1-2	0,14 ± 0,01	0,18 ± 0,02
Essai 1-3	0,19 ± 0,02	0,23 ± 0,03
Essai 2-1	0,18 ± 0,03	0,20 ± 0,01
Essai 2-2	0,25 ± 0,04	0,18 ± 0,05
Essai 2-3	0,24 ± 0,01	0,23 ± 0,02

TABLE 3.5 – Masse de suie déposée sur les cibles non refroidies.

Les différences de masse observées entre la zone 1 (écoulement plus lent) et la zone 2 (écoulement plus rapide) sont peu significatives. L'écart relatif entre le dépôt dans la zone 1 et le dépôt dans la zone 2 va de 56 % au maximum à 4 % au minimum et est donc dans certains cas inférieur à l'erreur commise sur la pesée de la masse de suie déposée ($4\% < \epsilon < 17\%$). La tendance observée lors des trois premiers essais s'inverse en outre

3.2. Étude expérimentale du dépôt de suie

durant les trois essais suivants. Il est donc difficile d'exploiter ces résultats bruts pour en déduire l'influence de la vitesse d'écoulement sur le dépôt des suies d'incendie.

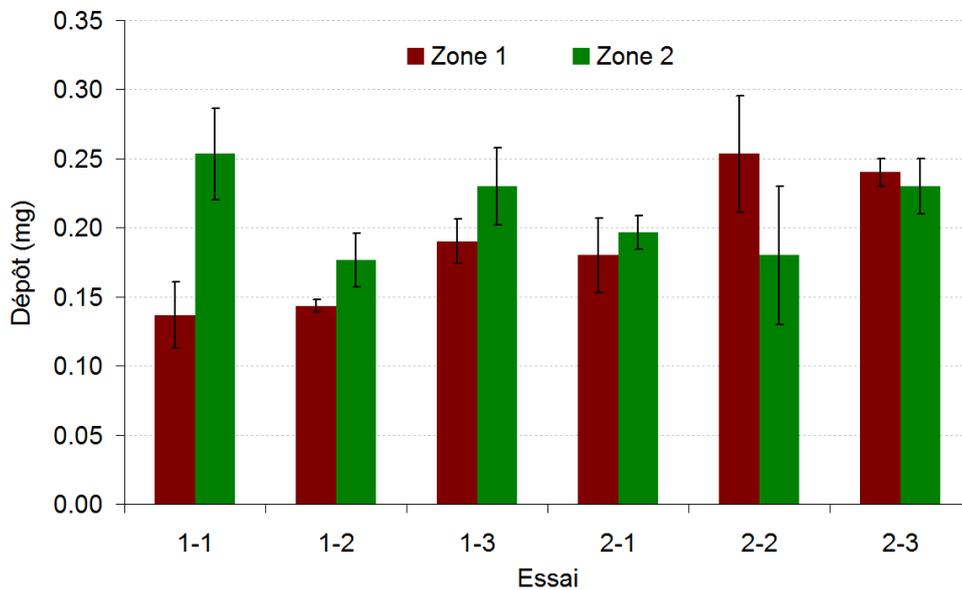


FIGURE 3.20 – Masse de suie déposée sur les cibles non refroidies, en Zone 1 (écoulement lent) et en Zone 2 (écoulement rapide).

Il est possible que les pertes thermiques dues à la longueur du couloir empêchent de percevoir l'influence de la vitesse d'écoulement : l'influence du gradient de température lié à la thermophorèse compensant un éventuel effet de la vitesse d'écoulement. En moyenne au cours d'un essai, on voit que la différence de température entre le gaz et la paroi pour les cibles non refroidies n'est pas conservée entre la zone 1 et la zone 2, ΔT est en moyenne inférieur de 5 à 10 °C dans la zone 1. Cela peut s'expliquer par le fait que, les fumées étant beaucoup plus chaudes dans cette zone, le transfert thermique y est plus intense et donc la température des cibles augmente plus rapidement que dans la zone 2. Il est donc difficile de faire directement la comparaison des résultats de dépôt entre la zone 1 où l'écoulement est plus lent, et la zone 2 où l'écoulement est plus rapide.

Dépôt de suie sur cibles refroidies

En s'intéressant au dépôt sur des cibles refroidies on augmente la quantité finale de suie récoltée grâce à la thermophorèse. On diminue ainsi l'importance relative des erreurs de mesure. Les trois premiers essais ont été effectués avec une température de consigne du bain thermostaté de 10 °C. Les résultats, rassemblés dans le tableau 3.6, mettent en évidence une tendance répétable : nous avons obtenu pour ces trois essais plus de dépôt en zone 2 qu'en zone 1.

Pendant la seconde série de trois essais, durant laquelle la température de consigne du bain thermostaté était fixée à 30 °C et dont les résultats sont rassemblés dans le tableau 3.7 ne reproduit pas cette tendance. C'est même l'inverse : nous avons cette fois obtenu plus de dépôt en zone 1 qu'en zone 2.

	Zone 1 (Ecoulement lent)	Zone 2 (Ecoulement rapide)
Nom de l'essai	Dépôt (mg)	Dépôt (mg)
Essai 1-1	0,18 ± 0,01	0,32 ± 0,02
Essai 1-2	0,20 ± 0,01	0,28 ± 0,01
Essai 1-3	0,25 ± 0,04	0,26 ± 0,02

TABLE 3.6 – Masse de suie déposée mesurée pour la première série de trois essais sur les cibles "F" refroidies par un bain à 10 °C.

	Zone 1 (Ecoulement lent)	Zone 2 (Ecoulement rapide)
Nom de l'essai	Dépôt (mg)	Dépôt (mg)
Essai 2-1	0,25 ± 0,03	0,19 ± 0,04
Essai 2-2	0,31 ± 0,05	0,21 ± 0,03
Essai 2-3	0,27 ± 0,02	0,21 ± 0,01

TABLE 3.7 – Masse de suie déposée mesurée pour la seconde série de trois essais sur les cibles "F" refroidies par un bain à 30 °C.

Comme pour les cibles non refroidies, les différences de dépôt mesurées entre une cible de la zone 1 et une cible de la zone 2 ne sont pas significatives pour tous les essais. Si un écart relatif de 50 %, comme celui de l'essai 1 – 1 est intéressant, un écart de 10 % l'est moins, compte tenu de l'erreur commise sur la pesée qui est du même ordre de grandeur voire supérieure. Il est difficile de conclure, en utilisant ces résultats bruts, quant à l'influence de la vitesse d'écoulement sur le dépôt de suie sur les cibles refroidies.

Dilution des fumées entre la zone 1 et la zone 2

Le flux de suie qui se dépose sur la paroi est directement proportionnel à la concentration de suie dans les fumées. Or celle-ci n'est pas forcément homogène dans la couche de fumée, à cause de la dilution et du dépôt par exemple. On souhaite vérifier grâce aux mesures de concentration de suie que celle-ci est équivalente en zone 1 et en zone 2 de façon à quantifier l'influence potentielle sur la masse de suie déposée de cette in-homogénéité.

La figure 3.21 montre les concentrations de suie mesurées par opacimétrie durant tous les essais, dans chaque zone de mesure. Bien que l'opacimètre installé en zone 2 soit soumis à beaucoup d'interférences liées à la proximité de la porte et donc à la luminosité extérieure, les valeurs et tendances mesurées semblent répétables sur les six essais. Les résultats sont bien meilleurs pour le capteur opacimétrique de la zone 1, qui n'est pas soumis à la luminosité extérieure. On voit que la concentration de suie a une évolution similaire à celle de la température, ce qui est normal étant donné que comme la température, la concentration de suie est contrôlée directement par l'activité du foyer. Les ordres de grandeurs sont identiques à ceux obtenus pour la première campagne d'essai : la concentration de suie dans les fumées varie entre 0,095 et 0,12 g · m⁻³ durant

3.2. Étude expérimentale du dépôt de suie

le palier principal, allant jusqu'à une valeur de $0,14 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ durant le pic de puissance en fin d'essai, avant l'extinction du foyer.

Outre mesurer la valeur de la concentration de suie dans les fumées, on souhaite également et surtout vérifier que la concentration de suie est similaire dans les deux zones de mesure, de façon à pouvoir comparer le dépôt de suie d'une zone à l'autre sans biais lié à ce paramètre. La quantité de suie déposée est en effet proportionnelle à la concentration de suie dans les fumées. Il n'est cependant pas possible de faire cette vérification avec les capteurs opacimétriques différentiels, ceux-ci étant trop influencés par le changement de luminosité entre les zones. On utilisera donc pour cela les signaux PPS qui n'ont, pour cette analyse relative, pas besoin d'être calibrés. On suppose seulement que les PPS des deux zones aspirent le même type de particules.

L'incertitude des mesures rend difficile l'évaluation précise de la dilution, mais on peut vérifier sur la figure 3.22 que les concentrations de particules dans les zones 1 et 2 sont identiques au cours de chaque essai (un signal PPS de a été perdu lors de l'essai 1–1). Le rapport tend vers l'infini au début de l'essai, il diminue rapidement lorsque les fumées atteignent la zone 2 et, le temps d'atteindre un régime de feu quasi stationnaire, il se stabilise ensuite autour de 1. Le rapport des concentrations en particule des zones 1 et 2 est compris entre 0,94 et 1,1 pour les six essais considérés.

L'éventualité d'une concentration de suie non homogène entre les zones 1 et 2 peut être pris en compte dans l'analyse des résultats de dépôt. D'après les mesures PPS, l'erreur à prendre en compte est inférieure à 15%.

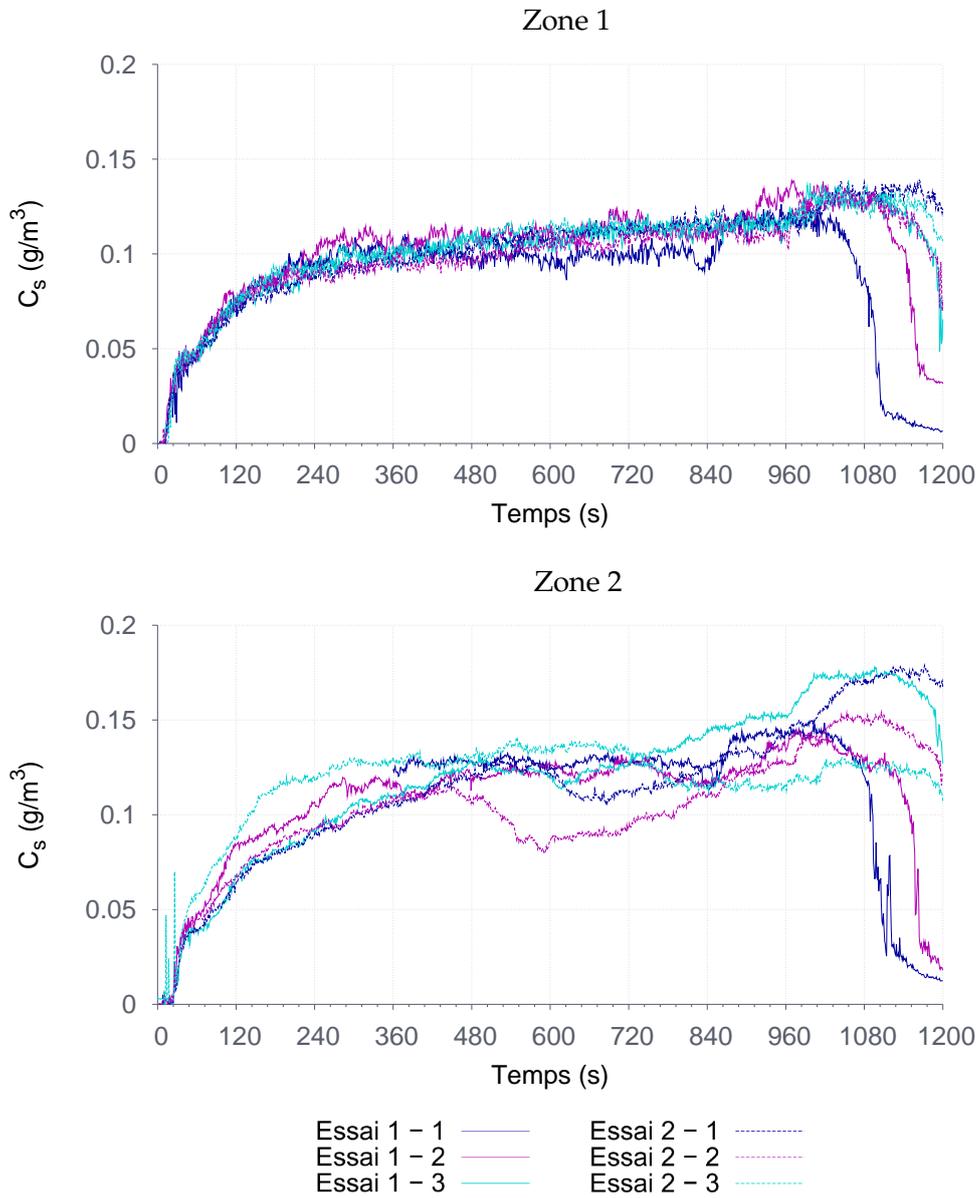


FIGURE 3.21 – Concentration de suie mesurée par les capteurs opacimétriques différentiels en Zone 1 et en Zone 2.

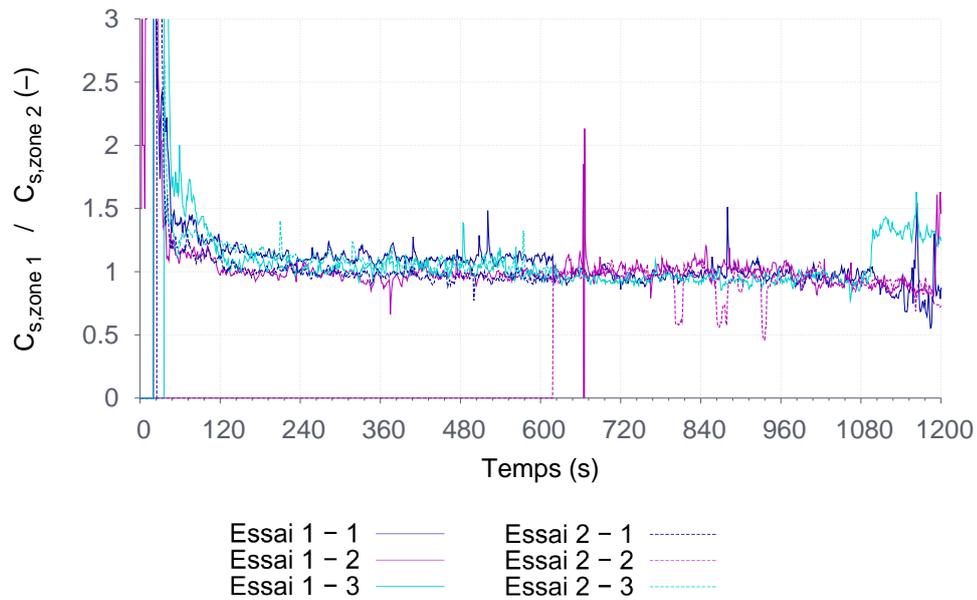


FIGURE 3.22 – Rapport des concentrations mesurées par les capteurs PPS dans la zone 1 et la zone 2 (signal perdu lors de l’essai 1 – 1).

Pertes thermiques entre la zone 1 et la zone 2

De la même façon que la concentration de suie, la température de la couche de fumée n’est pas homogène. Les pertes thermiques aux parois ainsi que le mélange avec l’air frais qui a lieu au niveau du plan neutre entraîne le refroidissement des fumées entre la zone 1 (température $T_{gaz,1}$), proche du foyer, et la zone 2 (température $T_{gaz,2}$), proche de l’ouverture. Il est donc difficile de faire directement la comparaison des résultats de dépôt entre la zone 1 où l’écoulement est plus lent, et la zone 2 où l’écoulement est plus rapide. En effet étant donné que la thermophorèse est un phénomène prépondérant dans le dépôt de suie ici, la température des fumées a une influence sur la masse de suie déposée. Il est important de quantifier cet effet dans le cas de nos essais de façon à vérifier s’il peut exister un effet de compensation de la température et à le prendre en compte dans l’analyse des résultats de dépôt.

Les températures dans la couche de fumée au voisinage des cibles évoluent de la même façon que l’activité du foyer. Un palier de température est atteint au bout d’environ 300 s pour tous les essais, suivi d’une augmentation rapide en fin d’essai avant extinction et donc diminution rapide de la température des fumées. L’évolution de la température varie peu d’un essai à l’autre, seuls les essais 1 – 1 et 1 – 2 semblent plus courts, et plus chauds que les autres. La hauteur du palier le plus long, entre 300 s et 960 s, qui correspond à un régime quasi-stationnaire, est peu différente d’un essai à l’autre et varie entre 95 °C et 110 °C pour la zone 1 et entre 81 °C et 97 °C pour la zone 2.

Comme on peut le voir sur la figure 3.23, les pertes thermiques en zone 2 sont comprises entre 2 et 7 % de la température absolue des fumées. En zone 1 on perd 10 °C à 20 °C entre la zone 1 et la zone 2. Cependant, plutôt que la température des fumées, c’est la différence de température entre les fumées et la paroi qui a la plus grande influence

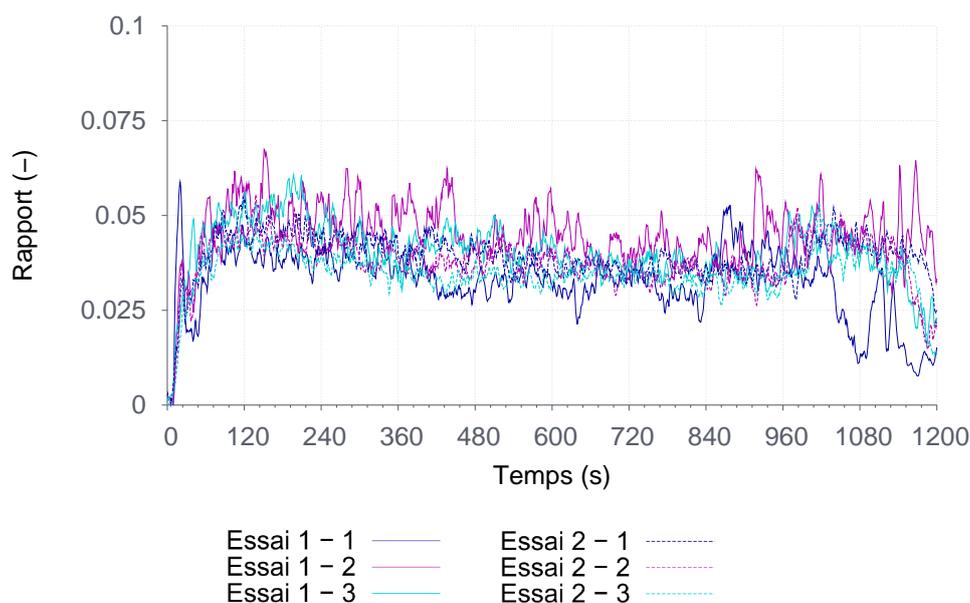


FIGURE 3.23 – Pertes thermiques en zone 2 par rapport à la zone 1 :
 $(T_{gaz,1} - T_{gaz,2})/T_{gaz,1}$

sur le dépôt par thermophorèse.

On considère donc maintenant la différence de température entre la paroi et le gaz à 5 cm de celle-ci, notée ΔT dans la suite, qui peut être calculée à chaque instant pour toutes les cibles de dépôt. Il est nécessaire ici de considérer séparément les cibles refroidies et les cibles non refroidies, dont les températures de paroi évoluent de façon très différentes. On définit donc pour chaque cible :

$$\Delta T = T_{gaz} - T_{paroi} . \quad (3.4)$$

Ce paramètre intervient directement à la fois dans l'expression du gradient de température grâce à un coefficient de transfert thermique mais également dans l'expression empirique de ce coefficient dans le cas de la convection naturelle.

Pour les cibles non refroidies on n'observe pas de régime stationnaire mais les tendances et les ordres de grandeur sont bien reproduits d'un essai à l'autre. Le paramètre ΔT croît rapidement dans un premier temps entre l'allumage et 240 s, ce qui est représentatif de l'arrivée des fumées chaudes sur les cibles à température initiale. ΔT entame ensuite une décroissance progressive au cours de laquelle la température de paroi se rapproche de la température des gaz, qui est alors quasi-stationnaire, du fait du transfert thermique entre les fumées chaudes et le support de cible en aluminium. Cette décroissance s'arrête lorsque le foyer entre dans la dernière phase de son activité : sa puissance augmente brusquement avant l'extinction, entraînant une brusque augmentation de la température de la fumée plus rapide que celle des supports du fait de leur inertie thermique. Après extinction, la fumée chaude est rapidement évacuée du couloir et est remplacée par de l'air frais tandis que les cibles refroidissent plus lentement, entraînant ΔT vers des valeurs négatives.

3.2. Étude expérimentale du dépôt de suie

Dans le cas des cibles refroidies, quelle que soit la température de consigne du bain thermostaté, ΔT atteint un régime stationnaire entre 250 et 850 s. Comme pour les cibles non refroidies, l'augmentation de la puissance du foyer se traduit également par une augmentation rapide de ΔT suivie d'une décroissance rapide. La décroissance est cependant moins importante que pour les cibles non refroidies, étant donné que le refroidissement rend les températures de surface des cibles moins sensibles aux variations brutales de la température des fumées.

Pour étudier l'influence de la vitesse d'écoulement sur le dépôt on compare les masses de suie récoltées en zone 1 et en zone 2. Cependant les pertes thermiques dans le couloir entraînent une différence de ΔT entre les zones 1 et 2. Les pertes thermiques ont donc une influence sur les masses déposées qui peuvent masquer l'effet du changement de vitesse d'écoulement. Nous cherchons à évaluer l'influence des pertes thermiques dans le couloir sur le dépôt. La vitesse de dépôt est donnée par la formule suivante :

$$V_{dep} = \frac{K_{th}\nu_g}{T_g} \left(\frac{dT}{dy} \right)_{paroi} = \frac{K_{th}\nu_g}{T_g} \left(\frac{h\Delta T}{k_g} \right), \quad (3.5)$$

où h , le coefficient de transfert thermique, est proportionnel au nombre de Reynolds de l'écoulement élevé à la puissance 0,8 donc à la vitesse d'écoulement élevée à la puissance 0,8. la figure 3.24 représente le rapport $\frac{\Delta T_1}{T_1} / \frac{\Delta T_2}{T_2}$ calculé pour chaque cible, au cours de chaque essai. A cause des pertes thermiques dans la couche de fumée, le paramètre $\frac{\Delta T}{T}$ est effectivement plus grand pour les cibles situées en zone 1 que pour les cibles situées en zone 2. Il est beaucoup plus répétable pour les cibles refroidies, quelle que soit la température de consigne du bain, que pour les cibles non refroidies.

