



HAL
open science

Stratification thermique et optique d'un environnement enfumé et interactions eau/fumée sous aspersion

Romain Morlon

► **To cite this version:**

Romain Morlon. Stratification thermique et optique d'un environnement enfumé et interactions eau/fumée sous aspersion. Autre. Université de Lorraine, 2015. Français. NNT : 2015LORR0138 . tel-01751966

HAL Id: tel-01751966

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01751966v1>

Submitted on 29 Mar 2018

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.



AVERTISSEMENT

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

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

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

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

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



Université de Lorraine
Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée - UMR 7563
Énergie Mécanique et Matériaux - ED 409

Stratification thermique et optique d'un environnement enfumé et interactions eau/fumée sous aspersion

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le vendredi 2 octobre 2015

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine

spécialité Mécanique-Énergétique

par

Romain MORLON

Composition du jury

<i>Président :</i>	Olivier VAUQUELIN	Professeur, Université d'Aix-Marseille, IUSTI, Marseille
<i>Rapporteurs :</i>	Thomas ROGAUME Bernard PORTERIE	Professeur, Université de Poitiers, Laboratoire Pprime, Poitiers Professeur, Université d'Aix-Marseille, IUSTI, Marseille
<i>Examineur :</i>	Elizabeth BLANCHARD	Docteur, CSTB, Champs-sur-Marne
<i>Directeurs :</i>	Pascal BOULET Gilles PARENT	Professeur, Université de Lorraine, LEMTA, Nancy Professeur, Université de Lorraine, LEMTA, Nancy
<i>Invités :</i>	Philippe FROMY Jean-Pierre VANTELON	Ingénieur, CSTB, Champs-sur-Marne Directeur de recherche, Laboratoire Pprime, Poitiers

Remerciements

Ce travail de recherche a été effectué en collaboration entre le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et le Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA - UMR 7563).

Pour commencer, j'aimerais témoigner toute ma gratitude à tous les membres du jury et notamment Bernard PORTERIE et Thomas ROGAUME pour avoir rapporté ce travail de thèse, ainsi qu'à Olivier VAUQUELIN pour l'avoir examiné et pour avoir accepté de présider ce jury. Je suis reconnaissant envers eux.

Je tiens à dire un grand merci à Pascal BOULET qui m'a proposé ce travail de thèse et qui m'a fait confiance. Je le remercie pour son encadrement tout au long de ces trois années. Ses nombreux conseils de qualité à la fois sur le plan scientifique et sur le plan humain m'ont permis d'apprendre, d'avancer et de sans cesse évoluer.

Merci à Gilles PARENT qui, avec Pascal, a dirigé cette thèse et m'a également beaucoup appris. Je retiendrai les moments à la "cryo", nos longs échanges sur les aspects de visibilité, les expériences "labo" sur l'effet de lumière parasite ainsi que son aide précieuse pour les dernières répétitions avant la soutenance (l'objectif était de "soutenir une belle thèse").

Je ne peux ensuite continuer ces remerciements sans adresser toute ma reconnaissance à Sullivan LECHÊNE qui a encadré ce travail de thèse durant deux ans et demi et avec qui nous avons pu échanger et partager afin de faire avancer le travail aussi bien expérimental que numérique. Merci à Elizabeth BLANCHARD qui a repris l'encadrement le restant de la thèse avec l'aide de Philippe FROMY.

C'est avec un profond respect que je voudrais remercier Monsieur Jean-Pierre VANTELON qui m'a conseillé et qui m'a fait profiter de son expérience dès les premiers jours de la thèse.

Je me dois également de remercier les industriels partenaires, à savoir CHUBB pour nous avoir fourni les Boîtiers Autonomes d'Éclairage de Sécurité et PROFOG pour le prêt de leur système d'aspersion complet qui m'a permis de mener à bien ce travail de recherche.

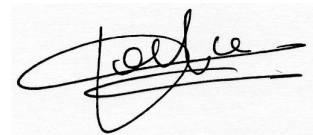
Le travail expérimental n'aurait pu être complet sans l'aide de Benoît FOREST, dans un premier temps puis Benjamin BUTET dans un second temps qui m'ont aidé par exemple, à tirer entre la pièce-couloir et le local d'acquisition, les quelques 5 kilomètres de rallonges de thermocouples à près de 4 m au-dessus du sol. J'aimerais également remercier Erich BERGER, collègue et néanmoins ami qui m'a conseillé et aidé entre autres à la mise en place des supports du dispositif d'opacimétrie. Je dis merci à Gabriel GIOVANNELLI avec qui j'ai pu discuter "mesure d'opacimétrie" et "essais" autour de cafés matinaux. Je souhaiterais également mettre en avant le grand apport technique de la division MRF et plus particulièrement (par ordre alphabétique) Anthony G., Cédric, Jean-François, José, Paulo, Romuald, Saïda et Stéphane C. qui ont toujours répondu avec une grande gentillesse lorsque j'avais besoin de matériel ou de leurs compétences. Merci aussi à Sébastien et Boris pour leurs conseils pertinents sur la métrologie et pour avoir réarmé le disjoncteur du surpresseur lors des différentes campagnes d'essais. Merci également à Bernard MONOD pour son aide à la "cryo" et surtout pour le prêt de son étuve de fortune.

J'ai eu l'occasion de partager mon bureau avec de nombreuses personnes, à commencer par Karine JACQUEMET et Anthony MALARA au CSTB avec qui j'ai passé de bons moments pendant près d'un an. Le déménagement dans "l'openspace" m'a offert la compagnie d'une multitude de thésards et de stagiaires avec qui j'ai pu échanger et avancer sur mon travail de manière sérieuse et rigoureuse. Je dirai donc un grand merci à Damien LAMALLE, Mathieu DUNY, Mehdi KOUTAIBA, Michele GODIO et Duc Toan PHAM pour leur participation et leur bonne humeur. Au LEMTA, l'entente a été toute aussi bonne avec mes colocataires de bureau Alexandre JENFT, fut un temps, puis Nicolas TRÉVISAN et Thomas GASPAROTTO. Nous avons pu débattre de sujets divers et variés pendant la pause déjeuner... Le reste de l'équipe "Feux" a également participé à un très bon accueil en janvier 2014. Je citerai Alexis MARCHAND (mon coéquipier Fifa), Anthony COLLIN (mon adversaire préféré), Jonathan GÉRARDIN (celui qui a programmé Fifa) et Zoubir ACEM (mon rival de l'US Vandœuvre). Merci à eux également pour leurs conseils et leur aide sur les différents aspects du travail.

Je suis également reconnaissant envers toutes les personnes qui travaillent dans l'ombre en particulier Ludovic BUHLER, Irène LÉONARD, Valérie REICHHART, Edith LANG et Dalida SIMONIGH pour le LEMTA ; Mara TAN, Bernadette MOREL DI PONZIO, Sylvie SECK et Sylvie LEROY pour le CSTB. Toutes ces personnes m'ont facilité les démarches administratives en tout genre (inscriptions à l'Université de Lorraine, déplacements en France ou à l'étranger, accès au cluster...) C'était un réel plaisir de s'adresser à chacune d'elle.

Enfin, je dédie ce mémoire à tous mes proches qui m'ont encouragé et soutenu dans les moments difficiles. Je citerai tout particulièrement ma mère Valérie, mon père Christian, mon frère David... sans oublier Noémie, à qui je dois beaucoup. J'espère que ces maigres mots pourront leur exprimer toute ma gratitude.

Champs-sur-Marne - le 2 octobre 2015

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Romain Morlon', written over a light grey rectangular background.

Romain MORLON

*« Tout obstacle renforce la détermination. Celui qui s'est fixé un but n'en change pas. »
Léonard De Vinci*

*« La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. Ici, nous avons réuni théorie et pratique : rien ne fonctionne ... et personne ne sait pourquoi ! »
Albert Einstein*

*« Le feu ça brûle et l'eau ça mouille. »
Charly et Lulu*

Table des matières

Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xv
Liste des symboles	xix
Introduction générale	1
Chapitre 1 Contexte de la recherche	3
1.1 Feu dans un bâtiment	5
1.1.1 Phénomènes physiques	5
1.1.2 Caractérisation de la stratification de l'environnement	6
1.2 Aspersions d'eau	11
1.2.1 Technologies d'aspersion	11
1.2.2 Caractérisation de l'aspersion	12
1.2.3 Phénomènes physiques	14
1.2.4 Incidence sur l'environnement stratifié	19
1.3 Risques liés à un incendie et conditions de visibilité	20
1.3.1 Risques liés à un incendie	20
1.3.2 En quoi la perte de visibilité constitue-t-elle un risque ?	22
1.4 Démarche du travail de thèse	27
Chapitre 2 Développement d'un dispositif d'opacimétrie	29
2.1 Principe de mesure optique	31
2.2 Technique de mesure de l'opacité et dispositif initial	32
2.3 Limites d'utilisation liées aux conditions de mesure	33
2.4 Dispositif développé	35
2.4.1 Dérivation par fibre optique	35
2.4.2 Protection du dispositif	36
2.5 Mise à l'épreuve du dispositif développé	38

2.5.1	Sensibilité à la température	38
2.5.2	Test des opacimètres soumis à un spray	40
2.5.3	Test d'exactitude	47
2.6	Conclusion du chapitre	49
Chapitre 3 Évaluation de la visibilité par méthode de Monte Carlo		51
3.1	Description du code	53
3.1.1	Image d'un point, PSF	53
3.1.2	Évaluation du parcours des quanta par Méthode de Monte Carlo	57
3.1.3	Calcul des propriétés radiatives	60
3.2	Sensibilité	65
3.2.1	Focalisation de la lentille et étude de la PSF	65
3.2.2	Acceptance de la lentille	67
3.2.3	Angle d'émission	68
3.2.4	Critère d'arrêt - convergence des résultats	70
3.2.5	Longueur d'onde, distribution de gouttes et fraction volumique	72
3.3	Étude sur la notion de contraste	76
3.4	Conclusion du chapitre	82
Chapitre 4 Configuration d'essais et résultats expérimentaux		83
4.1	Dispositif expérimental	85
4.1.1	Configuration d'essais	85
4.1.2	Foyer mis en œuvre	86
4.1.3	Systèmes d'aspersion	88
4.1.4	Instrumentation des essais	90
4.2	Résultats de l'étude expérimentale	97
4.2.1	Avant aspersion	99
4.2.2	Activation du sprinkler BP	106
4.2.3	Activation du sprinkler HP	113
4.2.4	Activation du brouillard d'eau	119
4.3	Étude de l'atténuation du rayonnement par un spray	126
4.4	Conclusion du chapitre	128
Chapitre 5 Résultats numériques		133
5.1	Données d'entrée des simulations	135
5.1.1	Maillage et conditions aux limites	135
5.1.2	HRR	136
5.1.3	Modélisation des sprays	137

5.2	Simulation des sprays seuls	140
5.2.1	Sprinkler BP	141
5.2.2	Sprinkler HP	142
5.2.3	Brouillard d'eau	145
5.2.4	Comparaison des trois technologies	148
5.3	Simulation avant aspersion	148
5.4	Simulations pendant aspersion	150
5.4.1	Aspersion par sprinkler BP	151
5.4.2	Aspersion par sprinkler HP	166
5.4.3	Aspersion par brouillard d'eau	179
5.5	Conclusion du chapitre	192
	Conclusion générale et perspectives	193
	Bibliographie	197

Liste des figures

1.1	Représentation des flux de matière et d'énergie au droit du foyer dans une pièce [11]	6
1.2	Valeurs mesurées par Newman dans ses essais à échelle 1 mettant en jeu des feux d'heptane [100]	8
1.3	Détermination de la hauteur d'interface par la méthode des « N-percent » pour des valeurs de $N = [10; 15; 20; 30]$ et pour deux profils verticaux de température	9
1.4	Profils de température théoriques, définis pour comparer la méthode « N-percent » proposée par Cooper, le modèle de Quintière <i>et al.</i> et celui de Janssens et Tran, ainsi que les deux modèles de He <i>et al.</i>	11
1.5	Empreinte du spray [11]	13
1.6	Énergie nécessaire pour transformer l'eau en vapeur [43]	15
1.7	Phénomène d'absorption et diffusion par une particule sphérique	18
1.8	Sensibilité au contraste en fonction de la fréquence spatiale	24
1.9	Premières corrélations entre la distance de visibilité et la densité optique dans un milieu enfumé [19, 64, 82, 111]	25
1.10	Corrélations de Jin et Yamada entre la visibilité et le coefficient d'extinction pour un système réfléchissant ($\beta V = 3$) et un panneau lumineux ($\beta V = 8$)	26
1.11	Configuration de pièce couloir utilisée et illustration du phénomène de stratification (image extraite de « smokeview »)	28
2.1	Dispositif initial mis en place lors des premiers essais de feu	32
2.2	Photos de la diode laser HL6335G et du photo-détecteur DET36A	32
2.3	Caractéristiques de la réponse de la photo-diode	33
2.4	Test en étuve du dispositif initial d'opacimétrie laser	34
2.5	Principe général du dispositif laser utilisé dans la mesure de transmittance	35
2.6	Récepteurs photo-diodes utilisés pour la mesure d'opacité	37
2.7	Schéma du système de support optique amélioré dans le brouillard	37
2.8	Système de mise en surpression des boîtes durant des essais de pulvérisation	38
2.9	Évolution du signal mesuré au récepteur en fonction de la chauffe	40
2.10	Positionnement du dispositif de mesure optique pour le test sous condition d'aspersion	41
2.11	Évolution de la transmittance durant l'aspersion continue	42
2.12	Configuration de test de la métrologie optique en condition d'essais	42
2.13	Dispositif laser sous conditions d'aspersion par brouillard d'eau	43
2.14	Transmittances mesurées dans le couloir lors de la pulvérisation par sprinkler basse pression seul	44
2.15	Transmittances mesurées dans le couloir lors de la pulvérisation par sprinkler haute pression seul	46

2.16	Transmittances mesurées dans le couloir lors de la pulvérisation par brouillard d'eau seul	47
3.1	Répartition des quanta dans le plan image pour un calcul sans diffusion et une lentille de 4 cm de diamètre	54
3.2	Histogramme représentant la répartition du nombre de quanta par rapport à la distance du centre de l'image	55
3.3	PSF bidimensionnelle obtenue pour un point vu au travers d'un milieu non-diffusant et d'une lentille de 4 cm de diamètre	56
3.4	PSF bidimensionnelle obtenue pour un point vu au travers d'un milieu semi-transparent de 1 m d'épaisseur, de coefficient de diffusion $\sigma = 10 m^{-1}$ et de coefficient d'absorption $\kappa = 10 m^{-1}$	56
3.5	Angles d'émission du quantum θ_0 et ψ_0	58
3.6	Référence des angles du cône de diffusion	59
3.7	Suivi du parcours de deux quanta dans un milieu absorbant et diffusant	60
3.8	Indices de réfraction n et k de l'eau entre 200 nm à 20 μm	61
3.9	Fonctions de phase de Mie en échelle logarithmique pour les suies et les gouttes issues des sprinklers BP, HP et du brouillard d'eau	63
3.10	Exemple de fonction de phase combinée en échelle logarithmique d'un milieu composé de suie $\sigma_{\lambda}^{\text{suie}}=14,3 m^{-1}$ et de gouttes d'eau $\sigma_{\lambda}^{\text{eau}}=8,8 m^{-1}$	65
3.11	aberration lentille	66
3.12	Répartition des quanta et de la PSF bidimensionnelle correspondante pour 3 positions de plan image	67
3.13	Quanta reçus en fonction de l'angle maximal d'émission des quanta	68
3.14	Quanta reçus cumulés en fonction de l'angle d'émission	69
3.15	Évolution de la transmission en fonction du coefficient de diffusion pour différents critères d'arrêt	71
3.16	Évolution de la transmission en fonction de la distance pour différents critères d'arrêt	72
3.17	Granulométries de goutte utilisée pour la sensibilité dans le visible	73
3.18	Coefficients de diffusion et transmittances spectrales pour différentes valeurs de diamètre	75
3.19	Coefficients de diffusion et transmittances spectrales pour différentes valeurs de fraction volumique en eau	76
3.20	Mire de résolution USAF1951 utilisée pour le calcul du contraste	77
3.21	Mire de résolution vue au travers de 3 milieux diffusant et 3 distances optiques différentes	78
3.22	Intensité lumineuse en fonction des pixels pour un élément de la Mire et 4 milieux diffusants	79
3.23	Détermination de la distance de visibilité par la notion de contraste seuil à 0,02 - pour 4 éléments de résolution	80
3.24	Distance de visibilité en fonction du coefficient de diffusion	81
4.1	Configuration expérimentale pour les essais d'aspersion	85
4.2	Photographies de la configuration d'essais avant instrumentation	86
4.3	Position du foyer, du dispositif d'aspersion et de l'instrumentation	87
4.4	Réseau hydraulique du dispositif expérimental	88
4.5	Photographie et représentation schématique de la tête de sprinkler employée	89

4.6	Photographie et représentation schématique de la buse brouillard d'eau employée	90
4.7	Granulométrie fournie par le constructeur pour le brouillard d'eau	91
4.8	Coupe longitudinale médiane du couloir indiquant la disposition de l'instrumentation	93
4.9	Photographie du foyer pendant un essai	97
4.10	Mesure de la masse au cours du temps et évolution temporelle de la perte de masse pour les trois technologies	98
4.11	Évolution temporelle de la puissance du feu pour les trois technologies	99
4.12	Évolution des températures dans le couloir avant le déclenchement de l'aspersion pour les 15 essais de répétabilité	100
4.13	Évolution des transmittances dans le couloir avant le déclenchement de l'aspersion pour les 15 essais de répétabilité	101
4.14	Photographie de la stratification observée durant un essai avant aspersion	101
4.15	Profils de température moyenne sur les 15 essais avant aspersion	104
4.16	Profils de transmittance moyenne sur les 15 essais avant aspersion	105
4.17	Hauteur de l'interface entre la fumée et l'air calculée par la méthode de Janssens [62] appliquée à des mesures de transmittance et de température moyennes pour les 15 essais	105
4.18	Évolution des températures dans le couloir pour l'essai avec aspersion par sprinkler basse pression	106
4.19	Évolution des transmittances dans le couloir pour l'essai avec aspersion par sprinkler basse pression	107
4.20	Profils de température pendant aspersion par sprinkler basse pression	110
4.21	Profils de transmittance pendant aspersion par sprinkler basse pression	111
4.22	Hauteur de l'interface entre la fumée et l'air calculée par la méthode de Janssens [62] appliquée à des mesures de transmittance et de température pour l'aspersion par sprinkler BP	111
4.23	BAES vu dans le couloir à 1,4 m du sol au niveau de la section 4 pour trois instants durant un essai avec sprinkler BP	112
4.24	Évolution des températures dans le couloir pour l'essai avec aspersion par sprinkler haute pression	113
4.25	Évolution des transmittances dans le couloir pour l'essai avec aspersion par sprinkler haute pression	114
4.26	Profils de température pendant aspersion par sprinkler haute pression	116
4.27	Profils de transmittance pendant aspersion par sprinkler haute pression	117
4.28	Hauteur de l'interface entre la fumée et l'air calculée par la méthode de Janssens [62] appliquée à des mesures de transmittance et de température pour l'aspersion par sprinkler HP	117
4.29	BAES vu dans le couloir à 1,4 m du sol au niveau de la section 4 pour trois instants durant un essai avec sprinkler HP	118
4.30	Évolution des températures dans le couloir pour l'essai avec aspersion par brouillard d'eau	119
4.31	Évolution des transmittances dans le couloir pour l'essai avec aspersion par brouillard d'eau	120
4.32	Photographie du mélange fumée/eau en sortie du couloir s'élevant sous l'effet des forces de flottabilité	120
4.33	Profils de température pendant l'aspersion par brouillard d'eau	123
4.34	Profils de transmittance pendant l'aspersion par brouillard d'eau	124

4.35	Hauteur de l'interface entre la fumée et l'air calculée par la méthode de Janssens [62] appliquée à des mesures de transmittance et de température pour l'aspersion par brouillard d'eau	124
4.36	BAES vu dans le couloir à 1,4 m du sol au niveau de la section 4 pour trois instants durant un essai avec le brouillard d'eau	125
4.37	Plan de la configuration utilisée pour les essais d'atténuation par pulvérisation d'eau sprinkler BP et brouillard d'eau	126
4.38	Spectres de transmittance dans l'infrarouge pour les trois technologies d'aspersion	127
4.39	Profils de température comparant l'effet des trois technologies d'aspersion sur la stratification thermique	128
4.40	Profils de transmittance comparant l'effet des trois technologies d'aspersion sur la stratification optique	128
5.1	Profils expérimentaux de température (essai #14 dans Tableau 4.13) comparés à trois simulations avec FDS6 pour des conditions limites aux parois différentes : 1-type béton ; 2-parois réelles et 3-parois adiabatiques	136
5.2	Évolution temporelle de la puissance du feu prescrite pour les simulations	138
5.3	Granulométrie prescrite à l'injection de la buse pour les trois technologies simulées	140
5.4	Champs de concentration en eau dans le plan longitudinal de la pulvérisation par sprinkler BP	141
5.5	Profils de diamètre de Sauter et de concentration en gouttelettes d'eau dans le couloir extraits de FDS : sprinkler BP	142
5.6	Champs de concentration en eau dans le plan longitudinal de la pulvérisation par sprinkler HP	144
5.7	Profils de diamètre de Sauter et de concentration en gouttelettes d'eau dans le couloir extraits de FDS : sprinkler HP	144
5.8	Champs de concentration en eau dans le plan longitudinal de la pulvérisation par brouillard	146
5.9	Profils de diamètres de Sauter et de concentration en gouttelettes d'eau dans le couloir extraits de FDS : brouillard d'eau	146
5.10	Champs de température et de concentration en suie dans le plan longitudinal du couloir avant aspersion, à t_0+420 s	149
5.11	Profils de température et de coefficient d'extinction (transmittance) évalués numériquement avant aspersion	150
5.12	Bloc Autonome d'Éclairage de Sécurité (BAES)	152
5.13	Champs de température et de concentration en suie induits par la pulvérisation par sprinkler BP sur le milieu enfumé dans le plan longitudinal médian du couloir (champs moyens durant la phase d'aspersion)	153
5.14	Profils moyens de température extraits de FDS durant le temps d'aspersion par Sprinkler BP comparés aux profils de température expérimentaux mesurés	156
5.15	Profils moyens de température extraits de FDS durant la phase d'aspersion par Sprinkler BP pour différentes tailles de gouttes	157
5.16	Profils de diamètres de Sauter, de fractions volumiques en eau et suie extraits de FDS durant l'aspersion par sprinkler BP sur le milieu enfumé	159
5.17	Profils de transmittance évaluée numériquement sur la base des fractions volumiques et du diamètre de goutte comparés aux profils expérimentaux : sprinkler BP	160

5.18	Évolution du contraste en fonction de l'épaisseur du milieu homogène équivalent pour les parties basse et haute du couloir durant l'aspersion par sprinkler BP . . .	160
5.19	BAES vu au travers de trois épaisseurs de milieu absorbant et diffusant en partie basse et haute du couloir durant l'aspersion par sprinkler BP : échelle mettant en avant la notion de contraste	161
5.20	BAES vu au travers de trois épaisseurs de milieu absorbant et diffusant en partie basse et haute du couloir durant l'aspersion par sprinkler BP : échelle tenant compte de l'intensité lumineuse	162
5.21	Autre type de BAES vu au travers de trois épaisseurs de milieu absorbant et diffusant en partie basse et haute du couloir durant l'aspersion par sprinkler BP : échelle mettant en avant la notion de contraste	164
5.22	Champs de température et de concentration en suie induits par la pulvérisation par sprinkler HP sur le milieu enfumé dans le plan longitudinal médian du couloir (champs moyens durant la phase d'aspersion)	167
5.23	Profils moyens de température extraits de FDS durant le temps d'aspersion par Sprinkler HP comparés aux profils de température expérimentaux mesurés	169
5.24	Profils moyens de température extraits de FDS durant la phase d'aspersion par Sprinkler HP pour différentes tailles de gouttes	170
5.25	Profils de diamètres de Sauter, de fractions volumiques en eau et suie extraits de FDS durant l'aspersion par sprinkler HP sur le milieu enfumé	172
5.26	Profils de transmittance évaluée numériquement sur la base des fractions volumiques et du diamètre de goutte comparés aux profils expérimentaux : sprinkler HP	173
5.27	Évolution du contraste en fonction de l'épaisseur du milieu homogène équivalent pour les parties basse et haute du couloir durant l'aspersion par sprinkler HP . . .	173
5.28	BAES vu au travers de trois épaisseurs de milieu absorbant et diffusant en partie basse et haute du couloir durant l'aspersion par sprinkler HP : échelle mettant en avant la notion de contraste	174
5.29	BAES vu au travers de trois épaisseurs de milieu absorbant et diffusant en partie basse et haute du couloir durant l'aspersion par sprinkler HP : échelle tenant compte de l'intensité lumineuse	175
5.30	Autre type de BAES vu au travers de trois épaisseurs de milieu absorbant et diffusant en partie basse et haute du couloir durant l'aspersion par sprinkler HP : échelle mettant en avant la notion de contraste	177
5.31	Champs de température et de concentration en suie induits par la pulvérisation par brouillard d'eau sur le milieu enfumé dans le plan longitudinal médian du couloir (champs moyens durant la phase d'aspersion)	179
5.32	Profils moyens de température extraits de FDS durant le temps d'aspersion par brouillard d'eau comparés aux profils de température expérimentaux mesurés . .	182
5.33	Profils de diamètres de Sauter, de fractions volumiques en eau et suie extraits de FDS durant l'aspersion par brouillard d'eau sur le milieu enfumé	183
5.34	Profils de transmittance évaluée numériquement sur la base des fractions volumiques et du diamètre de goutte comparés aux profils expérimentaux : brouillard d'eau	184
5.35	Évolution du contraste en fonction de l'épaisseur du milieu homogène équivalent pour les parties basse et haute du couloir	185
5.36	Distance de visibilité pour le milieu homogène équivalent en fonction de la résolution comparée à l'évaluation de Jin	186

5.37	BAES vu au travers de trois épaisseurs de milieu absorbant et diffusant en partie basse et haute du couloir durant l'aspersion par brouillard d'eau : échelle mettant en avant la notion de contraste	187
5.38	Évolution du contraste des différentes indications du BAES en fonction de la distance : évaluation de la distance de visibilité par la notion de contraste	189
5.39	BAES vu au travers de trois épaisseurs de milieu absorbant et diffusant en partie basse et haute du couloir durant l'aspersion par brouillard d'eau : échelle tenant compte de l'intensité lumineuse	190
5.40	Autre type de BAES vu au travers de trois épaisseurs de milieu absorbant et diffusant en partie basse et haute du couloir durant l'aspersion par brouillard d'eau : échelle mettant en avant la notion de contraste	191

Liste des tableaux

1.1	Hauteur d'interface calculée pour quatre profils théoriques de température et par quatre méthodes différentes	11
1.2	Classification des brouillards d'eau [85]	12
2.1	Diodes lasers installées dans le contrôleur	36
2.2	Récapitulatif des paramètres de test n°1 et 2	39
2.3	Résultats de transmittance pour la justesse du dispositif, opacimètre 101 à 108	48
2.4	Résultats de transmittance pour la justesse du dispositif, opacimètre 201 à 208	48
3.1	Angle d'émission lambertienne limitée pour différentes valeur de coefficient de diffusion et d'épaisseur optique	70
3.2	Transmittance calculée pour les 3 valeurs de critère de convergence en fonction de la distance	71
3.3	Transmittance calculée pour les 3 valeurs de critère de convergence en fonction du coefficient de diffusion	72
3.4	Diamètres testés pour la sensibilité	73
3.5	Diamètres testés pour la sensibilité	75
3.6	Résolution de la Mire USAF1951 en nombre de paires de lignes pour 1 mm	77
4.1	Caractéristiques thermiques des matériaux constitutifs des parois et du plafond	86
4.2	Liste, valeur et source des composantes d'incertitudes prises en compte pour la pesée du foyer [11]	93
4.3	Étiquette et position des mesures de température	94
4.4	Liste, valeur et source des composantes d'incertitude prises en compte pour la température de gaz [11]	95
4.5	Étiquette et position des mesures de transmittance	96
4.6	Liste, valeur et source des composantes d'incertitude prises en compte pour la transmittance [11]	96
4.7	Liste des essais de répétabilité réalisés	98
4.8	Calcul de la hauteur libre de fumée par les différentes méthodes appliquées aux profils de température et de transmittance	102
4.9	Hauteur d'interface entre les couches supérieure et inférieure pendant la pulvérisation par sprinkler BP et valeurs moyennes de température et de transmittance pour chaque couche	108
4.10	Hauteur d'interface entre les couches supérieure et inférieure pendant la pulvérisation par sprinkler HP et valeurs moyennes de température et de transmittance pour chaque couche	115

4.11	Hauteur d'interface entre les couches supérieure et inférieure pendant la pulvérisation par brouillard d'eau et valeurs moyennes de température et de transmittance pour chaque couche	121
4.12	Récapitulatif des valeurs de transmittance et de température mesurée pendant l'essai, avant aspersion et pour chaque technologie au niveau des sections 2 (en amont de l'aspersion et 4 (en aval de l'aspersion)	130
4.13	Liste des essais réalisés	131
4.14	(suite) Liste des essais réalisés	132
5.1	Production de gaz et enthalpies de combustion pour l'heptane en conditions bien ventilée et incomplète - extrait de [124]	137
5.2	Récapitulatif des données d'entrée pour la simulation des technologies d'aspersion	138
5.3	Coefficients de diffusion calculés par la théorie de Mie en partie basse du couloir et rayonnement transmis sur le chemin optique de 30 cm pour le sprinkler BP . .	143
5.4	Coefficients de diffusion calculés par la théorie de Mie en partie haute du couloir et rayonnement transmis sur le chemin optique de 30 cm pour le sprinkler BP . .	143
5.5	Coefficients de diffusion calculés par la théorie de Mie en partie basse du couloir et rayonnement transmis sur le chemin optique de 30 cm pour le sprinkler HP . .	145
5.6	Coefficients de diffusion calculés par la théorie de Mie en partie haute du couloir et rayonnement transmis sur le chemin optique de 30 cm pour le sprinkler HP . .	145
5.7	Coefficients de diffusion calculés par la théorie de Mie en partie basse du couloir et rayonnement transmis sur le chemin optique de 30 cm pour le brouillard d'eau	147
5.8	Coefficients de diffusion calculés par la théorie de Mie en partie haute du couloir et rayonnement transmis sur le chemin optique de 30 cm pour le brouillard d'eau	147
5.9	Calcul de la hauteur libre de fumée par les différentes méthodes appliquées aux profils de température et de transmittance	151
5.10	Paramètres pour la modélisation du sprinkler BP pour les 9 simulations de sensibilité	154
5.11	Valeurs de diamètre de Sauter et de concentration en suies et en eau extraites de FDS dans le cas de la pulvérisation par sprinkler BP sur la nappe de fumée - Calcul des coefficients d'absorption et de diffusion et du flux transmis : partie basse	163
5.12	Valeurs de diamètre de Sauter et de concentration en suies et en eau extraites de FDS dans le cas de la pulvérisation par sprinkler BP sur la nappe de fumée - Calcul des coefficients d'absorption et de diffusion et du flux transmis : partie haute	163
5.13	Propriétés du milieu homogène équivalent de la partie basse du couloir pour le sprinkler BP	164
5.14	Propriétés du milieu homogène équivalent de la partie haute du couloir pour le sprinkler BP	164
5.15	Valeurs de contraste pour deux BAES vus au travers d'un milieu semi-transparent contenant de la fumée et des gouttes injectées par le sprinkler BP	165
5.16	Paramètres pour la modélisation du sprinkler HP pour les 9 simulations de sensibilité	167
5.17	Valeurs de diamètre de Sauter et de concentration en suies et en eau extraites de FDS dans le cas de la pulvérisation par sprinkler HP sur la nappe de fumée pour le calcul de la visibilité en partie basse	176
5.18	Valeurs de diamètre de Sauter et de concentration en suies et en eau extraites de FDS dans le cas de la pulvérisation par sprinkler HP sur la nappe de fumée pour le calcul de la visibilité en partie haute	176
5.19	Propriétés du milieu homogène équivalent de la partie basse du couloir pour le sprinkler HP	177

5.20	Propriétés du milieu homogène équivalent de la partie haute du couloir pour le sprinkler HP	177
5.21	Valeurs de contraste pour deux BAES vus au travers d'un milieu semi-transparent contenant de la fumée et des gouttes injectées par le sprinkler HP	178
5.22	Valeurs de diamètre de Sauter et de concentration en suies et en eau extraites de FDS dans le cas de la pulvérisation par brouillard d'eau sur la nappe de fumée pour le calcul de la visibilité en partie basse	188
5.23	Valeurs de diamètre de Sauter et de concentration en suies et en eau extraites de FDS dans le cas de la pulvérisation par brouillard d'eau sur la nappe de fumée pour le calcul de la visibilité en partie haute	188
5.24	Propriétés du milieu homogène équivalent de la partie basse du couloir pour le brouillard d'eau	189
5.25	Propriétés du milieu homogène équivalent de la partie haute du couloir pour le brouillard d'eau	189
5.26	Valeurs de contraste pour deux BAES vus au travers d'un milieu semi-transparent contenant de la fumée et des gouttes injectées par aspersion par brouillard d'eau	189

Liste des symboles

INDICES

0	Grandeur considérée à l'instant initial
air	Grandeur relative à l'air ambiant
eau	Grandeur relative à l'eau
fond	Grandeur relative au fond de l'objet
low	Grandeur relative à la couche inférieure
max	Valeur maximale de la grandeur
Mie	Grandeur radiative calculée par la théorie de Mie
min	Valeur minimale de la grandeur
mélange	Grandeur relative au mélange suie + gouttes
objet	Grandeur relative à l'objet observé
p	Grandeur relative à la particule
Rayleigh	Grandeur radiative calculée par l'approximation de Rayleigh
suie	Grandeur relative à la suie
up	Grandeur relative à la couche supérieure
x	Composante selon \vec{e}_x de la grandeur considérée
y	Composante selon \vec{e}_y de la grandeur considérée
z	Composante selon \vec{e}_z de la grandeur considérée

LETTRES ROMAINES

$(x; y; z)$	Repère dans l'espace, [-]
\dot{m}	Débit massique, [kg.m ⁻² .s ⁻¹]
\dot{m}''	Débit surfacique du combustible, [kg.m ⁻² .s ⁻¹]
\dot{m}''_{∞}	Débit surfacique limite du combustible, [kg.m ⁻²]
\dot{Q}_{con}	Puissance convective, [W]
\dot{Q}_c	Puissance dégagée par la combustion, [W]
\dot{Q}_{rad}	Puissance radiative, [W]