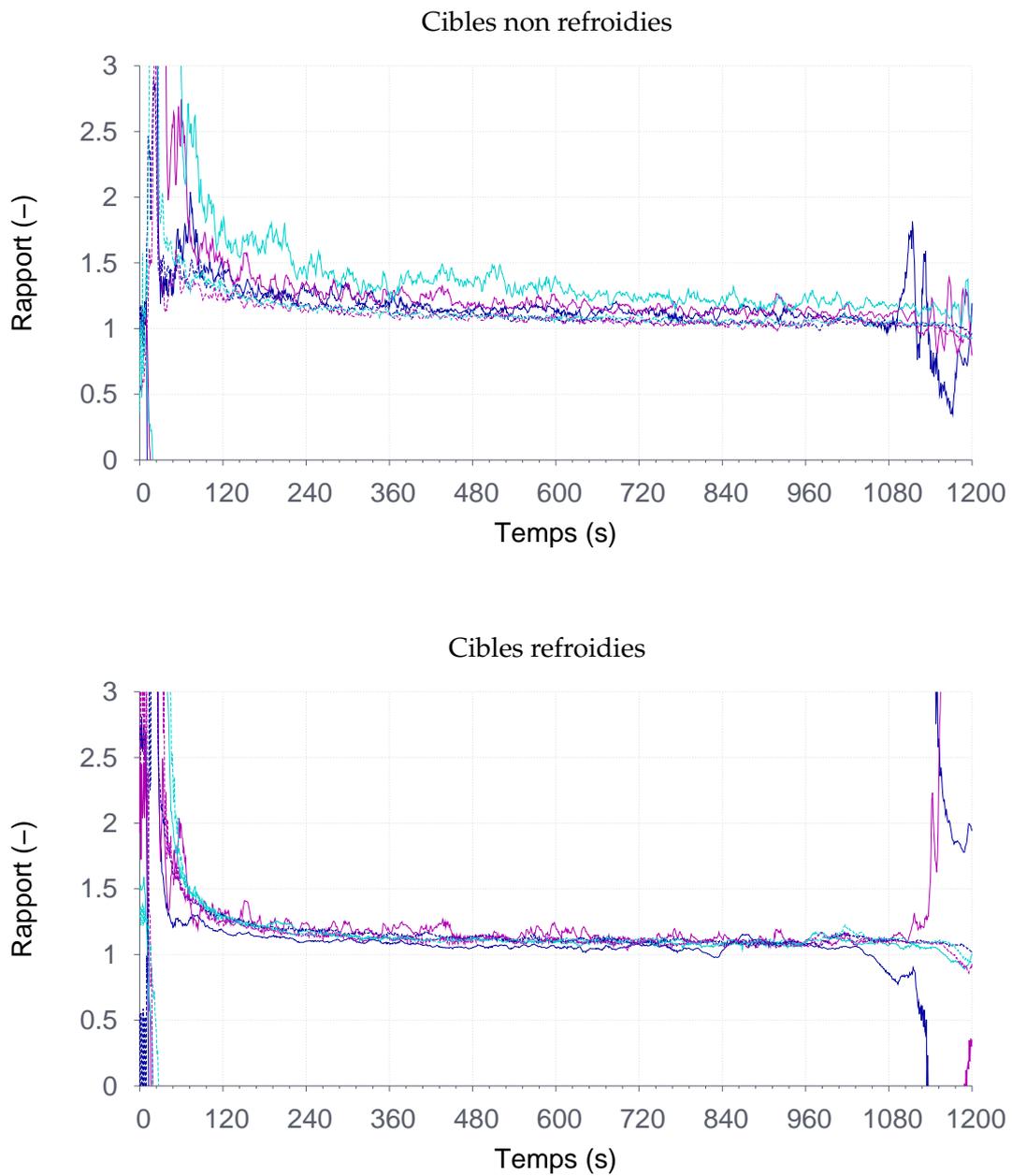


FIGURE 3.24 – Rapport Zone 1 / Zone 2 de la différence de température gaz-paroi divisée par la température absolue des gaz $(\frac{\Delta T}{T})_1 / (\frac{\Delta T}{T})_2$

3.3 Conclusion

L'objectif de cette nouvelle campagne expérimentale était de collecter de nouvelles données à échelle réelle sur le dépôt de particules de suie sur des parois verticales de façon à mieux comprendre la façon dont différents paramètres influencent la masse de suie déposée. Après la température de la surface de dépôt, dont l'importance a été mise en évidence par la première campagne d'essai, les résultats donnés par cette nouvelle configuration viennent ajouter au nombre des paramètres pris en compte la vitesse d'écoulement des fumées. Ce paramètre joue sur la couche limite dynamique qui influence non seulement le dépôt isotherme par diffusion et impaction, même si l'étude des modèles au chapitre 1 suggère que leur contribution au dépôt lors d'un incendie est négligeable, mais aussi le dépôt par thermophorèse car la couche limite thermique est liée à la couche limite dynamique. On a donc cherché ici à se placer dans une configuration expérimentale qui nous permette, à échelle réelle, d'étudier l'influence de la vitesse d'un écoulement de fumée parallèle aux cibles de dépôt verticales sur la quantité de suie déposée. La campagne a été organisée sous la forme de six essais répartis en deux séries de trois essais.

Il est malheureusement compliqué lors de ces essais à échelle réelle d'isoler l'influence d'un seul paramètre, qui plus est aussi difficile à maîtriser que la vitesse d'écoulement des fumées. Nous avons utilisé la simulation numérique, couplée à des mesures expérimentales de température et de vitesse d'écoulement d'air frais, pour montrer que le dispositif expérimental permet effectivement d'obtenir un écoulement de fumée stratifié dont la couche chaude a une épaisseur constante. La conservation du débit volumique nous assure alors que l'écoulement des fumées sortantes en partie haute est plus lent dans la première zone de mesure que dans la seconde. La simulation permet d'estimer un facteur d'accélération de l'ordre de 2 entre les deux zones de mesure.

Ces résultats appuient nos observations précédentes sur l'importance de la thermophorèse lors du dépôt : on récupère en effet plus de suie sur les cibles refroidies que sur les cibles non refroidies. Cependant, il est impossible au vu des résultats obtenus de tirer des conclusions sur l'effet, ou l'absence d'effet, de la vitesse d'écoulement sur le dépôt de suie. Lorsque l'on compare les résultats obtenus dans la zone à écoulement rapide à ceux obtenus dans la zone à écoulement lent, la première série d'essais donne des tendances reproductibles et semble mettre en évidence une augmentation du dépôt par l'accélération de l'écoulement, mais la seconde série d'essais montre un effet inverse.

L'échelle réelle empêche de contrôler les autres paramètres influençant le dépôt de suie (concentration en particules dans les fumées, température de gaz et température de paroi), mais ils ont été mesurés. Si les différences de concentration de suie et de température entre les deux zones de mesure sont relativement faibles, elles sont suffisantes pour noyer un potentiel effet de la vitesse sur le dépôt.

Le contrôle des conditions d'écoulement des fumées est donc trop difficile à échelle réelle pour pouvoir identifier l'importance de ce nouveau paramètre. L'étape suivante

est la réalisation d'un banc expérimental à échelle réduite qui nous permette de faire varier avec certitude la vitesse des fumées au voisinage des zones de mesure de dépôt.

Chapitre 4

Étude à échelle réduite de l'influence de la vitesse d'écoulement sur le dépôt

La question de la mise en évidence expérimentale d'une éventuelle influence de la vitesse d'écoulement des fumées sur le dépôt de suie reste donc en suspens malgré les résultats expérimentaux obtenus à grande échelle et présentés dans le chapitre 3. On choisit ici de passer à l'échelle réduite de façon à faciliter la maîtrise des conditions d'essais, en particulier la direction et la vitesse de l'écoulement des fumées, qui nous intéresse ici.

Un banc expérimental est donc monté en laboratoire pour répondre à cette problématique. Malgré le passage à l'échelle réduite, on souhaite conserver deux aspects : utiliser une flamme pour produire des particules de suie d'une part et rester dans des conditions thermiques rendant le dépôt par thermophorèse prépondérant d'autre part.

4.1 Description de l'essai en conduite

4.1.1 Hypothèses et objectif

Pour pouvoir isoler l'influence de la vitesse d'écoulement sur le dépôt de suie parmi les autres paramètres, on cherche à monter un banc expérimental qui permette de représenter le cas idéal suivant : un écoulement unidirectionnel porteur de particules de suie, dans lequel la température du gaz porteur soit constante et homogène. Dans ce cas, la comparaison entre deux mesures de dépôt de suie sur des cibles parfaitement thermostatées, situées dans deux zones se distinguant uniquement par la variation d'une vitesse représentative de l'écoulement permet d'évaluer exactement l'influence de ce paramètre.

Dans la continuité de la série d'essais à pleine échelle décrite dans le chapitre 3, nous avons choisi de créer à nouveau l'accélération de l'écoulement par un rétrécissement de section. Nous nous sommes cette fois-ci intéressés à un écoulement en conduite, non stratifié, de façon à mieux maîtriser l'écoulement des fumées. En pratique, il a été impossible de réaliser un dispositif qui permette d'utiliser des cibles de dépôt thermostatées tout en limitant les pertes aux parois pour s'approcher d'un écoulement isotherme. Dans le dispositif réel, schématisé par la figure 4.1, les températures des fumées T_g ainsi que celle des cibles T_p varient au cours du temps et entre les deux zones de mesure. Dans cette configuration à petite échelle non seulement la conservation du débit volumique Q_v nous assure l'accélération des fumées, mais nous nous assurons également d'obtenir un écoulement unidirectionnel.

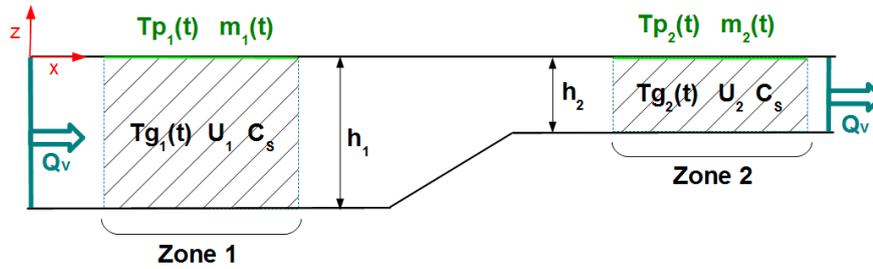


FIGURE 4.1 – Schéma de la configuration théorique reproduite par cette série d'expériences.

4.1.2 Réalisation d'une veine à section variable

L'outil expérimental, choisi comme le meilleur compromis possible entre la configuration théorique idéale et les possibilités pratiques à notre disposition, consiste en une veine à section variable associée à une source de fumée. Il s'agit d'une conduite de longueur 1,65 m, de section intérieure carrée de 10 cm de côté représentée sur la figure 4.2. Les parois latérales et le sol de la conduite sont construits en plexiglas et le couvercle amovible est en bois. Toutes les parois ont une épaisseur de 1 cm.

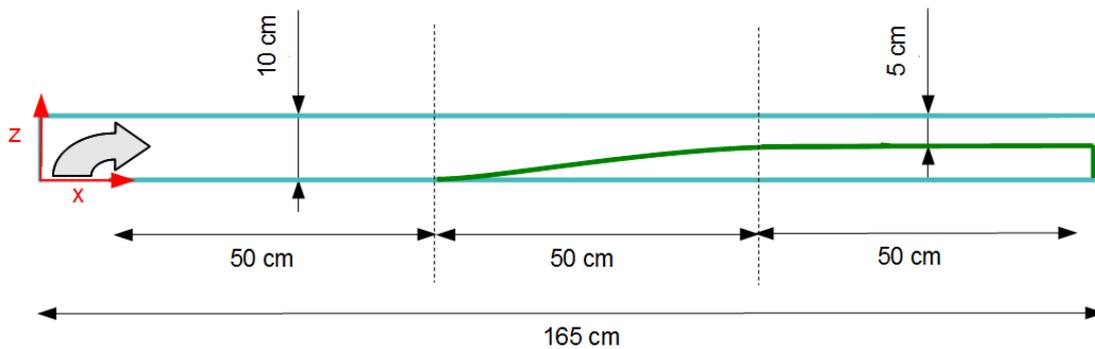


FIGURE 4.2 – Schéma de la vue en coupe du dispositif expérimental.

Le sol de la veine est équipé à une de ses extrémités d'une ouverture carrée, de 10 cm de côté, qui permet à la fumée d'entrer. Au début de l'essai cette ouverture est obstruée par une trappe. Dans la suite le temps $t_0 = 0s$ correspond au moment d'ouverture de la trappe, c'est-à-dire au moment où la fumée chaude pénètre dans la veine.

A l'intérieur de la conduite, on ajuste un dispositif qui permet de diminuer la hauteur de la veine progressivement (en vert sur la figure 4.2). La largeur de la section de passage de la conduite est constante mais la hauteur est variable entre $x = 50$ cm et $x = 100$ cm. La conduite est donc séparée en deux parties : une partie amont de hauteur 10 cm du côté de l'entrée des fumées, et une partie aval de hauteur 5 cm du côté de la sortie de la veine.

4.1.3 Pré-dimensionnement par simulation numérique

Les simulations numériques de l'expérience ont été réalisées grâce au logiciel FDS version 6.1. Comme dans le chapitre 3, la simulation nous permet d'accéder à des grandeurs non mesurées lors des expériences : la vitesse d'écoulement et la concentration de suie.

Simulation numérique du dispositif

Le domaine de calcul comprend le réservoir de fumée où a lieu la combustion de l'heptane et la production de fumée, et la veine où ont lieu les mesures de dépôt. Les deux maillages sont ouverts et contiennent des obstructions solides modélisant les parois du réservoir de fumée et de la veine. On utilise pour le bois et le plexiglas les propriétés données par le tableau 4.1. Le domaine de calcul, représenté sur la figure 4.3, a été découpé en deux maillages dans lesquels la simulation est résolue parallèlement (voir MCGRATTAN *et al.*, 2014). Chacun des deux maillages est uniforme. Les mailles sont cubiques de 2 cm côté dans le réservoir et 1 cm de côté dans la veine.

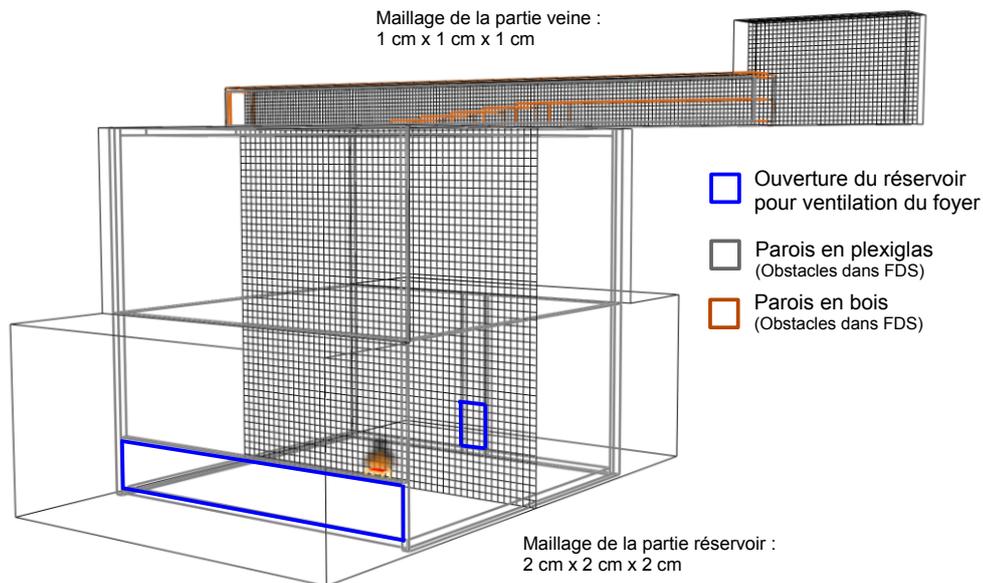


FIGURE 4.3 – Maillage du réservoir de fumée et de la veine

Matériaux	Epaisseur m	Masse volumique kg/m ³	Conductivité thermique W/(m K)	Chaleur spécifique kJ/(kg.K)
Plexiglas	0,01	1200	0,2	1,5
Bois	0,01	800	0,1	1,0

TABLE 4.1 – Propriétés des matériaux utilisés dans la simulation FDS.

Le terme source est prescrit grâce à la vitesse de perte de masse mesurée lors d'essais préliminaires $\dot{m}_{dodecane} = 0,7 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$. On a besoin des valeurs de chaleur de combustion ΔH_c , de facteur d'émission de suie y_{suie} et de facteur d'émission de monoxyde de carbone y_{CO} , donnés dans la littérature. Les valeurs de ces paramètres mesurées à petite échelle par TEWARSON (2002) pour un feu de dodécane dans des conditions bien ventilées :

$$\Delta H_c = 44,2 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1} \quad y_{suie} = 0,038 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \quad y_{CO} = 0,012 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \quad (4.1)$$

Terme source

On souhaite vérifier dans un premier temps que le terme source de fumée et de chaleur en entrée de la veine est bien reproduit par la simulation numérique. En effet la température d'entrée des produits de combustion conditionne l'écoulement à l'intérieur de la veine de mesure.

La comparaison entre la température mesurée et température prédite par simulation numérique au plafond du réservoir de fumée (voir figure 4.4) nous permet de vérifier que la fumée pénétrant dans la veine a une température cohérente par rapport à l'expérience.

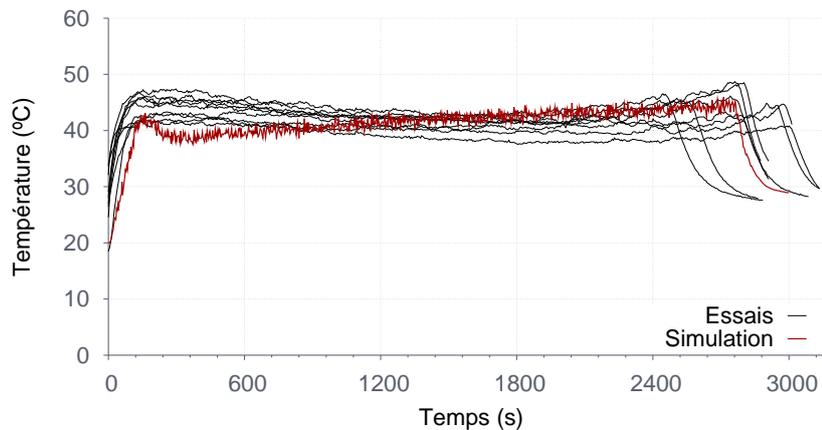


FIGURE 4.4 – Comparaison de la température au plafond de l'enceinte, mesurée lors des essais et calculée par simulation numérique. ($t = 0 \text{ s}$ correspond à l'allumage)

Champs de vitesse

La simulation numérique nous permet d'une part de vérifier que l'écoulement est unidirectionnel et d'autre part d'évaluer dans quelle mesure l'écoulement est accéléré entre les deux zones de mesure. Il est en effet possible que l'écoulement soit affecté par l'entrée/sortie des fumées aux extrémités de la veine ou par le changement de section. Le tableau 4.2 donne les valeurs, moyennées sur la durée de l'essai simulé, des composantes de la vitesse de l'écoulement au centre de la section de passage. Les

4.1. Description de l'essai en conduite

composantes transversales et verticales u_y et u_z de la vitesse sont inférieures d'un ordre de grandeur par rapport à sa composante longitudinale u_x .

Zone	U_x (m/s)	U_y (m/s)	U_z (m/s)
1	0,26	- 0,01	0,05
2	0,65	-0,01	0,02

TABLE 4.2 – Valeurs moyennes des composantes de la vitesse simulée numériquement

De plus, la variation de vitesse entre la zone 1 et la zone 2 vérifie également l'hypothèse faite sur l'augmentation de la vitesse d'écoulement liée à la réduction de hauteur de la veine. On obtient dans cette configuration (configuration B) une vitesse d'écoulement 2,5 fois plus élevée dans la zone 2 que dans la zone 1 (voir figure 4.6).

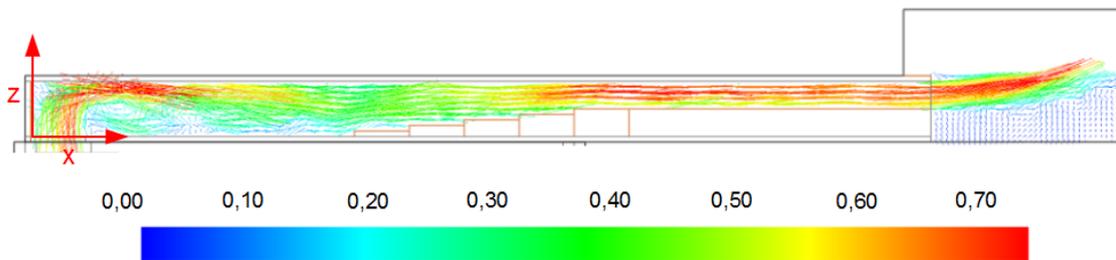


FIGURE 4.5 – Simulation du champ de vitesse dans le réservoir de fumée et dans la veine. (à $t = 1600$ s)

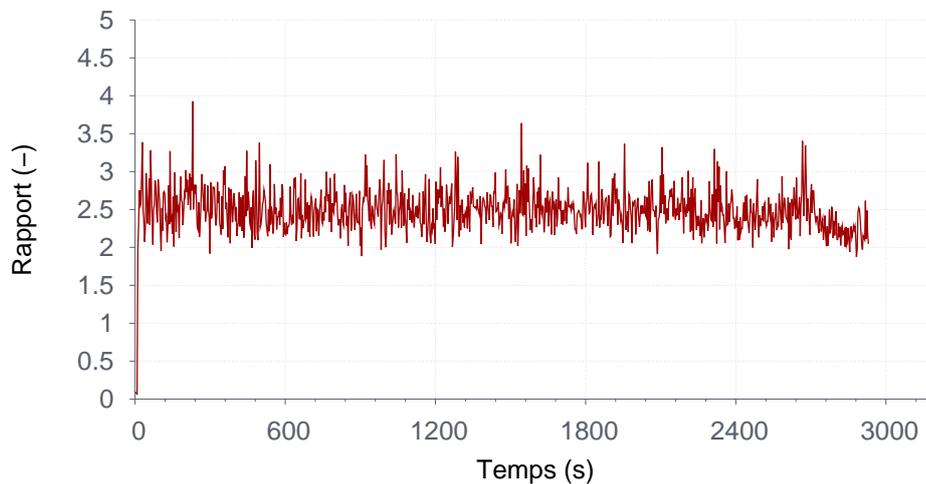


FIGURE 4.6 – Rapport des composantes longitudinales des vitesses d'écoulement U_x , évaluées par simulation numérique en zones 1 et 2 ($t = 0$ s correspond à l'ouverture de la trappe).