Liste des symboles

A	Surface du foyer source, [m ²]
a_n, b_n	Coefficients de Mie, [-]
C	Contraste de luminance, [-]
C_m	Constante liée à la géométrie de la tête/buse pour le calcul de d_{v50} , [-]
C_p	Capacité calorifique, [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
C_s	Concentration massique de suie, [kg.m ⁻³]
C_v	Critère de convergence, [-]
d	Diamètre, [m]
d_i	Diamètre de la i ème classe de goutte, [m]
D_n	Diamètre nominal de la tête sprinkler, [m]
d_{32}	Diamètre de Sauter, [m]
d_{v50}	Diamètre médian volumique de la distribution de gouttes, [m]
d_{v90}	Diamètre pour lequel 90 % du volume d'eau est contenu par des gouttes de diamètre inférieur, [m]
DO	Densité optique, [bels]
DO_{10}	Densité optique, [décibels]
f_v	Fraction volumique, [m ³ /m ³]
H	Dimension caractéristique, [m]
h	Coefficient de convection, [W.m ⁻² .K ⁻¹]
I	Luminance, [W.m ⁻² .sr ⁻¹]
$I(x; y)$	Matrice image, [-]
K	Nombre de débit, [m ³ .s ⁻¹ .bar ^{-0,5}]
k	Indice d'absorption, [-]
L	Longueur du trajet optique, [m]
L_v	Chaleur latente d'évaporation, [J.kg ⁻¹]
$L_{\text{diffusion}}$	Longueur que parcourt le quantum avant d'être dévié, [m]
m	Indice complexe relatif, [-] ou masse [kg]
n	Indice de réfraction, [-]
n^*	Indice complexe de réfraction, [-]
n_0	Indice de l'air, [-]
N_c	Nombre de classes de diamètre, [-]
n_i	Nombre de gouttes de la classe de diamètre i , [-]
N_{quanta}	Nombre de quanta lancés, [-]

$O(x; y)$	Matrice objet, [-]
P	Pression, [Pa]
$P(\Theta)$	Fonction de phase, [-]
Q	Énergie transportée par un quantum, [J]
$Q_{\lambda\text{abs}}$	Efficacité spectrale d'absorption, [-]
$Q_{\lambda\text{diff}}$	Efficacité spectrale de diffusion, [-]
$Q_{\lambda\text{ext}}$	Efficacité spectrale d'extinction, [-]
Q_v	Débit volumique d'eau pulvérisée, [m ³ .s ⁻¹]
R	Nombre tiré aléatoirement, [-]
S_1, S_2	Fonctions d'amplitude complexes, [-]
S_x	Direction du quantum selon l'axe $e_x^{\vec{}}$, [-]
S_y	Direction du quantum selon l'axe $e_y^{\vec{}}$, [-]
S_z	Direction du quantum selon l'axe $e_z^{\vec{}}$, [-]
T	Température, [K]
t	Temps, [s]
TF	Transformée de Fourier, [-]
Tr	Transmittance, [-]
U	Tension électrique, [V]
$u(i)$	Incertitude absolue de la grandeur « i »
V	Visibilité, [m]
v_{inj}	Vitesse d'injection des gouttes, [m.s ⁻¹]
Var_{ϕ}	Variance, [-]
x_p	Paramètre de taille, [-]
z_{int}	Hauteur de l'interface air/fumée, [m]

LETTRES GRECQUES

β	Coefficient d'extinction, $\beta = \kappa + \sigma$, [m ⁻¹]
χ	Rendement de combustion, [-]
ΔH_c	Enthalpie de combustion pour un feu bien ventilé, [J.kg ⁻¹]
ΔH_{ch}	Enthalpie de combustion, [J.kg ⁻¹]
ΔH_{con}	Part convective de l'enthalpie de combustion, [J.kg ⁻¹]
ΔH_{rad}	Part radiative de l'enthalpie de combustion, [J.kg ⁻¹]
κ	Coefficient d'absorption, [m ⁻¹]
Λ	Conductivité thermique, [W.m ⁻¹ . K ⁻¹]

Liste des symboles

λ	Longueur d'onde, [m]
μ	Viscosité dynamique, [kg.m ⁻¹ . s ⁻¹]
ν	Viscosité cinématique, [m ² . s ⁻¹]
ω_λ	Albédo spectral, $\omega_\lambda = \sigma_\lambda/\beta_\lambda$, [-]
Φ	Angle formé entre la normale à la direction incidente $\vec{\Omega}$ et la nouvelle direction de propagation $\vec{\Omega}'$, [rad]
Ψ_0	Angle d'émission polaire, [rad]
ψ_n, ζ_n	Fonctions de Riccati - Bessel, [-]
ρ	Masse volumique, [kg.m ⁻³]
σ	Coefficient de diffusion, [m ⁻¹]
σ_b	Constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma_b = 5,67 \cdot 10^{-8}$, [W.m ⁻² .K ⁻⁴]
σ_τ	Écart-type sur les mesures de la transmittance, [-]
$\sigma_{\text{air/eau}}$	Tension de surface eau/air, [N.m ⁻¹]
σ_s	Surface d'extinction spécifique par unité massique de suie, [kg.m ⁻³]
σ_T	Écart-type sur les mesures de la température, [K]
Θ	Angle de diffusion entre la direction incidente $\vec{\Omega}$ et la nouvelle direction de propagation $\vec{\Omega}'$, [rad]
θ_0	Angle d'émission polaire, [rad]
θ_{max}	Angle maximal pour l'émission lambertienne limitée, [rad]
φ	Puissance reçue par le détecteur, [W]

NOMBRES SANS DIMENSION

Fr	Nombre de Froude, $Fr = v^2/gH$
Re	Nombre de Reynolds, $Re = \rho V d/\mu$
We	Nombre de Weber, $We = \rho v_{\text{inj}}^2 D_n/\sigma_{\text{air/eau}}$

VECTEURS

$\vec{\Omega}$	Direction de propagation du quantum, [-]
\vec{e}_x	Vecteur du repère orthonormé selon x , [-]
\vec{e}_y	Vecteur du repère orthonormé selon y , [-]
\vec{e}_z	Vecteur du repère orthonormé selon z , [-]
\vec{g}	Accélération gravitationnelle, [m.s ⁻²]
\vec{v}	Vecteur vitesse, [m.s ⁻¹]

ABRÉVIATIONS

BP	Basse Pression
----	----------------

CFD	Computational Fluid Dynamics
CNF	Cumulative Number Fraction
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
CVF	Cumulative Volume Fraction
ERP	Établissement Recevant du Public
FDS	Fire Dynamics Simulator
HP	Haute Pression
HRR	Heat Release Rate
IGH	Immeuble de Grande Hauteur
LEMTA	Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée
NIST	National Institute of Standards and Technology
PSF	Point Spread Function
PSF2D	Point Spread Function bidimensionnelle

Introduction générale

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre de la sécurité incendie en bâtiment. En France, la stratégie actuelle de sécurité incendie dans les ERP se fonde sur des principes dont le premier indique que « les bâtiments et locaux où sont installés les ERP doivent être construits de manière à permettre l'évacuation rapide et en bon ordre de la totalité des occupants ou leur évacuation différée si celle-ci est rendue nécessaire ». Pour cela, la réglementation française préconise de garder un espace libre de fumée près du sol le plus longtemps possible afin de favoriser l'auto-évacuation des occupants et l'intervention des services de secours. Cette stratégie repose notamment sur le désenfumage, via l'évacuation naturelle ou l'extraction mécanique de la fumée.

Un système d'aspersion peut être installé dans les bâtiments. Il existe deux technologies d'aspersion, le sprinkler plus ancienne et le brouillard d'eau apparue plus récemment. Elles se différencient par la taille des gouttes pulvérisées. La technologie du brouillard d'eau produit de petites gouttes telles que 90 % du volume d'eau est composé par des gouttes de diamètre inférieur à 1 mm à 1 m de la buse [2, 104]. Néanmoins, l'installation des technologies d'aspersion soulève de nouvelles questions pour pouvoir définir des modalités d'utilisation des pulvérisations de type brouillard d'eau.

L'objectif du projet de recherche exposé ici était de comprendre, caractériser et évaluer les effets de stratification et déstratification « thermique et optique » d'un environnement enfumé pouvant comprendre des gouttelettes d'eau en suspension de tailles différentes. Un des enjeux scientifiques était de permettre l'estimation de la visibilité dans un environnement enfumé. Une application pratique de ce projet est de revoir en particulier les corrélations usuelles de Jin où la visibilité est basée sur l'inverse du coefficient d'extinction, corrélations établies en milieu principalement absorbant (alors que les gouttes mélangées aux fumées produisent un milieu particulièrement diffusant selon la taille des particules).

Ce projet, débuté en septembre 2012, s'appuie sur une campagne d'essais menée dans une configuration dite « pièce-couloir » sur le site de Champs-sur-Marne du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). Ce travail de recherche a également permis de développer une métrologie fine d'estimation de l'opacité dans le spectre visible. L'étude complète des phénomènes ne pouvant s'effectuer sur le seul plan expérimental, ce projet a été mené parallèlement au développement d'un outil de calcul de la visibilité sur la base de la théorie de Mie et de la méthode de Monte-Carlo. Ce développement de l'outil de calcul est venu compléter l'analyse des phénomènes d'interactions eau/fumée induits par l'aspersion sur l'environnement enfumé. Ce

document s'articule autour de 5 chapitres visant à décrire la démarche du travail et les résultats obtenus durant ces trois années. Le lien est fait entre les essais et les aspects numériques par le code de calcul FDS. La simulation des essais par ce code CFD permet d'accéder à des effets dynamiques difficilement mesurables. Ces simulations permettent également de calculer des grandeurs tridimensionnelles utilisées dans l'estimation de la visibilité.

Le Chapitre 1 sert de synthèse bibliographique et introduit le contexte général de la recherche pour la sécurité incendie en bâtiment. Il permet de décrire les phénomènes liés au déclenchement d'un feu dans un bâtiment ainsi que les interactions entre l'aspersion et le milieu enfumé. Il sert également d'introduction notamment en ce qui concerne la démarche adoptée dans ce travail de thèse.

Le Chapitre 2 a pour but de décrire le système de métrologie optique développé et appliqué à la configuration « pièce-couloir » mise à disposition au CSTB pour les essais de feu à échelle 1. Ce chapitre donne les principes de mesures de l'opacification et les principaux problèmes rencontrés lors de la mise en œuvre du dispositif de mesure en condition de feu et d'aspersion.

Le Chapitre 3 décrit le développement du code de calcul de la visibilité dans un milieu absorbant et diffusant (fumée/gouttes d'eau par exemple). Dans un premier temps, les principes du calcul et le développement du code sont donnés. Ensuite, quelques rappels de la théorie de Mie et des méthodes de Monte-Carlo sont ajoutés. Dans un second temps, la sensibilité du code et notamment le choix des paramètres d'entrée sont expliqués. Pour finir, l'application au calcul de la visibilité est détaillée sur le cas d'un milieu essentiellement diffusant.

Le Chapitre 4 a pour objectif de présenter les résultats expérimentaux obtenus lors des essais dans la configuration appelée « pièce-couloir ». L'instrumentation mise en place pour comprendre et quantifier les phénomènes d'interactions eau/fumée lors de l'aspersion est détaillée. Les incertitudes liées à la répétabilité et aux erreurs de mesures sont expliquées. Les protocoles d'essais sont également décrits dans ce chapitre, ainsi que les choix concernant la configuration, la position de la métrologie et les scénarii s'y rapportant. Enfin, les résultats de l'étude sont présentés et analysés montrant les différences observées selon la technologie d'aspersion utilisée dans la lutte contre l'incendie.

Le Chapitre 5 vise à présenter les principaux résultats numériques de ce travail de recherche. Dans un premier temps, les simulations avec FDS permettent d'accéder à des grandeurs difficilement mesurables. Des conclusions complémentaires sont apportées à l'étude expérimentale sur la base de l'étude numérique. La sensibilité numérique aux paramètres d'entrée du code permet également d'évaluer l'effet des granulométries et les effets thermiques et optiques résultants pour chaque technologie d'aspersion. La visibilité est également estimée sur la base du contraste sur une image reconstruite numériquement.

Chapitre 1

Contexte de la recherche

Sommaire

1.1 Feu dans un bâtiment	5
1.1.1 Phénomènes physiques	5
1.1.2 Caractérisation de la stratification de l'environnement	6
1.2 Aspersion d'eau	11
1.2.1 Technologies d'aspersion	11
1.2.2 Caractérisation de l'aspersion	12
1.2.3 Phénomènes physiques	14
1.2.4 Incidence sur l'environnement stratifié	19
1.3 Risques liés à un incendie et conditions de visibilité	20
1.3.1 Risques liés à un incendie	20
1.3.2 En quoi la perte de visibilité constitue-t-elle un risque?	22
1.4 Démarche du travail de thèse	27

Ce premier chapitre vise à décrire le contexte de la recherche dans le domaine de la sécurité incendie. Les généralités sur les feux et les techniques d'aspersion sont décrites, notamment sur les phénomènes physiques liés à la configuration des bâtiments. Ce chapitre permet également de faire l'état des recherches portant sur les interactions entre l'aspersion d'eau et la fumée. De plus, les risques en cas de feu pour les personnes sont abordés et la notion de visibilité est introduite.

La première partie décrit brièvement les phénomènes lorsqu'un feu se déroule dans un bâtiment. Elle aborde la combustion ainsi que les effets consécutifs au confinement et à la ventilation. Ensuite, du fait de l'objet de la présente thèse, une étude bibliographique est faite sur la manière de caractériser un environnement de feu.

La deuxième partie porte sur l'aspersion. Dans un premier temps, les technologies d'aspersion d'eau qui sont actuellement installées sont présentées. Ensuite, nous identifions les caractéristiques principales des sprays pour la recherche scientifique dans le domaine de la sécurité incendie. Enfin, les phénomènes liés à l'aspersion d'eau sont décrits en s'appuyant notamment sur les résultats de recherches scientifiques.

La troisième partie porte sur les aspects liés aux risques dans un incendie en bâtiment. Cette partie se découpe en deux sous-parties : la première aborde les risques auxquels peuvent être

exposées les personnes lors d'un feu ; la seconde sous-partie introduit la notion de visibilité et aborde les causes de perte de visibilité.

1.1 Feu dans un bâtiment

1.1.1 Phénomènes physiques

La combustion est une réaction exothermique. Elle résulte dans la flamme de l'oxydoréduction des gaz combustibles provenant d'un solide, d'un liquide ou d'un gaz. La pyrolyse est un phénomène de dégradation du solide sous l'effet de la chaleur, formant un gaz combustible pouvant prendre feu en présence de comburant. Pour les combustibles liquides, on parle de vaporisation. La dégradation ou vaporisation du combustible est entretenue par le flux de chaleur reçu par le combustible. Cette chaleur provient en partie du rayonnement de la flamme.

La réaction de combustion produit de la fumée. La fumée est un mélange de gaz, composé de dioxyde de carbone (CO_2), de monoxyde de carbone (CO), de vapeur d'eau (H_2O), de particules de suies (particules carbonées de taille variable) et de gouttelettes d'eau. Ces gaz et particules sont en proportions variables suivant la réaction de combustion qui dépend elle-même de la nature du combustible et du caractère complet ou non de la combustion [34, 110].

Dans un local, la fumée produite par la combustion suit un mouvement ascendant sous l'effet des forces de flottabilité. En s'élevant, elle entraîne de l'air, se dilue et se refroidit. Ce courant vers le haut de fumée et d'air est appelé un panache [50]. Dans un environnement ouvert, en l'absence de vent et en négligeant les effets de l'atmosphère, ce mélange retomberait dès lors que les forces de flottabilité ne seraient pas suffisamment importantes [116, 117]. Dans un local, le panache impacte le plafond et la fumée s'écoule sous le plafond jusqu'à rencontrer un obstacle pouvant être les parois verticales du local ou un écran de cantonnement. Ensuite, la couche de fumée s'épaissit. Cet écoulement de fumée est schématisé sur la Figure 1.1. Deux cas se distinguent en fonction des ouvertures : soit la fumée emplit le local jusqu'à étouffer le feu par manque de comburant ; soit l'environnement se décompose en deux zones [1, 34]. Dans le second cas, du fait de la différence de densité, il y a une couche de fumée chaude en partie haute, et une couche d'air frais en partie basse. Du fait de leur composition, la fumée est opaque et la couche d'air frais est transparente. L'épaisseur de la couche de fumée varie relativement au feu (puissance, dimensions et surface au sol), au volume du local (pièce, hall, atrium, ...), à ses ouvertures (fenêtres, portes, aération, ...) et aux systèmes de ventilation.

La ventilation d'un local par ses ouvertures (portes, fenêtres) ou ses systèmes de ventilation (ventilation de confort, désenfumage) influe sur l'environnement du feu (enfumage du local) mais également sur le développement du feu. En effet, l'amenée d'air permet un apport en comburant au foyer, nécessaire à la combustion. Ainsi, la puissance du feu dans le local est limitée par la taille de ses ouvertures. Dans ce cas, on parle de « contrôle par la ventilation ». Le chercheur japonais Kawagoe a étudié ce phénomène expérimentalement [70]. Il a établi une relation entre les dimensions de l'ouverture (hauteur, surface) et la puissance du feu. À titre d'illustration, dans un local comprenant une porte de hauteur 2 m et de largeur 1 m, le débit massique d'air entrant est estimé à 1,41 kg/s. Ainsi, la puissance maximale du feu correspondante est de l'ordre de 4,2 MW et la durée du feu de l'ordre de 15 minutes en considérant une masse totale de combustible comprise entre 200 et 250 kg.

Un feu dégage de la chaleur. Des transferts thermiques en résultent. Il existe trois modes de transfert thermique. Le premier est le transfert radiatif ou le transfert par rayonnement. Il

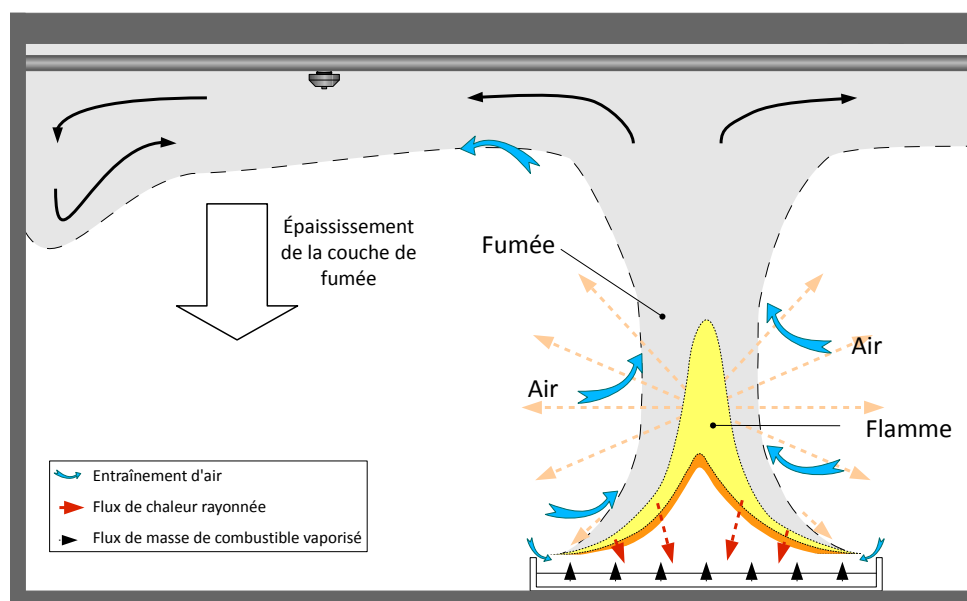


FIGURE 1.1 – Représentation des flux de matière et d'énergie au droit du foyer dans une pièce [11]

intervient à distance directement émis par la flamme, les gaz de combustion et les parois chauffées. Le deuxième mode est le transfert de chaleur par convection. Les gaz chauds s'écoulent dans les locaux. Au contact des parois, les gaz induisent une élévation de température de ces parois. Le dernier mode de transfert thermique est le transfert par conduction, intervenant par diffusion de chaleur à l'intérieur d'un solide, dans les parois du local par exemple.

La couche de fumée et les parois du local, du fait de leur température, émettent un rayonnement. Ce rayonnement est en partie reçu par le foyer. Cela contribue à la dégradation/vaporisation du combustible et ainsi à l'entretien de la combustion, voire à l'augmentation de la puissance. Ce rayonnement peut également être reçu par des foyers potentiels (fauteuil, meuble, matériel électronique...) ce qui peut engendrer l'extension de la zone de feu. En résumé, l'activité d'un foyer dans un local est potentiellement supérieure à celle en milieu ouvert du fait du confinement.

1.1.2 Caractérisation de la stratification de l'environnement

Comme indiqué précédemment, lors d'un feu dans un bâtiment, on observe la formation de deux zones avec en partie haute, une nappe de fumée opaque chargée en gaz de combustion et en particules et en partie basse, une zone d'air frais et transparent. On parle alors « d'environnement stratifié ». C'est cet état que la sécurité incendie en France cherche à préserver par des systèmes de désenfumage. Cette stratégie a pour objectif de faciliter l'auto-évacuation des personnes et de permettre l'intervention des services de secours.

La question qui se pose alors concerne la caractérisation de cet environnement stratifié. Cette caractérisation peut-elle se baser sur l'une des caractéristiques physiques de la fumée à savoir sa température, sa composition ou son opacité? Ou au contraire doit-elle intégrer l'ensemble de ces caractéristiques? La recherche bibliographique a mis en évidence que l'environnement stratifié

est souvent caractérisé à partir du seul gradient vertical de température [27, 37, 47, 62, 100] et parfois par la composition de l'air (concentration en CO₂) [80, 109]. Cela suppose que la présence de fumée est corrélée à une température ou à une concentration en CO₂ supérieure à la valeur ambiante. Des auteurs ont vérifié expérimentalement cette corrélation, notamment dans la configuration tunnel comme Ingason et Persson entre l'opacité du milieu gazeux et la température de l'air [60] ainsi que Newman entre la concentration en espèces chimiques et la température de l'air [100]. Dans la section qui suit, sont présentés les modèles qui permettent de caractériser un environnement.

À partir d'une campagne d'essais sur un tunnel à échelle réelle, Newman a introduit deux variables qui permettent de rendre compte du « degré » de stratification de l'environnement [100]. Ces variables ne caractérisent pas le niveau de température atteint, mais uniquement sa répartition le long du profil vertical. De la sorte, elles donnent une indication sur l'épaisseur de la couche haute et chaude et sur celle de la couche basse et froide. Ces variables sont souvent employées dans les recherches sur les incendies en tunnel [90, 42]. Elles sont calculées comme suit :

$$S = \frac{T_{\text{plafond}} - T_{\text{sol}}}{T_{\text{moy}} - T_0} \quad (1.1)$$

$$D = \frac{T_{\text{plafond}} - T_{\text{sol}}}{T_{\text{plafond}} - T_0} \quad (1.2)$$

où T_{plafond} , T_{sol} , T_{moy} et T_0 renvoient respectivement à la température relevée près du plafond, à la température relevée près du sol, à la température moyennée sur la hauteur et à la température ambiante. À noter que la variable D est bornée entre 0 et 1. À noter également que plus la couche chaude est épaisse, plus T_{moy} tend vers T_{plafond} et plus S tend vers D .

En traçant l'évolution de D en fonction de S , Newman identifie deux gammes de valeurs, lorsque $S \geq 1,7$ et lorsque $S < 1,7$ (Figure 1.2-a). Ces deux gammes ont été confirmées par Demouge qui a compilé des mesures effectuées dans plusieurs campagnes d'essais, à échelles 1 et réduite [32]. Lorsque $S \geq 1,7$, la variable D devient constante et égale à 1, autrement dit la température relevée près du sol est égale à la température ambiante. Il n'y a donc pas de fumée près du sol et l'environnement est considéré comme stratifié. Dans ce cas, la variable S relie directement T_{plafond} et T_{moy} et permet ainsi de juger de l'épaisseur de la couche de fumée. *A contrario*, lorsque $S < 1,7$, la température relevée près du sol est différente de la valeur ambiante. Newman estime un nombre de Froude pour ces mêmes essais. Le nombre de Froude peut être défini comme $Fr = \frac{v^2}{g.L}$ où v est la vitesse constante de l'écoulement de fumée et L la longueur caractéristique (diamètre du tunnel). Il traduit physiquement le ratio entre les forces d'inertie et les forces de gravité. En traçant la variable S en fonction du nombre de Froude, il établit que la courbe évolue linéairement avec une pente négative (Figure 1.2-b). Finalement, lorsque la valeur de S est petite (inférieure à 0,15), le nombre de Froude est élevé (supérieur à 10). L'écoulement est alors piloté non pas par les forces de flottabilité mais par les forces d'inertie. Dans ce cas, l'environnement n'est plus considéré comme stratifié.

D'autres chercheurs se sont intéressés à établir une corrélation entre le profil vertical de température et une hauteur libre de fumée. Il existe un certain nombre de relations, parmi lesquelles la méthode « N-percent » proposée par Cooper [27], le modèle de Quintière *et al.* et celui de Janssens et Tran, reposant tous deux sur deux intégrations de la température [108] ainsi

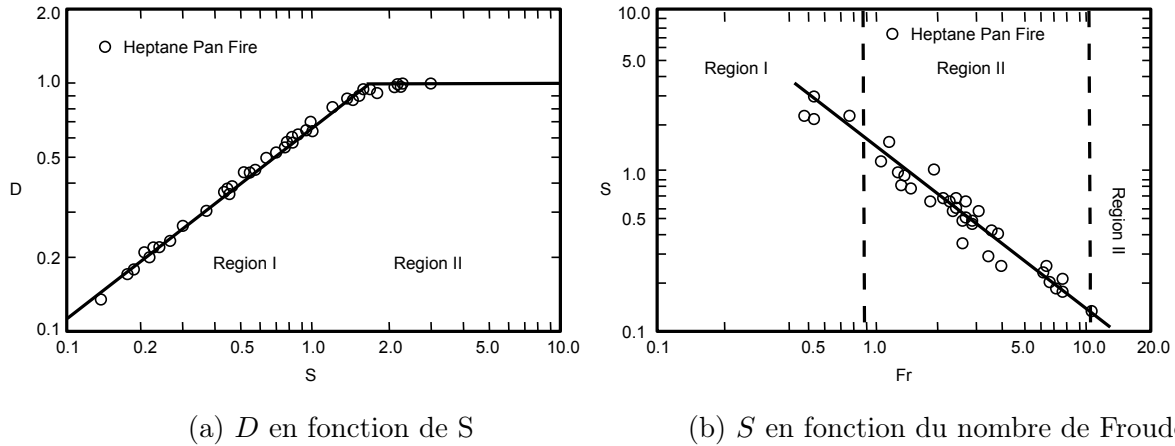


FIGURE 1.2 – Valeurs mesurées par Newman dans ses essais à échelle 1 mettant en jeu des feux d’heptane [100]

que les deux modèles de He *et al.* [47]. Ces relations visaient initialement à prédire les débits massiques aux ouvertures ou à comparer les mesures expérimentales aux prédictions de modèles numériques de type à zones [27, 47, 62, 108]. Ces relations sont aussi utilisées aujourd’hui dans la comparaison des prédictions numériques de modèles CFD et à zones.

La méthode « N-percent » a été établie par Cooper en 1982 sur la base d’essais dans une configuration bâtementaire [27]. Ces essais sont menés dans une ou deux pièces, adjacentes à un couloir. Les pièces et le couloir sont connectés par des ouvertures. Un brûleur méthane de puissance comprise entre 25 et 225 kW est placé dans une des pièces. L’enfumage des pièces est mesuré à l’aide de thermocouples de type K et de transmissiomètres [15]. Un enregistrement vidéo permet d’évaluer qualitativement la hauteur libre de fumée grâce à des lumières placées sur les murs des locaux. La méthode des « N-percent » repose sur la température maximale atteinte sur l’axe vertical T_{\max} , de sorte que, à un instant donné t , la hauteur de stratification correspond à la hauteur où la température $T(z_{\text{int}})$ satisfait la relation suivante :

$$\frac{N}{100} = \frac{T(z_{\text{int}}, t) - T_0}{T_{\max}(t) - T_0} \quad (1.3)$$

où T_0 renvoie à la température ambiante et N à une valeur choisie entre 10, 15 et 20 par la personne qui utilise cette formule. Cooper estime lui-même que le choix de la valeur de N a une part de subjectivité [47]. En se basant sur l’enregistrement vidéo des essais, Cooper a estimé une valeur de N pour ses essais permettant de déterminer la hauteur libre de fumée, à savoir $N = 10 \%$. Nous appliquons cette méthode à deux profils de température, où l’inflexion est dans un cas très marquée et, dans l’autre cas, beaucoup moins (Figure 1.3-a et b). Il apparaît que le choix de la valeur N a un poids d’autant plus important que les deux couches sont moins distinctes. Enfin, par ailleurs, He a identifié une limite d’utilisation de ce modèle, à savoir quand la température de la couche basse est supérieure à la valeur ambiante, parfois, il n’existe pas de solution à l’Équation 1.3.

Le modèle de Quintière *et al.* et celui de Janssens et Tran sont proches [108, 62]. Ils reposent tous deux sur deux intégrations de la température. Ainsi, ces modèles considèrent la fonction $T(z)$ continue du sol au plafond. À la différence de Quintière *et al.*, Janssens et Tran reprend

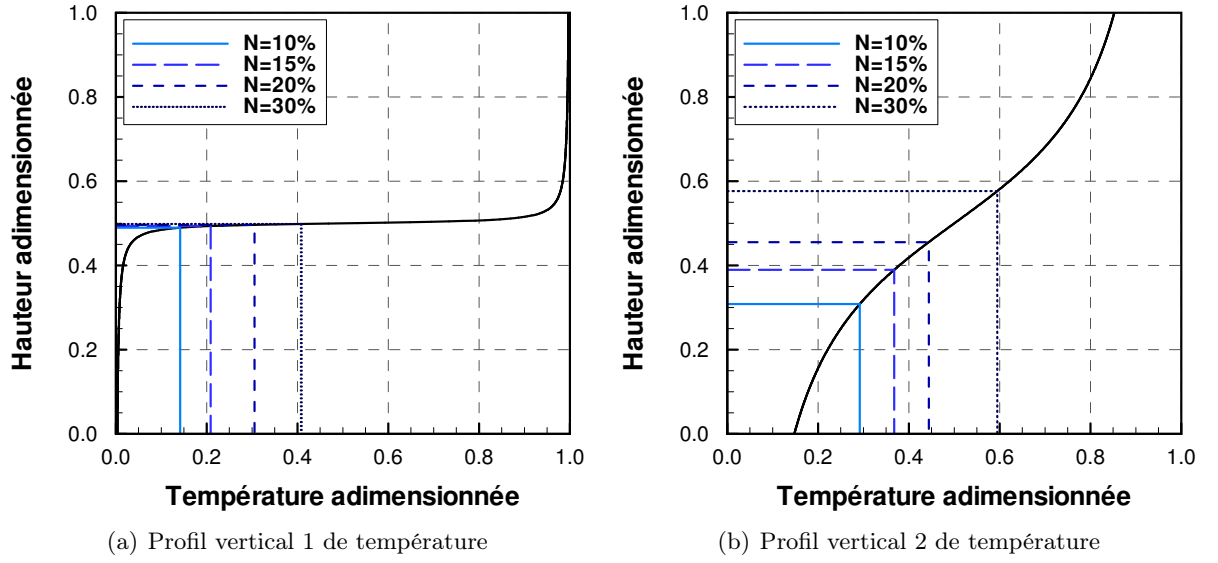


FIGURE 1.3 – Détermination de la hauteur d'interface par la méthode des « N-percent » pour des valeurs de $N = [10; 15; 20; 30]$ et pour deux profils verticaux de température

l'hypothèse de Emmons, à savoir que la température de la couche basse T_{low} est égale à la température relevée près du sol [37]. La température de la couche haute T_{up} et la hauteur d'interface z_{int} sont calculées en résolvant le système d'équations suivant à deux inconnues :

$$(H - z_{int}) \cdot T_{up} + z_{int} \cdot T_{low} = \int_0^H T(z) dz \quad (1.4)$$

$$(H - z_{int}) \cdot \frac{1}{T_{up}} + z_{int} \cdot \frac{1}{T_{low}} = \int_0^H \frac{1}{T(z)} dz \quad (1.5)$$

H désigne la hauteur de la pièce. À noter que cette méthode est celle implémentée dans le code Fire Dynamics Simulator (FDS) employé dans le Chapitre 5 pour estimer la hauteur d'interface et la température de deux couches haute et basse à partir du profil de température calculé [87, 88].

He *et al.* proposent deux autres méthodes qui se basent, à l'instar du modèle de Quintière *et al.* et de celui de Janssens et Tran, sur l'intégration de la température le long de l'axe vertical [47]. L'objectif de He *et al.* est de développer des méthodes purement mathématiques, sans empirisme ou « subjectivité ». Ces méthodes permettent de calculer le point d'inflexion du profil vertical de température $T(z)$. Pour ce faire, elles se basent sur les quantités moyennées dans chaque zone.

Dans la première méthode, « Integral Ratio Method », il s'agit de calculer, le long de l'axe vertical, deux variables r_{up} et r_{low} qui représentent deux couches, l'une *up* située au-dessus de la hauteur z et l'autre *low* en-dessous. Ces deux variables sont définies comme suit :

$$r_{up}(z) = \frac{1}{(H - z)^2} \cdot \int_z^H T(\tau) d\tau \cdot \int_z^H \frac{1}{T(\tau)} d\tau \quad (1.6)$$

$$r_{low}(z) = \frac{1}{z^2} \cdot \int_0^z T(\tau) d\tau \cdot \int_0^z \frac{1}{T(\tau)} d\tau \quad (1.7)$$

La hauteur d'interface z_{int} correspond à la hauteur où la somme des deux variables r_{up} et r_{low} est minimale :

$$r_t(z_{\text{int}}) = \min(r_u(z)) \quad (1.8)$$

$$= \min(r_{\text{up}}(z) + r_{\text{low}}(z)) \quad (1.9)$$

Dans la seconde méthode, celle des moindres-carrés (en anglais, « Least-Squares Method »), il s'agit de calculer dans un premier temps, pour chaque hauteur z , les deux variables T_{up} et T_{low} qui représentent deux couches, l'une *up* située au-dessus de la hauteur z et l'autre *low* en-dessous :

$$T_{\text{up}} = \frac{1}{(H - z)} \cdot \int_z^H T(\tau) d\tau \quad (1.10)$$

$$T_{\text{low}} = \frac{1}{z} \cdot \int_0^z T(\tau) d\tau \quad (1.11)$$

Ensuite, He *et al.* définissent une fonction de déviation du profil :

$$\sigma^2 = \frac{1}{z} \int_0^z [T(\tau) - T_{\text{low}}]^2 d\tau + \frac{1}{(H - z)} \int_z^H [T(\tau) - T_{\text{up}}]^2 d\tau \quad (1.12)$$

La hauteur d'interface z_{int} correspond à la hauteur où la fonction de déviation est minimale :

$$\sigma^2(z_{\text{int}}) = \min(\sigma^2(z)) \quad (1.13)$$

Pour comparer ces méthodes qui permettent de calculer une hauteur libre de fumée à partir d'un profil vertical de température, nous considérons quatre profils théoriques pour lesquels la transition entre les deux zones est plus ou moins marquée. Ces profils sont représentés sur la Figure 1.4. Les profils sont définis de manière discrète, avec 1000 points et le point d'inflexion théorique de la courbe est placé en $H/2 = 1,200$ m.