Concentration de suie

Quelle que soit la concentration massique de suie transportée par la fumée, la concentration de suie doit être conservée entre les zones 1 et 2. La seule source potentielle de

diminution de la concentration de suie entre la zone de mesure amont et la zone aval est le dépôt. La simulation numérique permet de vérifier dans quelle mesure, en considérant les modèles de dépôt adoptés par FDS et décrits au chapitre 1, le dépôt dans la veine pourrait invalider l'hypothèse de concentration de suie identique. Les pertes en lignes constatées sur la longueur de la veine sont inférieures à 2 %. C'est suffisamment bas pour que nous choissions de considérer la concentration de suie dans l'écoulement homogène sur toute la longueur de la veine.

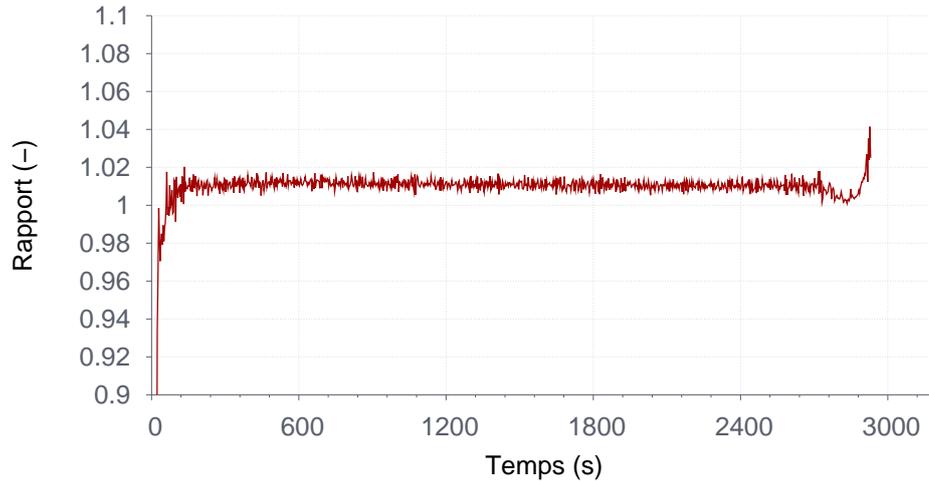


FIGURE 4.7 – Rapport des concentrations de suie évaluées par simulation numérique en zones 1 et 2 ($t = 0$ s correspond à l'ouverture de la trappe).

4.2 Mise en œuvre du dispositif expérimental

4.2.1 Plan d'expériences

En tout, neuf essais ont été effectués dans ce dispositif expérimental. Cinq essais ont été réalisés dans la configuration principale (tableau 4.3), décrite précédemment, où la zone à petite section de passage est située en aval de la zone à grande section de passage.

Nom de l'essai	Durée de l'essai	Température plafond max
Essai 1-1	49 min	49,0 °C
Essai 1-2	45 min	46,8 °C
Essai 1-3	44 min	44,7 °C
Essai 1-4	45 min	41,9 °C
Essai 1-5	50 min	47,6 °C

TABLE 4.3 – Durée et configuration de veine pour les 5 essais réalisés dans la configuration principale ('section large en amont → section étroite en aval).

4.2. Mise en œuvre du dispositif expérimental

La portion représentée en vert sur la figure 4.2 est amovible, il est donc possible de retourner ou de supprimer la réduction de section. Nous avons donc réalisé deux essais dans une configuration inversée où la zone 1 (amont) a une section plus petite que la zone 2 (aval) (tableau 4.4) ainsi que deux essais sans modification de section dans la veine (tableau 4.5). L'instrumentation de ces quatre derniers essais est identique à celle décrite dans le cas de la configuration principale.

Nom de l'essai	Durée de l'essai	Température plafond max
Essai 2-1	45 min	47,9 °C
Essai 2-2	46 min	50,5 °C

TABLE 4.4 – Durée et configuration de veine pour les 2 essais dans la configuration inversée (section étroite en amont → section large en aval).

Nom de l'essai	Durée de l'essai	Température plafond max
Essai 3-1	46 min	54,6 °C
Essai 3-2	48 min	50,0 °C

TABLE 4.5 – Durée et configuration de veine pour les 2 essais réalisés sans rétrécissement de conduite.

Le schéma 4.8 résume les trois configurations testées. On tente d'abord lors des cinq premiers essais de reproduire à échelle réduite une configuration semblable à celles des essais à échelle réelle présentés au chapitre 3. Les quatre essais supplémentaires nous permettront d'évaluer dans quelle mesure la modification de section influence le comportement thermique de la veine qui, on l'a vu, a une forte influence sur le dépôt. Nous pourrons ainsi savoir si le dispositif permet de prendre en compte expérimentalement l'influence de la seule vitesse d'écoulement sur le dépôt en inversant une éventuelle compensation de l'effet de la vitesse par rapport à celui de la différence de température gaz-paroi.

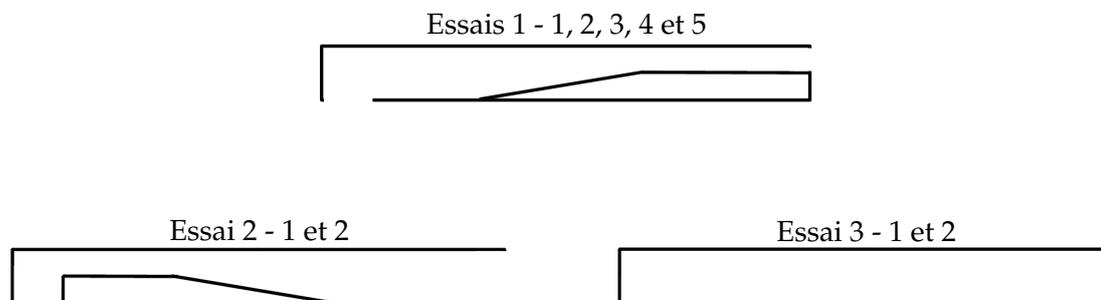


FIGURE 4.8 – Configurations expérimentales testées.

La durée d'un essai est définie comme le temps écoulé entre le moment où la trappe est ouverte et celui où l'opérateur enlève le plafond de la veine pour prélever les cibles de dépôt. Cette durée correspond au temps d'exposition des cibles aux fumées. A cause d'une grande sensibilité du terme source aux conditions extérieures (température initiale, opacité des parois ...), il s'est avéré très difficile d'obtenir une répétabilité parfaite des essais. La durée des essais varie entre 46 et 50 minutes. Les tableaux 4.3, 4.4 et 4.5 indiquent la durée de chaque essai.

4.2.2 Source de fumée chaude

Nous avons besoin d'une source qui puisse produire la fumée entrant dans la veine à l'intérieur de laquelle sont réalisées les mesures de dépôt. Nous avons choisi d'utiliser la fumée produite par un feu de bac de dodécane de faible puissance (voir figure 4.9). Ce foyer, installé dans un réservoir, produit une couche de fumée chaude. L'ouverture d'une trappe carrée de 10 cm par 10 cm permet l'entrée des fumées dans la veine de mesure installée au dessus du réservoir.

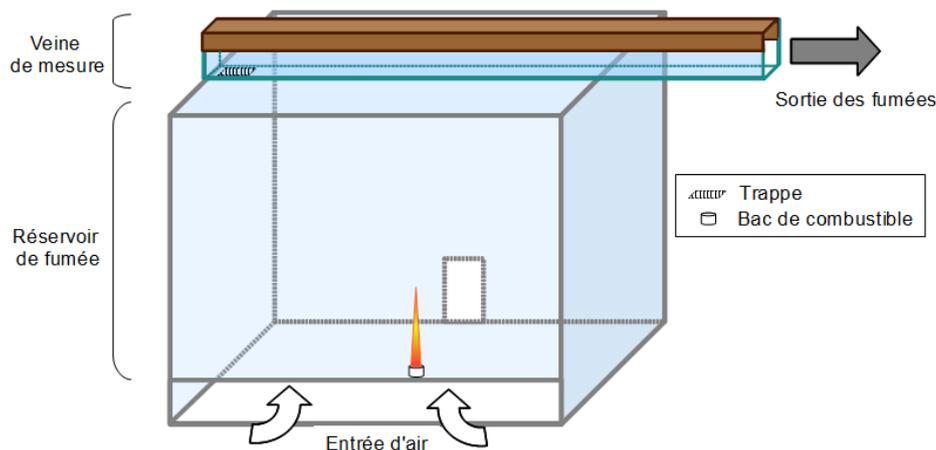


FIGURE 4.9 – Réservoir de fumée et veine de mesure

Il est important de caractériser cette source de fumée car la maîtrise des conditions limites, ici à l'entrée de la veine, est un des objectifs du passage à l'échelle réduite. Pour cela nous avons mesuré la perte de masse du foyer au cours d'essais préliminaires, et installé un arbre de thermocouple dans ce réservoir.

Le foyer est un récipient en verre circulaire de 5 cm de diamètre et 2 cm de haut, posé au sol au centre du caisson en plexiglas. On verse à l'intérieur au début de chaque essai 27 g de dodécane ($C_{12}H_{26}$) liquide. Deux ouvertures, de 0,08 m par 1,20 m ménagées sur toute la largeur de la face avant et de 0,20 m par 0,10 m au centre de la face arrière, assurent la bonne ventilation du foyer. Celui-ci, une fois allumé par la flamme d'un brûleur, produit une flamme orange peu battante d'une hauteur de l'ordre de 20 cm (voir figure 4.10).

Grâce à des essais préliminaires au cours desquels la perte de masse du même foyer a été mesurée par une balance, on a vérifié que la perte de masse du bac peut être

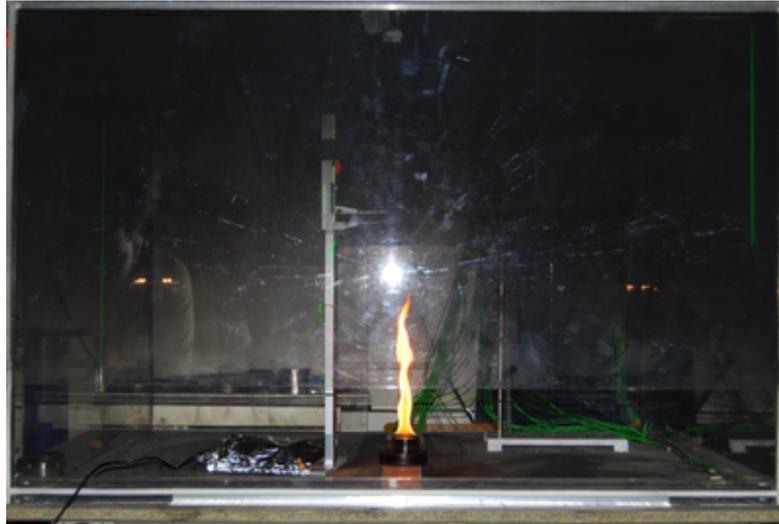


FIGURE 4.10 – Photographie de la face avant du réservoir de fumée et de la flamme du foyer.

considérée comme constante (voir figure 4.11). Si ces trois essais préliminaires ont montré que la perte de masse est constante, ils n'ont pas permis d'obtenir une vitesse de perte de masse identique. La vitesse de perte de masse mesurée vaut donc $\dot{m}_{dodcane} = (0,015 \pm 0,004) \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, où l'erreur est l'écart type des trois mesures effectuées. Les propriétés du dodécane sont celles données dans la littérature (TEWARSON, 2002). En utilisant une valeur de la chaleur de combustion $\Delta H_c = 44,2 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, on estime que le foyer a une puissance d'environ $\dot{q} = (0,670 \pm 0,180) \text{ kW}$.

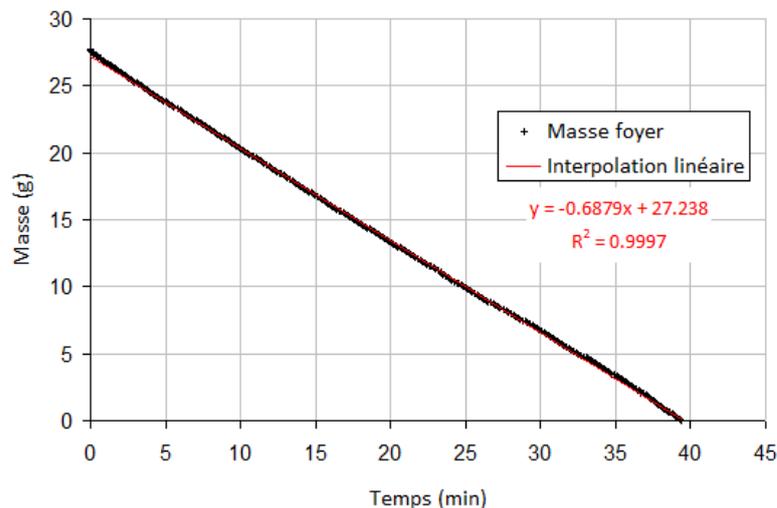


FIGURE 4.11 – Perte de masse du foyer mesurée lors d'un essai préliminaire. ($t = 0 \text{ s}$ correspond à l'allumage)

L'arbre de thermocouple nous permet de vérifier la stratification thermique de la couche de fumée dans le réservoir. Le thermocouple le plus haut, appelé "plafond" et situé à 2 cm sous la paroi supérieure du réservoir de fumée, donne la température de la fumée entrant dans la veine. Bien que le foyer soit identique pour chaque essai, on

observe toujours une variation dans la température des fumées liée aux conditions initiales et limites des essais. La fumée qui entre dans la veine a donc une température comprise entre 40 °C et 50 °C et varie peu au cours du temps.

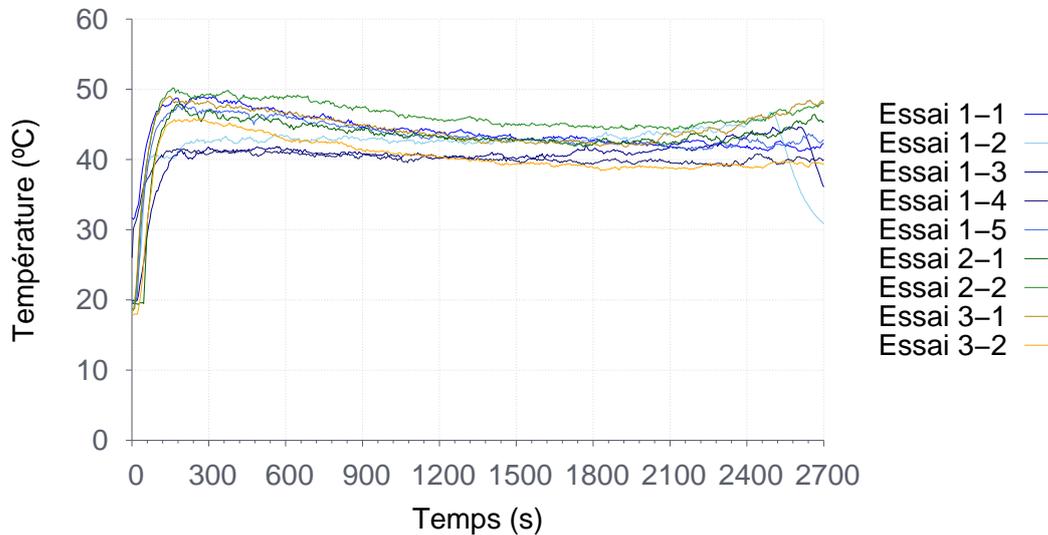


FIGURE 4.12 – Température mesurée au plafond du réservoir de fumée durant les essais. ($t = 0$ s correspond à l’allumage)

De même si la température du plafond de fumée varie peu au cours d’un essai, on voit sur la figure 4.12 que son évolution présente des différences d’un essai à l’autre. On observe un long plateau compris entre 40 et 45 °C. Le pic de température observé au début de certains essais peut être attribué à un trop grand préchauffage de l’intérieur du réservoir de fumée au moment de l’allumage. Le pic de température qui a lieu juste avant l’extinction correspond au sursaut d’activité observé avant l’extinction de tout feu de bac.

4.2.3 Instrumentation de la veine

On dispose donc d’une veine de mesure dans laquelle une même source de fumée crée un écoulement chaud, porteur de particules de suie. On souhaite maintenant mesurer le dépôt de suie et l’ambiance thermique dans chacune des deux zones créées qui se distinguent par la vitesse d’écoulement des gaz qui les traversent.

Cibles de dépôt

Le dépôt de suie est mesuré de la même façon que lors des deux campagnes d’essai à échelle réelle : par pesée différentielle de cibles en aluminium carrées. On choisit de plaquer les cibles au plafond amovible de la veine qui peut être enlevé entièrement à la fin de chaque essai pour faciliter le prélèvement. Les thermocouples de paroi sont donc également fixés sur le plafond de la conduite (voir figure 4.14).

4.2. Mise en œuvre du dispositif expérimental

Après nettoyage et pesée, les cibles propres sont plaquées au plafond grâce à deux attaches en carbone. La surface couverte par ces attaches est négligeable devant la surface totale de la cible. Ces attaches sont faciles à enlever sans risquer d'altérer le dépôt, lors du prélèvement à la fin des essais.



FIGURE 4.13 – Photographie d'une cible et d'un thermocouple installés sur le plafond de la veine avant essai.

Une fois prélevées après essai, les cibles sont transportées dans un conteneur scellé jusqu'à une balance précise à 10^{-5} g et pesées chacune dix fois. Le même processus de pesée ayant été appliqué aux cibles propres avant essai, la différence entre les masses des cibles avant et après essai donne la masse de suie déposée sur chacune. On considère que la dispersion d'une série de dix pesées autour de sa valeur moyenne représente l'erreur de mesure liée à la sensibilité de la balance et aux manipulations de l'opérateur.

Températures

En plus de la cible, chacune des deux zones de mesure est instrumentée par un thermocouple au centre de la section de passage, ainsi qu'un thermocouple plaqué au plafond de la conduite. Les quatre thermocouples utilisés sont de type K, de diamètre 1 mm, et reliés à une centrale de mesure séquentielle (tous représentés sur la figure). Les deux thermocouples "gaz" sont situés au centre de la section de passage de la veine, respectivement en Zone 1 et en Zone 2. Les deux thermocouples "parois" sont plaqués contre le plafond en bois de la veine, à la même abscisse x que le thermocouple "gaz" correspondant. Compte tenu de leur installation, les températures mesurées par les thermocouples "parois" correspondent à la température fluide au voisinage de la paroi. Pour ne pas gêner le prélèvement des cibles, les deux thermocouples de chaque zone sont situés 7 cm en amont de la cible de dépôt. La figure 4.14 montre le plafond de la veine instrumenté par les thermocouples "parois" et les cibles.

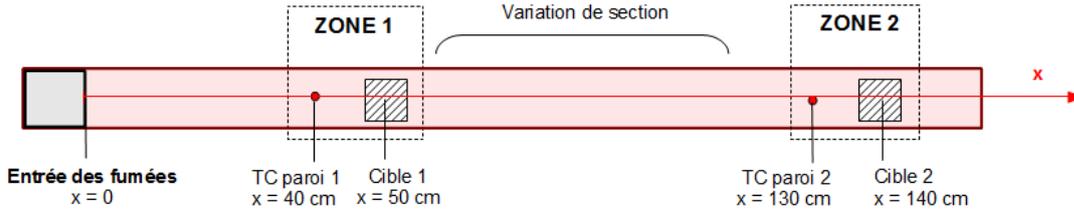


FIGURE 4.14 – Schéma donnant l'emplacement des moyens de mesure sur le couvercle de la veine (cible et thermocouple).

4.3 Résultats expérimentaux

4.3.1 Pertes thermiques le long de la veine

Les pertes thermiques dans la veine, qui ont lieu au niveau de toutes les parois, entraînent une diminution de la température de l'écoulement lorsque x augmente. Les mesures effectuées par les thermocouples "gaz" mettent en évidence ces pertes : la différence entre les températures mesurées en zone 1 et en zone 2 (voir figure 4.17).

On constate que la différence de température entre l'amont et l'aval tend vers une valeur fixe, que la durée des essais ne permet pas d'atteindre. On perd 5°C au maximum en début d'essai, à 2°C au minimum en fin d'essai entre la zone 1 et la zone 2 qui sont distantes de 80 cm. Les pertes thermiques sont très répétables d'un essai à l'autre, comme on peut le constater sur la figure 4.17.

On peut évaluer l'influence de ce refroidissement de 2 à 5°C sur le dépôt de suie en utilisant les modèles à notre disposition, présentés dans le chapitre 1. On suppose que la masse de particules déposée sur une cible de surface A pendant une durée t_1 s'exprime sous la forme :

$$m_{dep} = \int_0^{t_1} C_S \frac{K_{th} \nu_g}{T_g} \left(\frac{dT}{dz} \right)_{paroi} dt, \quad (4.2)$$

où C_S est la concentration massique de suie, K_{th} le coefficient de thermophorèse, ν_g la viscosité cinématique du gaz, T_g la température absolue des gaz au voisinage de la cible et $(dT/dz)_{paroi}$ le gradient de température à la surface de la cible. Le dépôt de suie récolté sur une cible à la fin de l'essai est donc inversement proportionnel à la température absolue des gaz dans la zone correspondante. Dans les conditions idéales de dépôt décrites précédemment et en supposant que le gradient de température à la paroi ne dépend pas de la température des gaz on peut estimer l'écart de masse déposée causée par une diminution de la température de 5°C par rapport à une température de référence T_0 à :

$$\frac{m_{dep}(T = T_0)}{m_{dep}(T = T_0 + 5^{\circ}\text{C})} = \frac{T_0 + 5^{\circ}\text{C}}{T_0}, \quad (4.3)$$

4.3. Résultats expérimentaux

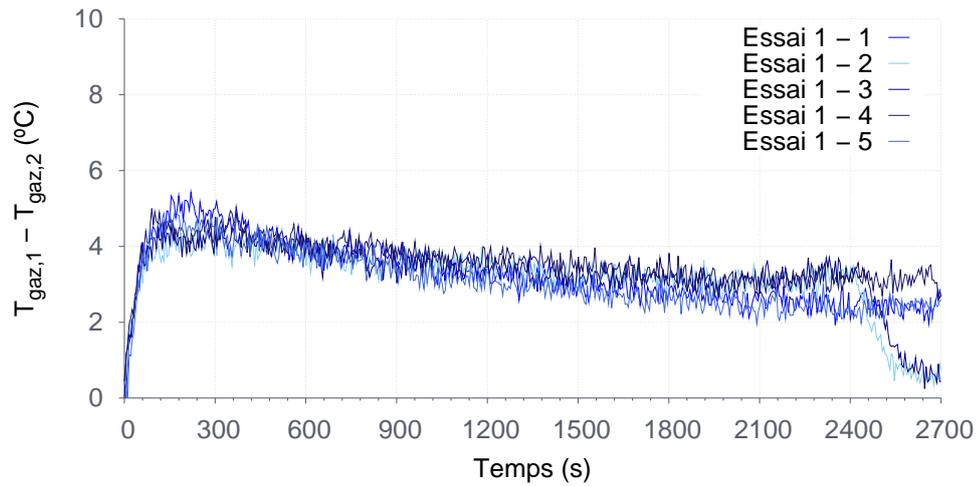


FIGURE 4.15 – Différence de température au centre de la veine entre les zones de mesure amont (1) et aval (2) dans la configuration 1 ($t = 0$ s correspond à l'ouverture de la trappe).