La hauteur d'interface calculée pour chacun de ces profils et par chacune des méthodes présentées ci-avant est indiquée dans le Tableau 1.1. Pour le profil T(1), présentant un fort gradient de température, les quatre méthodes conduisent à une hauteur d'interface d'environ 1,2 m. À noter que seule la méthode des moindres carrés *Least-Squares* renvoie exactement la valeur de 1,2 m. Lorsque le profil de température est moins marqué i.e. le gradient diminue, les quatre méthodes donnent des résultats différents. La méthode *Least-Squares* proposée par He renvoie toujours au point d'inflexion de la courbe, à savoir 1,2 m. Les trois autres méthodes donnent des résultats inférieurs. L'écart atteint 80 cm pour le profil T(4) pour une pièce mesurant 2,50 m. À noter que l'écart entre les résultats de la méthode des N-% change fortement avec des valeurs de N différentes. Ainsi, le choix de la valeur de N est d'autant plus important que le profil de température est peu marqué.

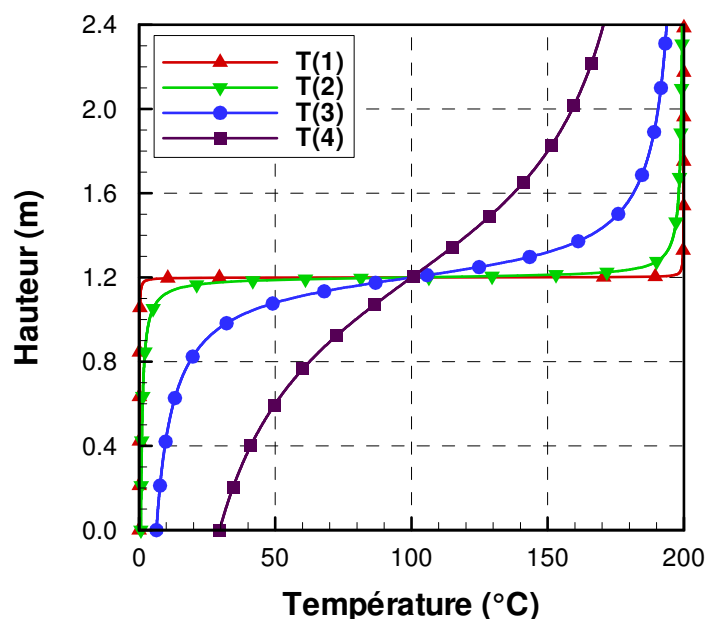


FIGURE 1.4 – Profils de température théoriques, définis pour comparer la méthode « N-percent » proposée par Cooper, le modèle de Quintière *et al.* et celui de Janssens et Tran, ainsi que les deux modèles de He *et al.*

Profil	T(1)	T(2)	T(3)	T(4)
N-10 %	1,199	1,163	0,901	0,449
N-15 %	1,199	1,177	0,995	0,601
N-20 %	1,199	1,183	1,050	0,721
Janssens	1,195	1,158	0,991	0,733
Integral Ratio	1,199	1,196	1,180	1,141

TABLEAU 1.1 – Hauteur d'interface calculée pour quatre profils théoriques de température et par quatre méthodes différentes

1.2 Aspersión d'eau

1.2.1 Technologies d'aspersión

Le premier système d'aspersión date du milieu du XIX^{ème} siècle [63]. Il s'agissait au départ de simples tuyaux percés dans une usine de coton aux États-Unis. Aujourd'hui, un système d'aspersión est constitué de plusieurs éléments. Une pompe alimentée par une cuve permet la mise sous pression de l'eau. Elle est raccordée à une canalisation de distribution débouchant dans les locaux concernés. Sur cette tuyauterie, sont installés un ou plusieurs ajutages. Un système d'aspersión peut être déclenché manuellement ou automatiquement. Pour le déclenchement automatique, l'ajutage peut être équipé d'une ampoule thermosensible qui éclate lorsque la température excède un certain seuil.

Les premières règles techniques d'installation apparaissent dans les années 1920. Les normes incendie actuellement en vigueur permettent le dimensionnement des installations en fonction de la surface des locaux et de l'activité du bâtiment (APSAD R1 [3], PR NF EN 12845 [104], APSAD D2 [2] et CEN TS 14972). L'activité et la charge calorifique permettent de classer les locaux en fonction du risque incendie. Par exemple, comme le mentionne l'annexe A de la PR NF EN 12845, un hôtel est classé en risques moyens de type OH1 (*Ordinary Hazard*) tandis qu'une fabrique de feux d'artifice est classée en risques élevés de type HHP4 (*High Hazard Potential*). Ces deux bâtiments nécessitent des installations différentes d'aspersion.

Pour une application dans un bâtiment, il existe deux technologies d'aspersion, le sprinkler et le brouillard d'eau. Elles se différencient par la taille des gouttes pulvérisées. Dans la norme américaine, le brouillard d'eau est défini tel que 99 % du volume d'eau est composé par des gouttes de diamètre inférieur à 1 mm à 1 m de la buse (NFPA 750 [101]). Dans la norme européenne et la règle APSAD D2, cette proportion est modifiée : le brouillard d'eau est défini tel que 90 % du volume d'eau est composé par des gouttes de diamètre inférieur à 1 mm à 1 m de la buse [2, 104]. Il n'y a pas de définition normalisée du système sprinkler. Nous pouvons donc en déduire que toute technologie ne satisfaisant pas la définition précédente est un système sprinkler. Mawhinney and Solomon proposent de classer les systèmes brouillard d'eau en trois groupes I, II et III suivant la taille des gouttes [85]. Le classement fait référence au d_{v90} (diamètre tel que 90 % du volume est constitué de gouttes de taille inférieure). Notre étude concerne des sprays qui s'étendent sur les 3 classes (et même au-delà du diamètre de 1 mm).

Classe I	Classe II	Classe III
$d_{v90} \leq 200 \mu m$	$200 \mu m < d_{v90} \leq 400 \mu m$	$400 \mu m < d_{v90} \leq 1000 \mu m$

TABLEAU 1.2 – Classification des brouillards d'eau [85]

1.2.2 Caractérisation de l'aspersion

Une aspersion d'eau est caractérisée par l'empreinte de son spray, le débit d'eau pulvérisée et la granulométrie.

L'empreinte du spray peut être conique ou elliptique. Le spray peut également être creux ou plein (Figure 1.5). La forme du spray dépend essentiellement de la géométrie de la buse. Par exemple, Collin [22] et Lechêne [75] ont utilisé des sprays elliptiques et pleins dans leurs travaux sur les boucliers radiatifs. Meyrand [90] et Blanchard [11] ont quant à eux utilisé des sprays coniques et pleins dans leurs recherches sur l'interaction entre une aspersion d'eau, un feu et la ventilation dans un tunnel à échelle réduite.

Le débit d'eau pulvérisée est renseigné par l'industriel grâce au facteur K ou nombre de débit. Ce facteur est propre à chaque tête/buse et est exprimé en $L \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1/2}$. Il relie le débit d'eau pulvérisée \dot{Q}_v à la pression d'alimentation p comme suit :

$$\dot{Q}_v = K \cdot \sqrt{p} \tag{1.14}$$

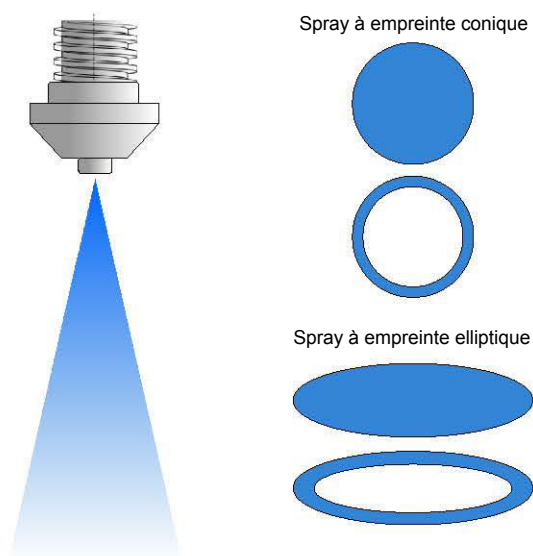


FIGURE 1.5 – Empreinte du spray [11]

La granulométrie renseigne sur la taille des gouttes dans le spray. Un spray qui est supposé formé de gouttes de mêmes tailles est dit monodisperse. En réalité, un spray contient des gouttes de tailles différentes. Il est dit polydisperse. Plusieurs diamètres moyens permettent de caractériser la granulométrie. Celui le plus utilisé en rayonnement est le diamètre de Sauter noté d_{32} . Il est défini par le rapport entre le volume occupé par les gouttes et la surface d'échange avec le milieu environnant. Il se calcule de la manière suivante [97] :

$$d_{32} = \frac{\sum_i^N n_i \cdot d_i^3}{\sum_i^N n_i \cdot d_i^2} \quad (1.15)$$

où n_i est le nombre de gouttes de diamètre d_i . On peut également comparer deux sprays par l'intermédiaire du diamètre volumique médian d_{v50} . Il correspond à la valeur pour laquelle la moitié du volume d'eau contenu dans le spray est constitué par des gouttes de diamètre inférieur.

L'empreinte et la granulométrie sont très rarement renseignées pour une tête/buse donnée. Dans les travaux de la littérature, les chercheurs peuvent mesurer ces paramètres par Anémométrie Laser Doppler (**PDA**), Velocimétrie par Image de Particules (**PIV**), caméra à haute vitesse ou diffraction laser. Dans sa thèse, Husted décrit chacune de ces techniques en y expliquant les avantages et inconvénients [58].

Lorsque la granulométrie n'est pas mesurée expérimentalement, des modèles permettent de calculer le diamètre moyen de pulvérisation en tenant compte de la géométrie de la buse et de la pression d'alimentation [36]. Cette méthode est utilisée dans plusieurs études sur les sprinklers, notamment par Chow [21] et Sheppard [119]. Le diamètre moyen pour une tête/buse sprinkler est donnée par la relation entre le nombre de Weber We élevé à la puissance $-1/3$ et le diamètre

nominal de la buse :

$$d_{v50} = C_m \cdot D_n \cdot We^{-1/3} \quad (1.16)$$

$$We = \frac{\rho \cdot v_{inj}^2 \cdot D_n}{\sigma_{eau/air}} \quad (1.17)$$

C_m est une constante dépendante de la tête/buse sprinkler. You évalue cette constante à 2,33 pour une tête/buse de diamètre nominal¹ D_n égale à 12,7 mm [20, 129]. ρ est la masse volumique de l'eau, v_{inj} la vitesse d'éjection de l'eau et σ la tension de surface entre l'eau et l'air (estimée à $72,8 \cdot 10^{-3}$ N/m).

Ces caractéristiques ont un impact sur les phénomènes physiques d'interactions entre une aspersion d'eau et la fumée.

1.2.3 Phénomènes physiques

En cas d'incendie, lorsqu'un système d'aspersion est déclenché, l'eau pulvérisée interagit avec la fumée. Dans la littérature scientifique, quatre phénomènes majeurs sont identifiés [43, 84, 127] :

- le refroidissement par puits de chaleur,
- les interactions dynamiques avec la fumée et le panache,
- la dilution du milieu gazeux ou l'inertage,
- l'atténuation du rayonnement.

L'importance de chacun de ces phénomènes peut varier suivant la technologie utilisée, la granulométrie du spray, l'angle de pulvérisation, le débit de pulvérisation et la puissance du feu [49, 61, 129].

Le refroidissement par puits de chaleur et le phénomène d'inertage ont fait l'objet de nombreuses recherches notamment sur leur effet extincteur [43, 105, 112]. L'étude des interactions dynamiques entre l'eau, la fumée et le foyer est également bien renseignée. Ces études diffèrent par leurs objectifs tels que l'étude des interactions entre systèmes de désenfumage et sprinklage [26, 51, 61], l'étude de la pénétration du spray dans le panache [98, 99], ou bien la modélisation des écoulements de gouttes dans un milieu enfumé [22]. Les premières études sur l'atténuation du rayonnement sont apparues à la fin des années 1980 [115]. L'objectif était à l'époque de simuler l'atténuation de la température d'une cible soumise au rayonnement. Cette première approche ne considérait que le phénomène d'absorption. Plus tard, les modèles ont été complétés [9, 13, 31, 22] et des études expérimentales ont été approfondies [28, 75, 103].

1.2.3.1 Refroidissement par puits de chaleur

Le refroidissement par puits de chaleur est l'énergie absorbée par l'eau pulvérisée dans la phase gazeuse et au contact des surfaces solides. Ce refroidissement concerne donc la fumée, les parois du local et le foyer. La capacité d'absorption de chaleur de l'eau est importante du fait de ses chaleurs spécifique et latente relativement élevées (Figure 1.6). Lorsque de l'eau est pulvérisée

1. Ce diamètre correspond à celui de la tuyauterie et non à la sortie de la buse.

dans l'environnement enfumé et sur les parois chaudes, elle va donc puiser de l'énergie et ainsi refroidir l'ensemble du milieu environnant.

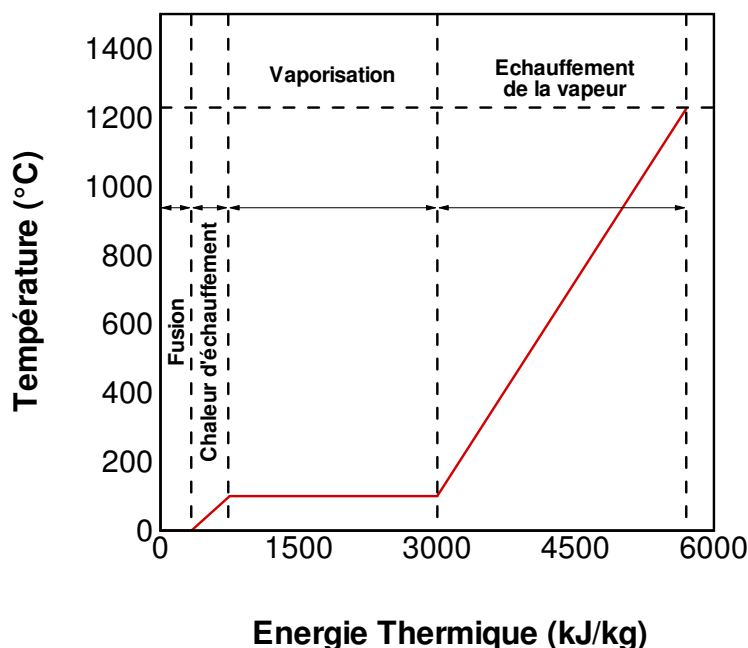


FIGURE 1.6 – Énergie nécessaire pour transformer l'eau en vapeur [43]

Les gouttes pulvérisées dans le milieu gazeux séjournent dans le gaz durant un temps plus ou moins long. Ce temps de séjour dépend de l'inertie des gouttes pulvérisées, c'est-à-dire de leur masse et de leur vitesse d'éjection de la buse. Les gouttes d'eau puisent une partie de la chaleur au gaz essentiellement par convection. Ce phénomène est un phénomène de surface et dépend donc de la taille des gouttes pulvérisées. Kincaid a montré que pour une même durée d'exposition et pour une quantité d'eau identique, les fines gouttes absorbent une quantité d'énergie beaucoup plus importante que les gouttes de plus gros diamètre [71, 72]. Effectivement, pour un même volume d'eau, la pulvérisation de gouttes de diamètres inférieurs induit une surface d'échange plus grande. Par exemple, pour un volume d'eau pulvérisé identique, un ensemble de gouttes de 100 μm bénéficie d'une surface d'échange dix fois plus importante qu'un ensemble de gouttes d'un diamètre de 1000 μm . De plus, les phénomènes de convection peuvent être liés à la vitesse de mouvement de la goutte dans le milieu [112]. Rasbash a étudié l'importance de la vitesse de pulvérisation des gouttes sur le refroidissement. Il a montré que le coefficient de transfert convectif était d'autant plus grand que la vitesse de chute des gouttes dans l'air ambiant augmentait. En revanche, le temps de séjour de la goutte dans le gaz diminue, ce qui réduit la durée de l'échange de chaleur.

Comme il a été dit précédemment, lorsque l'inertie des gouttes est suffisamment importante, elles peuvent traverser le milieu enfumé et impacter les surfaces solides et se déposer. Les échanges thermiques entre les surfaces solides et les gouttes dépendent des caractéristiques des gouttes (vitesse d'impact, diamètre, température), de celles de la surface (température, rugosité, propriétés thermophysiques) et de l'angle d'incidence entre la goutte et la surface [34, 96]. La chaleur est

échangée par conduction entre la paroi et l'eau déposée. De plus, l'eau déposée sur la paroi agit comme un film de protection pour les échanges thermiques convectifs et radiatifs avec le milieu gazeux. Ce qui tend à réduire l'échauffement des surfaces durant un incendie.

Pour conclure, une pulvérisation de gouttes de taille et de vitesse importantes provoque un refroidissement de surface plus important car l'eau atteint plus facilement les parois et se dépose pour créer un film protecteur. Le refroidissement de surface peut intervenir dans les mécanismes d'extinction, notamment dans le refroidissement direct du combustible [34, 89, 114]. En effet, le combustible peut être refroidi sous la température du point éclair et ainsi être éteint. Yao et Kalelkar ont évalué que l'extinction de feux puissants était optimale pour des gouttes de diamètres compris entre 4 et 5 mm [127]. Pour des gouttes plus petites et plus lentes, le temps de séjour dans la zone enfumée est accru. Le refroidissement de la phase gazeuse est de ce fait plus important. Back III *et al.* ont montré que dans les cas de feux peu développés, une pulvérisation de petites gouttes est plus efficace pour réduire le temps d'extinction qu'une pulvérisation de grosses gouttes [8].

1.2.3.2 Interactions dynamiques

Comme il a été décrit précédemment, le panache s'élève et impacte le plafond, puis la fumée s'écoule dans le bâtiment le long du plafond jusqu'aux ouvertures ou aux écrans de cantonnement. La phase liquide pulvérisée est soumise à la gravité et à sa vitesse de pulvérisation l'entraînant vers le sol. Il y a donc deux courants qui interagissent : une phase gazeuse continue s'écoulant verticalement et horizontalement et une phase dispersée dont la composante principale de vitesse est vers le bas.

Lors de la chute d'une goutte dans l'air ambiant, plusieurs forces agissent sur la particule et participent au mouvement de la goutte dans le milieu gazeux : la traînée, la gravité, et la poussée d'Archimède. L'effet combiné de la force de gravité et de la poussée d'Archimède est appelé la force de masse apparente. D'autres forces s'appliquent sur les gouttes mais elles peuvent être négligées lorsque la masse volumique du gaz est très petite devant celle de la particule [22]. Le bilan sur ces forces permet de déterminer à chaque instant la position et la vitesse de chaque particule dans le milieu gazeux.

La force de traînée est la force agissant entre la goutte et le milieu gazeux. Cette force de traînée est la résultante de la résistance qu'oppose la phase continue (l'air ou les fumées) au mouvement de la goutte d'eau. Elle dépend essentiellement de la viscosité du fluide, de la taille des particules, des frottements visqueux et des contraintes de pression à la surface de la goutte en mouvement. Elle se calcule en fonction de la vitesse du fluide et de celle de la particule. Aussi, certains auteurs proposent de calculer le coefficient de traînée pour des particules sphériques en mouvement en fonction du régime d'écoulement [95, 118].

En résumé, l'ensemble de la phase dispersée (gouttes) transmet une partie de sa quantité de mouvement à la phase continue (fumée) et réciproquement (chaque phase participant au mouvement de l'autre). La pénétration du spray dans la nappe de fumée est étudiée par les recherches dans le domaine de la sécurité incendie [43, 98, 99, 132]. Dans d'autres domaines, la coalescence des gouttes et l'effet de l'évolution de leur taille dans le spray sont étudiés pour leur influence sur la pénétration de l'eau dans le gaz [41]. La pénétration du spray dans la

phase gazeuse est plus importante lorsque les gouttes sont de tailles importantes, que la vitesse d'injection est grande et que le spray est dense et de faible section. La température de la fumée peut également avoir son importance dans le sens où elle conditionne les forces de flottabilité du panache.

Ces effets d'interactions n'interviennent pas directement dans les mécanismes d'extinction du feu. Cependant, des études ont été faites pour évaluer la capacité de pénétration des gouttes dans la zone de feu [98, 99] et l'optimisation du diamètre des gouttes à pulvériser pour atteindre la flamme.

1.2.3.3 Dilution par la vapeur

La dilution est la diminution de la concentration des gaz (par exemple CO_2 , CO et O_2) par la transformation de l'eau liquide en vapeur. Les gouttes d'eau en suspension dans le milieu gazeux peuvent s'évaporer sous les effets combinés du gradient d'humidité et de l'échauffement (voir 1.2.3.1). Lorsque l'eau passe de l'état liquide à l'état vapeur, elle occupe un volume 1600 fois plus important. De ce fait, la concentration en vapeur d'eau augmente dans le milieu et les concentrations en gaz de combustion et en air sont réduites dans le volume du local. Du fait de l'échauffement et donc de l'évaporation plus rapide des plus petites gouttes, la dilution de l'environnement gazeux est plus importante dans le cas du brouillard d'eau [8, 34, 43].

La vapeur d'eau est inerte vis à vis des réactions de combustion. Sa présence dans l'environnement gazeux diminue la concentration en oxygène et pénalise par conséquent la combustion par manque de comburant. Cette propriété, en plus du refroidissement fait l'objet de nombreuses études sur les mécanismes d'extinction du feu. Le seuil critique de concentration pour que la combustion puisse perdurer est d'environ 14 % pour les hydrocarbures [8]. Mawhinney a décrit l'importance de la part du phénomène d'inertage dans les mécanismes d'extinction [84] par rapport au refroidissement pour le brouillard d'eau. Downie *et al.* ont montré que les gouttelettes d'eau ne pénétraient pas la région des flammes mais qu'en revanche, durant l'aspersion, la concentration en oxygène dans la zone de flamme diminuait tandis que la concentration en monoxyde de carbone augmentait [33]. Le phénomène d'inertage est d'autant plus important que le milieu est confiné et que la puissance du feu est importante, la concentration en oxygène diminuant rapidement par consommation et par dilution. Ferng a également étudié numériquement l'influence de la taille de gouttes issues d'un brouillard d'eau dans la vitesse d'extinction [38]. Il montre que le temps d'extinction diminue lorsque la taille de gouttes diminue, pour certaines valeurs de diamètres. Les phénomènes de dilution et de refroidissement par évaporation devenant prépondérants. Il montre également que pour des tailles de gouttes beaucoup plus importantes, le phénomène qui prédomine dans l'extinction est le refroidissement du combustible.

1.2.3.4 Atténuation du rayonnement

Le rayonnement est atténué par les gaz et les particules d'eau en suspension. Ce phénomène est appelé extinction et correspond à la somme des contributions de l'absorption et de la diffusion. L'absorption est le phénomène par lequel une partie de l'énergie radiative est convertie en énergie calorifique. La diffusion est le phénomène par lequel une partie de l'énergie est dispersée

dans des directions différentes de la direction de propagation de l'onde incidente. La proportion des phénomènes d'absorption et de diffusion dans le phénomène d'extinction dépend de la longueur d'onde du rayonnement. On parle soit d'atténuation du rayonnement thermique (notion de bouclier radiatif dans l'infrarouge), soit d'opacification de l'environnement (notion d'opacité dans le spectre visible).

Dans l'infrarouge, l'eau possède des propriétés absorbante et diffusante [45, 92]. Le spray constitue alors une barrière pour le rayonnement thermique [24, 28, 84]. De plus, les gaz de combustion (CO, CO₂ et H₂O) et les particules de suies absorbent et émettent du rayonnement thermique [31]. La capacité des sprays pour la protection contre l'incendie a conduit à de nombreuses études ces dernières années. On peut citer notamment Collin [22, 23], Lechêne [75, 77, 76] et Parent [103] pour les recherches au LEMTA. Coppalle *et al.* [28] ont montré l'influence de la densité du spray pulvérisé, la taille des gouttes ou la longueur d'onde du rayonnement émis par la source dans les phénomènes d'atténuation. Ils montrent que l'atténuation est plus forte pour des gouttes de petites tailles. Lechêne a également étudié numériquement et expérimentalement la capacité d'atténuation du transfert radiatif par des pulvérisations de type brouillard d'eau. Il a montré la forte influence de la dynamique du spray en plus de la granulométrie sur l'atténuation des transferts radiatifs.

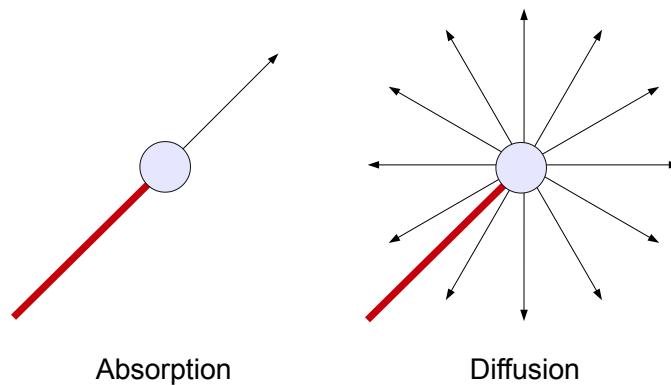


FIGURE 1.7 – Phénomène d'absorption et diffusion par une particule sphérique

Dans le spectre du visible (longueur d'onde comprise entre 400 et 800 nm), l'eau est purement diffusante. En effet, les indices optiques de l'eau permettent de la considérer comme non absorbante (en réalité, l'eau est peu absorbante dans le visible). L'utilisation de plus en plus fréquente de brouillards d'eau dans la sécurité incendie a poussé Lechêne dans sa thèse [75] à se poser la question de la perte de visibilité induite par la pulvérisation. Il a utilisé un système d'opacimétrie laser pour évaluer la transmittance puis il l'a comparée à un code de calcul numérique utilisant une méthode de Monte Carlo pour la propagation des photons et la théorie de Mie pour le calcul des propriétés radiatives. La concordance entre les simulations et les essais était bonne dans le cas d'un spray descendant. Il a montré la possibilité d'appliquer cette méthode, généralement utilisée en rayonnement [22] dans le domaine du visible. De plus, la fumée issue de la combustion contient des particules de suies qui sont absorbantes et diffusantes [46, 102, 128]. D'une part, l'absorption atténue la lumière visible directe provenant d'un objet. D'autre part, la diffusion par les gouttes majoritairement participe à la déviation de la lumière provenant de l'objet mais également de la lumière provenant d'autres directions (lumière ambiante, flammes). Ces deux phénomènes couplés sont responsables de la perte de visibilité au travers d'un milieu de fines

gouttes comme le mélange entre le brouillard et la fumée.

1.2.4 Incidence sur l'environnement stratifié

L'aspersion sur un milieu enfumé peut avoir une incidence sur l'environnement stratifié. Cooper note que l'activation d'un système d'aspersion peut en effet induire l'instabilité de la nappe de fumée et entraîner la déstratification de l'environnement [26]. Cet effet de déstratification est le résultat de la combinaison des interactions dynamique et thermique (Section 1.2.3 qui décrit les phénomènes). Certains auteurs définissent la déstratification lorsque les forces de flottabilité ne compensent plus la gravité et les forces de traînée dues à l'injection de gouttes [17, 123].

Premièrement, l'injection d'eau vers le bas transmet une partie de sa quantité de mouvement au gaz environnant. Cette interaction dépend essentiellement de la taille des gouttes pulvérisées, de la vitesse et de la densité du spray [26, 51, 61]. Cette interaction dynamique est caractérisée dans la littérature par une valeur de pénétration du spray. Cette valeur représente la distance maximale que pourrait parcourir le spray dans l'air à pression atmosphérique et à température ambiante. Grant *et al.* notent que la valeur de pénétration est maximale pour un spray dense, d'angle de pulvérisation faible et de taille de gouttes pulvérisées importante [43].

Deuxièmement, comme il a été décrit dans la Section 1.1, la stratification est gouvernée par la différence de température entre l'air ambiant et la fumée. Or, l'injection de gouttes d'eau induit un refroidissement de la phase gazeuse. La fumée, à température ambiante est plus lourde que l'air et tend à retomber. Les gouttes d'eau injectées avec une grande vitesse et un diamètre volumique moyen important augmentent l'épaisseur de la nappe de fumée dans la zone située sous le spray [61, 98, 123]. Néanmoins, la littérature scientifique fait état de cas où le milieu reste stratifié en dépit de l'aspersion. En particulier, Li *et al.* [78] ont observé que pour une pression de pulvérisation relativement faible, le caractère stratifié du milieu pouvait être conservé.

La part de ces deux effets sur la déstratification est variable et dépend à la fois de la nature de la fumée (température, composition, épaisseur) et de l'injection d'eau (taille de gouttes, densité du spray, débit). Dans les années 1970, Bullen [17] a établi un modèle permettant de calculer la stabilité de la couche de fumée sous une aspersion par sprinkler. Ce critère est basé sur le rapport entre les forces de traînée et la force de flottabilité. Le diamètre des gouttes du sprinkler étaient représenté par une monodispersion. La nappe de fumée est considérée à température constante. Ce critère présente des résultats cohérents avec les expériences dans le cas où la nappe de fumée est de faible épaisseur. Morgan et Baines [93, 94] ont inclus dans leur modèle le transfert par convection induit par la fumée sur les gouttes. La température est considérée comme le paramètre déterminant dans les effets de déstratification de la nappe de fumée par un système d'aspersion [26, 25]. Plus récemment, quelques études ont montré que la déstratification pouvait se produire lorsque les forces de traînée étaient inférieures aux forces de flottabilité et que le critère devait être complété [78, 130, 123]. Zhang [131] dans un premier temps, a établi son modèle sur la base du critère de Bullen en incluant le gradient de température dans la nappe de fumée. Li [78] a ensuite pris en compte la répartition des gouttes dans le spray ainsi que les forces de traînée résultantes. Les expériences de Li montrent que son critère de déstratification s'applique à de plus larges cas que ceux de Bullen et Zhang. Avec son modèle mathématique et ses essais sur l'entraînement de la fumée par une aspersion par sprinkler, Li [79] a identifié dans la déstratification la part due au refroidissement de la fumée par les gouttelettes d'eau et la part due à la force de traînée. Il note

que plus la pression d'alimentation du spray augmente (augmentation du débit et de la vitesse d'injection), plus la part de la force de traînée est importante devant la part du refroidissement. De plus, lorsque la température de la fumée est plus importante, la part de déstratification par refroidissement augmente devant la part de l'entraînement.

Ces études sur l'aspersion et la fumée ont été motivées par la compréhension des interactions entre les systèmes de désenfumage et le sprinkler [54, 120, 122, 126]. En 1956, le FMRC a conduit une étude expérimentale à échelle réelle mettant en avant les phénomènes d'interaction entre le sprinklage et le désenfumage [40]. Il a été montré que l'effet du désenfumage entraîne une réduction du nombre de sprinklers déclenchés dans les locaux adjacents. L'utilisation combinée d'aspersion d'eau et du désenfumage a beaucoup été discutée ces dernières années [10, 48, 86]. Le désenfumage vise à évacuer les gaz de combustion, à diminuer le nombre de sprinklers en fonctionnement, à aider les services de secours à identifier et à localiser la zone de feu et à réduire les températures dans le bâtiment avant la mise en route de l'aspersion. Cependant, la ventilation peut entretenir la combustion par l'apport d'air frais et également retarder la mise en marche des sprinklers. Les sprinklers ont pour objectif de réduire la température du milieu, éteindre le feu et limiter la propagation de la zone de feu. Thomas et Hinkley ont conclu que les sprinklers doivent être utilisés avant le désenfumage dans le but d'éviter le retard d'activation [52, 53, 125].

1.3 Risques liés à un incendie et conditions de visibilité

1.3.1 Risques liés à un incendie

En cas d'incendie, plusieurs objets sont impliqués. En fonction des matières combustibles et des zones touchées par le feu, les puissances dégagées, les températures et la quantité de fumée produite sont plus ou moins importantes. Par exemple, un incendie dans un bâtiment peut concerner des centaines de mètres carrés, enfumer plusieurs niveaux, nécessiter des moyens de lutte importants et causer de nombreuses victimes. La recherche en sécurité incendie s'intéresse à la sécurité des personnes, aux conditions d'opération des pompiers et à l'intégrité de la structure.

Les personnes amenées à être évacuées peuvent être soumises à plusieurs agressions. Ces agressions sont de natures thermique, toxique et/ou traumatique. De plus, la production de fumée par le feu induit une diminution de la visibilité. Cette diminution ne présente pas de danger direct pour les personnes mais est susceptible d'augmenter la durée nécessaire à l'évacuation et donc leur durée d'exposition aux agressions thermiques et toxiques ou bien à un effondrement éventuel de la structure. La visibilité constitue de ce fait un paramètre important pour l'évacuation des personnes et pour la recherche en sécurité incendie.

Bien que les pompiers soient munis d'équipements de protection contre les agressions thermiques (veste de protection) et toxiques (masques à oxygène), il peut être difficile pour eux d'approcher le foyer [83]. En effet, le rayonnement thermique peut être important. Après échauffement de leur peau sous leurs équipements, ils peuvent également être brûlés. De plus, tout comme les occupants, le manque de visibilité est un facteur qui influence leurs conditions d'opération et les durées d'intervention.

La structure du bâtiment est soumise à de très fortes températures et à des sollicitations thermiques importantes. L'intégrité de cette structure doit être garantie pour résister assez longtemps afin de permettre l'évacuation des occupants et le minimum de pertes matérielles après un sinistre [30]. Tout d'abord, la chaleur peut dilater la structure et entraîner des contraintes mécaniques supplémentaires par rapport à celles rencontrées « à froid ». De plus, les caractéristiques des matériaux peuvent se dégrader avec la température et la structure mécanique peut céder. Enfin, les hautes températures peuvent écailler les matériaux, qui éclatent et menacent la solidité du bâtiment. Les structures les plus sensibles à la déformation sont les structures métalliques car elles sont sujettes à une dilatation plus importante. Les structures en bois peuvent résister plus longtemps mais sont susceptibles de brûler. Les structures en béton, plus rigides sont susceptibles de s'écailler et de céder sous leur poids. La recherche sur la structure et les contraintes thermo-mécaniques est très importante dans la quantification de ces phénomènes et de leurs conséquences.

1.3.1.1 Risques thermiques

Le danger de brûlures durant un incendie est important. Ce danger existe également dans des zones éloignées du foyer. En effet, la fumée produite par le feu est chaude et rayonne vers la zone en partie basse. Le risque de brûlure est double. D'une part, le rayonnement thermique provoque des brûlures en surface, selon le temps d'exposition et le vêtement porté. D'autre part, la température chaude des gaz peut provoquer des brûlures internes, au niveau respiratoire et ce, dans des zones éloignées du foyer.

Le risque de brûlure par rayonnement thermique est largement étudié dans le domaine de la sécurité incendie. Curtat synthétise les risques liés à l'exposition au rayonnement thermique dans son ouvrage *Physique du feu pour l'ingénieur* [30]. Les critères de danger de brûlure par rayonnement se basent d'une part sur l'éclairement énergétique et sur le temps d'exposition à cet éclairement. L'éclairement énergétique est la densité de puissance rayonnée rapportée à un mètre carré (en $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$). Cet éclairement est représentatif de la puissance thermique reçue par une surface. Il est fonction de l'émissivité, de la température et de la longueur d'onde associée, de la distance entre l'émetteur et le récepteur et des propriétés optiques du milieu traversé. Des études montrent que pour un éclairement de $2,5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, un homme vêtu normalement peut continuer à évacuer dans une limite de temps d'exposition de 30 minutes. C'est environ 2,5 fois la valeur de l'éclairement énergétique du soleil [4, 14, 16].

Les brûlures respiratoires sont également un critère important dans la sécurité des personnes lors d'un incendie. À $140 \text{ }^\circ\text{C}$, un séjour de quelques secondes est insoutenable pour l'homme, de même un séjour de quelques minutes à $120 \text{ }^\circ\text{C}$. Pour des températures de $80 \text{ }^\circ\text{C}^2$ le temps de séjour est plus long, environ 15-20 minutes. Ces températures peuvent être vite atteintes dans un incendie, et ce même loin de la zone de feu.

2. température de l'air d'un sauna, valeur critique pour un temps d'exposition de 30 minutes

1.3.1.2 Risques toxiques

La fumée est un mélange de composés chimiques toxiques pour l'homme [106, 133] et elle constitue la première cause de décès lors d'incendies en bâtiment³. En général, les victimes sont retrouvées dans des zones éloignées du foyer. Il existe de nombreuses études toxicologiques sur l'exposition aux fumées d'incendie. Cette notion de toxicité est au cœur des recherches dans les risques incendie car la fumée tue énormément de personnes chaque année. Le CSTB s'est intéressé à ces aspects dans les années 1980 à 1990 en permettant à des toxicologues de participer à des essais de feu en condition bâtementaire [55, 56]. Les études de Imbert [59] et Purser [107] se basent sur l'effet considéré (par exemple l'asphyxie), la composition de la fumée et la durée d'exposition. De plus, les caractéristiques et les risques liés dépendent du type de sinistre et des matériaux brûlés. Le risque d'intoxication par l'inhalation de fumée est accru dans un milieu comme le bâtiment du fait du confinement. En effet, la densité de fumée dépend du taux de perte de masse du combustible mais également du volume dans lequel les gaz sont dispersés. L'effet toxique des fumées peut se trouver à court ou à long terme. Les personnes victimes dans des incendies sont suivies plusieurs semaines après le sinistre.

Deux types de dangers peuvent être différenciés pour les occupants. Le premier danger est l'inhalation de gaz toxiques et l'asphyxie. Le deuxième est le facteur irritant de la fumée et de certains gaz de combustion. En effet, l'irritation des yeux, des voies nasales, de la gorge et des poumons peuvent déstabiliser l'occupant en train d'évacuer et augmenter son temps d'exposition aux gaz asphyxiants.

Parmi les gaz de combustion, le monoxyde de carbone (CO) est le principal asphyxiant responsable du décès des victimes. La production de monoxyde de carbone dans un feu est liée à la quantité d'oxygène disponible et à la nature du matériau combustible. Durant l'effort, par exemple l'évacuation dans la panique, les victimes inhalent plus de CO et sont donc plus rapidement touchées par l'asphyxie. Le cyanure d'hydrogène (HCN) fait également partie des gaz asphyxiants. Ce gaz peut causer des troubles parfois même plusieurs jours après l'inhalation. Enfin, le CO₂ dégagé par la combustion peut également avoir des effets, dans une moindre mesure, sur la respiration.

1.3.2 En quoi la perte de visibilité constitue-t-elle un risque ?

1.3.2.1 Généralités

La visibilité est une grandeur difficile à évaluer, elle décrit la qualité de ce qui est visible. Le plus souvent, l'idée de visibilité est plutôt qualitative. Par exemple, la qualité de l'air qui permet de voir à une distance plus ou moins grande. En météorologie, la visibilité est définie comme la plus grande distance à laquelle il est possible de voir et d'identifier à l'œil nu un objet étendu sur le ciel à l'horizon de jour, et une source lumineuse diffuse d'intensité modérée de nuit [5, 35]. La notion de visibilité dépend à la fois de la nature de l'objet observé (lumineux ou sombre, ponctuel ou étendu) et de l'atmosphère qui sépare cet objet de l'observateur. La visibilité d'un objet et d'un détail est liée à l'observateur, à la quantité de lumière reçue par l'œil, la perception du contraste et la résolution spatiale.

3. 90 % des décès sont liés à l'inhalation des fumées [44]

L'observateur représente n'importe quel dispositif optique permettant de collecter la lumière. Par exemple, l'œil humain est sensible dans une gamme de longueurs d'onde de 380 nm à 780 nm (spectre visible). L'œil est capable de distinguer plus de deux millions de couleurs différentes et peut s'adapter au niveau d'éclairement ambiant.

La quantité de lumière reçue par un dispositif optique (ou l'observateur) est définie par la notion de luminance. C'est une grandeur mesurable qui correspond à la sensation visuelle de luminosité d'une surface. La luminance est le rapport de l'intensité lumineuse par unité de surface et d'angle solide. Il n'existe pas de valeur seuil de luminance perceptible.

Le contraste est une propriété de l'objet observé traduisant la différence de luminance entre les parties sombres et les parties claires de l'image. Il existe plusieurs méthodes pour calculer le contraste de luminance. Le contraste de Michelson [91] décrit le contraste global d'une image. Il est défini par :

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1.18)$$

où I_{\min} et I_{\max} représentent respectivement les luminances minimum et maximum sur la figure considérée.

Un autre type de contraste peut être calculé sur une image : le contraste local. Le contraste de Weber [29, 74] est le contraste intrinsèque entre deux plages lumineuses :

$$C = \frac{I_{\text{objet}} - I_{\text{fond}}}{I_{\text{fond}}} \quad (1.19)$$

où I_{objet} et I_{fond} représentent respectivement la luminance de l'objet et la luminance du fond.

La résolution spatiale est la finesse des détails d'une image. L'acuité de résolution introduite par Hooke définit une valeur limite pour laquelle l'œil humain est capable de séparer deux points distincts. De plus, Buser [18] a montré que pour les faibles luminances, la perception de contraste décroît lorsque la fréquence spatiale augmente. Pour les luminances élevées, il apparaît un maximum de sensibilité au contraste. L'éblouissement par une source lumineuse apparaît lorsque que la luminance de cette surface est très élevée. Ce phénomène apparaît également quand la surface de faibles dimensions et très lumineuse est placée sur un fond de luminance moindre.

La Figure 1.8 présente la sensibilité au contraste en fonction de la fréquence spatiale. La courbe noire montre que pour une résolution donnée, la perception du contraste augmente. Cette courbe délimite en partie haute, la zone dite non visible et en partie basse la zone de visibilité des fréquences. Il existe un maximum de visibilité du contraste pour une classe de fréquences données.

Pour une intensité lumineuse suffisante, la notion de visibilité est donc à la fois liée à la résolution de l'image et au contraste existant entre les parties sombre et claire d'un objet.

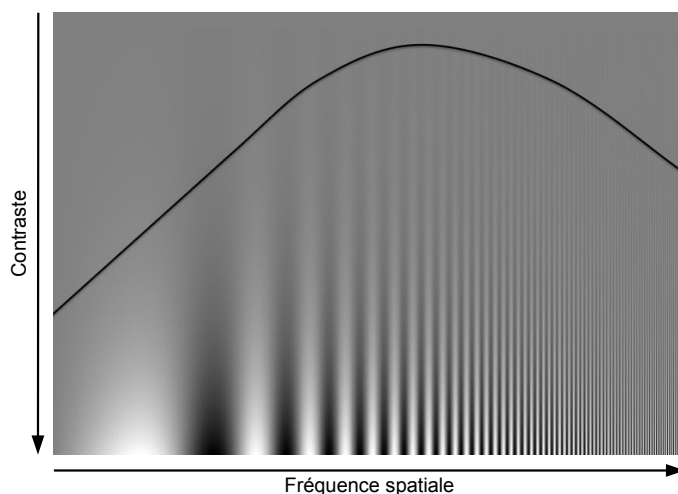


FIGURE 1.8 – Sensibilité au contraste en fonction de la fréquence spatiale

1.3.2.2 Visibilité lors d'un incendie

La géométrie confinée de certains bâtiments et l'expansion rapide du feu entraînent la production de grandes quantités de fumée. Les suies contenues dans les fumées sont des particules carbonées responsables du rayonnement visible de la flamme mais également de l'opacification de l'environnement par la fumée. L'opacité est la propriété optique atténuant le flux lumineux entre une source (un panneau lumineux et l'œil d'une personne par exemple).

L'opacité peut être déterminée par le calcul ou l'expérience. Souvent, elle est exprimée sous la forme de densité optique ou de coefficient d'extinction (en m^{-1}). Cette grandeur est une propriété optique moyenne du milieu enfumé.

La « distance de visibilité » est une conséquence de l'opacité et est exprimée en mètres. Elle dépend de l'acuité visuelle de l'observateur, de la densité optique de l'environnement et de l'objet observé (lumineux ou réfléchissant). Plus l'objet est lumineux, plus il sera facile à voir au travers d'un milieu absorbant [65].

1.3.2.3 Travaux sur la visibilité dans le domaine de l'incendie

Les premières études sur la visibilité au travers des fumées apparaissent dès les années 1950-1960 (Figure 1.9). D'abord Rasbash [111] en 1951 établit une corrélation **log/log** liant la visibilité à la densité optique des fumées. En se basant sur les compte-rendus de pompiers, il établit un lien existant entre la visibilité et la probabilité qu'à la personne de faire demi-tour. Par exemple, pour une visibilité de moins de 5 mètres, 20 % des personnes font demi-tour et ce pourcentage double lorsque la visibilité est de moins de 1 mètre. Il est suivi par Malhotra [82] en 1967 qui proposera une autre corrélation. En 1971, Jin [64] propose un modèle simplifié qu'il affinera en 1978 [65]. Jin indique également la relation existant entre les allures de marche dans un couloir enfumé et la valeur du coefficient d'atténuation du milieu. Sur la base de leurs travaux respectifs, Butcher et Parnell proposent la corrélation simplifiée permettant de calculer la valeur de la visibilité en

connaissant le coefficient d'extinction du milieu [19] :

$$\beta.V = 23 \quad (1.20)$$

où β est le coefficient d'extinction en m^{-1} et V la visibilité en mètres.

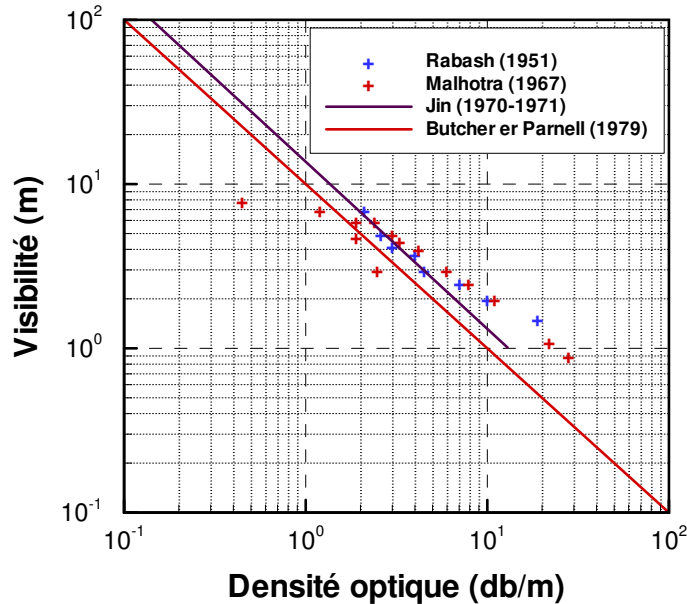


FIGURE 1.9 – Premières corrélations entre la distance de visibilité et la densité optique dans un milieu enfumé [19, 64, 82, 111]

Ensuite, Jin [66] limite la valeur du coefficient d'extinction. Il différencie également le cas des personnes ne connaissant pas les lieux et le trajet d'évacuation avec une limite du coefficient d'extinction fixée à $0,15 \text{ m}^{-1}$ et le cas des personnes connaissant le chemin de secours avec un coefficient d'extinction de $0,5 \text{ m}^{-1}$. Il met en avant l'importance de la connaissance des locaux dans l'évacuation durant un incendie. Pour Rasbash [113], la distance limite de visibilité est de 10 m, ce qui correspond à un coefficient d'extinction de $0,19 \text{ m}^{-1}$. Enfin, Babrauskas [6] estime que le coefficient d'extinction doit être inférieur à $1,2 \text{ m}^{-1}$ comme limite de visibilité. Les valeurs limites sont bien différentes et les valeurs sécuritaires sont choisies aux alentours de $\beta = 0,15$ à $0,20 \text{ m}^{-1}$.

Les modèles utilisés aujourd'hui reposent principalement sur les corrélations établies par Jin entre la visibilité et le coefficient d'extinction [65] pour différentes sources (Figure 1.10). Jin et Yamada se sont basés sur le contraste visuel minimal acceptable fixé à 0,02. Un panneau lumineux est plus de deux fois plus visible qu'un panneau réfléchissant dans une fumée deux fois plus opacifiante. La lumière nécessaire pour éclairer le panneau réfléchissant pénalise la visibilité de celui-ci. Cette source est généralement appelée lumière parasite. Les corrélations établies sont les suivantes :

- systèmes réfléchissants : $\beta \times V = 3$
- systèmes lumineux : $\beta \times V = 8$

Cette corrélation est limitée dans une gamme de visibilité de 5 à 15 mètres. L'expérience est conduite par Jin de manière à ce que les différentes personnes soient protégées par une vitre

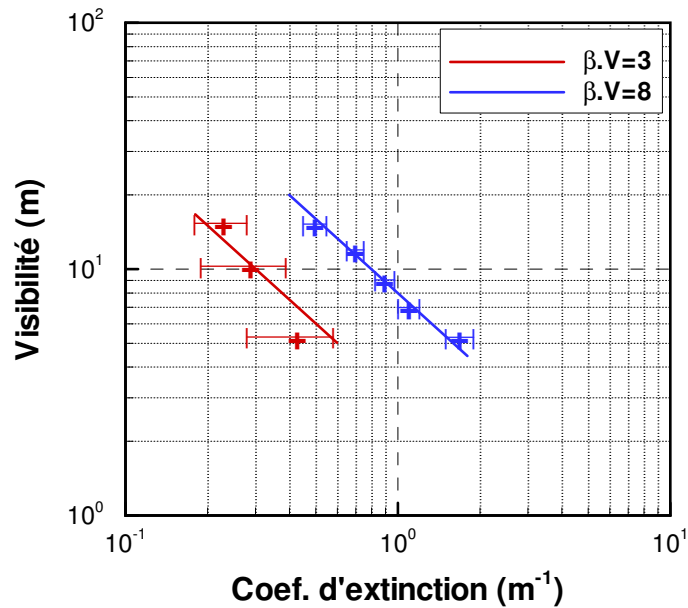


FIGURE 1.10 – Corrélations de Jin et Yamada entre la visibilité et le coefficient d'extinction pour un système réfléchissant ($\beta V = 3$) et un panneau lumineux ($\beta V = 8$)

et observent un objet à travers un milieu enfumé. Dans cette expérience, le facteur irritant des fumées n'est pas pris en compte. Jin et Yamada [67] mènent donc une nouvelle expérience en plaçant les personnes directement dans le milieu enfumé avec pour seule protection, un appareil respiratoire. Ils établissent donc une corrélation tenant compte du facteur irritant des fumées sur l'acuité visuelle pour une combustion de bois. Ils concluent que pour les coefficients d'extinction supérieurs à $0,25 \text{ m}^{-1}$ l'effet irritant devient important.

Ces premières expériences, menées par Rasbash, Jin et Malhotra mettent déjà en évidence la forte dépendance de la nature de l'objet (lumineux ou réfléchissant), la nature de la perception de l'objet (lecture d'une indication, simple perception de l'objet ou compréhension du signe porté sur l'objet) et le caractère du milieu (irritant ou non, densité optique plus ou moins importante...)

Le CSTB [81] a entrepris des essais portant sur la signalétique d'évacuation incendie à la fin des années 1970. L'objectif de cette étude était d'évaluer de façon concrète la visibilité de divers systèmes de signalisation au travers de milieux enfumés représentatifs de l'incendie. Ensuite, cette étude visait à accroître l'efficacité de la signalisation pour faciliter l'évacuation des personnes. Ces études ont été conduites dans un couloir de 21,5 m de longueur, de 1,4 m de large et de 2,5 m de hauteur complètement enfumé de manière homogène. Le coefficient d'extinction était contrôlé par la mise en place d'opacimètres placés horizontalement à 1,55 m. Des observateurs, munis de masques respiratoires ont évalué la distance maximale à laquelle ils pouvaient lire ou comprendre l'objet. Les objets à observer étaient des panneaux de signalisation opaques, des blocs de sécurité, des coffrets de signalisation et des dispositifs lumineux intermittents. Les résultats ont mis en évidence plusieurs facteurs tels que la couleur de la fumée, l'éclairement ambiant et les caractéristiques de la signalisation. Cette étude a montré que pour un même coefficient d'atténuation la visibilité est meilleure pour les fumées noires (absorbantes) que pour les fumées blanches (diffusantes). Ce phénomène est plus marqué pour les panneaux de signali-

sation opaques. En effet, la lumière ambiante est d'autant plus diffusée que la fumée est dense et blanche. Cette lumière ambiante parasite la visibilité de l'objet opaque. De la même manière, plus l'éclairage ambiant augmente, plus la visibilité évaluée diminue à une valeur mesurée et fixée de coefficient d'extinction. Ce constat est d'autant plus net pour les panneaux opaques, tributaires de l'éclairage ambiant. L'effet de la couleur de la signalisation avait également été étudié. Les panneaux de couleur blanche ou naturelle étaient les plus facilement vus par les personnes. Les autres paramètres étaient d'ordre dimensionnels et liés à la puissance lumineuse. Cette étude a permis de conclure sur un schéma de mise en œuvre de la signalisation incendie.

La visibilité au travers des fumées et le facteur irritant de celles-ci ont beaucoup été étudiés dans la recherche. Cependant, l'introduction de pulvérisation d'eau dans ces milieux enfumés complique ces notions du fait de la diffusion importante du rayonnement introduite par les gouttelettes d'eau en suspension dans le milieu. La mesure dans de telles conditions est parfois compliquée et un des objectifs de la thèse était de mettre en place un dispositif de mesure optique permettant de rendre compte de l'atténuation du rayonnement dans un couloir en condition de feu réel.

1.4 Démarche du travail de thèse

Les conséquences de l'incendie peuvent être dramatiques pour les personnes. On a montré ici les phénomènes résultants du déclenchement d'un feu dans un milieu semi-confiné, les caractéristiques des fumées, la notion de stratification et les risques associés aux fumées. Différents systèmes de lutte contre l'incendie peuvent être employés pour la sécurité des personnes. D'une part, les systèmes de désenfumage naturels ou mécaniques vont permettre de conserver la stratification du milieu enfumé et ainsi faciliter l'auto-évacuation des personnes et l'intervention des services de secours. D'autre part, des systèmes actifs, de type aspersion d'eau peuvent être également installés dans certains ERP dans le but d'augmenter la charge calorifique acceptable dans les locaux mais aussi de contrôler l'expansion du feu. Cependant, les interactions peuvent être nombreuses entre ces différents moyens de lutte. Par exemple, l'aspersion d'eau sur un milieu stratifié peut entraîner la perturbation de l'équilibre entre les deux zones distinctes d'air ambiant et de fumée engendrant la déstratification de l'environnement. Par conséquent, les personnes et le personnel d'intervention peuvent se trouver piégés dans les locaux et leur évacuation peut s'avérer difficile notamment par le manque de visibilité. Ces conséquences peuvent dépendre de la technologie d'aspersion utilisée et essentiellement des débits d'eau et de la granulométrie des sprays.

La configuration utilisée et développée est une pièce attenante à un couloir (Figure 1.11). Une ouverture dans la pièce permet d'alimenter le foyer en oxygène et un linteau dans le couloir permet d'obtenir une couche de fumée relativement stable et homogène dans toute la longueur du couloir d'essais. Cette configuration sera décrite au Chapitre 4. La Figure 1.11 illustre également le phénomène de stratification en montrant une zone enfumée opaque en partie haute et une zone libre et claire en partie basse. Le foyer, source de fumées et de chaleur est placé dans la pièce. Le point d'injection de l'aspersion est situé dans le couloir. Les interactions eau/fumée sont étudiées dans le couloir sans que la source ne soit affectée par l'aspersion (ou très peu). Ainsi, la comparaison des différents systèmes d'aspersion peut être faite pour des conditions de température et d'opacité identiques au moment du déclenchement.

En premier lieu, le travail repose sur la quantification des phénomènes de stratification liés au déclenchement d'un feu dans un bâtiment et également en situation d'interactions eau/fumée. Dans la littérature scientifique, les études de stratification et de déstratification d'un milieu enfumé sont généralement réalisées sur la base de mesures de température. Les aspects optiques sont bien souvent étudiés qualitativement, en ne reposant que sur des observations d'essai. Ici, une métrologie a été mise en place permettant l'analyse et la quantification de l'effet de sprays de différents types (sprinkler et brouillard d'eau) sur l'écoulement de fumées en analysant les conséquences thermiques et optiques. Pour cela, un système permettant la mesure optique a été spécialement développé. Il n'existe pas actuellement de mesure d'opacité dans ces conditions réelles de feu. On expliquera dans ce document quels ont été les problèmes rencontrés, liés à l'environnement de feu et d'aspersion et le cheminement aboutissant au dispositif métrologique utilisé (Chapitre 2).

Le deuxième aspect du travail repose sur la simulation des essais réalisés à échelle réelle. Les simulations par le logiciel FDS 6 ont permis de conduire une étude de sensibilité, notamment sur les paramètres d'injection des différents sprays (ce qui est difficilement réalisable expérimentalement). De plus, cette étude est venue compléter l'analyse des phénomènes observés expérimentalement. Enfin, ce code a été utilisé dans le but d'obtenir les champs de concentration en eau et en suies dans le couloir, ces paramètres étant directement liés à la perte de visibilité dans les interactions eau/fumée sous aspersion. Ces champs et les diamètres de Sauter des gouttes ont été utilisés pour calculer les propriétés optiques du milieu absorbant/diffusant visant ensuite à l'estimation de la visibilité.

Enfin, le troisième axe de travail vise à estimer la visibilité dans le milieu fumée et gouttes d'eau (absorbant et diffusant). Les estimations de la visibilité reposent sur des corrélations empiriques établies par Jin dans les années 1970. Cette méthode de calcul est d'ailleurs utilisée dans FDS 6 lorsqu'il s'agit de calculer la distance de visibilité d'un objet. Cependant, l'aspersion introduit un caractère diffusant supplémentaire au milieu pouvant causer une perturbation supplémentaire de la visibilité. Un code de calcul basé sur une méthode de Monte-Carlo et sur la théorie de Mie pour les calculs des propriétés radiatives de l'eau a été développé (Chapitre 3). Ce code permettra par couplage avec FDS 6 d'estimer la distance de visibilité au travers d'un milieu absorbant et diffusant (Chapitre 5).

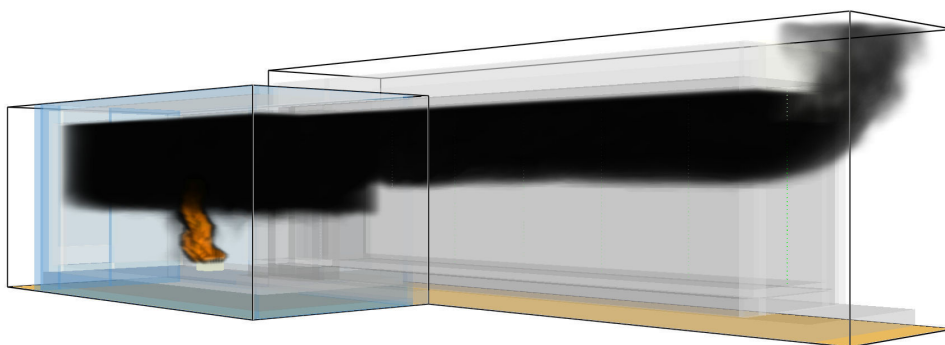


FIGURE 1.11 – Configuration de pièce couloir utilisée et illustration du phénomène de stratification (image extraite de « smokeview »)

Chapitre 2

Développement d'un dispositif d'opacimétrie

Sommaire

2.1	Principe de mesure optique	31
2.2	Technique de mesure de l'opacité et dispositif initial	32
2.3	Limites d'utilisation liées aux conditions de mesure	33
2.4	Dispositif développé	35
2.4.1	Dérivation par fibre optique	35
2.4.2	Protection du dispositif	36
2.5	Mise à l'épreuve du dispositif développé	38
2.5.1	Sensibilité à la température	38
2.5.2	Test des opacimètres soumis à un spray	40
2.5.3	Test d'exactitude	47
2.6	Conclusion du chapitre	49

Un dispositif a été développé pour permettre la mesure de l'opacité de l'environnement dans un milieu composé de fumées chaudes et de gouttelettes d'eau en suspension. Ce chapitre a pour but de décrire le dispositif de mesure optique, sa réalisation et son exactitude.

La première partie se concentre sur le principe de la mesure d'opacimétrie. Les principales caractéristiques de l'opacité sont présentées. De plus, cette partie permet d'introduire la réalisation de la mesure de transmittance par atténuation laser.

La deuxième partie présente les techniques de mesure et les éléments utilisés lors des essais de la thèse de Lechêne [75]. Cette technique a été reproduite dans le cadre du présent travail et certaines limites ont été mises en avant.

La troisième partie s'attache à décrire les problèmes rencontrés lors de la mise en place de ce premier dispositif. Les limites d'utilisation sont présentées et les conclusions sont tirées sur le système initial.

La quatrième partie représente le cœur du travail de développement de la métrologie et

notamment les solutions proposées pour faire face aux problèmes rencontrés. Cette partie se découpe elle-même en deux sections, la première étant basée sur la dérivation du signal lumineux par fibre optique et le seconde traitant de la protection des lentilles de collimation contre la pulvérisation d'eau et le dépôt de suie.

La cinquième et dernière partie expose les mises à l'épreuve du dispositif de mesure optique. Cette partie se décompose en trois axes : le premier axe propose d'évaluer la sensibilité à la température du dispositif (dilatation, tenue à la température de la fibre et des lentilles ...), le deuxième axe traite de l'encrassement de la lentille dans un milieu vicié, enfin, le troisième axe fait état de la fiabilité et de la précision de la mesure d'opacité.

2.1 Principe de mesure optique

L'opacité est une grandeur mesurable de façon indirecte, qui renseigne sur l'atténuation de la lumière le long d'un trajet optique. Dans la fumée, la loi qui exprime cette atténuation pour un parcours de longueur L à travers le milieu absorbant est la loi de Beer-Lambert :

$$I = I_0 \cdot \exp(-\kappa L) \quad (2.1)$$

où I_0 est la luminance incidente sans atténuation et I désigne la luminance du rayonnement après un parcours optique de longueur L dans le milieu de coefficient d'absorption κ (en m^{-1}). Le coefficient d'absorption du milieu semi-transparent traduit sa capacité d'absorption du rayonnement.

Si toutefois le milieu est diffusant et absorbant comme le mélange gouttelettes d'eau et suies par exemple, l'atténuation est représentée par le coefficient d'extinction. Le coefficient d'extinction est défini comme la somme des coefficients d'absorption κ et de diffusion σ . En supposant qu'il n'y a pas de renforcement par diffusion multiple, le coefficient d'absorption κ dans la relation 2.1 peut être remplacé par le coefficient d'extinction β . Cette hypothèse n'est vraie que pour le cas d'un milieu à diffusion simple. L'absorption et la diffusion sont des caractéristiques intrinsèquement liées au milieu. Elles dépendent des éléments en suspension (gaz, particules) et de la longueur d'onde du rayonnement considéré (visible, infrarouge).

La mesure d'opacité consiste à déduire le coefficient d'extinction β en enregistrant I et I_0 , sur un chemin optique connu. Plus l'épaisseur du chemin est réduite, plus la mesure du coefficient est locale. Le coefficient d'extinction β peut alors être donné par la relation :

$$\beta = -\frac{1}{L} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2.2)$$

Le rapport des luminances est généralement appelé transmittance et est noté Tr . La transmittance traduit la capacité du milieu à laisser passer le rayonnement lumineux sur une distance connue.

$$Tr = \frac{I}{I_0} \quad (2.3)$$

Une définition équivalente est la densité optique⁴ exprimée en bels (ou en décibels). La densité optique DO est parfois utilisée pour décrire l'opacité du milieu en faisant intervenir le logarithme en base 10 [34] :

$$DO = -\frac{1}{L} \log(Tr) \quad (\text{en bels}) \quad (2.4a)$$

$$DO_{10} = -10 \frac{1}{L} \log(Tr) \quad (\text{en décibels}) \quad (2.4b)$$

En pratique, il n'est pas possible de mesurer une luminance qui est une grandeur purement directionnelle. Cependant, il est possible de s'en approcher en mesurant des flux selon un angle

4. Le ratio densité optique (en db) par longueur du chemin optique (en m) est appelé un obscura

solide le plus réduit possible afin de considérer l'information comme quasi-directionnelle. De plus, si l'angle de réception est trop important, le rayonnement dévié par diffusion risque d'être détecté conduisant de ce fait à une sous-estimation de l'atténuation. La mesure de flux est faite par atténuation d'un faisceau laser.

2.2 Technique de mesure de l'opacité et dispositif initial

Le dispositif est composé d'une source lumineuse monochromatique, d'un photo-détecteur, d'une centrale d'acquisition et d'un ordinateur. Le dispositif est représenté sur la Figure 2.1.

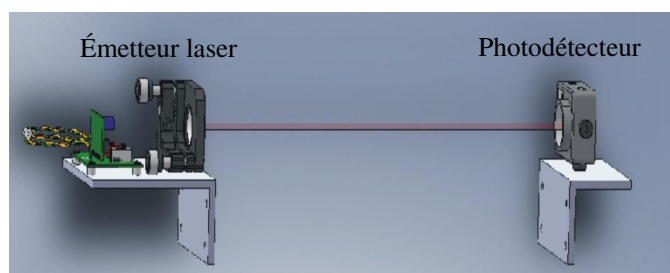
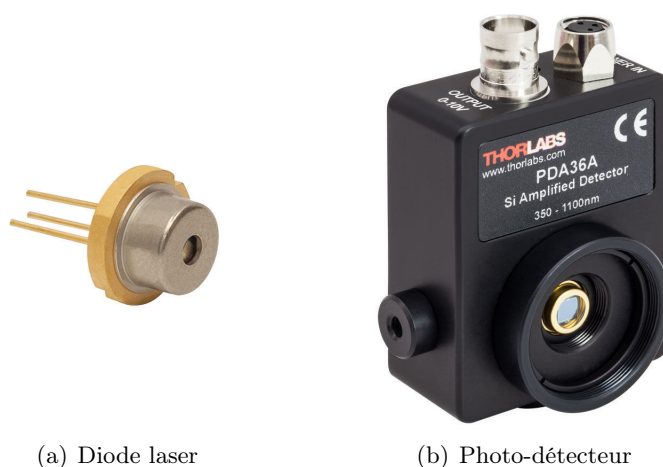


FIGURE 2.1 – Dispositif initial mis en place lors des premiers essais de feu

La source lumineuse est une diode laser HL6335G de la marque Opnext émettant un signal laser visible dont la longueur d'onde du pic d'émission est égale à 635 nm. La puissance lumineuse est de 5 mW pour une alimentation en courant de 25 mA à une température de 25 °C. Le faisceau est presque circulaire, contrairement à la plupart des diodes pour lesquelles le faisceau est elliptique. La diode laser est pilotée par un circuit électrique alimenté par une pile de 9 V. Le circuit électrique permet de contrôler le courant d'alimentation de la diode laser en le stabilisant en cas de variation de température. La température limite d'opération est de 50 °C. La diode est placée dans un collimateur de faisceau.

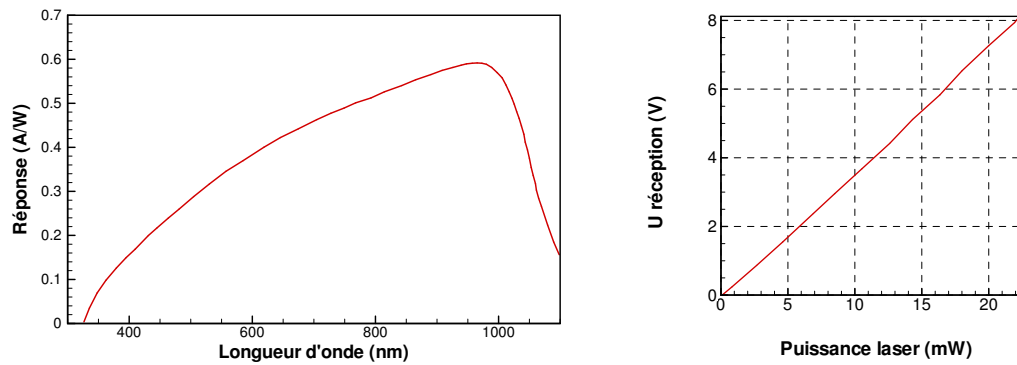


(a) Diode laser

(b) Photo-détecteur

FIGURE 2.2 – Photos de la diode laser HL6335G et du photo-détecteur DET36A

Un photo-détecteur est positionné face à la source laser. Le photo-détecteur transforme le flux lumineux reçu en signal de tension électrique. Le photo-détecteur dispose d'une photo-diode PIN (« Positive Intrinsic Negative ») dont la zone réceptrice est de 13 mm^2 ($3,6 \times 3,6 \text{ mm}$). Pour une distance émetteur-récepteur de 10 cm, la déviation maximale du faisceau est de $0,36^\circ$. Au delà, le faisceau n'est plus reçu par la photo-diode. La sensibilité de la photo-diode s'étend de 350 à 1100 nm, c'est-à-dire au-delà de la gamme du spectre visible. Le pic de réception est situé à 950 nm comme le montre la Figure 2.3a. Ce type de photo-détecteur est choisi pour la linéarité de sa réponse en fonction de l'intensité du rayonnement incident (Figure 2.3b). La température limite d'utilisation du détecteur est également de 50°C .