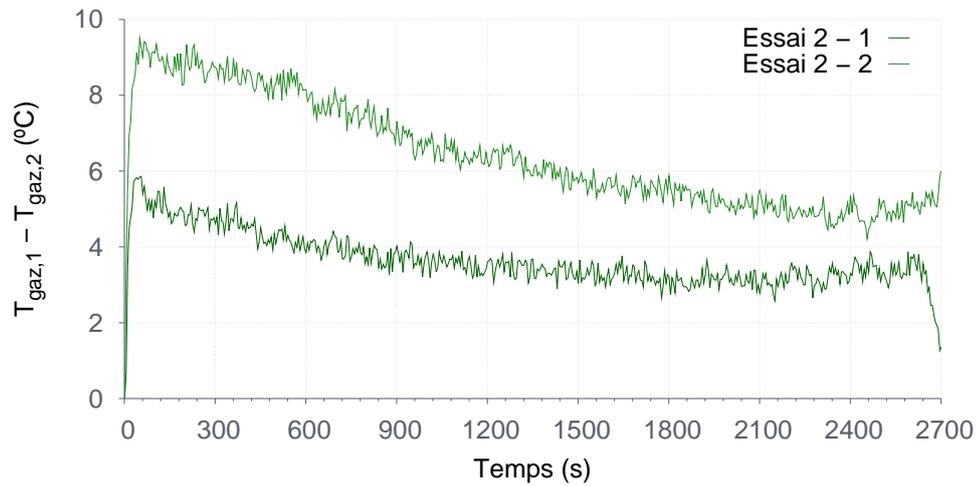


FIGURE 4.16 – Différence de température au centre de la veine entre les zones de mesure amont (1) et aval (2) dans la configuration 2. $t = 0$ s correspond à l'ouverture de la trappe.

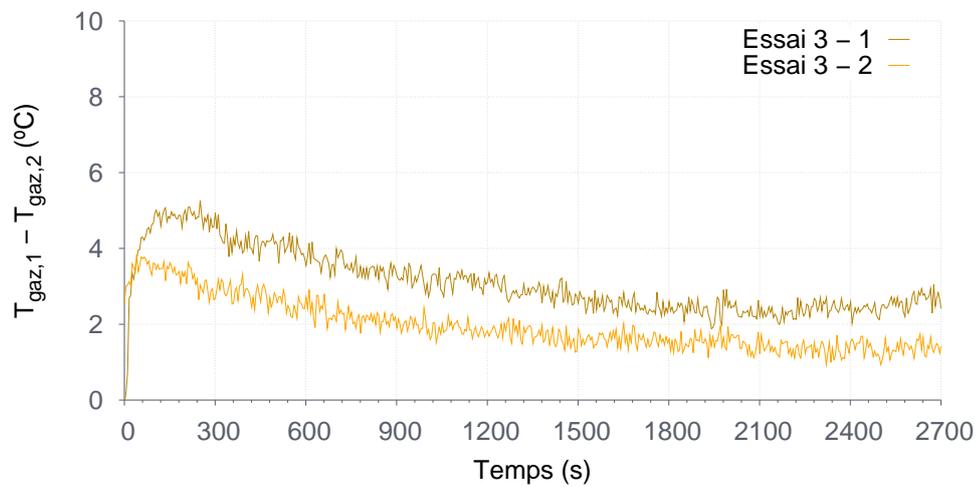


FIGURE 4.17 – Différence de température au centre de la veine entre les zones de mesure amont (1) et aval (2) dans la configuration 3. $t = 0$ s correspond à l'ouverture de la trappe.

où T_0 est une température absolue exprimée en K. Pour une température représentative de cette série d'essai fixons $T_0 = 315$ K, cela donne :

$$\frac{m_{dep}(T = T_0)}{m_{dep}(T = T_0 + 5^\circ\text{C})} = 1,02, \quad (4.4)$$

soit 2 % de masse déposée en moins sur la cible située dans la zone de température $T_0 + 5^\circ\text{C}$. Les conséquences sont donc faibles et d'autant plus négligeables que la température T_0 est élevée.

4.3.2 Mesure du dépôt de suie

Comme lors des précédents essais, chaque résultat de masse de suie déposée est la différence entre la masse mesurée avant essai m_1 et après essai m_2 . Chacune de ces masses est une valeur moyenne calculée d'après dix pesées, indicées i , réalisées les unes à la suite des autres. L'erreur sur la mesure, notée ϵ_1 ou ϵ_2 respectivement, est calculée comme un écart moyen des valeurs obtenues à la moyenne retenue. On a donc, dans le cas des pesées avant essai :

$$m_1 = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} m_{1,i} \quad \text{et} \quad \epsilon_1 = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} |m_1 - m_{1,i}|, \quad (4.5)$$

et de même après essais. Les masses de suie déposées sont alors présentées en mg sous la forme $m_{dep} \pm \epsilon$ où

$$m_{dep} = m_2 - m_1 \quad \text{et} \quad \epsilon = \epsilon_2 + \epsilon_1. \quad (4.6)$$

Les pesées répétées présentent toutes une très faible dispersion (inférieure à 3%) par rapport à la pesée moyenne retenue. Après chaque essai, la masse de suie récoltée sur une cible varie entre 0,9 et 0,34 mg.

Configuration principale : section lente → section rapide

Lors des cinq premiers essais, les fumées entraînent dans la conduite par une zone (zone 1) de hauteur 10 cm où a lieu un premier prélèvement. La hauteur est ensuite réduite par un élément formant un convergent de façon à ce que le second prélèvement (zone 2) soit fait dans une zone où la hauteur est de 5 cm seulement. Les résultats obtenus dans cette configuration sont présentés sur la figure 4.18.

On constate qu'on obtient 21 à 57 % de suie en plus sur la cible située en zone 1, qui est la zone où l'écoulement est le plus lent. Cependant c'est également la zone où la température est la plus élevée du fait des pertes thermiques. Même si on a vu que l'influence directe de la température sur le dépôt par thermophorèse était négligeable (de l'ordre de 1 % pour une différence de 5°C) la température peut avoir une influence indirecte sur le gradient de température à la paroi et augmenter ainsi l'efficacité de la thermophorèse.

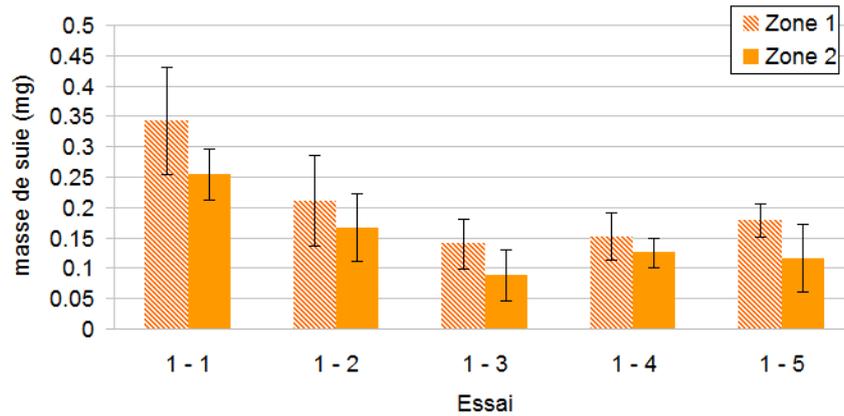


FIGURE 4.18 – Masse de suie déposée dans chaque zone de mesure.

Si on s'intéresse à la valeur moyenne au cours des essais de la différence de température $T_g - T_p$ mesurée par les deux thermocouples de chaque zone on peut vérifier qu'il existe une différence faible de ΔT entre les zones 1 et 2. Cependant cette différence est suffisante pour nous empêcher d'isoler l'influence du paramètre vitesse d'écoulement et de conclure quant à son influence sur le dépôt de suie dans notre configuration expérimentale.

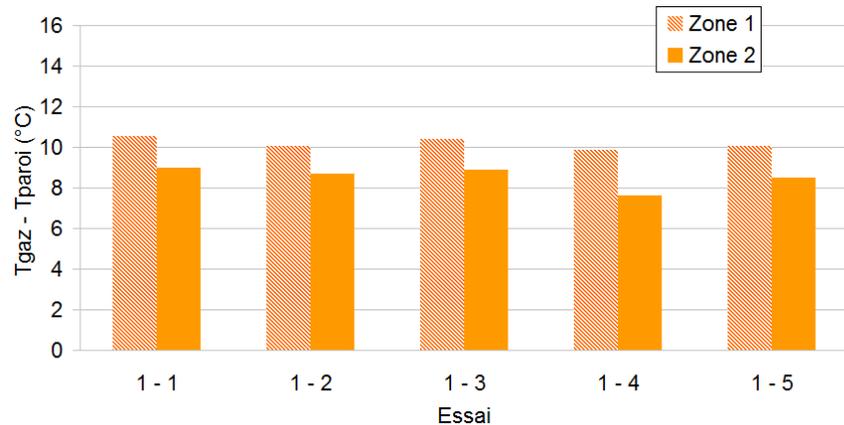


FIGURE 4.19 – Différence de température gaz-paroi mesurée dans chaque zone de mesure.

Effet du changement de configuration

Comme il a été précisé au début du chapitre, la même démarche expérimentale a été réalisée en changeant la configuration de la veine de façon à pouvoir prendre en compte l'effet de la réduction de section sur les pertes thermiques le long de la veine.

La série d'essais 1 correspond aux cinq essais standards dont les résultats ont été décrits jusqu'à maintenant, la série d'essais 2 (deux essais) correspond à une configuration inversée dans laquelle la section est d'abord petite avant de s'élargir, et la série d'essais 3 (deux essais) correspond à des essais dans une veine droite sans variation de

section. Pour l'ensemble de ces trois configurations on calcule les rapports des masses déposés en zone 1 et en zone 2 (voir figure 4.20).

Qualitativement, on note que l'on observe une tendance conservée pour tous les essais : la cible placée en zone 2 reçoit plus de suie que la cible placée en zone 1. Cette observation est faite de la même façon, que l'écoulement en zone 2 soit plus rapide, plus lent, ou identique à l'écoulement en zone 1. Les effets de la modification de la vitesse de l'écoulement semblent donc être cachés encore une fois par les effets thermiques. Une rapide analyse du modèle de dépôt par thermophorèse montre que ce n'est pas la température de l'écoulement en tant que telle qui influence le plus le dépôt mais qu'elle a un rôle indirect en modifiant le gradient de température à la paroi.

On voit ici que l'influence de l'augmentation de la vitesse d'écoulement de 100% (multiplication par un facteur 2 ou 0,5) n'entraîne pas d'effet discernable même alors que l'effet de compensation n'est dû qu'à une diminution de la température de 10% entre les deux zones (pertes inférieures à 5 °C).

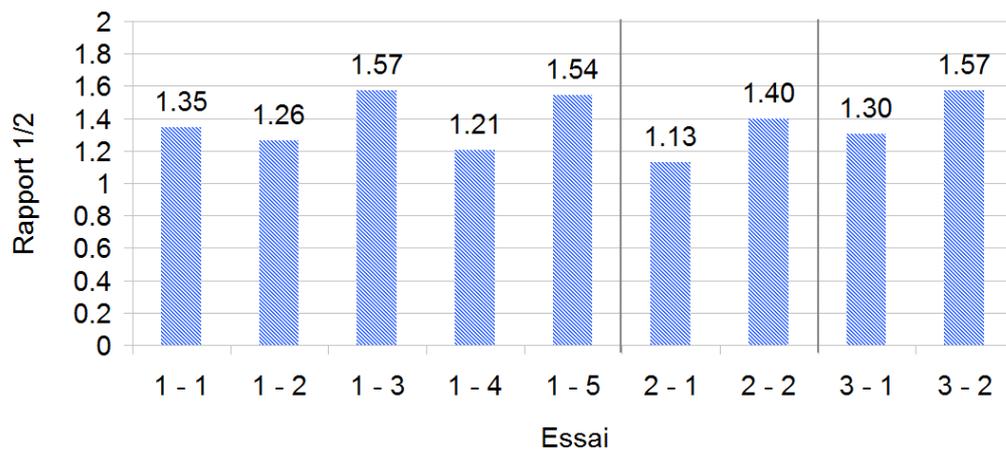


FIGURE 4.20 – Rapport de la masse de suie déposée en Zone 1 (amont) par la masse de suie déposée en Zone 2 (aval).

4.4 Bilan

La figure 4.21 compile les résultats qualitatifs obtenus grâce à l'ensemble des essais. De ce bilan, on peut tirer une conclusion quant à l'influence relative sur le dépôt de suie de la vitesse d'écoulement des fumées d'une part et de leur température d'autre part. Ces essais n'ont permis de mettre en évidence aucune influence de la vitesse d'écoulement qui soit perceptible par rapport à l'influence de la température (pour une vitesse théoriquement multipliée par deux). On peut en conclure qu'au moins dans la gamme de vitesses d'écoulement testée ($0,1 \text{ m/s} < u_{gaz} < 1 \text{ m/s}$) la vitesse de dépôt de suie peut être considérée comme dépendant uniquement de la température.

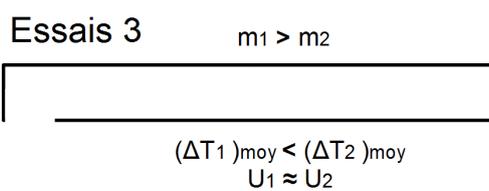
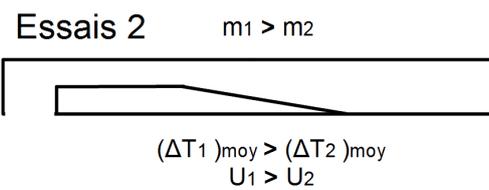
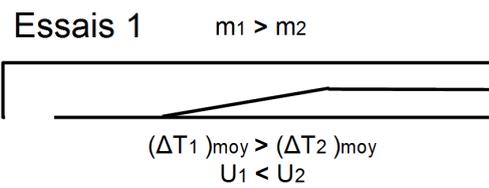


FIGURE 4.21 – Configuration expérimentale des trois types d’essai réalisés et résultats qualitatifs.

Conclusion et perspectives

Conclusions

A travers trois campagnes expérimentales complétées par des études numériques, nous avons progressé dans la connaissance des modèles de dépôt existant et surtout sur leur potentielle application au cas particulier du dépôt de suies lors d'un incendie.

Nous avons dans un premier temps effectué une revue exhaustive de l'état de l'art de façon à pouvoir combiner les nombreux résultats existant sur le dépôt de particules et les spécificités morphologiques des particules de suie qui nous intéressent. D'après cette étude bibliographique il semble qu'une fois la sédimentation des particules mise de côté, la thermophorèse créée par les gradients de température soit le principal moteur de dépôt de suie lors d'un incendie. D'autre part, il apparaît que les particules de suie ont des propriétés physiques et chimiques complexes et difficiles à évaluer en général. Si de nombreux travaux ont été réalisés sur le dépôt et les particules de suie, peu d'études cherchent à combiner les deux. L'utilisation de modèles de dépôt dans le cas particulier des particules de suie est difficile et si quelques données existent à l'échelle d'essais en laboratoire, aucune étude jusqu'ici ne fournit de données quantitatives de dépôt de particules à l'échelle réelle de l'incendie.

C'est ce manque de données expérimentales adaptées à l'échelle réelle qui a motivé la première campagne expérimentale présentée dans ce manuscrit. Une configuration d'essai simple a été choisie de façon à pouvoir contrôler le mieux possible les conditions initiales et les conditions limites, souvent problématiques à échelle réelle. Cet essai a d'abord permis d'évaluer quantitativement la masse déposée lors d'un essai en vraie grandeur, lors d'un feu de bac de faible puissance (40 kW) : on a mesuré entre 67 et 149 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$ de suie déposée sur des cibles verticales en aluminium situées dans la couche de fumée.

La mesure du dépôt a été complétée par une instrumentation exhaustive à proximité des cibles ainsi qu'au niveau du foyer, ce qui a permis d'effectuer une comparaison à deux niveaux. D'abord la mesure de perte de masse du foyer a permis de déterminer les conditions limites d'une simulation numérique réalisée grâce au code de simulation incendie FDS et de montrer que cet outil ne permet pas en l'état de prédire de façon satisfaisante le dépôt de suies dans les conditions de cette série d'essai. Ensuite les mesures effectuées au voisinage des cibles ont été utilisées comme données d'entrée pour un modèle de dépôt théorique qui permet de comparer les résultats donnés par

plusieurs modèles de thermophorèse, en utilisant les données les plus récentes disponibles dans l'état de l'art en termes de propriétés des particules de suie d'incendie. Cette approche n'a pas permis d'obtenir des résultats satisfaisants en termes de prédiction du dépôt, qui est toujours fortement sous-évalué par ces modèles.

Le dépôt étant principalement dû à la thermophorèse, le calcul du gradient de température à la paroi joue un rôle majeur dans la prédiction du dépôt de suie. Celui-ci avait jusque-là été évalué en utilisant un coefficient de transfert thermique par convection donné par des corrélations empiriques. Le coefficient de transfert utilisé par FDS est calculé comme le maximum entre deux valeurs données par deux corrélations qui correspondent respectivement à un régime de convection naturelle et à un régime de convection forcée. Seul le coefficient de transfert donné par la seconde corrélation dépend de la vitesse d'écoulement des fumées, or il se trouve qu'en pratique dans les gammes de vitesse et de différence de température gaz-paroi considérées lors de nos essais, le régime de convection naturelle prédomine toujours. Le gradient de température, et par conséquent le dépôt de suie, ne dépend donc pas d'après ce modèle de la vitesse d'écoulement. C'est cette hypothèse que nous avons voulu vérifier grâce à une seconde campagne expérimentale à échelle réelle.

Pour la seconde série de mesures, un couloir a été ajouté à un local semblable à celui de la première campagne expérimentale de façon à pouvoir évaluer à échelle réelle, l'influence de la vitesse d'écoulement des fumées sur le dépôt de suie. La diminution de la largeur du couloir définit deux zones à vitesse d'écoulement différentes, ce qui a été vérifié par la simulation numérique de l'essai qui complète l'instrumentation. Comme dans la première série d'essai, nous avons mis en évidence l'influence de la thermophorèse sur le dépôt des particules et nous avons obtenu des valeurs de masse déposée dans une configuration légèrement différente, de 28 à 65 mg · m⁻², ce qui élargit notre base de données sur le dépôt de particules de suie. Grâce à la mesure du gradient de température dans chaque zone de mesure, nous avons vérifié que les modèles de transfert thermique utilisés ne permettent pas d'évaluer efficacement le gradient de température et donc le dépôt de suie par thermophorèse. Cependant cette configuration expérimentale ne nous a pas permis de conclure quant à l'influence de la vitesse d'écoulement des suies sur le dépôt étant donné que les tendances obtenues ne semblent pas répertables. Néanmoins il est difficile à l'échelle réelle de contrôler localement, à proximité des zones de dépôt, la direction et la vitesse de l'écoulement des fumées. C'est pourquoi nous avons choisi de mettre en place un dispositif expérimental à échelle réduite dans lesquelles les conditions d'écoulement sont plus faciles à contrôler.

Cette campagne d'essais a en outre permis d'apporter des données expérimentales supplémentaires quant au dépôt sur des obstacles différents des cibles verticales parallèles à l'écoulement grâce à l'ajout de deux cibles : une cible perpendiculaire à l'écoulement sur laquelle le dépôt par impaction n'est plus négligeable qui a reçu en moyenne 154 % de la suie déposée sur son homologue parallèle à l'écoulement, et une cible horizontale orientée vers le bas où la sédimentation des particules s'oppose au dépôt et qui

a reçu en moyenne 71 % de la suie déposée sur son homologue verticale.

L'objectif de cette troisième et dernière série d'expériences était toujours de vérifier l'influence de la vitesse d'écoulement des fumées sur la vitesse de dépôt des particules des suies. Nous avons de nouveau choisi un foyer simple permettant d'obtenir des particules de suie réelles. La réduction de la section d'une veine expérimentale, dans laquelle s'écoulent les fumées, nous assure un écoulement uni directionnel et une accélération de l'écoulement. On vérifie par simulation numérique que la configuration expérimentale permet de doubler la vitesse d'écoulement entre les deux zones de mesure, permettant de discriminer l'influence ou non de ce paramètre. Malgré ce facteur discriminant sur la vitesse d'écoulement, nous n'avons mis en évidence aucune influence de ce paramètre sur la quantité de suie déposée en fin d'essai.

On peut donc en conclure que, dans ces conditions, l'influence de la vitesse d'écoulement est imperceptible en comparaison de celle de la température. L'utilisation d'un coefficient de transfert thermique proportionnel à la vitesse d'écoulement élevée à la puissance 0.8, corrélation classique de type convection forcée, n'est donc pas adaptée à l'évaluation du gradient de température effectif à prendre en compte dans l'expression de la vitesse de dépôt par thermophorèse.

Ce travail contribue à améliorer nos connaissances d'un phénomène complexe qu'est l'incendie. Ces trois campagnes d'essai complémentaires ont permis d'apporter des éléments de réponse et de progresser dans notre compréhension du dépôt de particules de suie et il est possible de synthétiser cette contribution en deux points principaux. Nous avons d'abord fourni des données quantitatives de masse de suie déposée dans diverses configurations expérimentales, à grande échelle et en utilisant un foyer réaliste comme source de particules. La vitesse d'écoulement a ensuite été identifiée comme un paramètre d'influence négligeable sur le dépôt de suie, dans les limites des conditions d'essai expérimentées, contrairement à ce que pourrait suggérer son importance dans la modélisation du transfert de chaleur par convection forcée qui produit la thermophorèse.

Perspectives

Même s'il est l'aboutissement du projet du Laboratoire Central de la Préfecture de Police dédié à l'exploitation des informations transportées par la fumée et la suie, ce travail constitue seulement un premier pas vers la possibilité d'utiliser le dépôt de suie comme élément de validation de scénarios d'incendie simulés numériquement et ses perspectives sont nombreuses.