(a) Réponse spectrale de la photo-diode

(b) Linéarité de la réponse de la photo-diode en fonction de la puissance laser à 642 nm

FIGURE 2.3 – Caractéristiques de la réponse de la photo-diode

La tension mesurée en situation d'atténuation (fumée et/ou eau) est indiquée « durant essai ». Cette mesure de tension est comparée à la mesure du signal à l'instant 0, indiquée « avant essai ». La transmittance peut être évaluée via le rapport des flux :

$$Tr = \frac{I}{I_0} = \frac{U_{\text{durant essai}}}{U_{\text{avant essai}}} \quad (2.5)$$

2.3 Limites d'utilisation liées aux conditions de mesure

Ce dispositif a d'abord été testé et validé en laboratoire par Lechêne [75] pour la mesure d'atténuation par un brouillard d'eau dans le visible avant d'être utilisé en condition de feu. Les conditions d'essai font que le dispositif peut être confronté à des températures élevées, plus de 200°C par endroit et à la présence de gouttes d'eau en suspension du fait de la pulvérisation par aspersion. Durant le développement du dispositif et les essais préliminaires, trois problèmes majeurs ont donc été identifiés : la température élevée, le ruissellement de gouttelettes d'eau et l'encrassement des collimateurs (par condensation et dépôt de suie).

Premièrement, le dispositif électronique est sensible à la température. Le système a été placé dans une étuve, à 100°C (Figure 2.4), température contrôlée durant le test. Deux mesures ont été faites : la première au niveau du circuit de contrôle de la diode (U émetteur) et la deuxième

aux bornes du photo-récepteur ($U_{\text{récepteur}}$). La mesure aux bornes du circuit de contrôle donne les informations sur le fonctionnement et la régulation de l'émission laser. La mesure aux bornes du récepteur renseigne sur le moment où le signal est totalement perdu.

On observe une augmentation du signal à l'émission, atteignant un pic au bout de 30 minutes. Ce pic d'émission est dû à l'échauffement de la diode laser. En effet, un deuxième test a été effectué et le circuit électrique a été placé hors de l'étuve. La perte de signal a eu lieu au même instant, cependant sans faire apparaître le pic d'émission. À partir du seuil 1,6 V, le contrôleur ne garantit plus le maintien du courant d'alimentation de la diode et la tension chute à 0. On peut imaginer que l'émission laser est perdue. La réception permet de confirmer ces observations. Durant la phase de croissance de la tension d'alimentation, le récepteur mesure un signal constant de 10,2 V puis s'effondre au bout de 30 minutes au moment de la défaillance du circuit. La perte de signal au niveau de la réception peut être également due au dysfonctionnement du détecteur. Cependant, afin d'écartier cette supposition et pour vérifier l'état du matériel, le récepteur a été placé à la fin du test à température ambiante face à une diode non-endommagée de même puissance que celle placée dans l'étuve. Le signal mesuré était de 10,2 V.

Plusieurs tests ont ensuite été effectués dans l'étuve afin de retarder l'échauffement de la diode et du circuit électronique. Par exemple, le matériel a été protégé par de la laine isolante, mais l'extinction de la diode a tout de même eu lieu. Placés en partie basse, ce dispositif a cependant pu être utilisé qualitativement pour détecter l'effet du spray sur l'abatement de la fumée lors d'essais de calibration.

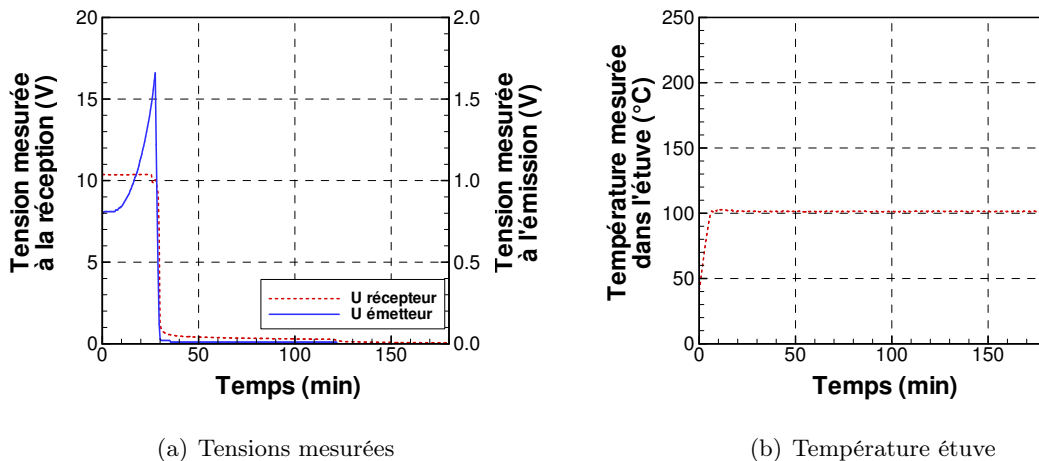


FIGURE 2.4 – Test en étuve du dispositif initial d'opacimétrie laser

Deuxièmement, l'aspersion peut entraîner le ruissellement ou le dépôt direct de l'eau sur la lentille de collimation. Cela cause la diffusion du rayonnement à l'émission et le signal de réception est perdu. Ce phénomène peut également se produire au niveau de la photo-diode en réception et perturber la mesure. Le dispositif doit être protégé afin de limiter ce problème au maximum.

Troisièmement, la présence de particules de suie en suspension et l'humidité importante de l'environnement (fumée + aspersion) peut encrasser les surfaces de mesures : 1-la suie peut se

déposer directement sur les surfaces de la lentille (au niveau de l'émission) et de la photo-diode de réception et 2-l'humidité importante de l'environnement peut conduire à la condensation d'eau sur les surfaces plus froides.

Compte tenu des tests réalisés, ce dispositif initialement prévu a été abandonné dans la suite des essais.

2.4 Dispositif développé

2.4.1 Dérivation par fibre optique

Le dispositif présenté ici a été développé et adapté pour faire face aux difficultés de mesures liées à l'environnement de feu. Cependant, le principe de mesure d'atténuation laser reste le même. La solution est de guider le signal lumineux par un système de fibre optique afin d'extraire l'émission laser et le récepteur du milieu enfumé (Figure 2.5). De plus, le choix de l'émetteur est orienté vers une source laser stabilisée permettant de sélectionner 4 longueurs d'onde. Les récepteurs utilisés sont conservés et adaptés à la réception du signal par fibre optique.

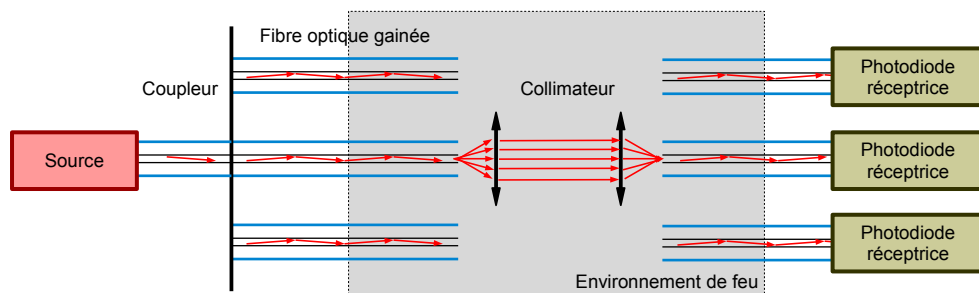


FIGURE 2.5 – Principe général du dispositif laser utilisé dans la mesure de transmittance

Le circuit de contrôle est remplacé par une source laser plus stable permettant le maintien de la température des 4 diodes. La source lumineuse Thorlabs dispose de 4 chaînes lasers fibrées indépendantes. Les chaînes sont adaptées pour recevoir 4 diodes de longueurs d'onde comprises entre 406 et 1550 nm. Le Tableau 2.1 décrit les 4 diodes pilotées par la source laser. Ces longueurs d'onde permettent de couvrir la gamme du visible : 405 nm (proche de l'ultra-violet), 520 nm (dans le vert), 642 nm (dans le rouge) et 785 nm (proche de l'infrarouge). La source permet également de contrôler de manière indépendante l'intensité d'alimentation de chacune des diodes lasers et ainsi d'en faire varier la puissance d'émission. De plus, un système peltier est installé au niveau de chaque diode offrant un choix de réglage de la température entre 20,0 et 30,0 °C. La régulation de la température garantit la stabilité de l'émission laser à $\pm 0,02\%$ ⁵.

Le signal laser peut être découpé en 4 signaux lasers d'intensité chacune environ égale à 25 % de l'émission en utilisant des coupleurs fibrés. Le dispositif comporte 5 coupleurs ce qui permet plusieurs configurations. Par exemple, 1 coupleur à la sortie de la source avec en parallèle

5. La tension au récepteur est mesurée durant 120 secondes à $8,118\text{ V} \pm 1,4 \times 10^{-3}$ pour un courant de 116,5 mA imposé au laser

Paramètres	Chaîne 1	Chaîne 2	Chaîne 3	Chaîne 4
Diode Laser	NDV4312-402	PL520	HL6364DG	LS-D6-7-780
Crête (nm)	405	520	642	785
Puissance (mW)	28,92	10,55	21,74	26.24
Constructeur	NICHIA	OSRAM	Opnext	EGISMOS

TABLEAU 2.1 – Diodes lasers installées dans le contrôleur

4 coupleurs supplémentaires en série de celui-ci donnent 16 signaux de même longueur d'onde et d'intensité égale à 6,25 % de la puissance d'émission. Un autre exemple peut être de placer 4 coupleurs en parallèle sur chacune des diodes de la source, on récupérerait ainsi 16 signaux de 4 fois 4 longueurs d'onde différentes. En réalité, les coupleurs utilisés sont optimisés pour une longueur d'onde proche de 642 nm. Aux autres longueurs d'onde, la distribution du signal entre les fibres n'est pas équi-répartie. La mesure de référence devra être considérée à la longueur d'onde de 642 nm.

Le signal laser est ensuite conduit par une fibre optique mono-mode du type SM1550 (« Single Mode »). Le cœur de la fibre de 9 μm de diamètre est gainé par un polymère polyimide permettant la résistance et la thermostabilité de la fibre. La gaine de protection est en acier inox de 3 mm.

Le collimateur (ou lentille) permet de collimater le faisceau lumineux en sortie de fibre. D'après le fabricant, la tache lumineuse est circulaire, son diamètre est évalué à 1143,7 μm à 1 cm et à 1336,0 μm à 10 cm. Un support de maintien du collimateur à l'émission permet le réglage directionnel micrométrique du laser.

Le signal lumineux est reçu par un second collimateur qui focalise le faisceau au cœur d'une fibre multi-mode SR300 (gainée comme la fibre d'émission). La surface de réception est d'environ 30 mm² (diamètre de lentille de 6 mm). La fibre multi-mode permet d'augmenter l'angle de réception afin de s'affranchir des problèmes de dilatation thermique et du désalignement émetteur-récepteur. Le fabricant a mesuré le diamètre du faisceau et l'a évalué à 1562,7 μm à 1 cm et à 4473,9 μm à 10 cm. Le signal reçu dans chaque fibre réceptrice est ensuite conduit jusqu'aux 16 photo-diodes (Figure 2.6). Le collimateur de réception est maintenu par un support rigide en aluminium ne permettant pas de degré de liberté de mouvement.

En résumé, avec ce dispositif, seules les fibres optiques et les collimateurs se trouvent dans le milieu enfumé. Les problèmes liés aux hautes températures sont résolus en utilisant des matériaux résistants pour les fibres (gaines polyimide et acier). De plus, les supports émetteur et récepteur sont fixés à la même barre en aluminium de section carré de 4 cm² pour éviter qu'un élément se désaxe par rapport à l'autre.

2.4.2 Protection du dispositif

Le système de dérivation de la source et des récepteurs ne permet cependant pas d'éviter le ruissellement, le dépôt de suie et de gouttes ou bien la condensation de l'eau sur les collimateurs.



FIGURE 2.6 – Récepteurs photo-diodes utilisés pour la mesure d'opacité

Les collimateurs sont donc protégés par des tubes de 80 mm de longueur et de 11 mm de diamètre intérieur (correspondant au diamètre extérieur d'un collimateur). L'extrémité de ces tubes est partiellement réduite par des bouchons percés de 3 mm d'ouverture.

Le dispositif est placé dans des boîtes de protection. Ces boîtes ont un rôle de barrière physique servant à limiter les dépôts d'eau et de suie sur le dispositif. De plus, une légère surpression permet le maintien d'un air non-vicié à l'intérieur des boîtes. La surpression doit tout de même être limitée afin de ne pas perturber les écoulements au niveau du trajet optique et fausser la mesure.

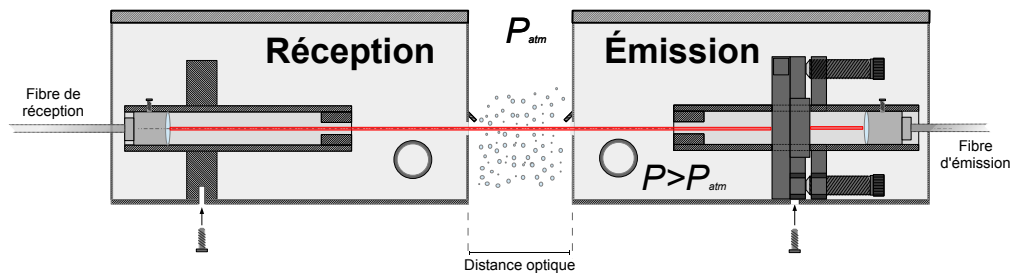
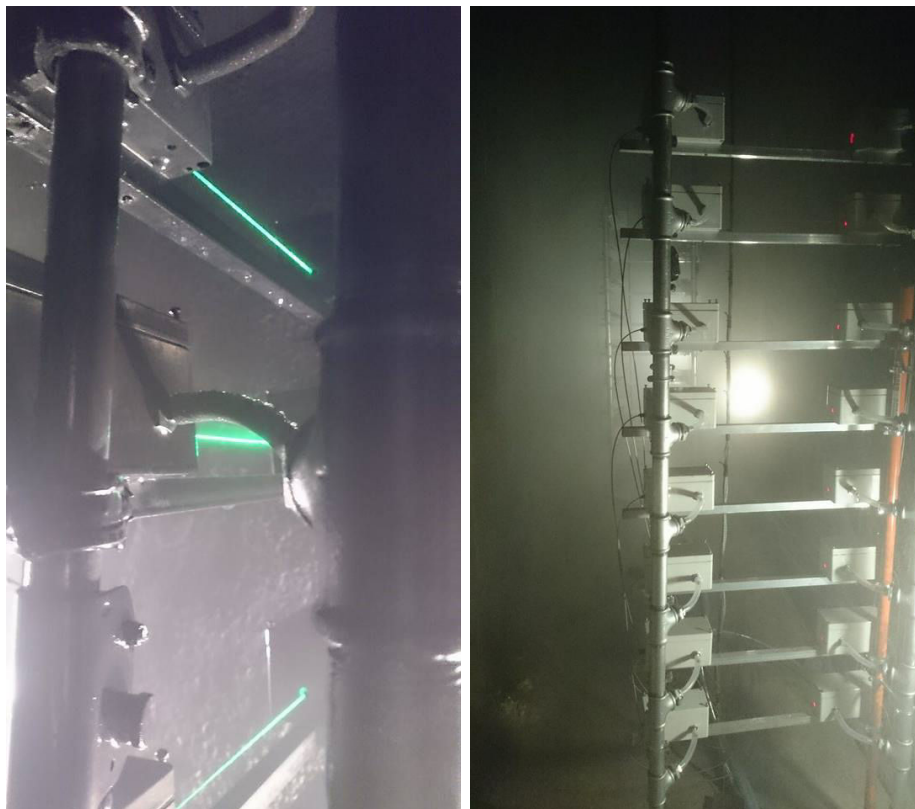


FIGURE 2.7 – Schéma du système de support optique amélioré dans le brouillard

Un dispositif de soufflage est placé hors du couloir. Des tubes conduisent l'air au niveau des points de mesure. Les sections de tube sont importantes (25 mm), ce qui limite les pertes de charge et répartit le soufflage de façon égale dans toutes les boîtes. Une rampe de distribution est utilisée pour répartir le soufflage dans les 16 boîtes du dispositif.

En supposant que les gouttes et les suies ne pénètrent pas dans les boîtes et n'entraînent pas d'atténuation du signal, la distance optique est mesurée entre la sortie des boîtes « émission » et l'entrée des boîtes « réception » (Figure 2.7).



(a) Tube alimentant la boîte

(b) Distribution de l'air soufflé en 16 points

FIGURE 2.8 – Système de mise en surpression des boîtes durant des essais de pulvérisation

2.5 Mise à l'épreuve du dispositif développé

Le système de mesure optique est confronté aux conditions d'utilisation dans un cas de feu et d'aspersion. Premièrement, le dispositif est soumis à une élévation de température dans un four. Deuxièmement, il est placé dans des conditions de pulvérisation extrême.

2.5.1 Sensibilité à la température

D'après les essais préliminaires, les températures dans le couloir peuvent atteindre $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $1,8\text{ m}$ au-dessus du sol. Les fibres et les collimateurs peuvent être positionnées à $1,8\text{ m}$ et donc être soumis à cette température. Les fibres sont placées dans un four et subissent des tests d'échauffements et refroidissements successifs.

Le test 1 est réalisé avec la diode de 642 nm de longueur d'onde (Tableau 2.2). La distance optique est de 10 cm et la puissance laser est de $8,5\text{ mW}$ (intensité de courant de la source : 80 mA).

Trois cycles successifs sont réalisés alternant échauffement et refroidissement de l'environne-

Test	Diode	L_{optique}	Intensité	T_{max}
n°1	642 nm	10 cm	80 mA	230 °C
n°2	642 nm	1 cm	80 mA	212 °C

TABLEAU 2.2 – Récapitulatif des paramètres de test n°1 et 2

ment gazeux (air) à l'intérieur du four. La courbe Figure 2.9a présente les cycles de chauffe et de refroidissement en parallèle de la mesure de signal au niveau du récepteur. La température maximale atteinte est de 230 °C, ce qui donne une marge de sécurité de 70 °C par rapport aux températures relevée dans les tests préliminaires. De plus, la stabilité de la puissance du laser est vérifiée durant le test.

Le premier cycle dure 120 minutes. La température atteint 200 °C au bout de 20 minutes, le refroidissement est lent pendant les 30 minutes suivantes jusqu'à une température de 150 °C. Avant la montée en température, le signal est stable, mesuré à 9,060 V. Ensuite, le signal lumineux reçu par le photo-détecteur diminue, avec un léger retard par rapport à l'augmentation de la température. La température mesurée est celle de l'environnement gazeux, le retard correspond au temps que la température du dispositif s'équilibre avec la température du four. La valeur minimale mesurée est de 8,802 V soit une perte de 2,9 %. Enfin, la porte du four est ouverte, laissant le système à température ambiante jusqu'au début du nouveau cycle. Le signal remonte à sa valeur initiale de 9,060 V.

Le deuxième cycle est plus court (70 minutes) mais plus contraignant pour le dispositif. La montée en température est rapide, 230 °C sont atteints en moins de 10 minutes. Puis, la température passe de 230 °C à 100 °C en 10 minutes et à moins de 50 °C en 20 minutes. Le pic de température pourrait dans ce cas représenter le passage de fumée chaude au niveau du dispositif suivi par une phase d'aspersion entraînant le refroidissement. La perte de signal maximale est de 3,4 % (signal minimum : 8,746 V).

Le pic de température du troisième et dernier cycle est moins important afin de se rapprocher de la température de 160 °C mesurée à 1,8 m dans le couloir lors des essais préliminaires. La perte de signal est moins importante que dans les deux cycles précédents. Elle est évaluée au maximum à 1,6 % ($U_{\text{min}} = 8,914$ V). Cette variation est tout à fait acceptable pour les mesures dans le couloir.

Pour conclure, la perte de signal est d'autant plus importante que la température du milieu est élevée. De plus, il y a un réel lien entre la durée d'échauffement et le temps de retour à l'état stable de la mesure de tension. En effet, au regard de la Figure 2.9, plus le temps de chauffe est long, plus le signal mesuré met de temps pour revenir à la mesure à l'instant 0.

Les variations de signaux mesurés peuvent être causées par la dilatation thermo-mécanique des éléments de maintien engendrant le désalignement du dispositif. Afin de vérifier s'il s'agit d'une dilatation mécanique des éléments supports, la distance optique est réduite. Le Tableau 2.2 regroupe les caractéristiques de l'essai réalisé.

La courbe de température sur la Figure 2.9b présente l'échauffement puis le refroidissement

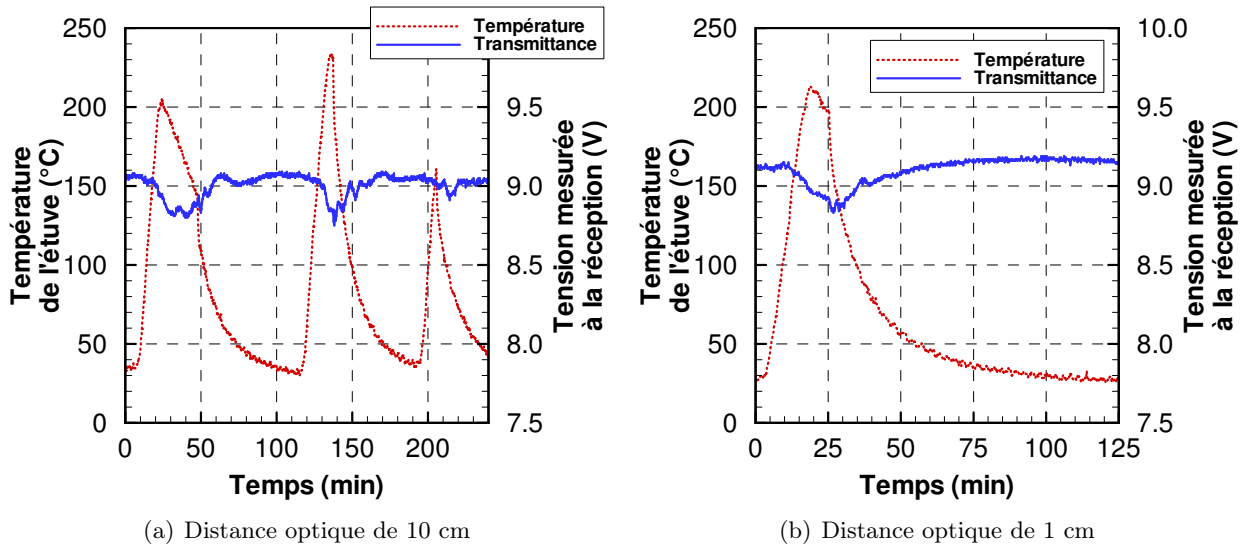


FIGURE 2.9 – Évolution du signal mesuré au récepteur en fonction de la chauffe

reproduit pour ce second test. La valeur maximale de température est atteinte au bout de 25 minutes à 212 °C. La température est maintenue au-dessus de 200 °C durant 10 minutes puis le système se refroidit progressivement jusqu'à la température de 30 °C au bout de 120 minutes de test. Avant la chauffe, le signal est stable à 9,119 V. Durant la chauffe, le signal diminue atteignant un niveau de 8,832 V (-3,1 %) quelques minutes après le pic de température. Ensuite, pendant le refroidissement, le niveau du signal s'établit à 9,194 V (+0,8 %) au-dessus du niveau de référence.

La variation de signal est du même ordre de grandeur (environ 3 %) pour les deux tests réalisés avec des chemins optiques différents. La dilatation mécanique des pièces métallique ne semble pas être la cause principale de la perte de signal. Cependant, on peut émettre des doutes sur la rigidité des jonctions entre les collimateurs et les fibres pouvant faire varier le niveau du signal lumineux reçu.

2.5.2 Test des opacimètres soumis à un spray

2.5.2.1 Tests sur un élément en condition laboratoire

La pulvérisation d'eau d'une part et la production de fumée d'autre part peuvent encrasser les collimateurs. Le système de soufflage dans les boîtes est d'abord testé sous un spray de type brouillard d'eau au LEMTA.

La pulvérisation d'eau est produite par huit tuyères de type TP400067 de chez *Spraying Systems*. Le banc d'essai complet est décrit dans la thèse de Lechène [75]. Quatre sprays sont ascendants et les quatre autres sont descendants. Pour une pression de 4 bars, le débit de chaque tuyère est de 0,32 L/min et la vitesse d'injection est de 24,4 m/s. Le diamètre de Sauter des gouttes est de 100 μm environ.

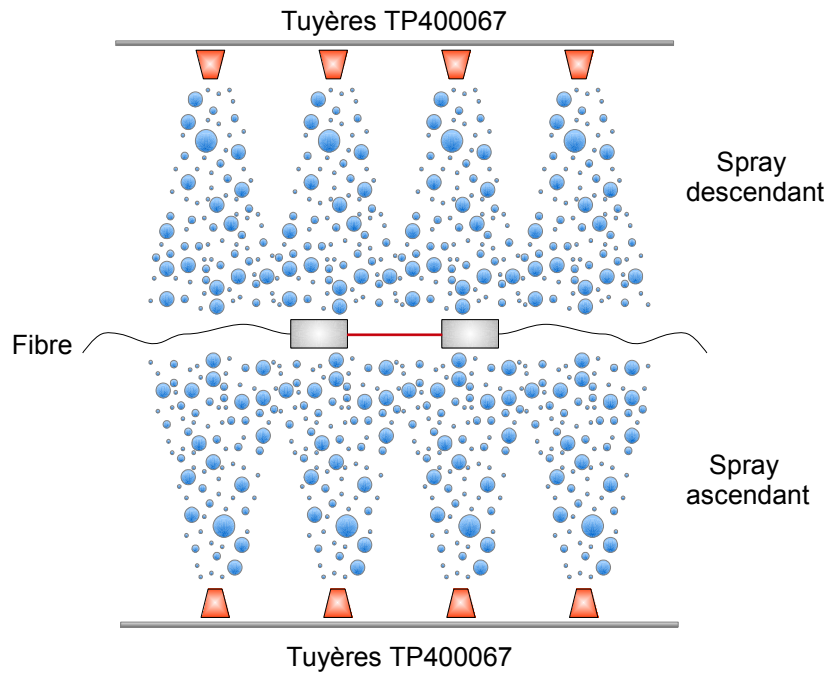


FIGURE 2.10 – Positionnement du dispositif de mesure optique pour le test sous condition d'aspersion

Le dispositif optique est placé à égale distance entre les tuyères supérieures et les tuyères inférieures, à l'endroit le plus critique pour le système comme indiqué sur la Figure 2.10.

Le premier test est réalisé sans soufflage dans les boîtes. Trois phases d'aspersion sont enchaînées. La première dure 30 secondes, la deuxième 60 secondes et la dernière 80 secondes. Les résultats de ce test sont présentés sur la Figure 2.11a. Après la première phase d'aspersion, le niveau de transmittance remonte à son niveau initial de 100 %. Au bout d'une vingtaine de secondes, le niveau de transmittance décroît progressivement, la dérive est de 0,5 %/min. Le constat est identique après la deuxième phase d'aspersion, le signal remonte puis la dérive continue (également évaluée à 0,5 %/min). Enfin, le signal continue sa dérive durant l'activation de la dernière phase d'aspersion. La dérive continue ainsi jusqu'à la fin du test. Cette dérive peut être due à la condensation d'eau sur la lentille. En effet, l'eau est susceptible de pénétrer dans les boîtes durant l'aspersion. À la fin du test, les lentilles sont désembuées avec un souffleur d'air sec, le signal est de nouveau de 100 %.

Le deuxième test est réalisé avec le soufflage d'air dans les boîtes (Figure 2.11b). L'aspersion est activée durant 90 secondes. Durant l'aspersion, l'atténuation est de 8 % (ce qui est logiquement attribuable à l'atténuation par le spray) puis le signal remonte à la valeur initiale de 100 % à la fin de l'aspersion. La méthode de soufflage semble efficace pour éviter la condensation d'eau sur les collimateurs, dans le cas de tests en laboratoire.

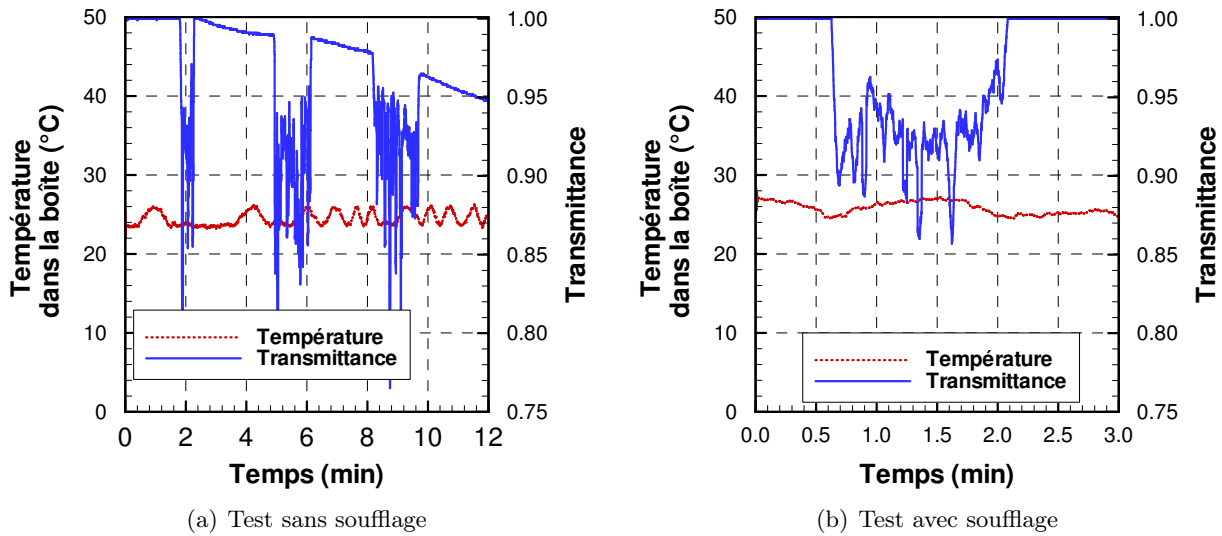


FIGURE 2.11 – Évolution de la transmittance durant l'aspersion continue

2.5.2.2 Tests en conditions d'essais références

Le dispositif est placé dans les conditions d'essais références utilisées lors de la campagne. Ces conditions et la position de la métrologie sont décrites dans le Chapitre 4. Le confinement du couloir peut avoir un impact sur les phénomènes observés. Les opacimètres sont placés dans un couloir de 9 m. Les sections sont à un tiers (TR10i) et deux tiers (TR20i) de la longueur totale du couloir (Figure 2.12). Les 2×8 opacimètres sont placés en échelle de 0,4 m jusque 1,8 m avec 0,2 m de hauteur entre deux supports. La distance optique pour la mesure de transmittance est de 30 cm entre chaque émetteur et récepteur. La pulvérisation se situe entre les deux positions, 0,5 m en aval de la section TR10i et à 2,5 m en amont de la section TR20i.

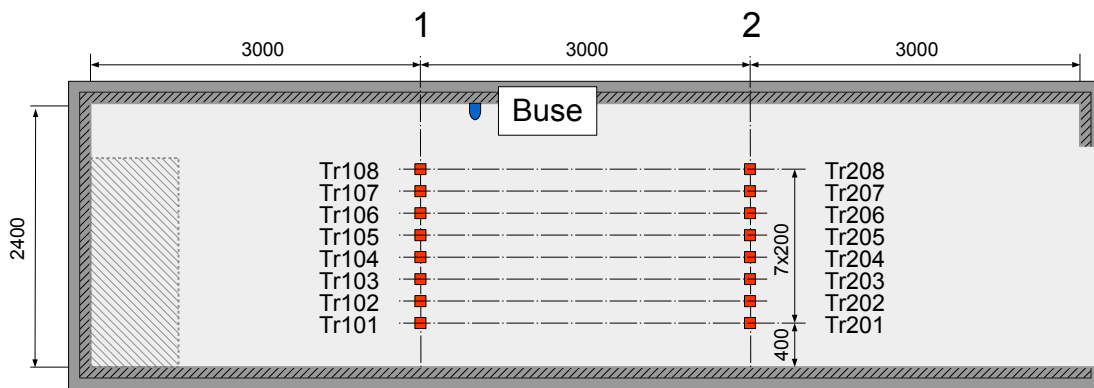


FIGURE 2.12 – Configuration de test de la métrologie optique en condition d'essais

Les technologies utilisées sont de types sprinklers, que l'on nommera basse pression et haute

pression et un système brouillard d'eau. Ces systèmes seront décrits en détail dans le chapitre suivant. À titre d'indication, les débits d'eau pulvérisés par le sprinkler basse pression (0,27 bar), le sprinkler haute pression (1,3 bar) et le brouillard d'eau (100 bars) sont respectivement de 40 L/min, 90 L/min et 27,5 L/min. Les tailles de gouttes sont respectivement de l'ordre de 2 mm, 1 mm et une dizaine de microns.

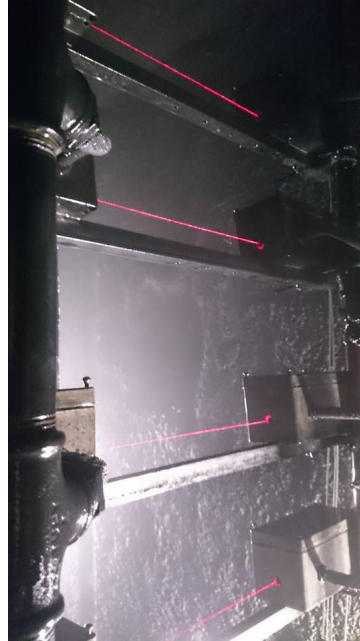


FIGURE 2.13 – Dispositif laser sous conditions d'aspersion par brouillard d'eau

Chaque technologie est testée. La durée de pulvérisation est découpée en deux phases : une pulvérisation continue de 5 minutes et une seconde pulvérisation intermittente de 3 périodes alternant une minute d'activation et une minute d'arrêt. Le protocole est identique pour chacune des technologies testées. L'aspersion continue est déclenchée à $t = 60$ s durant 300 s. L'aspersion par intermittence est déclenchée 60 s plus tard. Trois cycles alternant une minute d'activation et une minute d'arrêt sont ensuite réalisés. La dernière pulvérisation se termine à l'instant $t = 720$ s. Enfin, un délai de trois minutes est laissé afin d'observer le retour à l'état initial. Pour plus de lisibilité, les mesures sont présentées sur 4 figures découpant les sections 1 et 2 en une partie basse (0,4 à 1 m) et une partie haute (1,2 m à 1,8 m).

La Figure 2.14 présente les évolutions temporelles de transmittances mesurées pour le sprinkler basse pression. L'échelle est choisie entre 0,2 et 1,0 afin de pouvoir comparer les trois niveaux de transmittance induits par les différentes technologies de pulvérisation. La transmittance mesurée durant les phases d'aspersion est stable pour toutes les mesures. Le régime de pulvérisation est établi instantanément et l'atténuation par le sprinkler basse pression varie peu durant l'activation. L'atténuation est plus prononcée en section 1, située dans le cône d'aspersion. Toutes les mesures reviennent à leur niveau initial de transmittance quelques secondes après l'arrêt de l'aspersion.

En section 1, sous 1,2 m, la transmittance mesurée est de 95 %, alors que la transmittance à 1,8 m est de 90 %. Un gradient de transmittance est observable entre les deux extrêmes,

la transmittance étant décroissante en fonction de l'élévation dans le couloir. En section 2, le sprinkler basse pression a peu d'effet sur la mesure de transmittance. Une faible atténuation est visible en partie basse. Le gradient (faible) est inversé par rapport à celui vu en section 1. La concentration en eau est plus importante au niveau de la section 1. Les gouttes, de taille relativement élevée tombent assez rapidement vers le sol du fait de la vitesse d'injection et de la gravité. Cela explique pourquoi l'atténuation est plus faible en section 2 et pourquoi on retrouve plus d'eau en partie basse. Les grosses gouttes ont une capacité de pénétration dans l'air plus forte que les petites gouttes. On les retrouve donc plus bas sous l'injection. Les gouttes diffusent d'autant plus le rayonnement que leur taille est proche de la longueur d'onde.

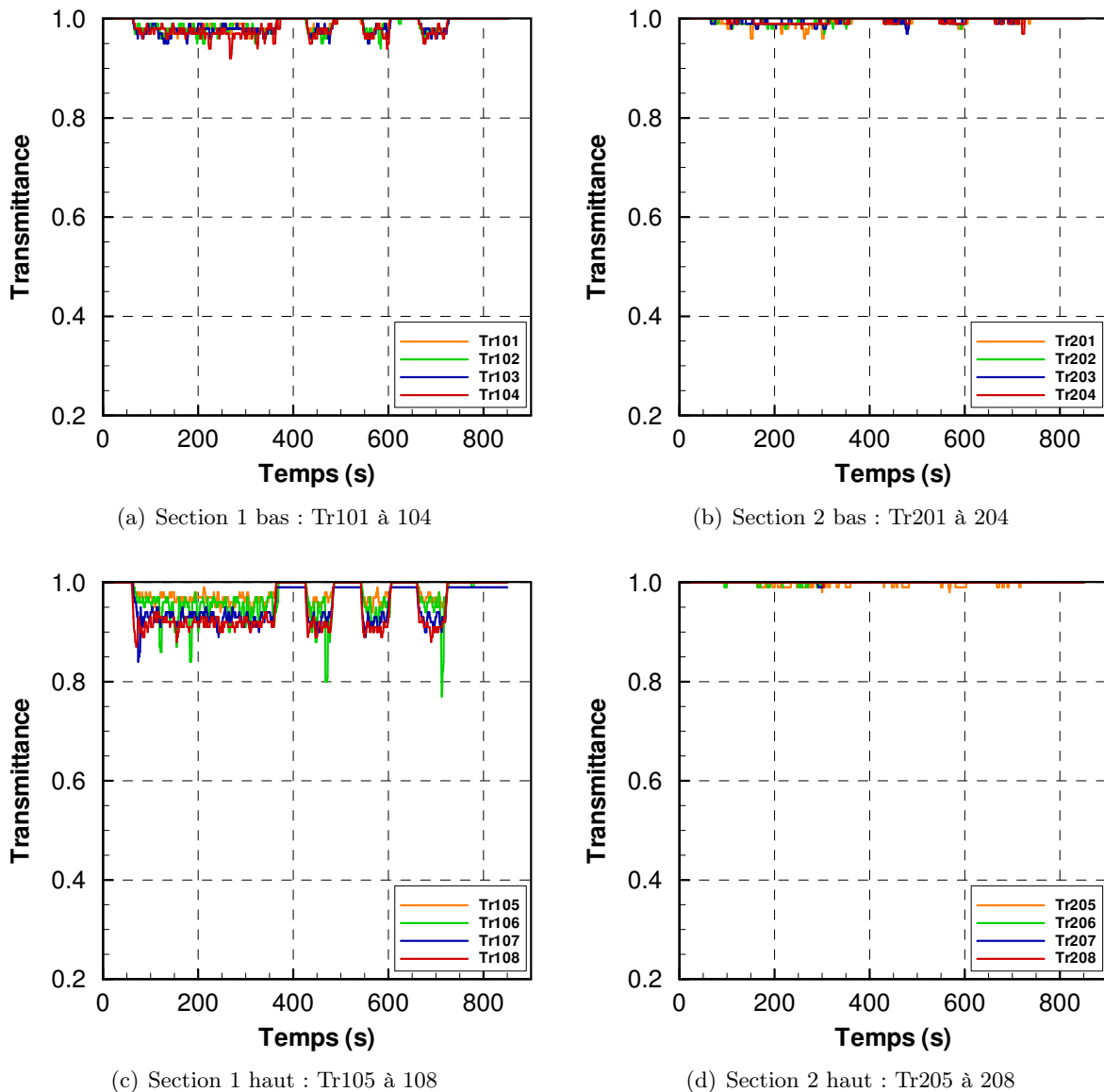


FIGURE 2.14 – Transmittances mesurées dans le couloir lors de la pulvérisation par sprinkler basse pression seul

La Figure 2.15 présente les résultats de mesure des tests réalisés avec le sprinkler haute

pression. Tout d'abord, le niveau global de transmittance atteint lors de la pulvérisation par sprinkler haute pression est nettement plus bas que celui obtenu avec la pulvérisation par sprinkler basse pression. Cela pour deux raisons : la première est que le débit d'eau pulvérisé est doublé⁶ et la seconde est que le diamètre des gouttes est réduit lorsque la pression augmente⁷. Le niveau de transmittance mesurée est moins stable que dans le cas des tests avec le sprinkler basse pression. En effet, l'aspersion par sprinkler haute pression est plus agressive pour la métrologie, ce qui implique un bruit de mesure important (vibrations des émetteurs et récepteurs, quantité élevée d'eau pulvérisée, densité de goutte accrue etc...) Les mesures Tr107 et Tr108 ne sont pas exploitables du fait de l'impact direct du spray sur le dispositif (Figure 2.15). À la fin du test, nous avons constaté que les émetteurs 107 et 108 avaient été désaxés (probablement dû à l'impact du spray sur les boîtes).

La transmittance en partie basse est de 80 % en section 1. De plus, un gradient est également visible entre 0,4 m au-dessus du sol (80 %) et 1,4 m (60 %). En section 2, la transmittance est de 95 % au-dessus de 1,2 m et de 90 % à 0,4 m. La gravité et l'injection descendante des gouttes tendent une nouvelle fois à augmenter la concentration en eau vers le sol lorsqu'on s'éloigne de la buse. À l'arrêt de l'aspersion, les niveaux de transmittance remontent à 1, quasiment instantanément. Les gouttes d'eau ne restent pas en suspension et retombent très vite au sol.

Les résultats pour les tests par brouillard d'eau sont présentés sur la Figure 2.16. L'atténuation apparait plus forte que pour les technologies présentées précédemment. En effet, le niveau de transmittance moyen en section 1 basse est de 60 % et atteint moins de 50 % à 1,6 m au-dessus du sol. Bien qu'on ait observé beaucoup de battements dans la pulvérisation, le niveau moyen de transmittance de chaque hauteur est assez stable.

En section 1, la transmittance est de 60 % sous 1,0 m et s'établit entre 55 % et 45 % entre 1,2 m et 1,6 m. Le gradient est à peine visible, la concentration en eau et la taille de gouttes doivent être sensiblement uniformes dans le cône d'aspersion. Cependant, à 1,8 m la transmittance est plus élevée qu'en partie basse, près de 80 %. Ce point de mesure est probablement situé au-dessus du cône de pulvérisation. Cette hypothèse n'est pas confirmée par les observations durant le test, la visibilité étant trop réduite. En section 2, la transmittance est relativement homogène sur la hauteur de mesure. Cependant, on observe tout de même une atténuation légèrement plus importante lorsqu'on s'approche du sol. La concentration en eau est plus élevée proche du sol, du fait de la gravité. Le niveau de transmittance entre les cycles d'intermittence n'atteint jamais 1 pour la section 1. De plus, sur les deux sections, on peut voir que le niveau à l'arrêt de l'injection de gouttes remonte plus lentement que pour les cas de sprinkler. Cela est dû aux fines gouttelettes d'eau qui restent en suspension dans le milieu gazeux.

Ces tests ont montré l'efficacité du système de soufflage pour minimiser les dépôts de gouttes et la condensation sur les collimateurs lors de la pulvérisation d'eau. Le sprinkler a un effet plutôt localisé sur l'atténuation du rayonnement, bien que les gouttes soient envoyées plus loin pour le sprinkler haute pression. Ce constat est également fait qualitativement lors de l'observation de ces tests. Le brouillard semble pulvériser dans tout le couloir une quantité de gouttelettes très importante. Les gradients de transmittance observés en section 1 peuvent être dus aux concentrations en eau et/ou à la répartition des gouttes en fonction de leur taille. En section

6. La quantité d'eau en suspension joue un rôle important sur le coefficient de diffusion

7. Les plus petites particules diffusent plus efficacement le rayonnement [28]

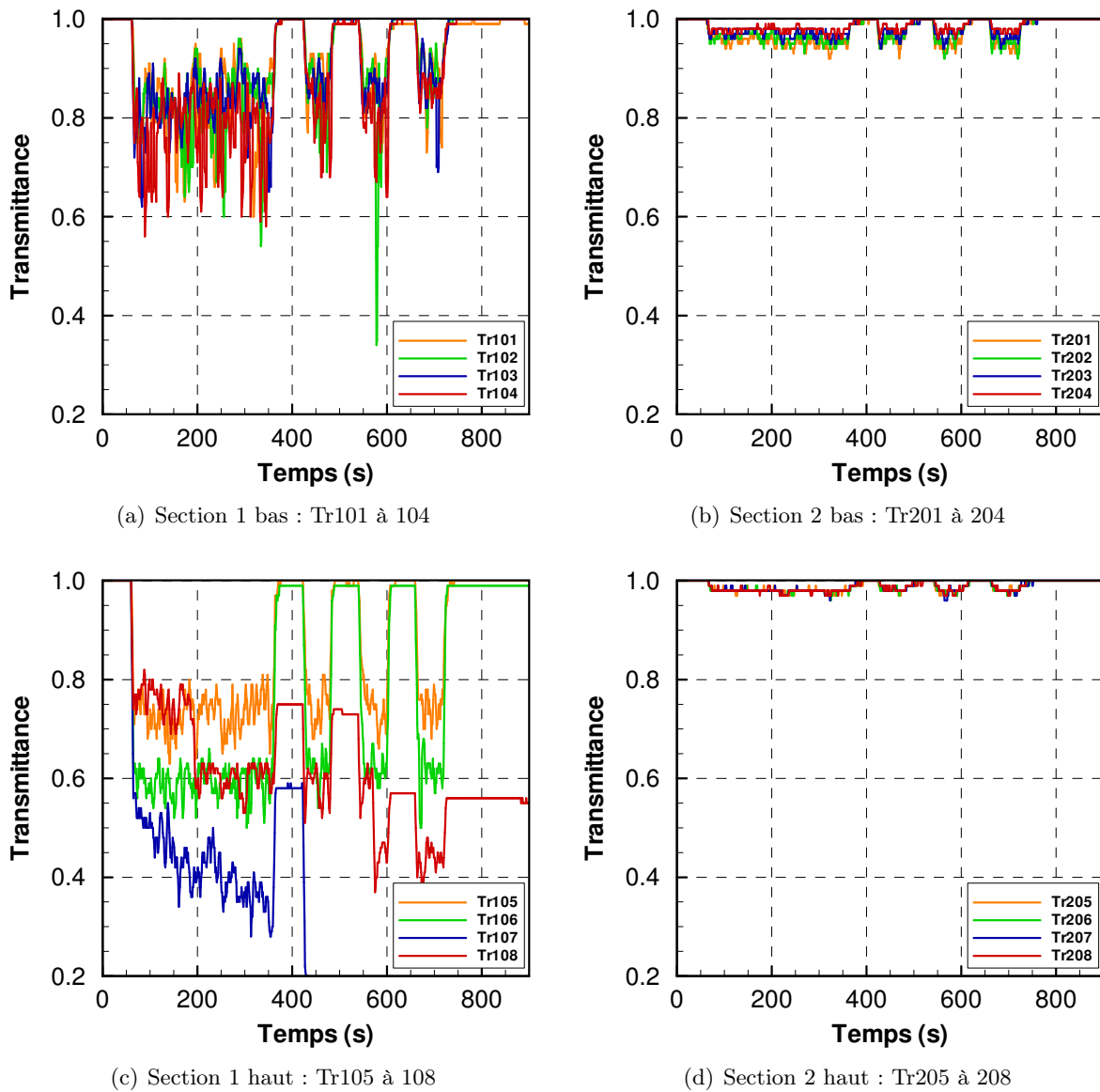
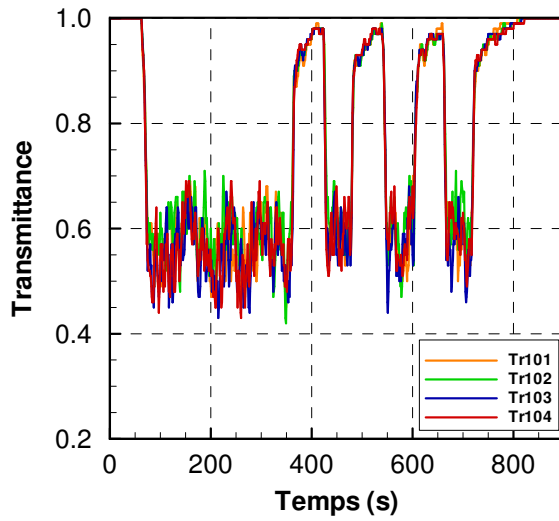
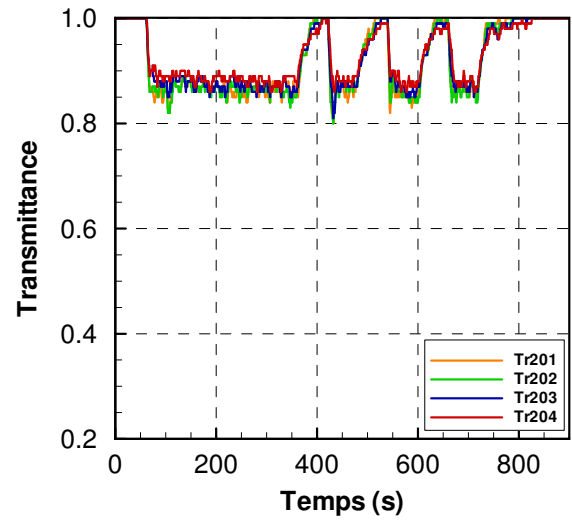


FIGURE 2.15 – Transmittances mesurées dans le couloir lors de la pulvérisation par sprinkler haute pression seul

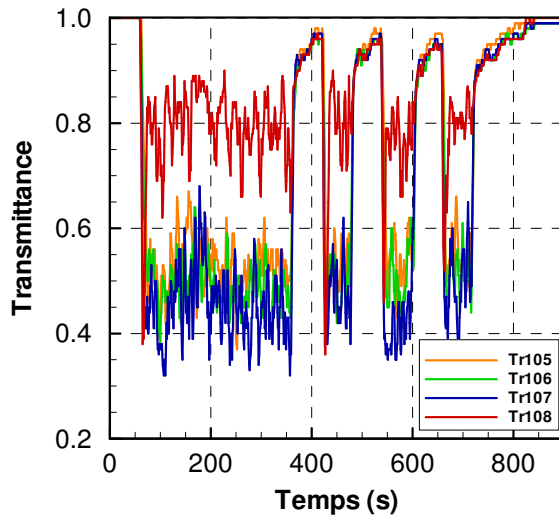
2, la concentration en eau est plus importante en partie basse et cela entraîne un gradient de transmittance inverse par rapport à la section 1. L'atténuation est donc fortement tributaire de la taille des gouttes injectées et du débit d'eau pulvérisé.



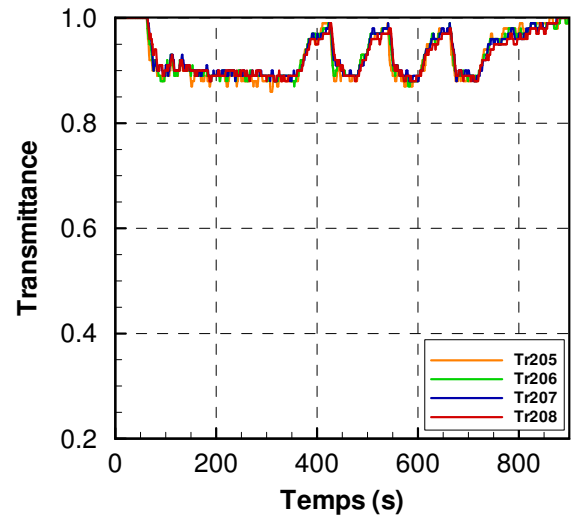
(a) Section 1 bas : Tr101 à 104



(b) Section 2 bas : Tr201 à 204



(c) Section 1 haut : Tr105 à 108



(d) Section 2 haut : Tr205 à 208

FIGURE 2.16 – Transmittances mesurées dans le couloir lors de la pulvérisation par brouillard d'eau seul

2.5.3 Test d'exactitude

La possibilité de mesurer la transmittance dans un milieu chaud et humide a été montrée. L'exactitude à accorder à cette mesure est une information importante pour la confiance à donner aux résultats. Le test d'exactitude présenté ici est ensuite utilisé dans le calcul des incertitudes de mesures optiques développé au Chapitre 4.

Une plaque semi-transparente, d'atténuation connue est utilisée pour l'estimation de l'exactitude du dispositif. L'atténuation par la plaque est évaluée à 8 % soit une transmittance théorique

de 92 %. Le test est effectué pour chacun des points de mesure, c'est-à-dire pour les 16 opacimètres (Figure 2.12). La plaque est placée à équidistance entre l'émetteur et le récepteur, verticalement et durant une dizaine de secondes afin de laisser la mesure se stabiliser. Chaque test est ensuite répété 8 fois.

Le Tableau 2.3 et le Tableau 2.4 regroupent les résultats pour les 16 opacimètres. En moyenne, la transmittance est évaluée entre 90 % et 92 % pour toutes les mesures, l'écart moyen étant de -0,67 % par rapport à la valeur de référence. L'écart le plus important est de -1,75 % pour l'opacimètre Tr104.

Sur la gamme de puissance de la diode, la réponse de la photo-diode est linéaire (Figure 2.3b). De plus, la saturation de la photo-diode a été testée et la puissance de la source laser ajustée en conséquence pour l'éviter. Dans ce cas, il est possible de supposer que l'écart mesuré pour une transmittance de 92 % est applicable sur toute la mesure de 0 à 100 %. Idéalement, il aurait fallu utiliser des polariseurs dont on fait varier l'angle entre leurs axes afin de couvrir toute la gamme. Ce type de test est à l'étude et viendra compléter le test d'exactitude présenté ici.

Test	Tr101	Tr102	Tr103	Tr104	Tr105	Tr106	Tr107	Tr108
n°1	0.920	0.933	0.915	0.902	0.932	0.892	0.910	0.929
n°2	0.921	0.928	0.924	X	0.908	0.925	X	0.928
n°3	0.923	0.928	0.919	0.922	0.909	0.917	0.916	0.922
n°4	0.924	0.928	0.928	0.916	0.924	0.920	X	0.899
n°5	0.920	0.929	0.928	X	0.922	0.932	X	0.928
n°6	0.929	0.925	0.922	X	0.930	0.916	X	0.906
n°7	0.918	0.911	0.899	0.891	0.885	0.919	0.895	0.902
n°8	0.898	0.889	0.89	0.888	0.912	0.911	0.909	0.903
moyenne	0.919	0.921	0.916	0.904	0.915	0.917	0.908	0.915
écart-type	-0.11%	0.13%	-0.46%	-1.75%	-0.51%	-0.37%	-1.35%	-0.58%

TABLEAU 2.3 – Résultats de transmittance pour la justesse du dispositif, opacimètre 101 à 108

Test	Tr201	Tr202	Tr203	Tr204	Tr205	Tr206	Tr207	Tr208
n°1	0.903	0.927	0.931	0.920	0.928	0.924	0.907	0.918
n°2	0.930	0.927	0.919	0.914	0.927	0.918	0.904	0.911
n°3	0.917	0.916	0.933	0.926	0.933	0.925	0.923	0.926
n°4	0.933	0.920	0.925	0.901	0.907	0.920	0.909	0.913
n°5	0.922	0.926	0.913	0.921	0.922	0.924	0.911	0.936
n°6	0.897	0.916	0.924	0.919	0.922	0.921	0.908	0.908
n°7	0.889	0.910	0.879	0.901	0.892	0.900	0.917	0.917
n°8	0.900	0.884	0.888	0.904	0.891	0.907	0.871	0.897
moyenne	0.911	0.916	0.914	0.913	0.915	0.917	0.906	0.916
écart-type	-0.93%	-0.45%	-0.65%	-0.73%	-0.51%	-0.27%	-1.52%	-0.46%

TABLEAU 2.4 – Résultats de transmittance pour la justesse du dispositif, opacimètre 201 à 208

2.6 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis de décrire le principe de mesure de la transmittance par l'atténuation d'un faisceau laser. L'atténuation peut être causée par la présence de gouttes d'eau en suspension et/ou de fumée. Dans un premier temps, le système de mesure développé lors d'un travail de thèse précédent (S. Lechêne) a été utilisé dans des tests préliminaires d'enfumage. Ce dispositif a été mis en défaut étant donné les fortes températures en conditions réelles de feu et la présence d'eau et de particules dans le milieu, pouvant se déposer sur les surfaces émettrices et réceptrices des capteurs. Dans un second temps, un système résistant aux hautes températures et permettant le maintien d'un air non vicié au niveau des collimateurs a été développé. Ce dispositif a montré sa robustesse vis à vis des températures allant jusqu'à plus de 200 °C. De plus, la possibilité de mesure par atténuation laser de l'opacité dans un milieu très humide a été testée. Cet outil original est au cœur de la métrologie mise en œuvre (à côté des mesures de température par thermocouples plus classiques) pour caractériser la stratification du milieu enfumé et l'influence d'une pulvérisation d'eau sur ces fumées.

Chapitre 3

Évaluation de la visibilité par méthode de Monte Carlo

Sommaire

3.1	Description du code	53
3.1.1	Image d'un point, PSF	53
3.1.2	Évaluation du parcours des quanta par Méthode de Monte Carlo	57
3.1.3	Calcul des propriétés radiatives	60
3.2	Sensibilité	65
3.2.1	Focalisation de la lentille et étude de la PSF	65
3.2.2	Acceptance de la lentille	67
3.2.3	Angle d'émission	68
3.2.4	Critère d'arrêt - convergence des résultats	70
3.2.5	Longueur d'onde, distribution de gouttes et fraction volumique	72
3.3	Étude sur la notion de contraste	76
3.4	Conclusion du chapitre	82

Comme évoqué précédemment, l'aspersion peut causer des difficultés d'évacuation. En effet, le problème se pose à deux niveaux : les gouttelettes d'eau en suspension peuvent atténuer la visibilité, cela d'autant plus que la taille de gouttes est petite (à quantité d'eau égale) [22, 28, 75] mais la pulvérisation peut aussi induire un brassage et une déstratification de la fumée générant un milieu gouttes-fumée aux propriétés optiques complexes et mal connues. C'est dans cet objectif que le code de calcul de visibilité est développé. Ce chapitre a pour but de décrire le développement de la méthode d'estimation de la visibilité au travers d'un milieu absorbant et diffusant par méthode de Monte-Carlo.

La première section décrit le code développé durant la thèse. Il reprend dans une première étape, le concept d'étalement du point et les aberrations géométriques liées au choix du système optique. Puis, la méthode de Monte-Carlo est expliquée pour l'évaluation du parcours d'un quantum dans un milieu semi-transparent. Enfin, quelques mots sur la théorie de Mie permettent d'expliquer le calcul des propriétés optiques du milieu considéré à partir des fractions volumiques en eau et des diamètres de gouttes.

La deuxième partie concerne les tests de sensibilité du code pour différents paramètres. Le premier présente l'importance de la position du plan image pour l'évaluation de l'image d'un point et les aberrations résultantes. Ensuite, les angles d'acceptance et d'émission sont présentés notamment pour leur importance sur les temps de calcul par méthode de Monte-Carlo. Le critère de convergence est également étudié. Le point suivant porte sur l'influence de la longueur d'onde, de la fraction volumique en eau et de la taille des gouttes dans l'atténuation du rayonnement par diffusion.

Enfin, la dernière partie de ce chapitre vise à décrire la notion de visibilité par l'étude d'un contraste seuil évalué sur une Mire de résolution USAF1951. Les notions de distance de visibilité et de résolution sont abordées.

3.1 Description du code

La vue est un sens de toute première importance lorsqu'il s'agit d'évacuer un bâtiment. L'œil est un système optique permettant de former une image de l'environnement sur la rétine. La propriété première d'un système optique s'appelle le stigmatisme. L'image d'un point lumineux doit être un point (stigmatisme rigoureux) ou s'en approcher le plus possible (stigmatisme approché) de sorte que l'ensemble de points (la scène observée) soit bien un ensemble de points et que l'image soit parfaitement nette ou la plus nette possible.

On considère dans la suite une lentille mince en lieu et place de l'optique de l'œil qui est en réalité formée d'un dioptré sphérique (la cornée) et d'une lentille épaisse (le cristallin). La raison de ce changement est que la modélisation réaliste de l'œil lui-même conduirait à des temps de calcul bien trop longs, le diamètre de la pupille de l'œil étant très petit (quelques millimètres).

Une lentille mince est formée de deux dioptrés sphériques. Elle est définie par son diamètre d , son rayon de courbure, sa distance focale, son épaisseur et le matériau qui la compose, notamment son indice de réfraction n .

La position du plan image est calculée par les lois de l'optique géométrique pour une lentille en verre. Le rayon lumineux est réfracté⁸ deux fois, la première lorsqu'il passe d'un milieu d'indice $n_1 = 1$ (air) à un milieu d'indice $n_2 = 1,5$ (verre) et la seconde lorsqu'il quitte la lentille. La loi de conjugaison de Descartes pour un dioptré sphérique est appliquée deux fois (air/lentille puis lentille/air).

Cependant, le dioptré sphérique n'est pas parfaitement stigmatique et il existe des aberrations géométriques. Lorsque les rayons s'éloignent de l'axe optique, le système devient non parfaitement stigmatique et le foyer image disparaît. L'image n'est plus ponctuelle sur le plan focal image et devient une tache. La première section décrit ce phénomène et propose une méthode de calcul de l'image d'un point.

3.1.1 Image d'un point, PSF

3.1.1.1 Milieu non-diffusant et stigmatisme imparfait

Les méthodes de Monte-Carlo utilisent des procédés aléatoires pour calculer des valeurs numériques ou des statistiques. Le champ d'utilisation de ces méthodes ne s'arrête pas au calcul de la propagation du rayonnement dans un milieu semi-transparent. Elles tirent leur nom des jeux de hasard pratiqués à Monte-Carlo. Elles sont apparues dans le milieu des années 1940, introduites par Metropolis et Ulam, pour modéliser la diffusion des neutrons dans les matériaux de fission. C'est dans les années 1960 que Fleck [39] commence à appliquer ces méthodes au transfert radiatif. Howell et Perlmutter [57] poursuivront en basant leur méthode sur le suivi de photons à travers un milieu semi-transparent.

Cette méthode est rigoureuse car elle ne fait pas d'approximation sur la modélisation des phénomènes radiatifs. Le résultat obtenu tend vers la solution réelle du problème, si statistiquement,

8. La réfraction désigne le fléchissement d'une onde à l'interface entre deux milieux.

le nombre de photons lancés est suffisamment important.

Le rayonnement est représenté par des paquets ou quanta d'énergie. Un quantum d'énergie regroupe un ensemble de photons. Ces quanta, émis depuis une source lumineuse vont subir des événements au cours de leur trajet dans le milieu. Ces événements peuvent être liés à de la diffusion ou à de l'absorption. À chaque instant, le quantum est caractérisé par sa position sur la surface, sa direction de propagation et son énergie (Figure 3.7).

Dans le plan image dont la position est calculée par les formules de Descartes, les rayons lumineux issus d'un point objet ne se coupent pas tous exactement au même point. Plus on considère des rayons inclinés par rapport à l'axe de la lentille, plus les rayons se couperont loin du point central sur le plan image. On parle donc de stigmatisme imparfait. Généralement, un système optique n'est stigmatique que pour des points particuliers et le stigmatisme est approché dans les conditions de Gauss.

Le phénomène de stigmatisme imparfait de la lentille fait apparaître un halo lumineux autour du point central du plan image. La Figure 3.1 cartographie la position de 100000 quanta sur le plan focal image pour le cas d'un milieu non-diffusant et d'une lentille de 4 cm de diamètre et de 200 mm de distance focale. Bien qu'il n'y ait pas de diffusion et que la source soit ponctuelle, l'étalement des quanta dans le plan image mesure 0,1 mm. La partie centrale montre une forte densité de quanta qui diminue à mesure qu'on s'en éloigne.

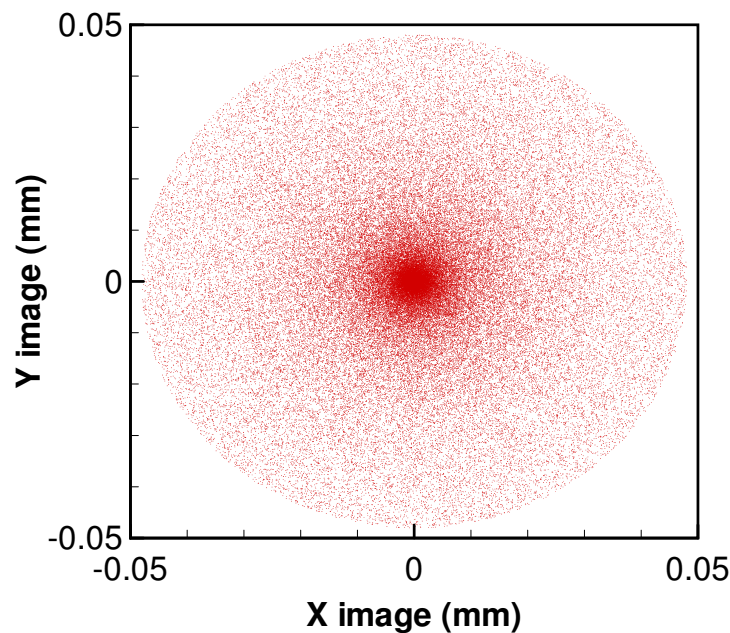


FIGURE 3.1 – Répartition des quanta dans le plan image pour un calcul sans diffusion et une lentille de 4 cm de diamètre

L'image d'un point par un système optique est appelée en anglais « **P**oint **S**pread **F**unction » ou **PSF** et traduit en français par fonction d'étalement du point. Plus cet étalement est important, plus la tache lumineuse observée est étendue. Ce résultat tend à diminuer le contraste d'un objet et à pénaliser la visualisation des contours d'une forme ou d'un point.

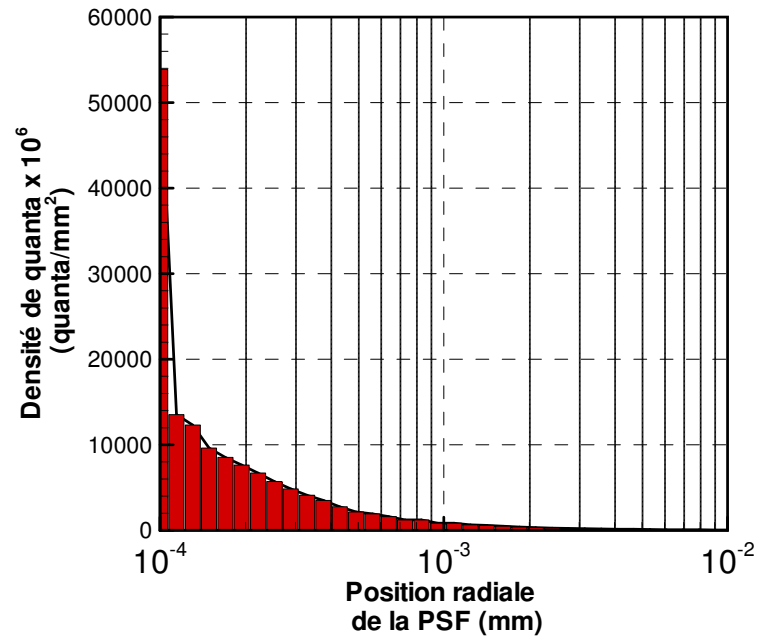


FIGURE 3.2 – Histogramme représentant la répartition du nombre de quanta par rapport à la distance du centre de l'image

Les quanta reçus sont classés en fonction de leur distance par rapport au centre dans le plan image (Figure 3.2). Par symétrie de révolution, on obtient la PSF bidimensionnelle comme sur la Figure 3.3. On la notera PSF2D.