Même si ces deux campagnes d'essai ont permis d'obtenir des données inédites de dépôt de particules de suie dans des configurations à échelle réelle, l'étape suivante de cette démarche expérimentale pourrait être d'étendre ce début de base de donnée en allant vers des foyers plus réalistes. Ainsi des mesures de dépôt de suie ont pu être

effectuées en Mars 2016 lors d'un essai incendie en conditions réelles dans un bâtiment voué à la démolition, réalisé par le LCPP dans le cadre d'un exercice d'investigation. Même s'il a été impossible de la compléter par des essais de répétabilité, l'expérience a permis de récolter des données précises sur le dépôt des particules de suie lors d'un feu réel et sur la nature et les propriétés des particules produites à différentes étapes de l'évolution de l'incendie.

Des progrès à faire en termes de caractérisation de la nature des particules de suie, et de son influence sur la thermophorèse et le dépôt en général, restent à accomplir. En particulier, les particules rencontrées dans des situations d'incendie réelles ne sont pas de purs agrégats de sphères de carbones de morphologie fractale, mais contiennent également une certaine proportion de carbone organique adsorbé à la surface de ce squelette. La question de l'applicabilité des résultats obtenus dans la littérature pour des agrégats se pose alors. Les paramètres comme la conductivité thermique effective, ou les facteurs d'accommodation pourraient être fortement affectés par la présence d'une gangue de matière organique entourant l'agrégat. Il est donc important, pour utiliser de la meilleure manière possible les modèles de dépôt disponibles, de pouvoir déterminer les propriétés chimiques des particules de suie produites par des incendies réels.

Annexe A

Coefficients tabulés pour le modèle de Beresnev

R	f_{11}	f_{12}	f_{21}	f_{22}	f_{31}	f_{32}	f_{41}	f_{42}
1000	-1.324(-5)	1.317(-5)	1.366(-9)	4.924(-8)	1	-0.9947	-1.004	0.9991
800	-2.067(-5)	2.055(-5)	2.677(-9)	9.601(-8)	1	-0.9934	-1.006	0.9989
600	-3.673(-5)	3.645(-5)	6.379(-9)	2.270(-7)	1	-0.9912	-1.007	0.9985
400	-8.256(-5)	8.159(-5)	2.175(-8)	7.619(-7)	1	-0.9868	-1.011	0.9978
200	-3.291(-4)	3.215(-4)	1.791(-7)	5.997(-6)	1	-0.9739	-1.022	0.9955
100	-1.307(-3)	1.248(-3)	1.502(-6)	4.643(-5)	1	-0.9489	-1.044	0.9909
80	-2.036(-3)	1.921(-3)	2.987(-6)	8.917(-5)	1	-0.9367	-1.055	0.9885
60	-3.598(-3)	3.331(-3)	7.225(-6)	2.055(-4)	1	-0.9169	-1.074	0.9846
40	-8.004(-3)	7.139(-3)	2.439(-5)	6.551(-4)	1	-0.8794	-1.110	0.9765
20	-3.115(-2)	2.505(-2)	1.066(-4)	4.417(-3)	1	-0.7812	-1.218	0.9512
10	-0.1109	7.525(-2)	-1.852(-3)	2.639(-2)	1	-0.6360	-1.415	0.8994
8	-0.1636	0.1039	-6.174(-3)	4.513(-2)	1	-0.5819	-1.504	0.8737
6	-0.2626	0.1524	-2.244(-2)	8.749(-2)	1	-0.5101	-1.635	0.8319
4	-0.4780	0.2443	-0.1013	0.2089	1	-0.4098	-1.847	0.7535
2	-1.058	0.4507	-0.7320	0.7674	1	-0.2570	-2.226	0.5676
1	-1.749	0.6623	-3.077	2.247	1	-0.1421	-2.533	0.3574
0.8	-1.952	0.7205	-4.501	3.051	1	-0.1142	-2.609	0.2962
0.6	-2.181	0.7851	-7.034	4.424	1	-8.453(-2)	-2.691	0.2265
0.4	-2.439	0.8559	-1.237(+1)	7.214	1	-5.344(-2)	-2.781	0.1482
0.2	-2.717	0.9310	-2.889(+1)	1.562(+1)	1	-2.237(-2)	-2.881	6.437(-2)
0.1	-2.857	0.9678	-6.220(+1)	3.238(+1)	1	-8.413(-3)	-2.937	2.470(-2)
0.08	-2.884	0.9748	-7.885(+1)	4.073(+1)	1	-5.993(-3)	-2.945	1.767(-2)
0.06	-2.910	0.9816	-1.066(+2)	5.463(+1)	1	-3.793(-3)	-2.961	1.123(-2)
0.04	-2.935	0.9881	-1.620(+2)	8.239(+1)	1	-1.900(-3)	-2.973	5.648(-3)

FIGURE A.1 – Valeurs tabulées des coefficients $f_{i,j}$ en fonction de R (BERESNEV *et al.*, 1989).

R	φ_{11}	φ_{12}	φ_{21}	φ_{22}	φ_{31}	φ_{32}	φ_{41}	φ_{42}
1000	1.430(-3)	-1.425(-3)	-1.421(-3)	1.416(-3)	1	-0.9947	-0.9934	0.9881
800	1.787(-3)	-1.780(-3)	-1.773(-3)	1.765(-3)	1	-0.9934	-0.9917	0.9852
600	2.382(-3)	-2.368(-3)	-2.356(-3)	2.342(-3)	1	-0.9912	-0.9890	0.9803
400	3.574(-3)	-3.539(-3)	-3.512(-3)	3.481(-3)	1	-0.9868	-0.9836	0.9706
200	7.123(-3)	-6.999(-3)	-6.891(-3)	6.771(-3)	1	-0.9739	-0.9675	0.9423
100	1.417(-2)	-1.369(-2)	-1.327(-2)	1.282(-2)	1	-0.9489	-0.9364	0.8885
80	1.767(-2)	-1.692(-2)	-1.628(-2)	1.559(-2)	1	-0.9367	-0.9213	0.8630
60	2.347(-2)	-2.216(-2)	-2.105(-2)	1.987(-2)	1	-0.9169	-0.8970	0.8225
40	3.490(-2)	-3.206(-2)	-2.970(-2)	2.728(-2)	1	-0.8794	-0.8509	0.7483
20	6.808(-2)	-5.793(-2)	-4.981(-2)	4.239(-2)	1	-0.7811	-0.7317	0.5716
10	0.1296	-9.714(-2)	-7.248(-2)	5.444(-2)	1	-0.6355	-0.5599	0.3563
8	0.1582	-0.1125	-7.850(-2)	5.612(-2)	1	-0.5811	-0.4977	0.2900
6	0.2028	-0.1341	-8.408(-2)	5.621(-2)	1	-0.5088	-0.4174	0.2135
4	0.2817	-0.1672	-8.625(-2)	5.268(-2)	1	-0.4079	-0.3120	0.1289
2	0.4562	-0.2272	-7.268(-2)	4.044(-2)	1	-0.2550	-0.1740	4.572(-2)
1	0.6480	-0.2822	-4.422(-2)	2.676(-2)	1	-0.1411	-9.216(-2)	1.357(-2)
0.8	0.7045	-0.2970	-3.425(-2)	2.286(-2)	1	-0.1135	-7.491(-2)	8.880(-3)
0.6	0.7698	-0.3133	-2.197(-2)	1.840(-2)	1	-8.415(-2)	-5.735(-2)	5.034(-3)
0.4	0.8447	-0.3309	-6.783(-3)	1.324(-2)	1	-5.329(-2)	-3.937(-2)	2.178(-2)
0.2	0.9281	-0.3488	1.204(-2)	7.231(-3)	1	-2.234(-2)	-2.065(-2)	4.738(-4)
0.1	0.9698	-0.3565	2.305(-2)	3.825(-3)	1	-8.410(-3)	-1.076(-2)	9.206(-5)
0.08	0.9776	-0.3577	2.540(-2)	3.104(-3)	1	-5.992(-3)	-8.708(-3)	5.294(-5)
0.06	0.9849	-0.3587	2.779(-2)	2.366(-3)	1	-3.793(-3)	-6.618(-3)	2.540(-5)
0.04	0.9915	-0.3594	3.022(-2)	1.608(-3)	1	-1.900(-3)	-4.483(-3)	8.596(-6)

FIGURE A.2 – Valeurs tabulées des coefficients $\phi_{i,j}$ en fonction de R (BERESNEV *et al.*, 1989).

Annexe B

Mesure de concentration de suie grâce au Capteur Opacimétrique Différentiel

Le capteur opacimétrique différentiel, aussi appelé opacimètre, est un appareil qui permet de mesurer l'atténuation d'un signal lumineux par les fumées, qui peut être reliée à la concentration de suie dans les fumées.

B.1 Présentation

Les capteurs opacimétriques différentiels (voir photo B.1), développés au LCPP, mesurent l'efficacité de transmission d'un signal lumineux parcourant 0,05 m dans les fumées. C'est un moyen de mesure peu intrusif, qui ne perturbe pas l'écoulement si ce n'est par sa taille étant donné qu'il est entièrement plongé dans les fumées.

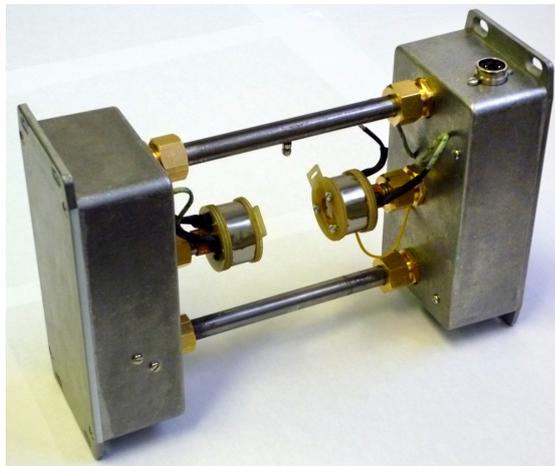


FIGURE B.1 – Photographie du capteur opacimétrique différentiel utilisé par le LCPP

B.2 Principe de mesure par extinction

L'atténuation d'un signal lumineux parcourant une distance L dans un milieu absorbant est donnée par la loi de Beer-Lambert :

$$I = I_0 e^{-\sigma_s L C_s}, \quad (\text{B.1})$$

où I_0 est l'intensité lumineuse incidente, I est l'intensité lumineuse transmise après traversée de la fumée et C_s la concentration massique de particules dans les fumées. Le coefficient d'extinction massique du milieu σ_s ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) prend en compte les effets d'absorption et de diffusion du milieu en supposant que la diffusion ne fait qu'atténuer le signal lumineux et ne le renforce pas par des effets de diffusion multiple. On cherche ainsi à déterminer la transmittance $T = I/I_0$ du milieu sur la distance L de façon à mesurer la concentration massique de suie C_s .

B.3 Fonctionnement du capteur opacimétrique différentiel

Le schéma B.2 décrit le principe de fonctionnement de l'appareil. Un ampoule halogène unique située dans le boîtier "lampe" produit une lumière qui, par réflexion sur l'écran blanc installé au fond du boîtier est envoyée dans deux canaux. Deux photodiodes situées dans le boîtier "électronique" réagissent aux signaux lumineux qui ont parcouru le même chemin optique, l'un ayant traversé les fumées et l'autre non. La carte électronique qui accueille les photodiodes permet à l'appareil d'envoyer deux signaux électrique de tensions proportionnelles à chacune des intensités lumineuses captées. La mesure de l'intensité du signal lumineux identique mais ne traversant pas les fumées permet de corriger la dérive du signal lié au chauffage des composants électroniques qui peuvent être soumis à une température allant jusqu'à 150 °C.

On obtient alors la transmittance des fumées, définie précédemment grâce aux signaux de tension renvoyés par l'appareil :

$$\frac{I(t)}{I_0(t)} = \frac{U_2(t)}{U_2(t=0)} \frac{U_1(t=0)}{U_1(t)}, \quad (\text{B.2})$$

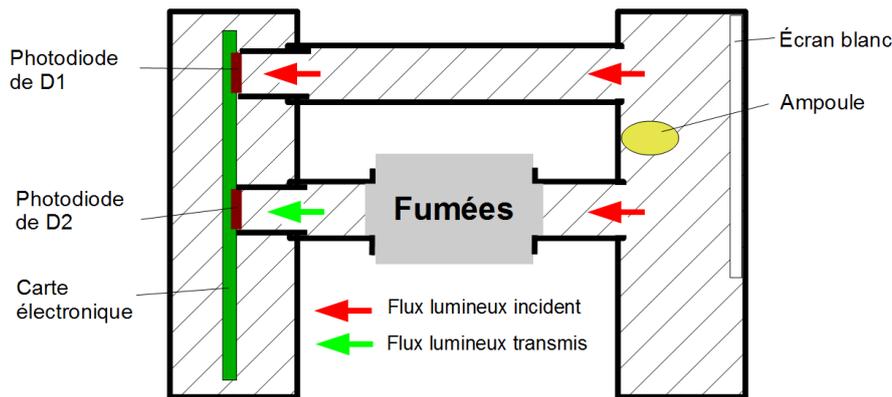


FIGURE B.2 – Schéma de principe du capteur opacimétrique différentiel

D'après une compilation d'études expérimentales du coefficient d'extinction massique σ_s MULHOLLAND *et al.* (2000) propose d'utiliser la valeur universelle de $8,7 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$

La concentration massique de suie $C_s(t)$ est alors donnée par la loi de Beer-Lambert, qui permet de relier la concentration à la transmittance une fois le chemin optique $L =$

B.3. Fonctionnement du capteur opatométrique différentiel

0,05 m et le coefficient d'extinction massique σ_s connus.

Annexe C

Mesure de concentration massique de suie grâce au capteur PPS

Le Pegasor Particle Sensor (PPS), représenté sur la figure C.1, est un appareil qui permet de mesurer en ligne la concentration massique de suie dans les fumées. Il est disponible dans le commerce et est fabriqué par la société Pegasor.

C.1 Présentation

C'est un appareil qui nécessite le prélèvement du mélange gaz-particule duquel on souhaite mesurer la concentration en particules. Il est donc relié à une ligne de prélèvement chauffée, prolongée d'une canne en inox entourée d'un ruban chauffant. En fonctionnement, la ligne de prélèvement et la canne sont donc chauffés à 200°C de façon à limiter l'encrassement.



FIGURE C.1 – Photographie du Pegasor Particle Sensor (PPS)

C.2 Principe de fonctionnement

Le PPS mesure le courant de fuite créé par l'écoulement de particules, préalablement chargées, qui sort de l'appareil.

Le PPS est alimenté en air comprimé propre et sec. Cet air a une double utilité : l'écoulement de l'aérosol et la charge des particules. Comme le montre la figure C.2, l'air est ionisé par effet couronne¹ et éjecté à travers un orifice (voir figure C.2). L'écoulement de l'air crée une dépression qui aspire l'aérosol par effet venturi. L'air ionisé se mélange donc avec le mélange gaz-particules. Ce sont les collisions aléatoires entre les ions gazeux et les particules d'aérosol qui chargent les particules, cet effet est appelé "Diffusion Charging" (DC). Les ions restants sous forme gazeuse, non fixés sur des particules, sont captés par un piège à ions tandis que les particules chargées et seulement elles sortent de l'appareil. Un électromètre permet de mesurer le courant électrique créé

1. Ionisation du milieu entourant un conducteur produisant un champ électrique dépassant une certaine valeur critique.

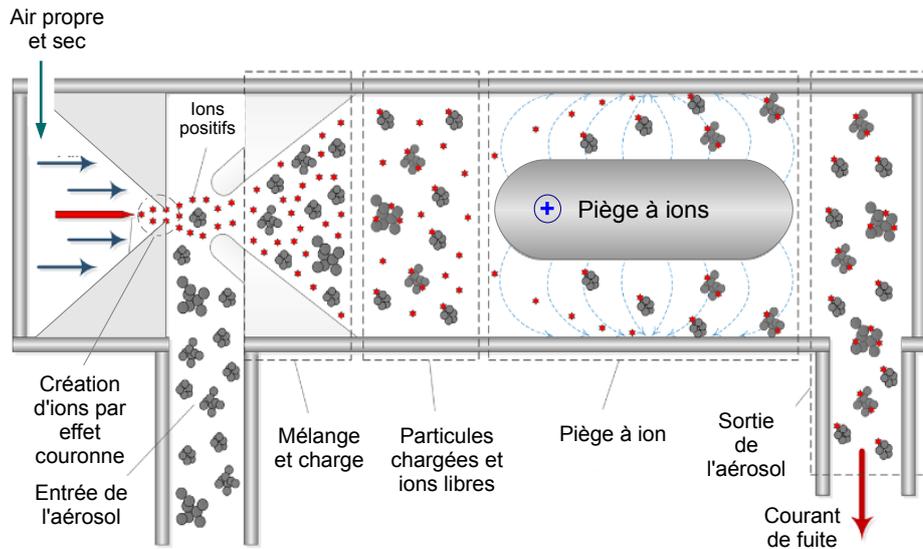


FIGURE C.2 – Principe de fonctionnement du PPS (??).

par l'écoulement des charges portées par les particules qui sortent de la cage de Faraday que constitue l'enveloppe externe de l'appareil. Ce courant est directement relié au nombre de particules traversant l'appareil par unité de temps par l'intermédiaire d'une loi de charge propre aux particules. Étant donné que le débit d'aspiration est connu il est alors possible de remonter au nombre de particules par unité de volume.

Le courant mesuré par le PPS est donc un nombre de charges par unité de temps $I = q_E/T$ traversant une surface S . La quantité totale de charge q_e est portée par les particules contenues dans le volume $q_v T$, où q_v est le débit volumique d'aspiration du PPS.

Si on choisit un diamètre représentatif des particules δ , On peut associer à chaque diamètre de particule une concentration $C_p(\delta)$ en particules par unité de volume et un nombre de charges élémentaires e par particule $N_e(\delta)$. On peut donc écrire :

$$I = q_v e \int_{\forall \delta} C_p(\delta) N_e(\delta) d\delta . \quad (C.1)$$

La concentration massique C_m en particules s'écrit sous la forme suivante :

$$C_m = \int_{\forall \delta} m(\delta) C_p(\delta) d\delta , \quad (C.2)$$

où $m(\delta)$ est la masse d'une particule en fonction de son diamètre.

L'étalonnage du PPS consiste alors à déterminer une relation entre C_m et I de la forme :

$$C_m = \frac{K}{q_v} I \quad (C.3)$$

Dans les systèmes classiques de détection d'aérosol par électromètre, après l'étape de chargement électrique des particules et de piégeage des ions, la charge portée par l'aérosol est déterminée en collectant les particules sur un filtre Très Haute Efficacité contenu dans une cage de Faraday indépendante. L'originalité de ce nouvel instrument réside dans le fait que la zone de charge électrique et le piège à ions sont placés à l'intérieur de la cage de Faraday qui est reliée à l'électromètre. Cette innovation permet de mesurer directement la quantité d'ions fixée sur les particules, sans procéder à la collecte de l'aérosol sur un filtre.

C.3 Étalonnage par mesure filtre

Le signal de sortie du PPS a été calibré par NTZIACHRISTOS *et al.*, 2013 grâce à des suies produites par un moteur diesel de façon à obtenir la concentration massique ou le nombre de l'aérosol. Cette calibration a été validée pour des émissions moteur (diesel et essence) en supposant que la distribution de diamètres des particules est fixe d'espérance $d_g = 50$ nm et d'écart-type $\sigma_g = 1,7$. Non seulement cette hypothèse de taille de particule uniforme crée une erreur mais en plus cette calibration n'est pas adaptée aux aérosols rencontrés dans le domaine de l'incendie, dont les diamètres sont de l'ordre du micron.

Nous avons choisi d'étalonner à chaque utilisation la mesure donnée par le PPS grâce à un prélèvement sur filtre THE réalisé en parallèle au même point. Ce filtre est pesé au début et à la fin de chaque essai de façon à calculer la masse de suie déposée dessus.