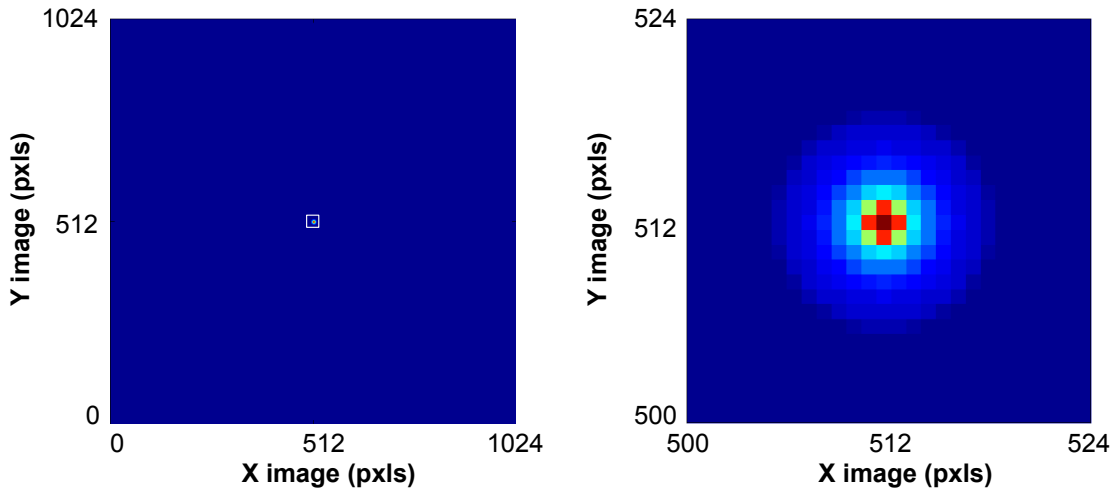
La PSF est calculée en W.m^{-2} et tient également compte du nombre total de quanta lancés pour la convergence des résultats. Le point central de l'image est plus intense et on observe un halo lumineux qui s'estompe autour de cette zone au fur et à mesure qu'on s'en éloigne.

3.1.1.2 Cas du milieu diffusant et absorbant

Dans le cas d'un milieu diffusant, les quanta émis par la source atteignent la lentille après avoir été déviés tout au long de leur trajet. La position des quanta déviés est modifiée. L'étalement de la tache est donc plus important que dans le cas sans diffusion. De plus, pour un milieu absorbant, les quanta atteignent la lentille avec une énergie moindre.

La tache lumineuse formée par la lentille dépend à la fois de la position avec laquelle chaque quantum est arrivé sur le plan image et de son énergie finale. Les quanta ayant été déviés de nombreuses fois ont donc perdu d'avantage d'énergie, du fait de leur parcours plus long.

Statistiquement, une infinité de quanta doit être lancée pour converger vers une valeur de PSF réelle. La valeur de l'énergie reçue après chaque série de lancers est comparée à la valeur de la série précédente. Lorsque le résultat converge vers une valeur de flux reçu, le calcul est arrêté (le critère d'arrêt sera décrit et testé dans la Section 3.2.4).



(a) PSF2D 1024×1024 pixels

(b) Zoom sur la partie centrale

FIGURE 3.3 – PSF bidimensionnelle obtenue pour un point vu au travers d’un milieu non-diffusant et d’une lentille de 4 cm de diamètre

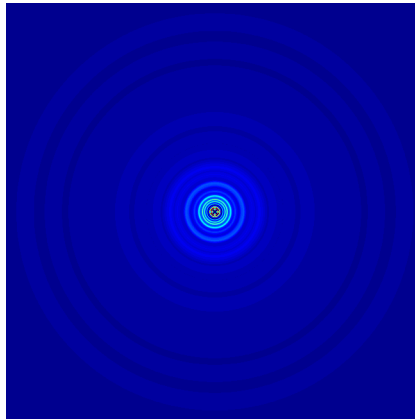


FIGURE 3.4 – PSF bidimensionnelle obtenue pour un point vu au travers d’un milieu semi-transparent de 1 m d’épaisseur, de coefficient de diffusion $\sigma = 10 m^{-1}$ et de coefficient d’absorption $\kappa = 10 m^{-1}$

3.1.1.3 Image d’un objet

La PSF calculée précédemment représente l’image d’un seul point vu au travers du milieu semi-transparent et d’un système optique. L’image d’un objet entier pourrait être construite de la même manière en lançant une infinité de quanta depuis chaque point (ou pixel) lumineux de l’objet. Cette méthode, coûteuse en temps de calcul peut être simplifiée en supposant que l’objet est suffisamment petit pour que la réponse impulsionnelle soit invariante par translation. En

d'autres termes, les quanta lancés depuis la surface de l'objet ont statistiquement tous le même parcours dans le milieu semi-transparent.

L'image d'un objet est alors obtenue par le résultat du produit de convolution entre la PSF bidimensionnelle et l'objet. Le produit de convolution est transformé en produit simple dans l'espace de Fourier :

$$I(x; y) = PSF(x; y) * O(x; y) \quad (3.1a)$$

$$TF[I(x; y)] = TF[PSF(x; y)] \cdot TF[O(x; y)] \quad (3.1b)$$

$$I(x; y) = TF^{-1}[TF[PSF(x; y)] \cdot TF[O(x; y)]] \quad (3.1c)$$

$I(x; y)$ est l'image de l'objet $O(x; y)$ convoluée par la $PSF(x; y)$ (intrinsèquement liée au milieu absorbant/diffusant).

3.1.2 Évaluation du parcours des quanta par Méthode de Monte Carlo

3.1.2.1 Émission du quantum

Le quantum est émis depuis un point source lumineux. La direction d'émission du quantum est définie par un tirage aléatoire. Deux angles définissent la direction d'émission du quantum. L'angle θ_0 est l'angle formé entre la direction d'émission et l'axe \vec{e}_x (Figure 3.5). Si l'émission est hémisphérique, elle est dite lambertienne et l'angle θ_0 prend des valeurs entre 0 et $\pi/2$. L'émission du quantum se fait vers l'avant suivant l'axe \vec{e}_x quand θ_0 est égal à zéro. L'angle ψ_0 est formé entre l'axe \vec{e}_y et la projection du quantum dans le plan YZ. Il prend des valeurs entre 0 et 2π :

$$\psi_0 = 2\pi R_\psi \quad (3.2)$$

où R_ψ est tiré aléatoirement entre 0 et 1.

Lorsque la diffusion est faible, les quanta lancés dans une direction éloignée de l'axe \vec{e}_x ont peu de chances d'atteindre la lentille. L'émission hémisphérique peut être limitée par un angle θ_{max} . Plus la diffusion est importante et plus la surface réceptrice est proche du point d'émission, plus l'angle θ_{max} doit être grand. Le calcul de l'angle θ_0 s'écrit :

$$\cos \theta_0 = (1 - R_\theta \sin^2 \theta_{max})^{1/2} \quad (3.3)$$

où R_θ est un nombre aléatoire tiré entre 0 et 1. La direction (cosinus directeurs) du quantum dans le repère orthonormé est calculée suivant les angles d'émission tel que :

$$s_x = \cos \theta_0 \quad (3.4a)$$

$$s_y = \sin \theta_0 \cos \psi_0 \quad (3.4b)$$

$$s_z = \sin \theta_0 \sin \psi_0 \quad (3.4c)$$

Dans le cas d'une surface émettrice de taille Δy par Δz et de normale orientée selon un axe X , la position initiale du quantum est déterminée à partir de :

$$y_{\text{émission}} = y_{\text{centre surface}} + (R_y - 0.5) \Delta y \quad (3.5a)$$

$$z_{\text{émission}} = z_{\text{centre surface}} + (R_z - 0.5) \Delta z \quad (3.5b)$$

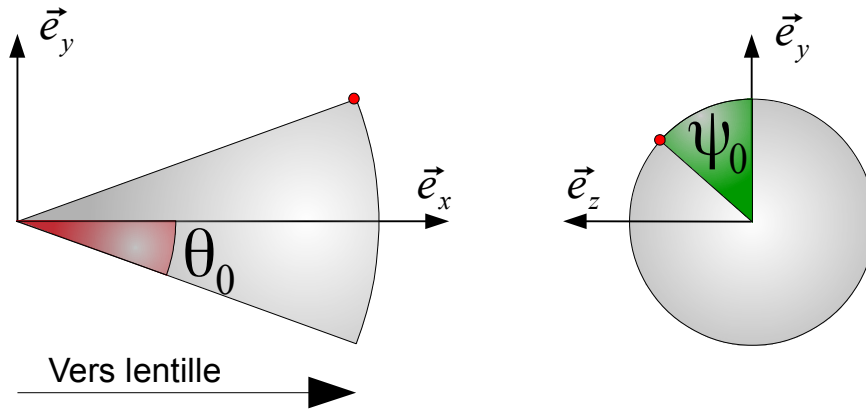


FIGURE 3.5 – Angles d'émission du quantum θ_0 et ψ_0

avec R_x et R_y deux nombres aléatoires suivant une loi uniforme entre 0 et 1.

3.1.2.2 Parcours du quantum

Une fois lancé, le quantum est suivi tout au long de son parcours dans le milieu. Cette méthode permet de déterminer l'évolution du quantum en fonction des événements de diffusion et d'absorption subis jusqu'à sa sortie du domaine ou son absorption totale.

Il existe plusieurs façons de traiter le problème de diffusion et absorption par la méthode de Monte-Carlo. En général, le principe repose sur l'évaluation d'une distance d'interaction⁹ des quanta avec un événement de diffusion ou d'absorption. Certaines méthodes utilisent le coefficient d'extinction β et un tirage aléatoire pour déterminer la distance d'interaction. Au bout de la distance d'interaction, le quantum est soit diffusé, soit totalement absorbé. Le choix entre ces deux phénomènes est fait par un second tirage aléatoire et une comparaison à l'albédo (défini comme le rapport du coefficient de diffusion sur le coefficient d'extinction). Collin [22] et Lechêne [75] décrivent ces différentes méthodes.

La méthode utilisée ici est basée sur une distance d'interaction liée au coefficient de diffusion. Pour un milieu homogène, elle est donnée par :

$$L_{\text{diffusion}} = -\frac{1}{\sigma} \ln(R_\sigma) \quad (3.6)$$

avec R_σ un nombre aléatoire dans $[0; 1]$ et σ le coefficient de diffusion du milieu.

Lorsque le quantum subit un événement de diffusion, il est dévié dans une nouvelle direction de propagation basée sur la fonction de phase cumulée. L'angle formé entre la direction d'incidence et la direction de diffusion est appelé Θ . Il fixe sur le cône de diffusion la direction selon laquelle

⁹. La distance d'interaction est la distance maximale que peut parcourir un quantum dans le milieu semi-transparent avant d'être absorbé et/ou dévié

le quantum est diffusé et est défini tel que :

$$R_{\Theta} = \frac{1}{2} \int_0^{\Theta} P(\Theta) \sin \Theta d\Theta \quad (3.7)$$

où $P(\Theta)$ est la fonction de phase cumulée pour un ensemble de particules.

L'angle formé entre la normale à la direction d'incidence et la nouvelle direction de diffusion est noté Φ . Cet angle détermine une direction unique de propagation et est équiprobable sur le cône de diffusion :

$$\Phi = 2\pi R_{\Phi} \quad (3.8)$$

R_{Φ} est un nombre aléatoire compris entre 0 et 1. La Figure 3.6 présente les deux angles Θ et Φ du calcul de la nouvelle direction de propagation.

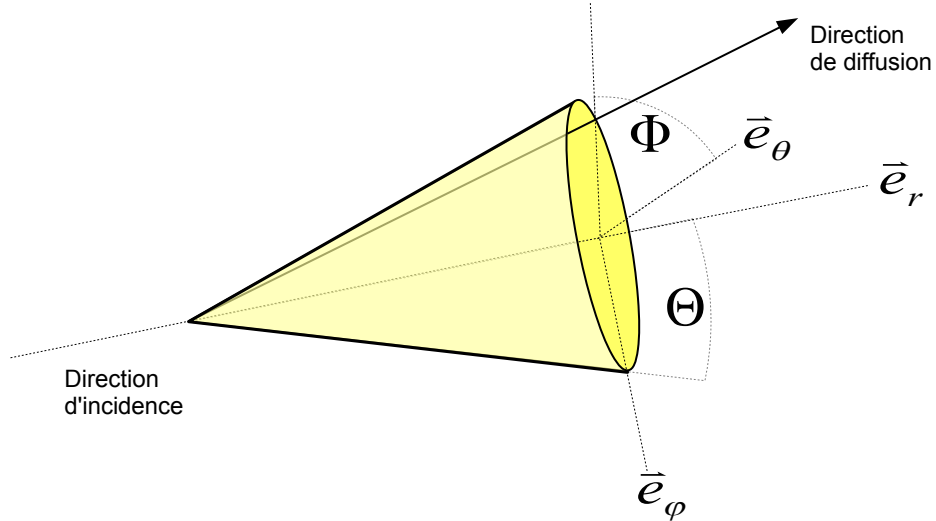


FIGURE 3.6 – Référence des angles du cône de diffusion

La nouvelle direction de propagation du quantum $\vec{\Omega}_{\text{diffusée}}$ est donc définie par :

$$\vec{\Omega}_{\text{diffusée}} = \cos \Theta \vec{e}_r - \sin \Phi \sin \Theta \vec{e}_\varphi + \cos \Phi \sin \Theta \vec{e}_\theta \quad (3.9)$$

L'absorption est calculée sur l'ensemble du trajet lorsque le quantum atteint la lentille. Ainsi, la puissance détectée $Q_{\text{détectée}}$ est calculée par la loi de Beer :

$$Q_{\text{détectée}} = \exp(-\kappa L_{\text{abs}}) Q_{\text{émission}} \quad (3.10)$$

où $Q_{\text{émission}}$ est la puissance à l'émission du quantum, κ le coefficient d'absorption du milieu et L_{abs} la distance totale parcourue par le quantum dans le milieu après N diffusions.

Une fois le quantum perdu ou collecté par la lentille, un nouveau quantum est émis par la source. Le critère d'arrêt est basé sur la variance du flux reçu par le détecteur après plusieurs

ensembles de lancers de quanta. Lorsque la différence entre le flux reçu d’une série de lancers à l’autre descend en-dessous de la valeur fixée, on considère que le calcul a convergé et la PSF2D peut être calculée.

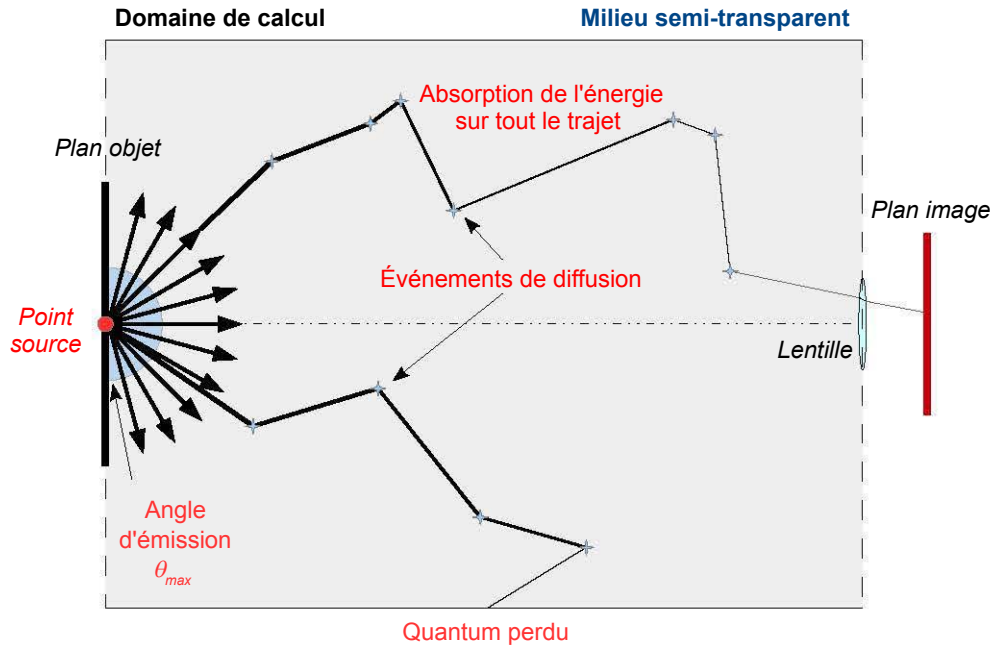


FIGURE 3.7 – Suivi du parcours de deux quanta dans un milieu absorbant et diffusant

3.1.3 Calcul des propriétés radiatives

Le milieu dans lequel se propage les quanta est un milieu dit semi-transparent. En effet, les particules de suies et les gouttelettes d’eau induisent un caractère absorbant et diffusant. Afin de calculer le parcours des quanta dans ce milieu, il est nécessaire de connaître les propriétés radiatives. On peut utiliser la théorie de Mie¹⁰ pour les gouttes d’eau et le modèle de diffusion de Rayleigh¹¹ pour les suies applicable lorsque la longueur d’onde est très grande devant la taille des particules¹². Généralement, le rayon de la particule est comparé à la longueur d’onde par le paramètre de taille x_p .

$$x_p = \frac{\pi d_p}{\lambda} \quad (3.11)$$

La théorie de Mie a été largement décrite dans la thèse de Collin [22] puis reprise par Lechêne [75]. On se contentera dans ce document de donner les éléments essentiels aux calculs des propriétés radiatives et des fonctions de phase.

10. Gustav Mie, physicien allemand (1869, Rostock - 1957, Fribourg)

11. John William Strutt Rayleigh, physicien anglais (1842, Landford Grove - 1919, Witham)

12. C’est le cas des particules de suie issues de la combustion d’heptane qui ont un diamètre moyen de 35 nm, d’après Koylu et Faeth [73], très petit devant les longueurs d’onde du spectre visible

3.1.3.1 Détermination des propriétés radiatives

Le milieu est considéré comme homogène équivalent, c'est-à-dire que ses propriétés radiatives sont les mêmes quelle que soit la position dans le milieu. Pour l'eau, principalement diffusante dans le spectre visible, elles sont estimées via la distribution en diamètres des gouttes, l'indice relatif de réfraction de l'eau dans l'air et la fraction volumique de gouttelettes en suspension. Pour les suies, elles sont calculées grâce à la fraction volumique de particules par volume d'air et une corrélation tirée de [102, 121].

Hale et Query [45] ont fourni les indices n et k de l'eau pour un ensemble de longueurs d'onde allant de 200 nm à 20 μm (Figure 3.8). Dans le spectre visible les coefficients sont quasi-constants, n est estimé à 1,33 et k est très proche de 0 (peu ou pas d'absorption).

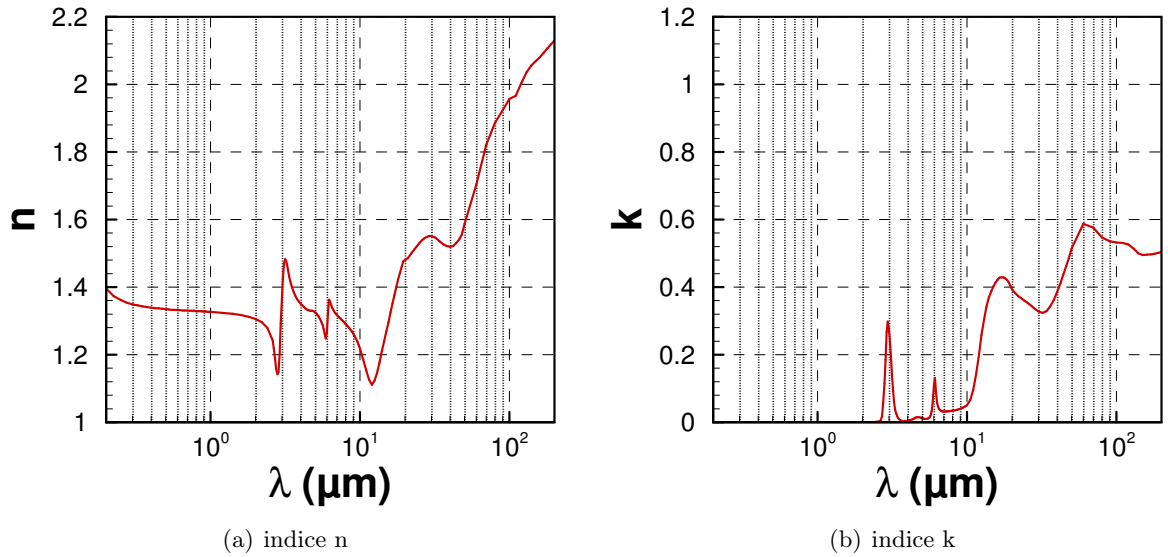


FIGURE 3.8 – Indices de réfraction n et k de l'eau entre 200 nm à 20 μm

On pose l'hypothèse d'une diffusion indépendante. Elle est valable uniquement si le rapport entre la distance interparticulaire et la longueur d'onde est supérieur à 0,5. La diffusion indépendante implique que le rayonnement diffusé par une particule n'est pas influencé par les autres particules situées autour. D'après Modest [92], la teneur en gouttelettes peut être considérée comme faible lorsqu'elle est inférieure à 10^{-2} m³ d'eau par m³ d'air et que le paramètre de taille est élevé. Ici, le paramètre de taille pour une particule de 35 μm et une longueur d'onde de 632 nm est de $x_p = 173$.

De plus, le fait que les gouttes d'eau soient considérées parfaitement sphériques implique que les coefficient d'absorption et de diffusion de Mie sont indépendants de la direction de propagation du rayonnement.

Pour un ensemble de gouttelettes d'eau parfaitement sphériques et avec l'hypothèse de diffusion indépendante les propriétés radiatives sont obtenues par sommation des contributions de chaque classe de diamètre de gouttes :

– le coefficient spectral d'absorption $\kappa_\lambda^{\text{eau}}$:

$$\kappa_\lambda^{\text{eau}} = \sum_{n=1}^{N_c} \pi \frac{d_i^2}{4} N_i Q_{\lambda \text{ abs}}(d_i) \quad (3.12)$$

– le coefficient spectral de diffusion $\sigma_\lambda^{\text{eau}}$:

$$\sigma_\lambda^{\text{eau}} = \sum_{n=1}^{N_c} \pi \frac{d_i^2}{4} N_i Q_{\lambda \text{ diff}}(d_i) \quad (3.13)$$

– le coefficient spectral d'extinction $\beta_\lambda^{\text{eau}}$:

$$\beta_\lambda^{\text{eau}} = \sum_{n=1}^{N_c} \pi \frac{d_i^2}{4} N_i Q_{\lambda \text{ ext}}(d_i) \quad (3.14)$$

N_i est le nombre de particules par unité de volume de diamètre d_i de la classe i considérée (dépendant de la distribution du spray), N_c est le nombre total de classes et $Q_{\lambda \text{ abs}}(d_i)$, $Q_{\lambda \text{ diff}}(d_i)$ et $Q_{\lambda \text{ ext}}(d_i)$ sont respectivement les efficacités spectrales d'absorption, de diffusion et d'extinction d'une goutte de diamètre d_i d'après Collin [22].

Les coefficients spectraux des particules de suie sont calculés en fonction de la concentration massique de suie C_s , de la masse volumique de la particule de suie ρ_{suie} et de l'indice complexe de la particule de suie sous la forme d'une fonction $E(m)$. Cette méthode est valable lorsque le paramètre de taille est très petit devant 1 dans le cas de l'approximation de Rayleigh. Ouf [102] donne une valeur empirique pour $E(m)$ de 0,2831 à une longueur de d'onde de 632 nm. La valeur de ce coefficient est relativement constante dans le spectre visible¹³ [121].

$$\kappa_\lambda^{\text{suie}} = \frac{6 \cdot \pi \cdot E(m) \cdot C_s}{\lambda \cdot \rho_{\text{suie}}} \quad (3.15)$$

Ouf évalue également à 23 % la part de la diffusion des suies dans le phénomène d'extinction pour trois combustibles différents. Le coefficient d'absorption des suies peut alors être calculé en fonction du coefficient d'absorption par la relation :

$$\sigma_\lambda^{\text{suie}} = 0,3 \cdot \kappa_\lambda^{\text{suie}} \quad (3.16)$$

Ainsi, les coefficients d'absorption $\kappa_\lambda^{\text{tot}}$ et de diffusion $\sigma_\lambda^{\text{tot}}$ d'un milieu composé de suies et d'eau peuvent être calculés respectivement en sommant les coefficients d'absorption $\kappa_\lambda^{\text{suie}} + \kappa_\lambda^{\text{eau}}$ et les coefficients de diffusion $\sigma_\lambda^{\text{suie}} + \sigma_\lambda^{\text{eau}}$.

3.1.3.2 Détermination de la fonction de phase

La fonction de phase décrit la probabilité que le rayonnement provenant d'une direction $\vec{\Omega}$ soit diffusé dans la direction $\vec{\Omega}'$. La fonction de phase de Mie pour une particule sphérique dépend de la longueur d'onde du rayonnement considéré, du diamètre de la particule et d'un angle de

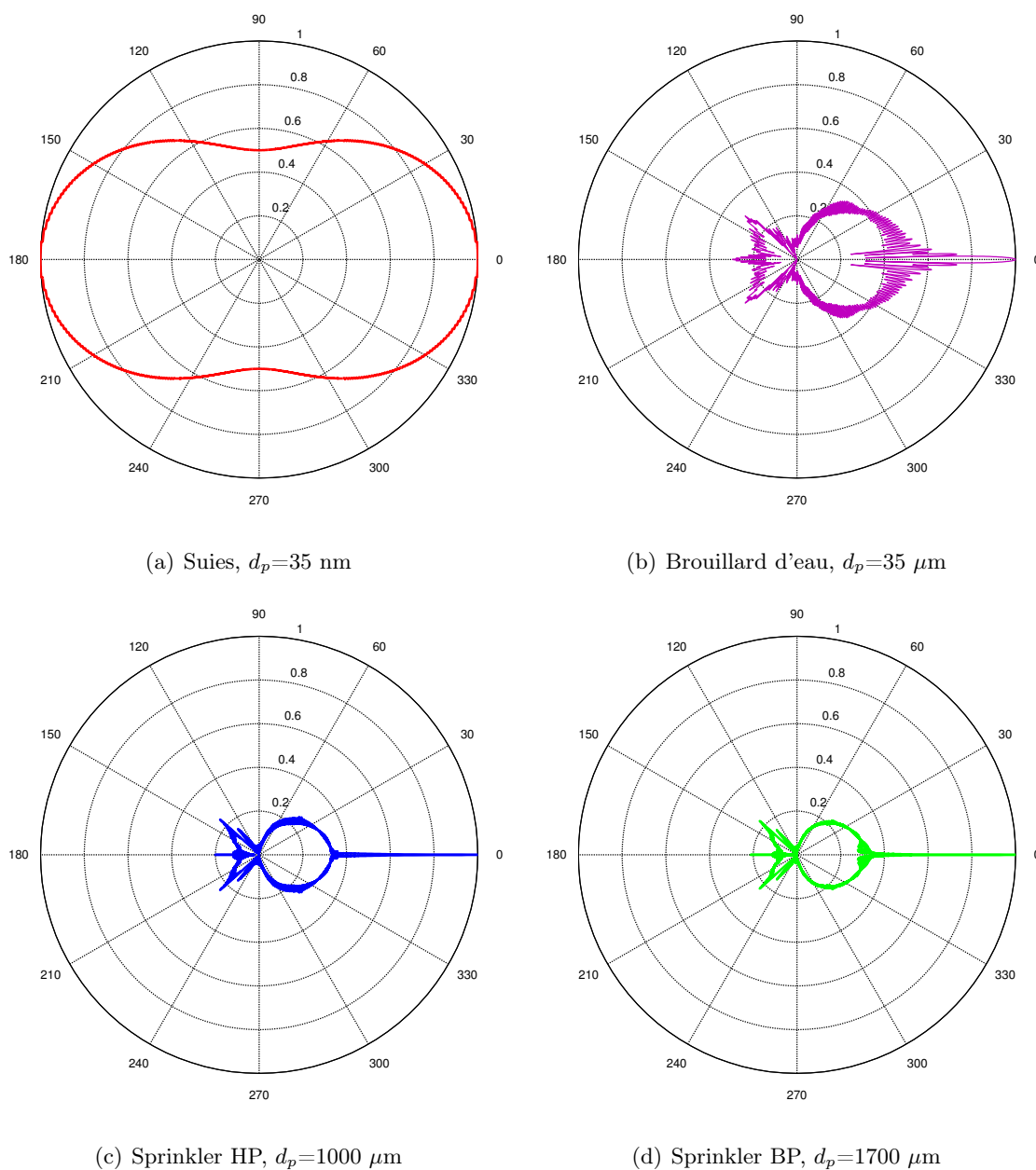


FIGURE 3.9 – Fonctions de phase de Mie en échelle logarithmique pour les suies et les gouttes issues des sprinklers BP, HP et du brouillard d'eau

diffusion ([12, 22, 75]). L'angle de diffusion est formé entre la direction du rayonnement incident et la direction du rayonnement diffusé (respectivement $\vec{\Omega}$ et $\vec{\Omega}'$).

La diffusion de Mie est très majoritairement orientée vers l'avant et ce d'autant plus que le diamètre des particules augmente par rapport à la longueur d'onde. Par exemple, pour une longueur d'onde de 642 nm, la Figure 3.9 présente trois fonctions de phase représentatives des sprays utilisés dans ce travail, à savoir le sprinkler basse et haute pression et le brouillard d'eau

13. Solovjov donne également le calcul de $\kappa_\lambda^{\text{suie}} = \text{cte} \cdot f_v / \lambda$, avec une valeur de 5,5 pour cste

et une fonction de phase pour les particules de suie. La diffusion est d'autant plus orientée vers l'avant que la granulométrie augmente. De plus, pour des particules de très petites tailles, comme les suies (35 nm, d'après Koylu et Faeth [73] pour les fumées d'heptane), la diffusion est identique que ce soit vers l'avant ou vers l'arrière.

Pour une polydispersion de gouttes, la fonction de phase totale est la somme de la contribution des fonctions de phase de chaque classe N_c de gouttes. La somme est pondérée par l'efficacité de diffusion pour chaque classe :

$$P_\lambda^{\text{Mie}}(\Theta) = \frac{1}{\sigma_\lambda^{\text{eau}}} \sum_{i=1}^{N_c} \pi \frac{d_i^2}{4} N_i Q_{\lambda \text{diff}}(d_i) P_\lambda^{\text{Mie}}(d_i, \Theta) \quad (3.17)$$

La fonction de phase des suies est calculée par le modèle de diffusion de Rayleigh. Elle est estimée par :

$$P_\lambda^{\text{Rayleigh}}(\Theta) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \Theta) \quad (3.18)$$

La diffusion de Rayleigh ne se fait pas majoritairement vers l'avant mais est répartie de manière plus isotrope comme le montre la Figure 3.9a.

Dans le cas d'un mélange de suie et de gouttelettes d'eau, la contribution de chaque particule est ajoutée à la fonction de phase du mélange en tenant compte des coefficients de diffusion. On obtient donc la fonction de phase $P_\lambda^{\text{Mélange}}(\Theta)$ pour un milieu homogène équivalent composé de gouttelettes d'eau et de suie :

$$P_\lambda^{\text{Mélange}}(\Theta) = \frac{1}{\sigma_\lambda^{\text{eau}} + \sigma_\lambda^{\text{suie}}} \left[\sum_{i=1}^{N_c} \pi \frac{d_i^2}{4} N_i Q_{\lambda \text{diff}}(d_i) P_\lambda^{\text{Mie}}(d_i, \Theta) + \sigma_\lambda^{\text{suie}} P_\lambda^{\text{Rayleigh}}(\Theta) \right] \quad (3.19)$$

La Figure 3.10 représente la fonction de phase combinée d'un milieu composé de suie et de gouttes d'eau de 35 μm (brouillard d'eau). La diffusion est essentiellement dirigée vers l'avant. La diffusion de Rayleigh par les suies contribue à la fois à renforcer la diffusion vers l'avant mais engendre également une diffusion vers l'arrière un peu plus marquée que pour le cas du brouillard seul.

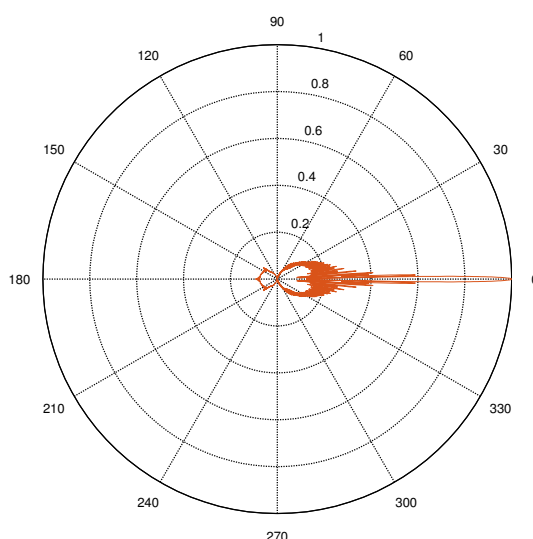


FIGURE 3.10 – Exemple de fonction de phase combinée en échelle logarithmique d'un milieu composé de suie $\sigma_{\lambda}^{\text{suie}}=14,3 \text{ m}^{-1}$ et de gouttes d'eau $\sigma_{\lambda}^{\text{eau}}=8,8 \text{ m}^{-1}$

3.2 Sensibilité

Le domaine de calcul est un cylindre de rayon égal à 1 m. La longueur du cylindre dépend du cas traité. Le point d'émission des quanta est situé dans l'axe médian du cylindre en $(0;0;0)$ en face du détecteur (lentille ou surface réceptrice) placé en $(x;0;0)$. Le diamètre de la lentille est de 4 cm.

3.2.1 Focalisation de la lentille et étude de la PSF

La focalisation de la lentille est un facteur important dans l'estimation de la visibilité. Comme vu précédemment, les lentilles convergentes engendrent une aberration géométrique pouvant modifier l'image du point (PSF). En effet, les aberrations géométriques élargissent la PSF. Cela résulte en partie du calcul de la position du plan image par rapport à la distance entre l'objet et la lentille et de la taille de la lentille.

La Figure 3.11 schématise l'aberration géométrique d'une lentille convergente. Les scénarii comparés reposent sur trois positions de plan image : le cas optimal du cercle de moindre confusion, le plan de Gauss et un plan avancé.

La taille de la lentille est de 4 cm, la distance lentille-objet est de 1 m et un million de quanta sont lancés pour chaque cas. La taille de la PSF2D est de 0,5 mm pour 2048 pixels (Figure 3.12). La PSF radiale est calculée en comptabilisant le nombre de quanta reçus par unité de surface distribués en fonction de la classe de rayon par rapport au centre du plan image.