Le prélèvement sur filtre THE (Très Haute Efficacité) sert à étalonner les mesures PPS et permet également, par pesée pré et post-essai du filtre et connaissance du débit de prélèvement, d'obtenir une estimation de la concentration moyenne en particule au cours de l'essai. Cette concentration C_{filtre} est obtenue pour chaque essai en faisant le rapport de la masse cumulée d'aérosol prélevée et du volume total de mélange de gaz et d'aérosol aspiré.

$$C_{\text{filtre}} = \frac{M_{\text{filtre}}}{Q_{\text{filtre}} T}, \quad (\text{C.4})$$

où M_{filtre} est la masse de particules récoltée sur le filtre, $Q_{\text{filtre}} = 2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ est le débit de prélèvement, réglé au niveau de la pompe, et T est la durée de l'essai. La mesure étalonnée $C_{s,\text{PPS}}$ qui est présentée dans la suite est calculée comme :

$$C_{s,\text{PPS}}(t) = C_{\text{PPS}}(t) \frac{M_{\text{filtre}} Q_{\text{PPS}}}{M_{\text{PPS}} Q_{\text{filtre}}}, \quad (\text{C.5})$$

où C_{PPS} est la mesure de concentration donnée par le PPS, M_{filtre} (respectivement M_{PPS}) est la masse de particules récoltée sur le filtre après l'essai (respectivement traversant le PPS au cours de l'essai) et Q_{filtre} est le débit d'aspiration de la pompe en aval du filtre (respectivement du PPS). Le débit PPS est mesuré à chaque début d'essai pour chaque appareil et varie légèrement en fonction de l'appareil et de l'installation entre

$3,5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ et $5,5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. La masse de particules M_{PPS} traversant le PPS au cours d'un essai de durée T est calculée à partir de la mesure PPS comme :

$$M_{\text{PPS}} = \int_0^T C_{\text{PPS}}(t) Q_{\text{PPS}} dt . \quad (\text{C.6})$$

Annexe D

Fichier d'entrée FDS pour la simulation des essais en local (chapitre 2)

local.fds

&HEAD CHID='caisson_heptane', TITLE='Simulation essai caisson foyer bac heptane
22,5 cm diamètre (20 cm cote) maillage 5 cm au foyer et 10cm '

/MAILLAGE

/&MESH IJK= 48, 36, 48 XB=-0.1,2.3, 2.9,4.7, -0.1,2.3 /ZONE FOYER
/&MESH IJK= 24, 18, 24 XB=-0.1,2.3, 1.1,2.9, -0.1,2.3 /ZONE INTERMEDIAIRE
/&MESH IJK= 60, 120, 70 XB=-0.1,0.5, -0.1,1.1, 1.6,2.3 /ZONE CIBLE
/&MESH IJK= 24, 12, 17 XB= -0.1,2.3, -0.1,1.1, -0.1,1.6 /ZONE CIBLE BAS
/&MESH IJK= 18, 18, 24 XB= 0.5,2.3, -0.7,1.1, -0.1,2.3 /ZONE PORTE
/&MESH IJK= 16, 27, 24 XB= 0.7,2.3, -3.4,-0.7, -0.1,2.3 /SORTIE
/&MESH IJK= 16, 27, 27 XB= 0.7,2.3, -3.4,-0.7, 2.3,5.0 /SORTIE

&MESH IJK= 108, 72, 108 XB=-0.2,2.5, 2.9,4.7, -0.2,2.5 /
&MESH IJK= 108, 72, 108 XB=-0.2,2.5, 1.1,2.9, -0.2,2.5 /
&MESH IJK= 108, 72, 108 XB=-0.2,2.5, -0.7,1.1, -0.2,2.5 /
/&MESH IJK= 18, 27, 27 XB= 0.7,2.5, -3.4,-0.7, -0.2,2.5 /
/&MESH IJK= 18, 27, 27 XB= 0.7,2.5, -3.4,-0.7, 2.5,5.2 /

/&MESH IJK= 27, 18, 27 XB=-0.2,2.5, 2.9,4.7, -0.2,2.5 /
/&MESH IJK= 27, 18, 27 XB=-0.2,2.5, 1.1,2.9, -0.2,2.5 /
/&MESH IJK= 27, 18, 27 XB=-0.2,2.5, -0.7,1.1, -0.2,2.5 /
/&MESH IJK= , 164, 216 XB= 0.7,2.5, -3.4,-0.7, -0.2,5.2 /
&MESH IJK= 36, 54, 108 XB= 0.7,2.5, -3.4,-0.7, -0.2,5.2 /

/TEMPS

/&TIME T_END=0.1/
&TIME T_END=2000/

/CONDITIONS INITIALES

&MISC TMPA=12.0, HUMIDITY=65.0 ,P_INF=101360.0 /
&INIT XB= 0.0, 2.3, 0.0, 4.5, 1.2, 2.3, TEMPERATURE= 35./
&INIT XB= 0.0, 2.3, 0.0, 4.5, 0.0, 1.2, TEMPERATURE= 20./

/ESPECES ET BRULEUR

&SPEC ID = 'NITROGEN', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'OXYGEN', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'CARBON DIOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'WATER VAPOR', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'CARBON MONOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /

&SPEC ID = 'HEPTANE', FORMULA = 'C7H16' /

&SPEC ID = 'SOOT', AEROSOL=.TRUE., MEAN_DIAMETER=1.E-6 /

&SPEC ID = 'AIR', SPEC_ID = 'NITROGEN','OXYGEN',
VOLUME_FRACTION = 3.761904762,1.000, BACKGROUND = .TRUE. /

local.fds

&SPEC ID = 'PRODUCTS', SPEC_ID = 'NITROGEN', 'CARBON DIOXIDE', 'WATER VAPOR',
'CARBON MONOXIDE',
VOLUME_FRACTION = 40.21576508, 6.688866667, 8.0, 0.0028 /

&REAC ID='HEPTANE', HEAT_OF_COMBUSTION=44600.,
SPEC_ID_NU = 'HEPTANE', 'AIR', 'PRODUCTS', 'SOOT',
NU=-1., -10.69026667, 1., 0.308333333/

/BRULEUR

&SURF ID= 'FEU', MASS_FLUX= 0.0402, RAMP_MF='rampe_MLR', SPEC_ID='HEPTANE',
COLOR= 'RED' /Calcul excel MLRPUA en kg/m2

&OBST XB= 0.6,1.7, 3.15,3.85, 0.0, 0.2, SURF_ID='Balance' / Balance

&VENT XB= 1.1,1.3, 3.4,3.6, 0.2,0.2, SURF_ID= 'FEU' /

&RAMP ID='rampe_MLR', T= 0 , F= 0 /
&RAMP ID='rampe_MLR', T= 7 , F= 0.223214285714281 /
&RAMP ID='rampe_MLR', T= 57 , F= 0.436046511627907 /
&RAMP ID='rampe_MLR', T= 150 , F= 0.625 /
&RAMP ID='rampe_MLR', T= 250 , F= 0.687499999999999 /
&RAMP ID='rampe_MLR', T= 600 , F= 0.713541666666667 /
&RAMP ID='rampe_MLR', T= 950 , F= 0.71875 /
&RAMP ID='rampe_MLR', T= 1025 , F= 0.937499999999999 /
&RAMP ID='rampe_MLR', T= 1075 , F= 1 /
&RAMP ID='rampe_MLR', T= 1125 , F= 0.9375 /
&RAMP ID='rampe_MLR', T= 1175 , F= 0.8125 /
&RAMP ID='rampe_MLR', T= 1225 , F= 0.375 /
&RAMP ID='rampe_MLR', T= 1275 , F= 0.125 /
&RAMP ID='rampe_MLR', T= 1350 , F= 0.0625 /
&RAMP ID='rampe_MLR', T= 1450 , F= 0 /
&RAMP ID='rampe_MLR', T= 1650 , F= 0 /

/MATERIAUX

&MATL ID = 'BA13',
SPECIFIC_HEAT = 0.8,
CONDUCTIVITY = 0.35,
DENSITY = 875. /

&MATL ID = 'MOUSSEPU',
SPECIFIC_HEAT = 1.38 ,
CONDUCTIVITY = 0.024 ,
DENSITY = 45. /

&MATL ID = 'CONCRETE',
SPECIFIC_HEAT = 0.88 ,
CONDUCTIVITY = 1. ,
DENSITY = 2100. /

&MATL ID = 'ROCKWOOL',

local.fds

SPECIFIC_HEAT = 0.1 ,
CONDUCTIVITY = 0.042 ,
DENSITY = 70./

&MATL ID = 'STEEL'
SPECIFIC_HEAT = 0.3 ,
CONDUCTIVITY = 50. ,
DENSITY = 8000. /

&MATL ID = 'ALUMINIUM'
SPECIFIC_HEAT = 0.9 ,
CONDUCTIVITY = 200. ,
DENSITY = 2700. /

/SURFACES

&SURF ID = 'PAROI_ISOLEE',
MATL_ID = 'BA13', 'ROCKWOOL', 'STEEL'
COLOR = 'SLATE GRAY',
THICKNESS = 0.013, 0.10, 0.01,
BACKING = 'EXPOSED',
TMP_INNER = 20.,
TRANSPARENCY = 0.9 /

&SURF ID = 'ADIABATIC'
ADIABATIC = .TRUE.,
COLOR = 'GOLDENROD' /

&SURF ID = 'DALLE_BETON',
MATL_ID = 'CONCRETE',
THICKNESS = 10.0,
COLOR = 'GRAY',
TRANSPARENCY=1.0 /

&SURF ID = 'PAROI_ACIER',
MATL_ID = 'STEEL',
THICKNESS = 0.01,
COLOR = 'TEAL',
TRANSPARENCY = 1.0 /

&SURF ID = 'Balance',
MATL_ID = 'BA13', 'ROCKWOOL', 'STEEL'
COLOR = 'GOLDENROD',
THICKNESS = 0.026, 0.05, 0.1,
BACKING = 'EXPOSED',
TRANSPARENCY = 1.0

/CIBLES

&SURF ID = 'CB1',
COLOR = 'RED',
TMP_FRONT = 69.0,
RAMP_T = 'rampe_TC_CB1', /

local.fds

&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 0, F= 0.191519075360676 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 100, F= 0.219905689593717 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 200, F= 0.277602154998627 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 300, F= 0.341276287418852 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 400, F= 0.420084493709718 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 500, F= 0.488532579161724 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 600, F= 0.560585963292567 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 700, F= 0.629320369061045 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 800, F= 0.695536324698925 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 900, F= 0.753589229681483 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 1000, F= 0.816626445479353 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 1100, F= 0.893529745174918 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 1200, F= 0.966582328777529 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 1300, F= 0.99049299683879 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 1400, F= 0.984094614256414 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 1500, F= 0.960306654902213 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 1600, F= 0.928980874971514 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 1700, F= 0.890304259160789 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 1800, F= 0.851627643350064 /

&SURF ID = 'CB2',
COLOR = 'BLUE',
TMP_FRONT = 42.7,
RAMP_T = 'rampe_TC_CB2', /

&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 0, F= 0.0446676802780191 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 100, F= 0.168429626411816 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 200, F= 0.312652041702867 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 300, F= 0.430864465682016 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 400, F= 0.531668114682884 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 500, F= 0.589389661164205 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 600, F= 0.652280625543006 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 700, F= 0.70264986967854 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 800, F= 0.746394439617724 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 900, F= 0.78643570807993 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 1000, F= 0.831592093831451 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 1100, F= 0.938336229365769 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 1200, F= 0.986468288444831 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 1300, F= 0.881407471763684 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 1400, F= 0.75497393570808 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 1500, F= 0.659100781928757 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 1600, F= 0.570525629887055 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 1700, F= 0.497013466550825 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 1800, F= 0.423501303214596 /

&SURF ID = 'CB3',

local.fds

COLOR = 'RED',
TMP_FRONT = 73.1,
RAMP_T = 'rampe_TC_CB3', /

&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 0, F= 0.26372901319054 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 100, F= 0.292100398606241 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 200, F= 0.344617179874474 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 300, F= 0.403606541286555 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 400, F= 0.471511377454482 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 500, F= 0.531765809290634 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 600, F= 0.595237446084552 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 700, F= 0.659368882539302 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 800, F= 0.718630888439328 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 900, F= 0.771196745715392 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 1000, F= 0.821586899977643 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 1100, F= 0.897954621051426 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 1200, F= 0.9627731216158 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 1300, F= 0.987458353554466 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 1400, F= 0.992638598825447 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 1500, F= 0.985342632328002 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 1600, F= 0.968509561642192 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 1700, F= 0.949593487068472 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 1800, F= 0.930677412494751 /

&SURF ID = 'CB4',
COLOR = 'BLUE',
TMP_FRONT = 46.2,
RAMP_T = 'rampe_TC_CB4', /

&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 0, F= 0.118816905256789 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 100, F= 0.186754100920207 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 200, F= 0.291558105721284 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 300, F= 0.40628628863062 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 400, F= 0.510456004762044 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 500, F= 0.577173414522283 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 600, F= 0.650565492744713 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 700, F= 0.715614235389405 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 800, F= 0.764639870409946 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 900, F= 0.803741327322229 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 1000, F= 0.84442362676503 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 1100, F= 0.927564233925661 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 1200, F= 0.990944309454805 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 1300, F= 0.947871229641773 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 1400, F= 0.872234745357495 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 1500, F= 0.794236755564663 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 1600, F= 0.719468758843448 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 1700, F= 0.66616899401817 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 1800, F= 0.612869229192892 /

/CONDITIONS LIMITES

local.fds

```
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /
```

/PAROIS

/Parois x (parois latérales et séparation sas)

```
&OBST XB= -0.1,0.00, -1.4,4.6, 0.0,2.3, SURF_ID= 'PAROI_ISOLEE' / gauche
&OBST XB= 2.2,2.3, -1.4,4.6, 0.0,2.3, SURF_ID= 'PAROI_ISOLEE' / droite
&OBST XB= 1.1,1.2, -1.4,-0.1, 0.0,2.3, SURF_ID= 'PAROI_ISOLEE' / séparation
```

/Parois y (porte et fond)

```
&OBST XB= 0.0,2.2, 4.5,4.6, 0.0,2.3, SURF_ID= 'PAROI_ISOLEE' / fond
&OBST XB= 0.0,2.2, -0.1,0.0, 0.0,2.3, SURF_ID= 'PAROI_ISOLEE' / avant
&HOLE XB= 1.4,2.1, -0.1,0.0, 0.0,1.65 / porte
&HOLE XB= 1.4,2.1, -0.1,0.0, 1.65,2.1, DEVC_ID='ouverture' /
```

/Parois z (sol et plafond)

```
&OBST XB= -0.1,2.3, -1.4,4.6, 2.3,2.35, SURF_ID= 'PAROI_ISOLEE' / plafond
&OBST XB= -0.1,2.3, -1.4,4.6, -0.1,0.0, SURF_ID= 'PAROI_ISOLEE' / sol caisson
```

```
&OBST XB= -0.2,2.5, -1.4,4.7, -0.2,-0.1, SURF_ID= 'DALLE_BETON' / sol zone
&OBST XB= 0.7,2.5, -1.4,4.7, -0.2,-0.1, SURF_ID= 'DALLE_BETON' / sol zone
```

/Plaque de depot

```
&OBST XB= 0.0,0.025, 0.55,1.15, 1.6,1.85, SURF_ID= 'ADIABATIC' / CB 12
&OBST XB= 0.0,0.025, 0.55,1.15, 1.9,2.15, SURF_ID= 'ADIABATIC' / CB 34
```

/CIBLES

/Cibles alu ambiantes

```
&OBST XB= 0.025,0.025, 0.6,0.7, 1.7,1.8, SURF_ID= 'CB1' / CB 1
&OBST XB= 0.025,0.025, 0.6,0.7, 2.0,2.1, SURF_ID= 'CB3' / CB 3
```

/Cibles alu refroidies

```
&OBST XB= 0.025,0.025, 0.8,0.9, 1.7,1.8, SURF_ID= 'CB2' / CB 2
&OBST XB= 0.025,0.025, 0.8,0.9, 2.0,2.1, SURF_ID= 'CB4' / CB 4
```

/SORTIES

/Sortie sur les murs

```
&BNDF QUANTITY='WALL_TEMPERATURE' /
&BNDF QUANTITY='SURFACE DEPOSITION', SPEC_ID='SOOT' /
&BNDF QUANTITY='DEPOSITION VELOCITY', SPEC_ID='SOOT' /
&BNDF QUANTITY='YPLUS' /
&BNDF QUANTITY='FRICTION VELOCITY' /
```

local.fds

/Coupes transversales CB Ambiantes

&SLCF PBX= 0.65, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /
&SLCF PBX= 0.65, QUANTITY= 'VELOCITY' /
&SLCF PBX= 0.65, QUANTITY= 'PRESSURE' /
&SLCF PBX= 0.65, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /
&SLCF PBX= 0.65, QUANTITY= 'VOLUME FRACTION', SPEC_ID= 'OXYGEN' /

/Coupes transversales CB Froides

&SLCF PBX= 0.85, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /
&SLCF PBX= 0.85, QUANTITY= 'VELOCITY' /
&SLCF PBX= 0.85, QUANTITY= 'PRESSURE' /
&SLCF PBX= 0.85, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /
&SLCF PBX= 0.85, QUANTITY= 'VOLUME FRACTION', SPEC_ID= 'OXYGEN' /

/Coupes transversales foyer

&SLCF PBX= 3.5, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /
&SLCF PBX= 3.5, QUANTITY= 'VELOCITY' /
&SLCF PBX= 3.5, QUANTITY= 'PRESSURE' /
&SLCF PBX= 3.5, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /
&SLCF PBX= 3.5, QUANTITY= 'VOLUME FRACTION', SPEC_ID= 'OXYGEN' /

/Coupes longitudinales milieu caisson

&SLCF PBX= 1.2, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /
&SLCF PBX= 1.2, QUANTITY= 'VELOCITY' /
&SLCF PBX= 1.2, QUANTITY= 'PRESSURE' /
&SLCF PBX= 1.2, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /
&SLCF PBX= 1.2, QUANTITY= 'VOLUME FRACTION', SPEC_ID= 'OXYGEN' /

/Coupes longitudinales milieu porte

&SLCF PBX= 1.75, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /
&SLCF PBX= 1.75, QUANTITY= 'VELOCITY' /
&SLCF PBX= 1.75, QUANTITY= 'PRESSURE' /
&SLCF PBX= 1.75, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /
&SLCF PBX= 1.75, QUANTITY= 'VOLUME FRACTION', SPEC_ID= 'OXYGEN' /

/Coupes longitudinales mur

&SLCF PBX= 0.45, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /
&SLCF PBX= 0.45, QUANTITY= 'VELOCITY' /
&SLCF PBX= 0.45, QUANTITY= 'PRESSURE' /
&SLCF PBX= 0.45, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /

/Capteurs ponctuels

/POINTS DE MESURE EXPERIMENTAUX

/Cibles

PROP ID="my target", SMOKEVIEW_ID='target' /
&DEVC ID= 'Dep_CB1', XYZ= 0.025, 0.65, 1.75, QUANTITY= 'SURFACE DEPOSITION',
SPEC_ID='SOOT', IOR=1/
&DEVC ID= 'Dep_CB2', XYZ= 0.025, 0.85, 1.75, QUANTITY= 'SURFACE DEPOSITION',
SPEC_ID='SOOT', IOR=1/

local.fds

&DEVC ID= 'Dep_CB3', XYZ= 0.025, 0.65, 2.05, QUANTITY= 'SURFACE DEPOSITION',
SPEC_ID='SOOT', IOR=1/
&DEVC ID= 'Dep_CB4', XYZ= 0.025, 0.85, 2.05, QUANTITY= 'SURFACE DEPOSITION',
SPEC_ID='SOOT', IOR=1/

/Pression

&DEVC ID= 'P_foyer_bas', XYZ= 0.3, 3.5, 0.1, QUANTITY= 'PRESSURE' /
&DEVC ID= 'P_foyer_haut', XYZ= 0.4, 3.5, 2.2, QUANTITY= 'PRESSURE' /

/Opacimètres

&DEVC ID= 'OPA1', XYZ= 0.425, 0.75, 0.95, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /
&DEVC ID= 'OPA2', XYZ= 0.425, 0.75, 1.35, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /
&DEVC ID= 'OPA3', XYZ= 0.425, 0.75, 1.75, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /
&DEVC ID= 'OPA4', XYZ= 0.425, 0.75, 2.05, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /

/PPS

&DEVC ID= 'PPS1', XYZ= 0.625, 0.15, 2.15, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /
&DEVC ID= 'PPS2', XYZ= 1.225, 3.5, 2.15, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /

/Thermocouples

&DEVC ID= 'TC_E1_25mm', XYZ= 0.025, 0.65, 0.95, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /
&DEVC ID= 'TC_E2_25mm', XYZ= 0.025, 0.85, 1.35, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /
&DEVC ID= 'TC_E3_25mm', XYZ= 0.025, 0.65, 1.75, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /
&DEVC ID= 'TC_E4_25mm', XYZ= 0.025, 0.85, 2.05, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /

&DEVC ID= 'TC_E1_75mm', XYZ= 0.075, 0.65, 0.95, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /
&DEVC ID= 'TC_E2_75mm', XYZ= 0.075, 0.85, 1.35, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /
&DEVC ID= 'TC_E3_75mm', XYZ= 0.075, 0.65, 1.75, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /
&DEVC ID= 'TC_E4_75mm', XYZ= 0.075, 0.85, 2.05, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /

&DEVC ID= 'T_foyer_haut', XYZ= 0.425, 3.5, 2.2, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /
&DEVC ID= 'TC_foyer_bas', XYZ= 0.325, 3.5, 0.1, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /

&DEVC ID= 'TC_CB1', XYZ= 0.025, 0.65, 1.75, QUANTITY= 'WALL TEMPERATURE', IOR=1
/

&DEVC ID= 'TC_CB2', XYZ= 0.025, 0.85, 1.75, QUANTITY= 'WALL TEMPERATURE', IOR=1
/

&DEVC ID= 'TC_CB3', XYZ= 0.025, 0.65, 2.05, QUANTITY= 'WALL TEMPERATURE', IOR=1
/

&DEVC ID= 'TC_CB4', XYZ= 0.025, 0.85, 2.05, QUANTITY= 'WALL TEMPERATURE', IOR=1
/

/Anémomètre

&DEVC ID= 'Anemo_porte_120', XYZ= 1.75, -0.025, 1.2, QUANTITY= 'VELOCITY' /
&DEVC ID= 'Anemo_porte_60', XYZ= 1.75, -0.025, 0.6, QUANTITY= 'VELOCITY' /
&DEVC ID= 'Anemo_porte_30', XYZ= 1.75, -0.025, 0.3, QUANTITY= 'VELOCITY' /

&DEVC ID= 'Anemo_porte_U', XYZ= 1.75, -0.025, 0.6, QUANTITY= 'U-VELOCITY' /
&DEVC ID= 'Anemo_porte_V', XYZ= 1.75, -0.025, 0.6, QUANTITY= 'V-VELOCITY' /
&DEVC ID= 'Anemo_porte_W', XYZ= 1.75, -0.025, 0.6, QUANTITY= 'W-VELOCITY' /

local.fds

```
/Sonde Lambda
&DEVC ID='Lambda', XYZ= 1.2 , 3.5, 2.15, QUANTITY='VOLUME FRACTION' ,
SPEC_ID='OXYGEN' /

/CAPTEURS SIMULATION SUPPLEMENTAIRES

/Paroi
/&DEVC ID= 'TC_Paroi_210', XYZ= 0.00, 1.25, 2.1, QUANTITY= 'WALL TEMPERATURE',
IOR=1 /
/&DEVC ID= 'TC_Paroi_170', XYZ= 0.00, 1.25, 1.7, QUANTITY= 'WALL TEMPERATURE',
IOR=1 /

/Vitesse ecoulement cibles
&DEVC ID= 'V_CB1', XYZ= 0.075, 0.65, 1.75, QUANTITY= 'VELOCITY' /
&DEVC ID= 'V_CB2', XYZ= 0.075, 0.85, 1.75, QUANTITY= 'VELOCITY' /
&DEVC ID= 'V_CB3', XYZ= 0.075, 0.65, 2.05, QUANTITY= 'VELOCITY' /
&DEVC ID= 'V_CB4', XYZ= 0.075, 0.85, 2.05, QUANTITY= 'VELOCITY' /

/&DEVC ID= 'Yp_CB1', XYZ= 0.025, 0.65, 1.75, QUANTITY= 'YPLUS', IOR=1/
/&DEVC ID= 'U_tau_CB1', XYZ= 0.025, 0.65, 1.75, QUANTITY= 'FRICTION VELOCITY',
IOR=1/
/&DEVC ID= 'Qc_CB1', XYZ= 0.025, 0.65, 1.75, QUANTITY= 'CONVECTIVE HEAT FLUX',
SPEC_ID='SOOT', IOR=1/

/&DEVC ID= 'Yp_CB2', XYZ= 0.025, 0.65, 1.85, QUANTITY= 'YPLUS', IOR=1/
/&DEVC ID= 'U_tau_CB2', XYZ= 0.025, 0.65, 1.85, QUANTITY= 'FRICTION VELOCITY',
IOR=1/
/&DEVC ID= 'Qc_CB2', XYZ= 0.025, 0.65, 1.85, QUANTITY= 'CONVECTIVE HEAT FLUX',
SPEC_ID='SOOT', IOR=1/

/Foyer
&DEVC ID= 'T_foyer', XYZ= 1.2, 3.5, 1.0, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /
&DEVC ID= 'V_foyer', XYZ= 1.2, 3.5, 1.0, QUANTITY= 'VELOCITY' /
&DEVC ID= 'D_foyer', XYZ= 1.2, 3.5, 1.0, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /

/Plafond au dessus du foyer
&DEVC ID= 'V_foyer_haut', XYZ= 1.15, 3.75, 2.2, QUANTITY= 'VELOCITY' /
&DEVC ID= 'D_foyer_haut', XYZ= 1.15, 3.75, 2.2, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID=
'SOOT' /

/Timer enlevement de l'impost
&DEVC XYZ= 0.0,0.0,0.0, ID='ouverture', SETPOINT=1430., QUANTITY='TIME',
INITIAL_STATE=.FALSE. /

&TAIL /
```


Annexe E

Fichier d'entrée FDS pour la simulation des essais en couloir (chapitre 3)

couloir.fds

&HEAD CHID='couloir_simu', TITLE=''

/TEMPS//

&TIME T_END=1500/

/CONDITIONS INITIALES//

&MISC TMPA=12.0, HUMIDITY=65.0 ,P_INF=101360.0, BNDF_DEFAULT=.FALSE./,
DT_RESTART=500. /

&DUMP DT_BNDF = 60.0/

&INIT XB= 0.0, 2.3, 0.0, 4.5, 1.2, 2.3, TEMPERATURE= 35./

&INIT XB= 0.0, 2.3, 0.0, 4.5, 0.0, 1.2, TEMPERATURE= 20./

/DECOUPAGE 12 MAILLAGES

/zone foyer

&MESH IJK= 40, 50, 50, XB= 00.00,02.00, 00.00,02.50, 00.00,02.50 /maillage 5x5x5
100 000

/tampon foyer-depot56

&MESH IJK= 30, 14, 20, XB= 02.00,03.50, 00.00,00.70, 01.50,02.50 /maillage 5x5x5
750 000

/zone depot56

&MESH IJK= 100, 70, 100, XB= 03.50,04.50, 00.00,00.70, 01.50,02.50 /maillage
1x1x1 750 000

/tampon depot56-convergent

&MESH IJK= 10, 14, 20, XB= 04.50,05.00, 00.00,00.70, 01.50,02.50 /maillage 5x5x5
750 000

/zone depot34

&MESH IJK= 150, 50, 100, XB= 03.50,05.00, 02.00,02.50, 01.50,02.50 /maillage
1x1x1 750 000

/tampon foyer-depot34

&MESH IJK= 30, 36, 20, XB= 02.00,03.50, 00.70,02.50, 01.50,02.50 /maillage 5x5x5
50 000

/remplissage depot34-depot56

&MESH IJK= 60, 40, 20, XB= 02.00,05.00, 00.00,2.00, 01.50,02.50 /maillage 5x5x5
16 000

/remplissage depot34-depot56-sol dessous

&MESH IJK= 60, 50, 30, XB= 02.00,05.00, 00.00,2.50, 00.00,01.50 /maillage 5x5x5
48 000

/convergent+couloir avant depot

&MESH IJK= 64, 50, 50, XB= 05.00,08.20, 00.00,02.50, 00.00,02.50 /maillage 5x5x5
135 000

/zone depot12

&MESH IJK= 150, 50, 110, XB= 08.20,09.70, 02.00,02.50, 01.40,02.50 /maillage

couloir.fds

```
5x5x5 1 100 000
/remplissage depot2-paroi face
&MESH IJK= 30, 40, 22, XB= 08.20,09.70, 00.00,02.00, 01.40,02.50 /maillage 5x5x5
135 000
/remplissage depot2-sol dessous
&MESH IJK= 30, 50, 28, XB= 08.20,09.70, 00.00,02.50, 00.00,01.40 /maillage 5x5x5
56 000

/fin et sortie
&MESH IJK= 106, 50, 50, XB= 09.70,15.00, 00.00,02.50, 00.00,02.50 /maillage
5x5x5 265 000

/PAROIS DE L'ENCEINTE////////////////////////////////////

/Parois verticales Exterieures
&OBST XB= 00.00,00.10, 00.00,02.50, 00.00,02.50, SURF_ID='PAROI_CAISSON'
/Caisson x-
&OBST XB= 00.10,12.00, 02.40,02.50, 00.00,02.50, SURF_ID='PAROI_CAISSON'
/Caisson y+
&OBST XB= 00.10,12.00, 00.00,00.10, 00.00,02.50, SURF_ID='PAROI_CAISSON'
/Caisson y-

&OBST XB= 00.10,00.20, 00.00,02.50, 00.15,02.50, SURF_ID='PAROI_ISOLEE'
/Isolation x-
&OBST XB= 00.20,04.80, 02.30,02.40, 00.15,02.50, SURF_ID='PAROI_ISOLEE'
/Isolation y+
&OBST XB= 00.20,5.85, 00.10,00.30, 00.15,02.50, SURF_ID='PAROI_ISOLEE'
/Isolation y-

/Paroi verticale Interieure
&OBST XB= 10.00,10.10, 00.10,02.40, 00.05,02.45, SURF_ID='PAROI_ACIER' /Paroi
sas
&OBST XB= 05.85,10.00, 00.10,00.30, 00.05,02.45, SURF_ID='PAROI_COULOIR'
/Convergent
&MULT ID='conv', DXB=0.15,0.00, 0.10,0.10, 0.0,0.0 N_LOWER=0, N_UPPER=11
/Convergent
&OBST XB= 05.85,10.00, 00.30,00.40, 00.05,02.45, MULT_ID='conv',
SURF_ID='PAROI_COULOIR' /Convergent

/Porte
&HOLE XB= 10.00,10.10, 01.50,02.25, 00.05,02.10 /Porte sas

/Plafonds intérieurs
&OBST XB= 00.20,04.80, 00.25,02.25, 02.30,02.50, SURF_ID='PAROI_ISOLEE' /Plafond
zone feu
&OBST XB= 04.80,10.00, 00.25,02.40, 02.45,02.50, SURF_ID='PAROI_ISOLEE' /Plafond
zone couloir
&OBST XB= 10.00,12.00, 00.10,02.40, 02.45,02.50, SURF_ID='PAROI_ISOLEE' /Plafond
sas
/Sol intérieurs
&OBST XB= 00.10,05.85, 00.10,02.40, 00.00,00.20, SURF_ID='SOL' /Sol zone feu
&OBST XB= 05.85,12.00, 00.10,02.40, 00.00,00.05, SURF_ID='SOL' /Sol zone
```

couloir.fds

couloir

/Cibles

```
&OBST XB= 04.20,04.80, 02.26,02.28, 01.75,02.05,
SURF_ID='SUPPORT_CIBLE' /Plaque 34 zone foyer
&OBST XB= 04.25,04.35, 02.26,02.26, 01.90,2.00,
SURF_ID='CB3',
BNDF_FACE(-2)=.TRUE. /
&OBST XB= 04.45,04.55, 02.26,02.26, 01.90,2.00,
SURF_ID='CB4',
BNDF_FACE(-2)=.TRUE. /

&OBST XB= 08.90,09.50, 02.36,02.38, 01.65,01.95,
SURF_ID='SUPPORT_CIBLE' /Plaque 12 zone couloir
&OBST XB= 08.95,09.05, 02.36,02.36, 01.80,01.90,
SURF_ID='CB1',
BNDF_FACE(-2)=.TRUE. /
&OBST XB= 09.15,09.25, 02.36,02.36, 01.80,01.90,
SURF_ID='CB2',
BNDF_FACE(-2)=.TRUE. /

&OBST XB= 04.00,04.05, 00.30,00.50, 01.85,02.05,
SURF_ID='SUPPORT_CIBLE' /Plaque 5 face ecoulement
&OBST XB= 04.00,04.00, 00.35,00.45, 01.90,02.00,
SURF_ID='CB5',
BNDF_FACE(-1)=.TRUE. /

&OBST XB= 04.00,04.20, 00.50,00.70, 02.25,02.30,
SURF_ID='SUPPORT_CIBLE' /Plaque 6 plafond
&OBST XB= 04.05,04.15, 00.55,00.65, 02.25,02.25,
SURF_ID='CB6',
BNDF_FACE(-3)=.TRUE. /
```

/HOTTE////////////////////////////////////

```
&SURF ID= 'HOTTE', VOLUME_FLOW=0.03, COLOR= 'BLUE' /
&OBST XB= 12.00,13.00, 0.00,02.50, 02.45,02.50 /Hotte
&VENT XB= 12.00,13.00, 0.00,02.50, 02.45,02.45, SURF_ID= 'HOTTE' /
```

/ESPECES ET REAC////////////////////////////////////

```
&SPEC ID = 'NITROGEN', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'OXYGEN', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'CARBON DIOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'WATER VAPOR', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'CARBON MONOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
```

```
&SPEC ID = 'HEPTANE', FORMULA = 'C7H16' /
```

couloir.fds

&SPEC ID = 'SOOT', AEROSOL=.TRUE., MEAN_DIAMETER=1.E-6 /

&SPEC ID = 'AIR', SPEC_ID = 'NITROGEN', 'OXYGEN',
VOLUME_FRACTION = 3.761904762,1.000, BACKGROUND = .TRUE. /

&SPEC ID = 'PRODUCTS', SPEC_ID = 'NITROGEN', 'CARBON DIOXIDE', 'WATER VAPOR',
'CARBON MONOXIDE',
VOLUME_FRACTION = 40.21576508, 6.688866667, 8.0, 0.0028 /

&REAC ID='HEPTANE', HEAT_OF_COMBUSTION=44600.,
SPEC_ID_NU = 'HEPTANE', 'AIR', 'PRODUCTS', 'SOOT',
NU=-1., -10.69026667, 1., 0.308333333/

/BRULEUR////////////////////////////////////

&SURF ID= 'FEU', MASS_FLUX= 0.05030082, RAMP_MF='Rampe_MLR', SPEC_ID='HEPTANE'
COLOR= 'RED' /Calcul excel

&OBST XB= 00.70,01.20, 00.75,01.75, 00.15,00.40 / Balance

&OBST XB= 00.85,01.05, 01.15,01.35, 00.40,00.50 / bac

&VENT XB= 00.85,01.05, 01.15,01.35, 00.50,00.50, SURF_ID= 'FEU' /

&RAMP ID='Rampe_MLR', T= 0 , F= 0 /

&RAMP ID='Rampe_MLR', T= 80 , F= 0.175 /

&RAMP ID='Rampe_MLR', T= 140 , F= 0.25 /

&RAMP ID='Rampe_MLR', T= 200 , F= 0.275 /

&RAMP ID='Rampe_MLR', T= 250 , F= 0.375 /

&RAMP ID='Rampe_MLR', T= 300 , F= 0.55 /

&RAMP ID='Rampe_MLR', T= 360 , F= 0.65 /

&RAMP ID='Rampe_MLR', T= 420 , F= 0.75 /

&RAMP ID='Rampe_MLR', T= 480 , F= 0.75 /

&RAMP ID='Rampe_MLR', T= 820 , F= 0.75 /

&RAMP ID='Rampe_MLR', T= 900 , F= 0.8 /

&RAMP ID='Rampe_MLR', T= 970 , F= 1 /

&RAMP ID='Rampe_MLR', T= 1020 , F= 0.95 /

&RAMP ID='Rampe_MLR', T= 1110 , F= 0.45 /

&RAMP ID='Rampe_MLR', T= 1200 , F= 0 /

&RAMP ID='Rampe_MLR', T= 1300 , F= 0 /

/ MATERIAUX //////////////////////////////////////

&MATL ID = 'BA13',
SPECIFIC_HEAT = 0.8 ,
CONDUCTIVITY = 0.35 ,
DENSITY = 875. /

&MATL ID = 'MOUSSEPU',
SPECIFIC_HEAT = 1.38 ,
CONDUCTIVITY = 0.024 ,
DENSITY = 45. /

&MATL ID = 'CONCRETE',

SPECIFIC_HEAT = 0.88 ,
CONDUCTIVITY = 1. ,
DENSITY = 2100. /

&MATL ID = 'ROCKWOOL',
SPECIFIC_HEAT = 1 ,
CONDUCTIVITY = 0.042 ,
DENSITY = 70. /

&MATL ID = 'STEEL'
SPECIFIC_HEAT = 0.3 ,
CONDUCTIVITY = 17. ,
DENSITY = 8000. /

&MATL ID = 'ALUMINIUM'
SPECIFIC_HEAT = 0.9 ,
CONDUCTIVITY = 200. ,
DENSITY = 2700. /

&MATL ID = 'WOOD'
SPECIFIC_HEAT = 1.3 ,
CONDUCTIVITY = 0.2 ,
DENSITY = 570. /

/ SURFACES //////////////////////////////////////

&SURF ID = 'SOL',
MATL_ID = 'WOOD',
THICKNESS = 0.1,
COLOR = 'SIENNA' /

&SURF ID = 'SUPPORT_CIBLE',
MATL_ID = 'ALUMINIUM', 'WOOD',
COLOR = 'SIENNA',
THICKNESS = 0.005, 0.02,
BACKING = 'EXPOSED',
TRANSPARENCY = 0.9,
BACKING = 'VOID' /

&SURF ID = 'PAROI_ISOLEE',
MATL_ID = 'BA13', 'ROCKWOOL',
COLOR = 'BEIGE',
THICKNESS = 0.013, 0.05,
BACKING = 'EXPOSED',
TRANSPARENCY = 0.9 /

&SURF ID = 'PAROI_COULOIR',
MATL_ID = 'BA13', 'ROCKWOOL', 'BA13',
COLOR = 'GRAY 50',
THICKNESS = 0.013, 0.05, 0.013,
BACKING = 'EXPOSED',
TRANSPARENCY = 0.9,

couloir.fds

BACKING = 'VOID' /

&SURF ID = 'PAROI_CAISSON',
MATL_ID = 'ROCKWOOL', 'STEEL'
COLOR = 'CADET BLUE',
THICKNESS = 0.01,0.01,
BACKING = 'EXPOSED',
TRANSPARENCY = 0.9 /

&SURF ID = 'ADIABATIC'
ADIABATIC = .TRUE.,
COLOR = 'SIENNA' /

&SURF ID = 'DALLE_BETON',
MATL_ID = 'CONCRETE',
THICKNESS = 10.0,
COLOR = 'GRAY',
TRANSPARENCY=1.0 /

&SURF ID = 'PAROI_ACIER',
MATL_ID = 'STEEL',
THICKNESS = 0.01,
COLOR = 'SILVER',
TRANSPARENCY = 1.0 /

&SURF ID = 'Balance',
MATL_ID = 'BA13', 'ROCKWOOL', 'STEEL'
COLOR = 'GOLDENROD',
THICKNESS = 0.026, 0.05, 0.1,
BACKING = 'EXPOSED',
TRANSPARENCY = 1.0 /

/CIBLES

CB1

&SURF ID = 'CB1',
COLOR = 'RED',
TMP_FRONT = 27.6,
RAMP_T = 'rampe_TC_CB1', /

&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 0, F= 0.0421478060046189 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 50, F= 0.102675134719015 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 100, F= 0.158808057480113 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 150, F= 0.243135745445214 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 200, F= 0.331505003849115 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 250, F= 0.409449576597383 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 300, F= 0.467218373107519 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 350, F= 0.516551193225558 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 400, F= 0.512990762124711 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 450, F= 0.565499101873236 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 500, F= 0.564633051064922 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 550, F= 0.590871182961252 /

couloir.fds

&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 600, F= 0.646426738516808 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 650, F= 0.676064921734668 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 700, F= 0.647966384398255 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 750, F= 0.690434949961509 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 800, F= 0.712214523992815 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 850, F= 0.724275083397485 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 900, F= 0.7354054440082114 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 950, F= 0.775821144470105 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 1000, F= 0.814825506800103 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 1050, F= 0.875064151911727 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 1100, F= 0.966448550166795 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 1150, F= 0.958750320759559 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 1200, F= 0.860469591993841 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 1250, F= 0.686649987169617 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB1', T= 1300, F= 0.612971516551193 /

/CB2

&SURF ID = 'CB2',
COLOR = 'BLUE',
TMP_FRONT = 57.8,
RAMP_T = 'rampe_TC_CB2', /

&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 0, F= 0.246740768239687 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 50, F= 0.262398183128426 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 100, F= 0.290131679514336 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 150, F= 0.319906972681414 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 200, F= 0.36150721726028 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 250, F= 0.397265957679121 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 300, F= 0.434880876989933 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 350, F= 0.468947219007272 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 400, F= 0.490457056755399 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 450, F= 0.530004585853733 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 500, F= 0.551787391085974 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 550, F= 0.586366911973446 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 600, F= 0.622278514183391 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 650, F= 0.656312100102636 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 700, F= 0.671412661323783 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 750, F= 0.713045662000743 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 800, F= 0.739250540475619 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 850, F= 0.766208809206647 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 900, F= 0.784661411132706 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 950, F= 0.82490773699037 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 1000, F= 0.857172493612561 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 1050, F= 0.898903762583801 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 1100, F= 0.957744633459262 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 1150, F= 0.980914113510798 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 1200, F= 0.974712292271745 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 1250, F= 0.939761535605879 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB2', T= 1300, F= 0.926473478479244 /

/CB3

couloir.fds

```
&SURF ID = 'CB3',
      COLOR = 'RED',
      TMP_FRONT = 36.6,
      RAMP_T = 'rampe_TC_CB3', /

&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 0, F= 0.0862173895403092 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 50, F= 0.142512273298982 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 100, F= 0.193045806791902 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 150, F= 0.253783421917475 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 200, F= 0.321296709538686 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 250, F= 0.391589240069785 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 300, F= 0.44118959711121 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 350, F= 0.481275611636305 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 400, F= 0.491946281494705 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 450, F= 0.55026980971315 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 500, F= 0.559865298007871 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 550, F= 0.595204284497099 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 600, F= 0.659593459650262 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 650, F= 0.659208017202905 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 700, F= 0.668316630827281 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 750, F= 0.711039883150079 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 800, F= 0.737817990019069 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 850, F= 0.74804235809632 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 900, F= 0.763541201768978 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 950, F= 0.803505497626486 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 1000, F= 0.851969813770439 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 1050, F= 0.908548707753479 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 1100, F= 0.971517831784801 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 1150, F= 0.98567777011401 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 1200, F= 0.929687183024303 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 1250, F= 0.815555645717532 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB3', T= 1300, F= 0.768044792469672 /
```

/CB4

```
&SURF ID = 'CB4',
      COLOR = 'BLUE',
      TMP_FRONT = 66.9,
      RAMP_T = 'rampe_TC_CB4', /

&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 0, F= 0.272025770287732 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 50, F= 0.270851911842321 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 100, F= 0.302609787613518 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 150, F= 0.340045862376472 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 200, F= 0.375298014450288 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 250, F= 0.420468815403935 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 300, F= 0.456012157169636 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 350, F= 0.491391704733652 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 400, F= 0.506005787395126 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 450, F= 0.551367681584072 /
```

couloir.fds

&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 500, F= 0.578921506178681 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 550, F= 0.615056327006024 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 600, F= 0.659335359528273 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 650, F= 0.671101243015997 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 700, F= 0.694751305803774 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 750, F= 0.731277412779588 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 800, F= 0.756783809853131 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 850, F= 0.7783682457641 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 900, F= 0.800262070722696 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 950, F= 0.833193804939305 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 1000, F= 0.866562323693741 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 1050, F= 0.908147851566054 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 1100, F= 0.96193604746392 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 1150, F= 0.987633537772763 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 1200, F= 0.981709647478479 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 1250, F= 0.945001546945238 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB4', T= 1300, F= 0.937467013667716 /

/CB5

&SURF ID = 'CB5',
COLOR = 'RED',
TMP_FRONT = 73.7,
RAMP_T = 'rampe_TC_CB5', /

&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 0, F= 0.22887289701449 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 50, F= 0.283647768161043 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 100, F= 0.322741417874161 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 150, F= 0.367216117216117 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 200, F= 0.41353042237998 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 250, F= 0.448118253427988 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 300, F= 0.467332814677947 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 350, F= 0.516896819994165 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 400, F= 0.562044150539726 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 450, F= 0.579516353852637 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 500, F= 0.608552951473305 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 550, F= 0.643894453628967 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 600, F= 0.647930240850595 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 650, F= 0.701011378002529 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 700, F= 0.723913254886706 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 750, F= 0.743759927388246 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 800, F= 0.759749100457065 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 850, F= 0.787278355862427 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 900, F= 0.804199487827806 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 950, F= 0.822028266718532 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 1000, F= 0.877783720704075 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 1050, F= 0.920872637686797 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 1100, F= 0.945289960776686 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 1150, F= 0.964172258420046 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 1200, F= 0.920718661869104 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 1250, F= 0.908805795973938 /

couloir.fds

&RAMP ID='rampe_TC_CB5', T= 1300, F= 0.888213556355149 /

/CB6

&SURF ID = 'CB6',
COLOR = 'RED',
TMP_FRONT = 60.9,
RAMP_T = 'rampe_TC_CB6', /

&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 0, F= 0.432935307107222 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 50, F= 0.438905700498896 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 100, F= 0.46393228101742 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 150, F= 0.493170851394455 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 200, F= 0.534585343911017 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 250, F= 0.568955999018565 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 300, F= 0.585998200703361 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 350, F= 0.621115154984869 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 400, F= 0.656140099779177 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 450, F= 0.665126359695755 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 500, F= 0.693628854175186 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 550, F= 0.719309724380469 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 600, F= 0.716621002698945 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 650, F= 0.744234072135438 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 700, F= 0.779749734194815 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 750, F= 0.780363130776151 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 800, F= 0.80377443363049 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 850, F= 0.814018156538807 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 900, F= 0.852764373926556 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 950, F= 0.864981189171506 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 1000, F= 0.913122597530057 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 1050, F= 0.937116627136665 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 1100, F= 0.980320193015457 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 1150, F= 0.987098225239225 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 1200, F= 0.967520651018238 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 1250, F= 0.921802159155966 /
&RAMP ID='rampe_TC_CB6', T= 1300, F= 0.917293694283144 /

/CONDITIONS LIMITES

&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /

/SORTIES

/Sortie sur les murs

&BNDF QUANTITY='WALL_TEMPERATURE', CELL_CENTERED=.TRUE. /
&BNDF QUANTITY='YPLUS', CELL_CENTERED=.TRUE./
&BNDF QUANTITY='SURFACE DEPOSITION', SPEC_ID='SOOT', CELL_CENTERED=.TRUE./

couloir.fds

```
&BNDF QUANTITY='DEPOSITION VELOCITY', SPEC_ID='SOOT', CELL_CENTERED=.TRUE./  
&BNDF QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX', CELL_CENTERED=.TRUE./  
&BNDF QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX', CELL_CENTERED=.TRUE./
```

/COUPES PERPENDICULAIRES A Y

/FOYER

```
&SLCF PBX= 1.25, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /  
&SLCF PBX= 1.25, QUANTITY= 'VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /  
&SLCF PBX= 1.25, QUANTITY= 'U-VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 1.25, QUANTITY= 'V-VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 1.25, QUANTITY= 'W-VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 1.25, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /
```

/ZONE 1

```
&SLCF PBX= 2.15, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /  
&SLCF PBX= 2.15, QUANTITY= 'VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /  
&SLCF PBX= 2.15, QUANTITY= 'U-VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 2.15, QUANTITY= 'V-VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 2.15, QUANTITY= 'W-VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 2.15, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /
```

/ZONE 2

```
&SLCF PBX= 2.25, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /  
&SLCF PBX= 2.25, QUANTITY= 'VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /  
&SLCF PBX= 2.25, QUANTITY= 'U-VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 2.25, QUANTITY= 'V-VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 2.25, QUANTITY= 'W-VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 2.25, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /
```

/COUPES PERPENDICULAIRES A X

/FOYER

```
&SLCF PBX= 0.95, QUANTITY= 'VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 0.95, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /  
&SLCF PBX= 0.95, QUANTITY= 'U-VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 0.95, QUANTITY= 'V-VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 0.95, QUANTITY= 'W-VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 0.95, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID='SOOT' /
```

/ZONE 1

```
&SLCF PBX= 4.30, QUANTITY= 'VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 4.30, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /  
&SLCF PBX= 4.30, QUANTITY= 'U-VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 4.30, QUANTITY= 'V-VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 4.30, QUANTITY= 'W-VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 4.30, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID='SOOT' /
```

/ZONE 2

```
&SLCF PBX= 9.10, QUANTITY= 'VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 9.10, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /  
&SLCF PBX= 9.10, QUANTITY= 'U-VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 9.10, QUANTITY= 'V-VELOCITY' /  
&SLCF PBX= 9.10, QUANTITY= 'W-VELOCITY' /
```

couloir.fds

&SLCF PBX= 9.10, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID='SOOT' /

/COUPES PERPENDICULAIRES A Z

&SLCF PBZ= 1.95, QUANTITY= 'VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ= 1.95, QUANTITY= 'PRESSURE' /

&SLCF PBZ= 1.95, QUANTITY= 'U-VELOCITY' /

&SLCF PBZ= 1.95, QUANTITY= 'V-VELOCITY' /

&SLCF PBZ= 1.95, QUANTITY= 'W-VELOCITY' /

&SLCF PBZ= 1.95, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /

&SLCF PBZ= 1.95, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID='SOOT' /

&SLCF PBZ= 1.85, QUANTITY= 'VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ= 1.85, QUANTITY= 'PRESSURE' /

&SLCF PBZ= 1.85, QUANTITY= 'U-VELOCITY' /

&SLCF PBZ= 1.85, QUANTITY= 'V-VELOCITY' /

&SLCF PBZ= 1.85, QUANTITY= 'W-VELOCITY' /

&SLCF PBZ= 1.85, QUANTITY= 'TEMPERATURE' /

&SLCF PBZ= 1.85, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID='SOOT' /

/CAPTEURS ZONES

/ZONE 1

&DEVC ID= 'Vit_1_20_F', XYZ= 4.30,2.20,1.95, QUANTITY= 'VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_21_F', XYZ= 4.30,2.21,1.95, QUANTITY= 'VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_22_F', XYZ= 4.30,2.22,1.95, QUANTITY= 'VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_23_F', XYZ= 4.30,2.23,1.95, QUANTITY= 'VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_24_F', XYZ= 4.30,2.24,1.95, QUANTITY= 'VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_25_F', XYZ= 4.30,2.25,1.95, QUANTITY= 'VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_20_NF', XYZ= 4.50,2.20,1.95, QUANTITY= 'VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_21_NF', XYZ= 4.50,2.21,1.95, QUANTITY= 'VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_22_NF', XYZ= 4.50,2.22,1.95, QUANTITY= 'VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_23_NF', XYZ= 4.50,2.23,1.95, QUANTITY= 'VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_24_NF', XYZ= 4.50,2.24,1.95, QUANTITY= 'VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_25_NF', XYZ= 4.50,2.25,1.95, QUANTITY= 'VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_m_220', XYZ= 4.4,1.25,2.20, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_m_200', XYZ= 4.4,1.25,2.00, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_m_180', XYZ= 4.4,1.25,1.80, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_m_160', XYZ= 4.4,1.25,1.60, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_m_140', XYZ= 4.4,1.25,1.40, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_m_120', XYZ= 4.4,1.25,1.20, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_m_100', XYZ= 4.4,1.25,1.00, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_m_080', XYZ= 4.4,1.25,0.80, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_m_060', XYZ= 4.4,1.25,0.60, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_1_m_040', XYZ= 4.4,1.25,0.40, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /

&DEVC ID= 'T_1_m_220', XYZ= 4.4,1.25,2.20, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /

&DEVC ID= 'T_1_m_200', XYZ= 4.4,1.25,2.00, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /

&DEVC ID= 'T_1_m_180', XYZ= 4.4,1.25,1.80, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /

couloir.fds

```
&DEVC ID= 'T_1_m_160', XYZ= 4.4,1.25,1.60, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'T_1_m_140', XYZ= 4.4,1.25,1.40, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'T_1_m_120', XYZ= 4.4,1.25,1.20, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'T_1_m_100', XYZ= 4.4,1.25,1.00, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'T_1_m_080', XYZ= 4.4,1.25,0.80, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'T_1_m_060', XYZ= 4.4,1.25,0.60, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'T_1_m_040', XYZ= 4.4,1.25,0.40, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /

&DEVC ID= 'T_1', XYZ= 4.4,2.21,1.95, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'U_1', XYZ= 4.4,2.21,1.95, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /
&DEVC ID= 'D_1', XYZ= 4.4,2.21,1.95, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /

&DEVC ID= 'Vit_1_m', XYZ= 4.0,1.25,1.00, QUANTITY= 'VELOCITY', /
&DEVC ID= 'T_1_m', XYZ= 4.0,1.25,2.00, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'U_1_m', XYZ= 4.0,1.25,2.00, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /
&DEVC ID= 'D_1_m', XYZ= 4.0,1.25,2.00, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /

/ZONE 2

&DEVC ID= 'Vit_2_30_F', XYZ= 9.00,2.30,2.00, QUANTITY= 'VELOCITY', /
&DEVC ID= 'Vit_2_31_F', XYZ= 9.00,2.31,2.00, QUANTITY= 'VELOCITY', /
&DEVC ID= 'Vit_2_32_F', XYZ= 9.00,2.32,2.00, QUANTITY= 'VELOCITY', /
&DEVC ID= 'Vit_2_33_F', XYZ= 9.00,2.33,2.00, QUANTITY= 'VELOCITY', /
&DEVC ID= 'Vit_2_34_F', XYZ= 9.00,2.34,2.00, QUANTITY= 'VELOCITY', /
&DEVC ID= 'Vit_2_35_F', XYZ= 9.00,2.35,2.00, QUANTITY= 'VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_2_30_NF', XYZ= 9.20,2.30,2.00, QUANTITY= 'VELOCITY', /
&DEVC ID= 'Vit_2_31_NF', XYZ= 9.20,2.31,2.00, QUANTITY= 'VELOCITY', /
&DEVC ID= 'Vit_2_32_NF', XYZ= 9.20,2.32,2.00, QUANTITY= 'VELOCITY', /
&DEVC ID= 'Vit_2_33_NF', XYZ= 9.20,2.33,2.00, QUANTITY= 'VELOCITY', /
&DEVC ID= 'Vit_2_34_NF', XYZ= 9.20,2.34,2.00, QUANTITY= 'VELOCITY', /
&DEVC ID= 'Vit_2_35_NF', XYZ= 9.20,2.35,2.00, QUANTITY= 'VELOCITY', /

&DEVC ID= 'Vit_2_m_220', XYZ= 9.1,1.90,2.20, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /
&DEVC ID= 'Vit_2_m_200', XYZ= 9.1,1.90,2.00, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /
&DEVC ID= 'Vit_2_m_180', XYZ= 9.1,1.90,1.80, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /
&DEVC ID= 'Vit_2_m_160', XYZ= 9.1,1.90,1.60, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /
&DEVC ID= 'Vit_2_m_140', XYZ= 9.1,1.90,1.40, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /
&DEVC ID= 'Vit_2_m_120', XYZ= 9.1,1.90,1.20, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /
&DEVC ID= 'Vit_2_m_100', XYZ= 9.1,1.90,1.00, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /
&DEVC ID= 'Vit_2_m_080', XYZ= 9.1,1.90,0.80, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /
&DEVC ID= 'Vit_2_m_060', XYZ= 9.1,1.90,0.60, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /
&DEVC ID= 'Vit_2_m_040', XYZ= 9.1,1.90,0.40, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /

&DEVC ID= 'T_2_m_220', XYZ= 9.1,1.90,2.20, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'T_2_m_200', XYZ= 9.1,1.90,2.00, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'T_2_m_180', XYZ= 9.1,1.90,1.80, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'T_2_m_160', XYZ= 9.1,1.90,1.60, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'T_2_m_140', XYZ= 9.1,1.90,1.40, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'T_2_m_120', XYZ= 9.1,1.90,1.20, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'T_2_m_100', XYZ= 9.1,1.90,1.00, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'T_2_m_080', XYZ= 9.1,1.90,0.80, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
```

couloir.fds

```
&DEVC ID= 'T_2_m_060', XYZ= 9.1,1.90,0.60, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'T_2_m_040', XYZ= 9.1,1.90,0.40, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /

&DEVC ID= 'T_2', XYZ= 9.1,2.31,2.00, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'U_2', XYZ= 9.1,2.31,2.00, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /
&DEVC ID= 'D_2', XYZ= 9.1,2.31,2.00, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /

&DEVC ID= 'Vit_22', XYZ= 8.7,1.55,1.90, QUANTITY= 'VELOCITY', /
&DEVC ID= 'T_22', XYZ= 8.7,1.55,1.90, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'U_22', XYZ= 8.7,1.55,1.90, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /
&DEVC ID= 'D_22', XYZ= 8.7,1.55,1.90, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /

&DEVC ID= 'Vit_2_m', XYZ= 8.7,1.40,1.90, QUANTITY= 'VELOCITY', /
&DEVC ID= 'T_2_m', XYZ= 8.7,1.40,1.90, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'U_2_m', XYZ= 8.7,1.40,1.90, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /
&DEVC ID= 'D_2_m', XYZ= 8.7,2.40,1.90, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /

/CAPTEURS AIR ENTRANT

&DEVC ID= 'Vit_E_60', XYZ= 8.5,1.90,0.60, QUANTITY= 'VELOCITY', /
&DEVC ID= 'T_E_60', XYZ= 8.5,1.90,0.60, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'U_E_60', XYZ= 8.5,1.90,0.60, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /
&DEVC ID= 'D_E_60', XYZ= 8.5,1.90,0.60, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /

&DEVC ID= 'Vit_E_70', XYZ= 8.5,1.90,0.70, QUANTITY= 'VELOCITY', /
&DEVC ID= 'T_E_70', XYZ= 8.5,1.90,0.70, QUANTITY= 'TEMPERATURE', /
&DEVC ID= 'U_E_70', XYZ= 8.5,1.90,0.70, QUANTITY= 'U-VELOCITY', /
&DEVC ID= 'D_E_70', XYZ= 8.5,1.90,0.70, QUANTITY= 'DENSITY', SPEC_ID= 'SOOT' /

&TAIL /
```

Bibliographie

- BABRAUSKAS, V. (2002). « Heat Release Rate ». *SFPE Handbook for Fire Safety Engineering*, p. 3–25.
- BATCHELOR, G. K. et C. SHEN (1985). « Thermophoretic Deposition of Particles in Gas Flowing over Cold surfaces ». *Journal of Colloid and Interface Science* 107, p. 21–37.
- BELLIVIER, A., M. VIGREUX et F. X. OUF (2012). « Analysis of Soot deposit for post fire investigation : comparison between full scale experiment and theoretical approach. » *European Aerosol Conference*.
- BELLIVIER, A. *et al.* (2013). « Experimental and numerical study of smoke movement through soot concentration in a staircase of the Parisian underground. » *Interflam conference*.
- BERESNEV, S. et V. CHERNYAK (1989). « Thermophoresis of a spherical particle in a rarefied gas : Numerical analysis based on the model kinetic equations. » *Physics of Fluids* 7, p. 1743–1756.
- BOULAUD, D. et A. RENOUX (1998). *Les aerosols, physique et metrologie*. Tec&Doc.
- BROCK, J. (1962). « On the theory of thermal forces acting on aerosol particle ». *Journal of Colloid Science* 17, p. 768–780.
- BRUGIÈRE, E. *et al.* (2014). « Increase in Thermophoretic Velocity of Carbon Aggregates as a Function of Particle Size ». *Journal of Aerosol Science* 76, p. 87–97.
- CAPORALONI M., Tampieri F. Trombetti F. et O. VITTORI (1975). « Transfer of particles in nonisotropic air turbulence. » *Journal of the Atmospheric Sciences* 32, p. 565–568.
- CUNNINGHAM, E. (1910). « On the Velocity of Steady Fall of Spherical Particles through Fluid Medium ». *Proc. Roy. Soc.* 83, p. 357–365.
- DERJAGUIN, B.V. *et al.* (1976). « Measurement of the coefficient of thermal slip of gases and the thermophoresis velocity of large-size aerosol particles ». *Journal of Colloid Interface Science* 57, p. 451–461.
- DOBBINS, R.A. et H. SUBRAMANIASIVAM (1994). « Soot Precursor Particles in Flames ». *Soot Formation in Combustion*, p. 290.
- DREW, D. A. (1983). « Continuum modelling of Two-Phase Flows - Theory of dispersed multiphase flow ». *Academic Press*.
- ELGHOBASHI, S.E. et Abou-Arab T.W. (1983). « A two-equation turbulence model for two-phase flow ». *Physics of Fluids*.
- EPSTEIN, P.S. (1929). *Physik* 54.
- EVANS, D.D. *et al.* (1992). « In situ Burning of Oil Spills : Mesoscale Experiments ». *Proceedings of the Fifteenth Arctic and Marine Oil Spill Program technical Seminar*.
- FARADAY, M. (1885). « The Chemical History of a Candle. A Course of Six Lectures Delivered before a Juvenile Auditory at the Royal Institution of Great Britain during the Christmas Holidays of 1860. » *Dover Publications* 1.
- FLOYD, K. J. K. J. Overholt. E. et O. A. EZEKOYE (2016). « Computational Modeling and Validation of Aerosol Deposition in Ventilation Ducts ». *Fire Technology* 52, p. 149–166.
- HAMAKER, H. C. (1937). « The London-van der Waals Forces between Spherical Particles ». *Physica* 4.
- HEBERT, D. (2012). « Etude de la combustion des matériaux solides, application à la sécurité incendie. » Thèse de doct. INSA de Rouen.
- HURLEY, M., éd. (2002). *SFPE Handbook of fire protection engineering 5th Edition*. Springer.

- IVCHENKO, L. N. et YU. I. YALAMOV (1971). « The hydrodynamic method for the thermophoretic velocity of moderate large non-volatile particles ». *Russian Journal of Physical Chemistry* 45, p. 317.
- JENNINGS, S. (1988). « The mean free path in air ». *Journal of Aerosol Science* 19, p. 159–166.
- JOHANSSON, N., S. SVENSSON et P. van HEES (2015). « A Study of Reproducibility of a Full-Scale Multi-Room Compartment Fire Experiment ». *Fire Technology* 51, p. 645–665.
- KENNEDY, I. M. (1997). « Models of Soot Formation and Oxidation ». *Progress in Energy and Combustion Science*. Sous la dir. de National Fire Protection ASSOCIATION.
- KIM, A. S. et R. YUAN (2005). « Hydrodynamic of an ideal aggregate with quadratically increasing permeability ». *Journal of Colloid Interface Science* 285, p. 627–633.
- KRUPITCZKA, R. (1967). « Analysis of thermal conductivity in granular materials. » *Int. Chem Engng* 7, p. 122–144.
- KÖYLÜ, Ü. Ö. et al. (1995). « Fractal and projected structure properties of soot aggregates ». *Combustion and Flame* 100, p. 621–633.
- KÖYLÜ, U. O. et G. M. FAETH (1992). « Structure of overfire soot in buoyant turbulent diffusion flames at long residence times. » *Combust. Flame* 89, 140–152.
- LAI, A. C., K. WANG et F. Z. CHEN (2008). « Experimental and numerical study on particle distribution in a two-zone chamber ». *Atmospheric Environment*.
- LAZZARI, S. et al. (2016). « Fractal-like structures in colloid science ». *Advances in Colloid and Interface Science* In press.
- LI, A. et G. AHMADI (1993). « Aerosol particle deposition with electrostatic attraction in a turbulent channel flow ». *Journal of Colloid and interface science* 158, p. 476–482.
- LOYALKA, S. K. (1968). « Momentum and Temperature Slip Coefficients with Arbitrary Accommodation at the Surface ». *J. Chem. Phys.* 48, p. 5432.
- LOYALKA, S. K. et H. FERZIGER (1967). « Model Dependence of the Slip Coefficient ». *Physics of Fluids* 10, p. 1833.
- MACKOWSKI, D. W. (2004). « Monte Carlo simulation of Hydrodynamic drag and thermophoresis of fractal aggregates of spheres in the free-molecule flow regime. » *Journal of Aerosol Science* 37, p. 242–259.
- MCCOY, D. et T. HANRATTY (1977). « Rate of Deposition of Droplets in Annular Two-Phase Flow. » *International Journal of Multiphase Flow* 3, p. 319–331.
- MCGRATTAN, K. et al. (2014). *FDS 6 User Guide*. Sous la dir. de NIST Special PUBLICATION. 6^e éd. NIST.
- MEGARIDIS, C.M. et R.A. DOBBINS (1990). « Morphological description of flame-generated materials ». *Combustion Science and Technology* 71, p. 95–109.
- MESSERER, A., R. NIESSNER et U. PÖSCHL (2003). « Thermophoretic deposition of soot aerosol particles under experimental conditions relevant for modern diesel engine exhaust gas systems. » *Journal of Aerosol Science* 34, p. 1009–1021.
- MULHOLLAND, G. W. (2002). « Smoke Production and Properties ». *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. National Fire Protection Association.
- MULHOLLAND, G. W., V. HENZEL et V. BABRAUSKAS (1988). « The Effect of Scale on Smoke Emission ». *Fire Safety Science, Proceedings of the Second International Symposium*.
- MULHOLLAND, G W et C. CROARKIN (2000). « Specific extinction coefficient for flame generated smoke. » *Fire and Materials* 24, p. 227–230.
- NEOH, K. G., J.B. HOWARD et A. F. SAROFIM (1981). « Soot Oxidation in Flames ». *Particulate Carbon Formation During Combustion*. Sous la dir. de D.C. SIEGLA et G.W. SMITH, p. 261–277.

- NTZIACHRISTOS, L. *et al.* (2013). « Application of the Pegasor Particle Sensor for the measurement of mass and particle number emission. » *SAE International Journal of Fuels and Lubricants* 6.
- OESTERLE, Benoît (2006). *Ecoulements multiphasiques*. Sous la dir. de LAVOISIER. Germes Sciences.
- OUF, F. X., A. COPPALLE et J. YON (2008). « Characterization of Soot Particles in the Plumes of Over-Ventilated Diffusion Flames ». *Combustion Science and Technology* 180, p. 674–698.
- PURI, R., R. J. SANTORO et K. C. SMYTH (1994). « The Oxidation of Soot and Carbon Monoxide in Hydrocarbon Diffusion Flames ». *Combustion and Flame* 97, p. 125–144.
- RASBASH, D. J. et B. T. PRATT (1979). « Estimation of the smoke produced in fires ». *Fire Safety Journal* 5, p. 23637.
- REEKS, M. W. (1976). « The transport of discrete particles in inhomogeneous turbulence. » *Journal of Aerosol Science* 14, p. 729–739.
- IAFSS, éd. (2011). *Measurement and Prediction of smoke deposition from a fire against a wall*.
- ROSNER, D. E. et P. TANDON (1994). « Prediction and correlation of "accessible area" of large multiparticle Aggregates ». *AIChE Journal* 40, p. 1167–1182.
- SCHMAUSS, A. (1922). « Kolloidchemie und Meteorologie ». *Kolloid Zeitschrift* 31, p. 266–269.
- SIPPOLA, M. R. et W.W. NAZAROFF (2004). « Experiments Measuring Particle Deposition from Fully Developed Turbulent Flow in Ventilation Ducts ». *Aerosol Science and Technology* 38, p. 914–925.
- SIPPOLA, Mark R. et William W. NAZAROFF (2002). *Particle deposition from turbulent Flow : Review of Published research and Its Applicability to Ventilation Ducts in Commercial Buildings*. Rapp. tech. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- SMITH, O. I. (1981). « Fundamentals of soot formation in flames with application to diesel engine particulate emission ». *Progress in Energy and Combustion Science* 7, p. 275–291.
- SONE et AOKI (1983).
- SUZUKI, Sayaka, Kasunori KUWANA et Ritsu DOBASHI (2009). « Effect of particle morphology on thermophoretic velocity of aggregated soot particles. » *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52, p. 4695–4700.
- TALBOT, L. *et al.* (1980). « Thermophoresis of particles in a heated boundary layer ». *Journal of Fluid Mechanics*.
- TAVMAN, I. H. (1996). « Effective thermal conductivity of granular porous materials. » *Int. Comm. Heat Mass Transfer* 23, p. 169–176.
- TEWARSON, A. (2002). « Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires ». *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*.
- TYNDALL (1870).
- VANHULLE, P. (2002). « Caractérisation des aérosols émis par la combustion des hydrocarbures : application à la mesure de l'indice de réfraction des suies. » Thèse de doct. CORIA.
- WAL, R. L. Vander et A. J. TOMASEK (2003). « Soot oxydation : dependence upon initial nanostructure ». *Combustion and Flame* 134, p. 1–9.
- WALDMAN (1961). *Rarefied Gas Dynamics*.
- WENTZEL, M. *et al.* (2003). « Transmission electron microscopical and aerosol dynamical characterization of soot aerosols ». *Journal of Aerosol Science* 34, p. 1347–1370.
- WITTEN, T A. et C. M. SANDER (1981). « Diffusion limited aggregation, a kinetic critical phenomenon ». *Phys. Rev. Letters* 47, p. 1400–1403.
- ZAICHIK, L.I. (1999). « Model of particle transport and heat transfer in turbulent shear flow ». *Physics of Fluids*.
- ZHAO, B. *et al.* (2008). « Particle dispersion and deposition in ventilated rooms : Testing and evaluation of different Eulerian and Lagrangian models ». *Building and Environment*.

ZHENG, F. (2002). « Thermophoresis of spherical and non-spherical particles : a review of theories and Experiments ». *Advances in Colloid and Interface Science* 97, p. 255–278.