Lorsque l'image formée est trop proche de la lentille, les rayons se coupent en un disque d'étendue

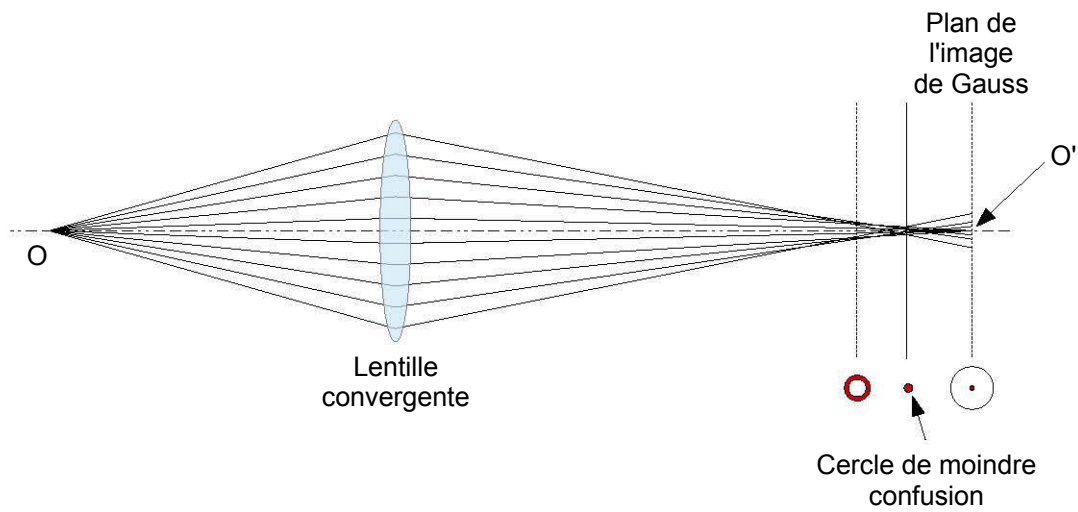


FIGURE 3.11 – aberration lentille

plus ou moins importante en fonction de la distance lentille-plan image. L'étendue de la tache est d'environ 0,2 mm. Au contraire, pour les deux autres positions, la densité de quanta est plus grande au centre du plan image, dans l'axe de la lentille. Pour le plan reculé, la tache mesure 0,4 mm de diamètre. L'image formée est floutée. Le diamètre de la tache lumineuse est minimal pour le plan intermédiaire, il est égal à 0,1 mm et induit moins d'aberrations. C'est le cercle de moindre confusion. L'effet d'étalement de la PSF est minimal, cette position peut être utilisée pour les calculs de visibilité.

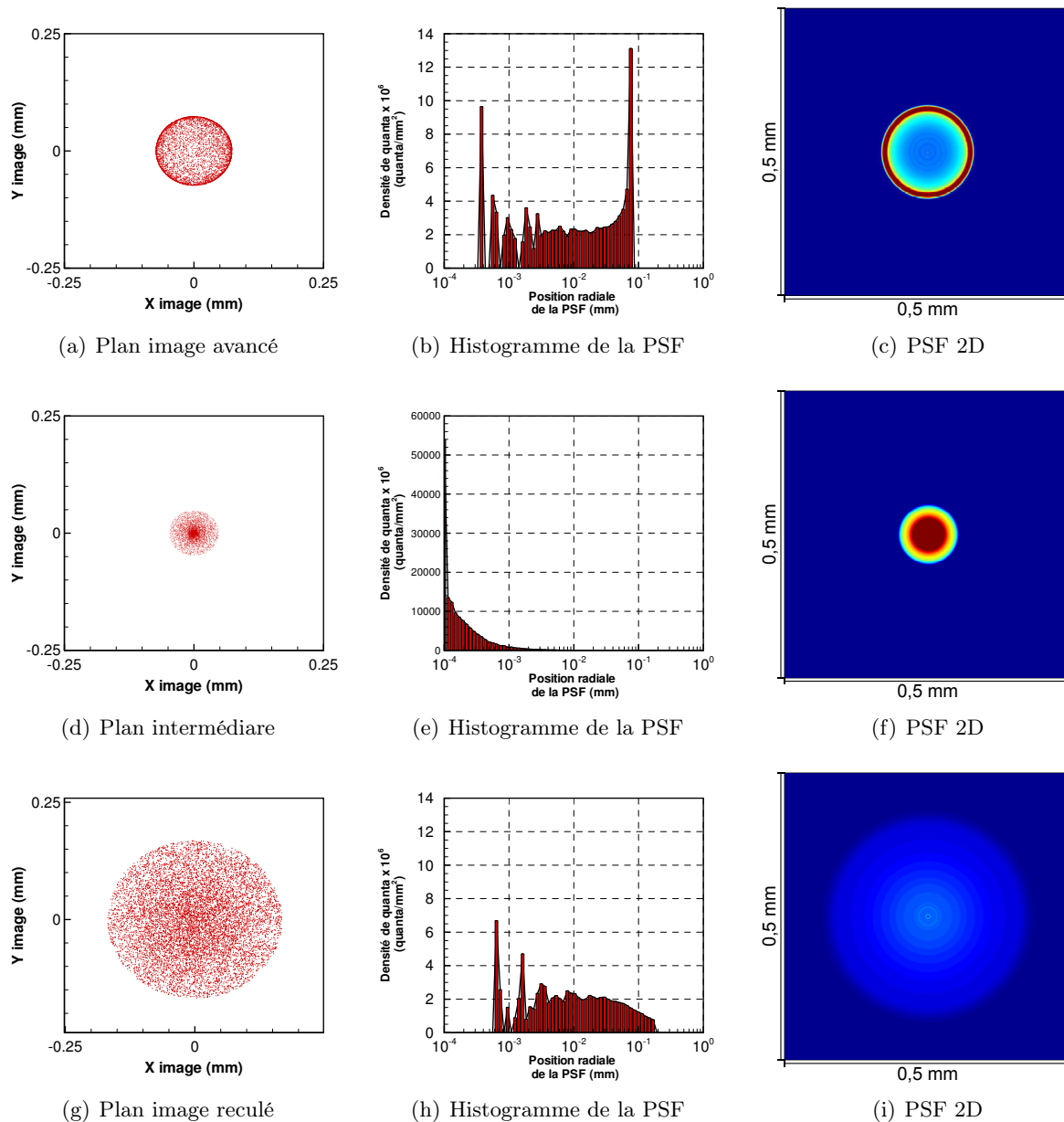


FIGURE 3.12 – Répartition des quanta et de la PSF bidimensionnelle correspondante pour 3 positions de plan image

3.2.2 Acceptance de la lentille

En l'absence de diffusion, les quanta lancés au delà d'un certain angle n'ont aucune chance d'atteindre le dispositif optique. Cet angle est formé entre le point d'émission et le bord de la lentille. C'est l'angle maximal dans lequel tous les quanta lancés sont reçus par la lentille. Il dépend à la fois de la taille de la lentille et de la distance entre le point d'émission et l'éloignement du dispositif optique. Cet angle est d'autant plus grand que la lentille est grande et que la distance lentille-objet est réduite. Par exemple, une lentille de 4 cm située à 0,5 m du point émission, en

l'absence de diffusion, pourra collecter des quanta émis dans un angle maximum de $2,29^\circ$ et pour un éloignement plus important, 2,5 m par exemple, cet angle sera de $0,46^\circ$.

Plusieurs tests sont lancés pour deux distances de 0,5 et 2,5 m entre le point source et la lentille. L'angle maximal d'émission est fixé pour chaque simulation entre $0,1$ et 45° . Le nombre de quanta reçus est rapporté au nombre de quanta lancés pour chaque angle d'émission. Ce test est réalisé pour 7 milieux de coefficients de diffusion différents.

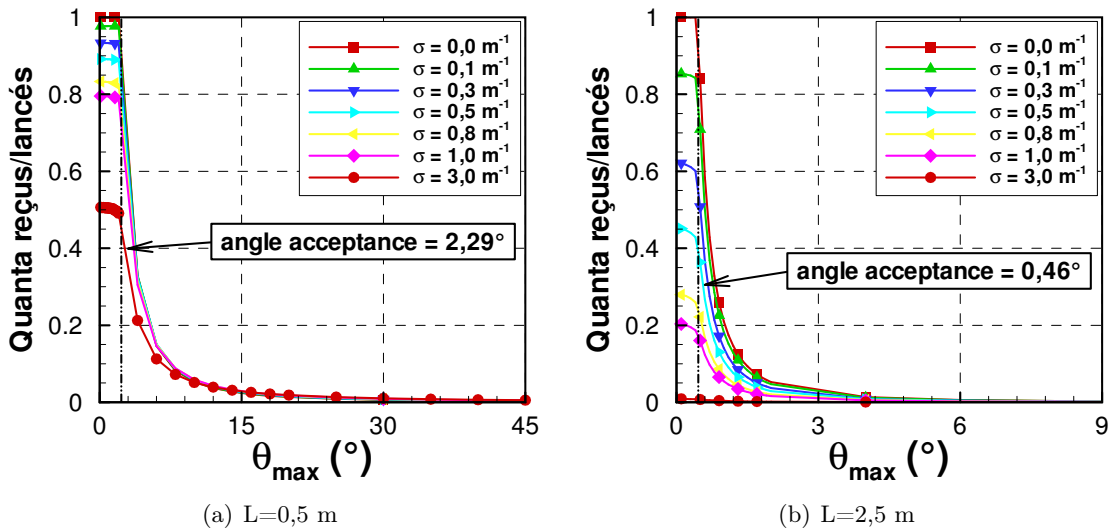


FIGURE 3.13 – Quanta reçus en fonction de l'angle maximal d'émission des quanta

Pour une diffusion nulle et si l'angle maximal d'émission est inférieur à l'angle d'acceptance de la lentille, 100 % des quanta sont reçus par la lentille (Figure 3.13). La proportion de quanta reçus diminue quand l'angle d'émission maximal augmente. La diffusion du milieu fait également diminuer la proportion de quanta reçus par rapport au nombre de quanta lancés. En effet, pour un coefficient de diffusion de $1,0 \text{ m}^{-1}$ et une distance de 0,5 m, la part de quanta reçus par rapport aux quanta lancés dans un angle inférieur à $2,29^\circ$ est de 80 % (Figure 3.13). Si le coefficient de diffusion est de $3,0 \text{ m}^{-1}$, la part n'est plus que de 50 %. Les quanta lancés dans la direction de la lentille ont été déviés et n'ont pas été reçus par la lentille. Plus la diffusion augmente, plus les quanta risquent d'être déviés hors du domaine de calcul.

La distance objet-lentille joue également un rôle important. Sur une distance objet-lentille plus importante, les événements de diffusion sont plus nombreux et la part reçue diminue plus vite lorsque le coefficient de diffusion augmente (Figure 3.13). Pour un coefficient de diffusion de 3 m^{-1} et une distance objet-lentille égale à 2,5 m, l'angle d'acceptance n'est plus visible sur la Figure 3.13. La proportion de quanta reçus lancés dans un angle inférieur à $0,46^\circ$ est de moins de 1 %. C'est-à-dire que 99 % des quanta qui auraient dû être reçus par la lentille ont été déviés.

3.2.3 Angle d'émission

L'émission est hémisphérique mais peut être limitée dans une certaine mesure. C'est-à-dire que l'angle d'émission maximal peut être réduit pour limiter les quanta lancés dans des directions

qui ne leur permettraient pas d'être reçus par la lentille et permettant ainsi de réduire les temps de calcul. Cet angle d'émission maximal ne peut être dissocié de l'angle d'acceptance, il doit être supérieur à celui-ci, au risque de perdre de l'information dans les résultats des calculs.

L'étude est conduite sur deux distances objet-lentille de 0,5 et 2,5 m. L'angle maximal d'émission est de 45° , les quanta lancés dans un angle supérieur n'ayant pratiquement aucune chance d'être reçus par la lentille dans les conditions de diffusion et les dimensions du domaine de calcul. Les quanta reçus par la lentille sont classés en fonction de l'angle dans lequel ils ont été émis par la source. Ce nombre est rapporté au nombre total de quanta émis dans le calcul puis cumulé en fonction de $\theta_{\text{émission}}$. En tout, 7 milieux semi-transparentes sont testés, pour des coefficients de diffusion compris entre 0 et $3,0 \text{ m}^{-1}$. L'angle d'émission limité correspond à l'angle pour lequel 99 % des quanta lancés sont reçus par la lentille. On le note θ_{99} .

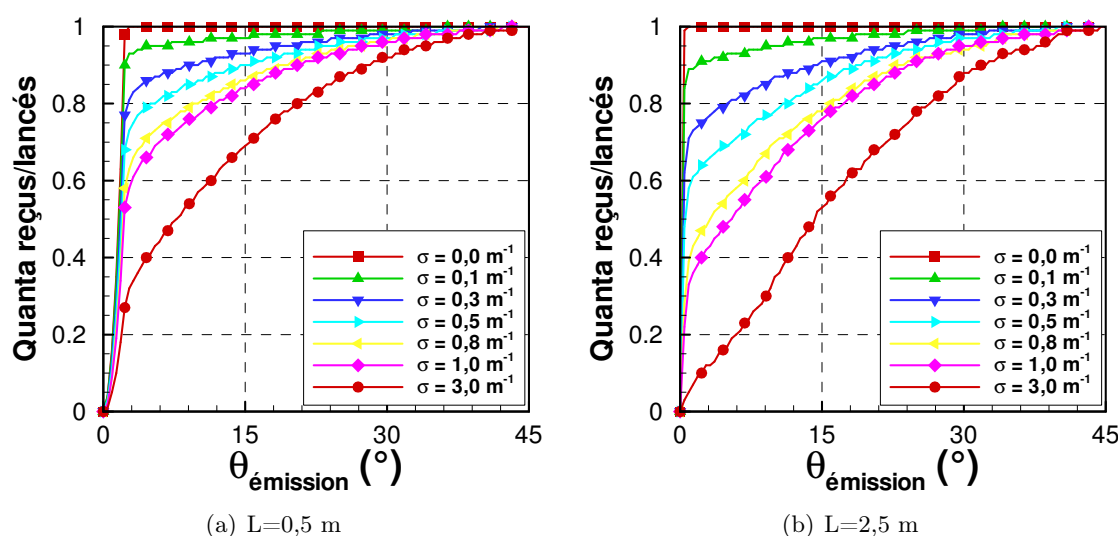


FIGURE 3.14 – Quanta reçus cumulés en fonction de l'angle d'émission

Pour un coefficient de diffusion égale à 0 m^{-1} , cet angle correspond à l'angle d'acceptance de la lentille. L'augmentation du coefficient de diffusion conduit à considérer un angle limite plus grand. Pour une distance de 0,5 m et un coefficient de diffusion de $0,5 \text{ m}^{-1}$, 99 % des quanta reçus ont été lancés dans un angle inférieur à $30,9^\circ$ (Tableau 3.1). Pour le même coefficient et une distance de 2,5 m, cet angle est de $33,2^\circ$. L'augmentation de la distance objet-lentille fait augmenter le nombre de diffusions et donc la possibilité qu'un quantum soit dévié sur son trajet dans le domaine de calcul.

Pour des distances objet-lentille de 0,5 m et 2,5 m, l'angle θ_{99} augmente progressivement avec le coefficient de diffusion et tend vers une valeur de 40° . Sans diffusion, l'angle θ_{99} pour une distance égale à 0,5 m est inférieur à l'angle θ_{99} pour une distance de 2,5 m. Cette tendance s'inverse en introduisant un caractère diffusant au milieu et tend à se réduire pour les diffusions importantes. Par exemple, l'écart à $\sigma=3,0 \text{ m}^{-1}$ entre les deux angles est inférieur à l'écart calculé pour un coefficient de diffusion de $0,1 \text{ m}^{-1}$.

Angle θ_{99} pour l'émission lambertienne limitée							
σ (m^{-1})	0,0	0,1	0,3	0,5	0,8	1,0	3,0
L = 0,5 m	2,27 °	15,9 °	28,2 °	30,9 °	33,2 °	34,1 °	38,2 °
L = 2,5 m	0,46 °	18,6 °	29,1 °	33,2 °	34,5 °	36,4 °	40,0 °

TABLEAU 3.1 – Angle d'émission lambertienne limitée pour différentes valeur de coefficient de diffusion et d'épaisseur optique

3.2.4 Critère d'arrêt - convergence des résultats

Le nombre de quanta lancés doit être suffisant pour que le résultat du calcul tende vers la solution réelle. Il est possible de définir l'arrêt du calcul par plusieurs critères. On peut imaginer fixer le nombre de quanta à lancer ou alors, définir un critère de convergence. Ce critère peut être basé sur le flux spectral reçu par la surface de la lentille. Ce critère a également été développé et testé par Lechêne [75] durant sa thèse.

Un nombre N_{quanta} de quanta est lancé. Les N quanta sont lancés en 10 séries de $\frac{N_{\text{quanta}}}{10}$. Le calcul de la variance sur le flux reçu Var_{φ} est réalisé entre chaque série¹⁴ :

$$Var_{\varphi} = \frac{\sum_i (\varphi_i - \bar{\varphi})^2}{10} \quad (3.20)$$

où φ_i est le flux spectral reçu lors de la série i et $\bar{\varphi}$ la moyenne sur les lancers telle que :

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varphi_i \quad (3.21)$$

Pour une longueur d'onde donnée le critère de convergence est calculé par l'Équation 3.22.

$$C_v = \frac{\sqrt{Var_{\varphi}}}{\bar{\varphi}} \quad (3.22)$$

Si le critère de convergence est satisfait, le calcul s'arrête et on considère que les résultats ont convergé. Dans le cas contraire, le nombre de quanta lancés est doublé, et ce, jusqu'à ce que le critère soit satisfait.

La transmittance est calculée en faisant le rapport du flux reçu pour le calcul avec milieu diffusant et le flux reçu sans spray. Trois valeurs de critère de convergence C_v de 3 %, 5 % et 10 % sont présentées, pour 4 cas de calcul. Dans un premier temps, la distance objet-lentille est fixée à 0,5 m puis 2,5 m. La transmission est calculée pour un ensemble de coefficients de diffusion imposés entre 0 et 10 m^{-1} . Dans un second temps, le coefficient de diffusion est imposé à 1 puis 10 m^{-1} . Le calcul est effectué pour un ensemble de distances objet-lentille de 0 à 10 m pour $\sigma=1 \text{ m}^{-1}$ et de 0 à 3 m pour $\sigma=10 \text{ m}^{-1}$.

14. On peut également choisir de faire le test pour des tailles de série différente

À distance fixée, la transmittance décroît avec le coefficient de diffusion. Pour un milieu de 0,5 m, la transmittance est de 1 lorsque le coefficient est de 0 m^{-1} et atteint 0,292 pour un coefficient de diffusion de 10 m^{-1} . La décroissance est plus marquée pour une distance de 2,5 m, à 10 m^{-1} la transmittance atteint 0,028. La diffusion multiple participe au renforcement de la transmittance. En effet, avec une simple loi de Beer, la transmittance calculée est de 0,007 pour une distance de 0,5 m et un coefficient de diffusion de 10 m^{-1} .

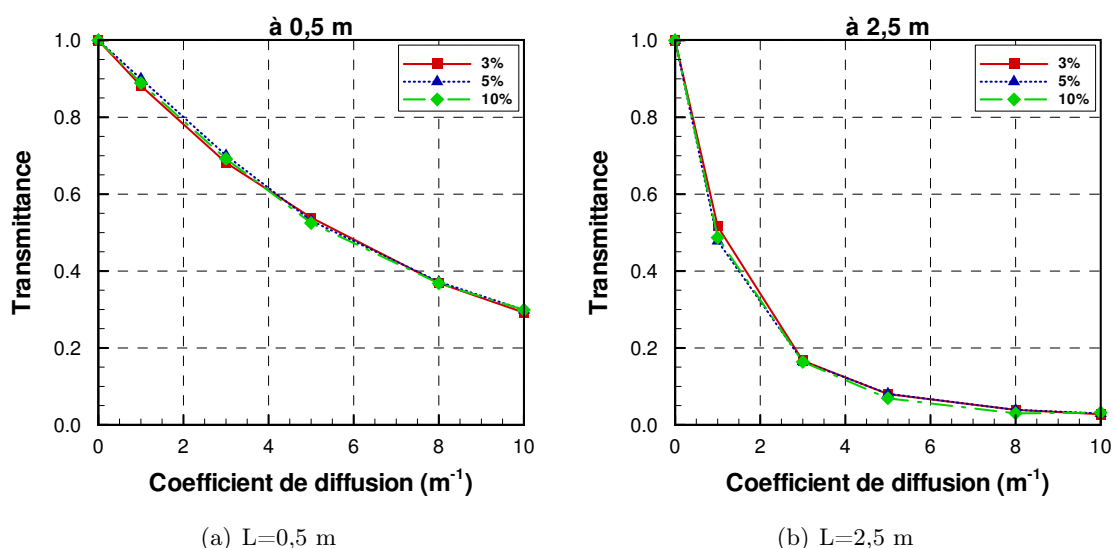


FIGURE 3.15 – Évolution de la transmission en fonction du coefficient de diffusion pour différents critères d'arrêt

Le critère de convergence a une faible influence sur la transmittance moyenne calculée (Tableau 3.2). En effet, à 0,5 m, un critère basé sur la variation de 3 % du flux reçu par la lentille donne une transmittance moyenne de 0,627. Lorsque la valeur du critère augmente à 5 % et 10 %, la transmittance est respectivement de 0,629 et 0,634. Pour une distance plus importante, la transmittance est plus faible pour un critère plus large. À faible coefficient de diffusion, le choix du critère est peu influent car il n'est pas nécessaire de lancer beaucoup de quanta pour que le calcul converge. Dans ce cas, le calcul ne dure que quelques minutes quelque soit la valeur du critère de convergence.

	Transmittance		
C_v	3 %	5 %	10 %
L=0,5 m	0,627	0,629	0,634
L=2,5 m	0,305	0,299	0,297

TABLEAU 3.2 – Transmittance calculée pour les 3 valeurs de critère de convergence en fonction de la distance

À coefficient de diffusion fixé, la transmittance décroît avec la distance et tend vers 0 pour un milieu très diffusant à partir de 3 m (Figure 3.16). À 3 m, pour un coefficient de diffusion de 1 m^{-1} , la transmittance est de 0,454. Lorsque le coefficient est 10 fois plus important la transmittance à la même distance est de seulement 0,017. Ici encore, la diffusion multiple est

participative, la transmittance est estimée à 0,368 par la loi de Beer à 1 m et $\sigma=1 \text{ m}^{-1}$ alors que le calcul par méthode de Monte-Carlo donne une valeur proche de 0,8.

La valeur du critère de convergence choisi montre des résultats peu différents. En effet, la transmittance évaluée avec une valeur de critère de convergence à 10 % est à $\pm 2 \%$ de celle évaluée pour un critère de 3 %.

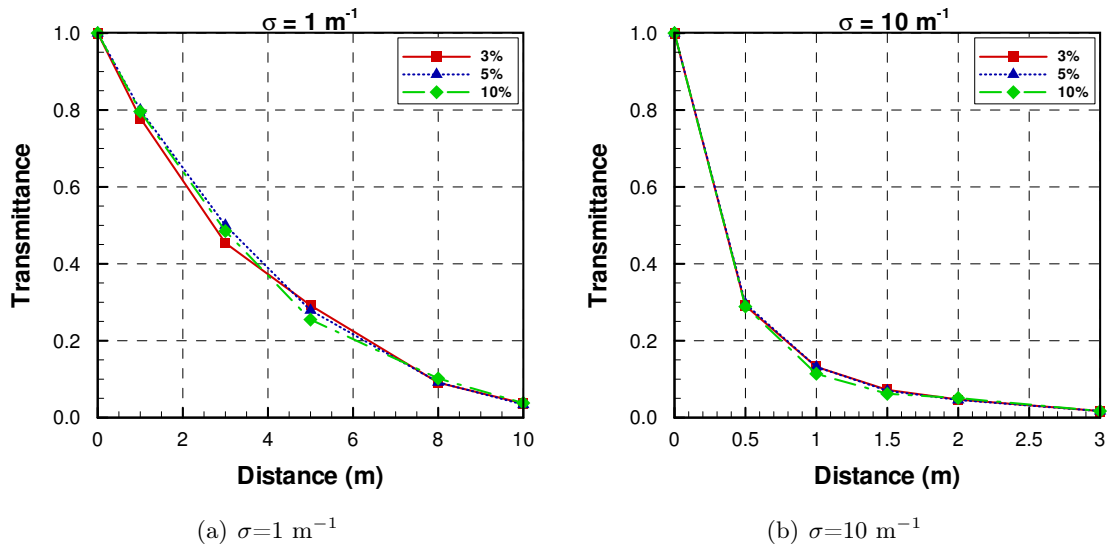


FIGURE 3.16 – Évolution de la transmission en fonction de la distance pour différents critères d’arrêt

Transmittance			
C_v	3 %	5 %	10 %
$\sigma=1 \text{ m}^{-1}$	0,442	0,446	0,451
$\sigma=10 \text{ m}^{-1}$	0,260	0,260	0,255

TABLEAU 3.3 – Transmittance calculée pour les 3 valeurs de critère de convergence en fonction du coefficient de diffusion

La méthode de Monte-Carlo encadre rapidement la solution. Le choix du critère de convergence de 3 % apporte un intervalle de confiance plus précis par rapport à un critère plus élevé tel que 5 ou 10 %. Selon l’étude, la valeur de ce critère peut être modifiée en fonction de la confiance que l’on souhaite obtenir pour les résultats. De plus, le temps de calcul est principalement influencé par la longueur du chemin optique et le coefficient de diffusion. Pour un milieu dense optiquement, une valeur de critère de convergence plus élevée que 3 % peut contribuer à réduire les temps de calcul de quelques jours à quelques heures.

3.2.5 Longueur d’onde, distribution de gouttes et fraction volumique

L’influence de la longueur d’onde, de la taille des gouttes et de la fraction volumique est testée sur l’évaluation de la transmission dans le visible par la méthode de Monte-Carlo. La question

sur la longueur d'onde est posée afin de savoir si un calcul ou une mesure effectuée à une longueur d'onde est représentative de la totalité du spectre visible. Dans le cas où le choix de la longueur impacte sur le résultat de transmission, il faut réaliser des calculs spectraux ou considérer une moyenne de Planck sur l'ensemble du spectre visible.

3.2.5.1 Granulométrie

Dans la visibilité au travers d'un spray, la taille des gouttes peut jouer un rôle important, notamment sur les phénomènes de diffusion. En effet, pour un diamètre de gouttes de $35,5 \mu\text{m}$ et une fraction volumique de $6,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^3$, le coefficient d'absorption est de $6,82 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ à 400 nm et de $1,74 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ à 800 nm . Ces valeurs sont très faibles devant le coefficient de diffusion quasi-constant dans la gamme du visible à environ $5,7 \text{ m}^{-1}$ (on néglige donc l'absorption en spray seul dans ce qui suit).

Le diamètre nominal $d_{32}(3)$ choisi pour l'étude de sensibilité est de $35,5 \mu\text{m}$. Ce diamètre correspond au diamètre des gouttes pulvérisées par le système brouillard d'eau. On choisit 4 diamètres de Sauter $d_{32}(1)$; $d_{32}(2)$; $d_{32}(4)$ et $d_{32}(5)$ respectivement dans un rapport de 0,5; 0,75; 1,5 et 2 par comparaison avec le diamètre nominal $d_{32}(3)$. Les valeurs de diamètres de Sauter pour les cinq cas présentés sont regroupés dans le Tableau 3.5. La granulométrie est représentée par une loi log-normale représentée sur la Figure 3.17.

Diamètres en μm				
$d_{32}(1)$	$d_{32}(2)$	$d_{32}(3)$	$d_{32}(4)$	$d_{32}(5)$
17,7	26,6	35,5	53,2	71,0

TABLEAU 3.4 – Diamètres testés pour la sensibilité

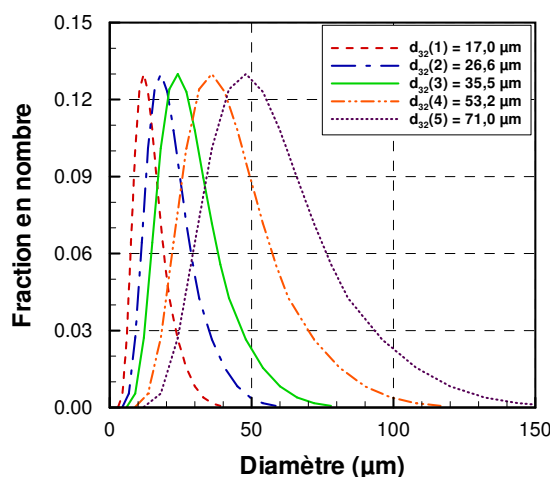


FIGURE 3.17 – Granulométries de goutte utilisées pour la sensibilité dans le visible

La surface réceptrice est de $12,5 \text{ cm}^2$ et le domaine de calcul cylindrique de 1 m de rayon fait $0,5 \text{ m}$ de longueur. Les coefficients de diffusion sont calculés par la théorie de Mie. La

transmittance est le rapport entre l'énergie reçue par le détecteur au travers du spray et l'énergie reçue en l'absence de spray.

L'augmentation du diamètre des gouttes (à quantité d'eau constante) entraîne une diminution du coefficient de diffusion et par conséquent, une augmentation de la transmittance (Figure 3.18). Dans la gamme de paramètre de taille concerné ici (qui représente pour mémoire : le rapport entre la taille caractéristique d'une goutte et la longueur d'onde du rayonnement), le coefficient de diffusion est quasiment inversement proportionnel au diamètre des gouttes. En effet, l'efficacité de diffusion varie très peu d'après la théorie de Mie pour les grands paramètres de taille. Dans le même temps, en divisant la taille des gouttes par 2, à même quantité d'eau, on augmente le nombre de gouttes par 8 (lié au volume des gouttes qui est divisé par 8), tandis que leur surface est réduite par un facteur 4. Le coefficient de diffusion est proportionnel au nombre de gouttes et proportionnel à leur surface. La conséquence est une augmentation du coefficient de diffusion par un facteur 2. Si on effectue les calculs exacts par théorie de Mie, pour prendre en compte la légère variation des efficacités avec la taille de goutte, on observe que la division par 2 du diamètre des gouttes engendre un coefficient de diffusion multiplié par 2,041 et la multiplication par 2 du diamètre entraîne un coefficient de diffusion divisé par 2,024. Par exemple, pour une fraction volumique de $6,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^3$ et un diamètre de $17,7 \text{ }\mu\text{m}$, le coefficient de diffusion moyen sur l'ensemble du spectre est de $11,57 \text{ m}^{-1}$, alors qu'il est de $5,67 \text{ m}^{-1}$ pour un diamètre de gouttes de $35,5 \text{ }\mu\text{m}$.

Cependant, un coefficient de diffusion deux fois plus important n'entraîne par une atténuation deux fois plus grande et inversement un coefficient de diffusion réduit de moitié ne permet pas de diviser l'atténuation par deux. Lorsque le diamètre est égal à 0,5 et 0,75 fois le diamètre nominal, la transmittance est respectivement de 0,688 et 0,783 alors que la valeur nominale est de 0,844. Pour les diamètres de 1,5 et 2,0 fois $35,5 \text{ }\mu\text{m}$, la transmittance est plus élevée respectivement 0,896 et 0,921. La transmittance augmente bien avec la taille des gouttes mais elle n'est évidemment pas proportionnelle au coefficient de diffusion puisque la transmittance suit la loi de Beer-Lambert $\text{Tr} = \exp(-\sigma L)$ (en régime de diffusion simple).

De plus, on peut également remarquer que le coefficient de diffusion est constant sur l'ensemble du spectre visible. L'écart-type calculé sur l'ensemble du spectre est de moins de 0,5 % pour un diamètre de $71 \text{ }\mu\text{m}$ et est d'environ 1,3 % pour les diamètres plus petits. La sensibilité à la longueur d'onde étant de plus en plus prononcée à mesure que la taille des gouttes tend vers la longueur d'onde. Le choix de la longueur d'onde importe donc peu pour l'évaluation de la transmission au travers d'un spray, dans le spectre visible.

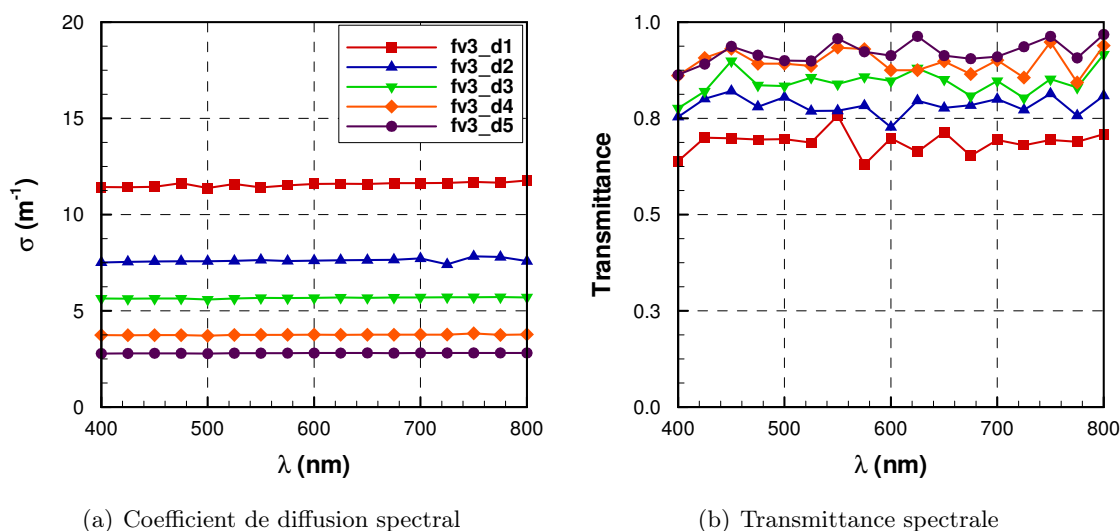


FIGURE 3.18 – Coefficients de diffusion et transmittances spectrales pour différentes valeurs de diamètre

3.2.5.2 Fraction volumique en eau

La fraction volumique est un paramètre également important pour le calcul des coefficients de diffusion. Différentes fractions volumiques sont testées autour d'une fraction volumique de référence $6,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^3$. Deux tests sont faits à $\pm 50\%$ de la valeur de f_v nominale, puis deux autres en prenant respectivement un ordre de grandeur en-dessous et un ordre de grandeur au-dessus (Tableau 3.5).

L'évolution du coefficient de diffusion en fonction de la fraction volumique est linéaire, elle joue un rôle multiplicateur de la diffusion. C'est-à-dire que pour une fraction volumique 10 fois plus importante, le coefficient de diffusion sera 10 fois plus important. Par exemple, pour un diamètre de goutte de $35,5 \mu\text{m}$ et une fraction volumique de $6,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$ le coefficient de diffusion est de $0,567 \text{ m}^{-1}$ alors qu'il est de $5,67$ et $56,7 \text{ m}^{-1}$ respectivement pour des fractions volumiques 10 et 100 fois plus grandes.

La transmittance augmente de $15,6\%$ et $9,2\%$ lorsque la fraction volumique nominale est divisée par 10 puis par 2. À l'opposé, lorsque la fraction volumique est doublée puis décuplée la transmittance est réduite de $8,6\%$ et $62,9\%$.

Fraction volumique en m^3/m^3				
f_{v1}	f_{v2}	f_{v3}	f_{v4}	f_{v5}
$6,5 \cdot 10^{-6}$	$3,25 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$9,75 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$

TABLEAU 3.5 – Diamètres testés pour la sensibilité

La variation du coefficient de diffusion sur la longueur d'onde dans la gamme 400 à $800 \mu\text{m}$ est de $0,6\%$ quelle que soit la fraction volumique choisie. Le choix de la longueur d'onde pour

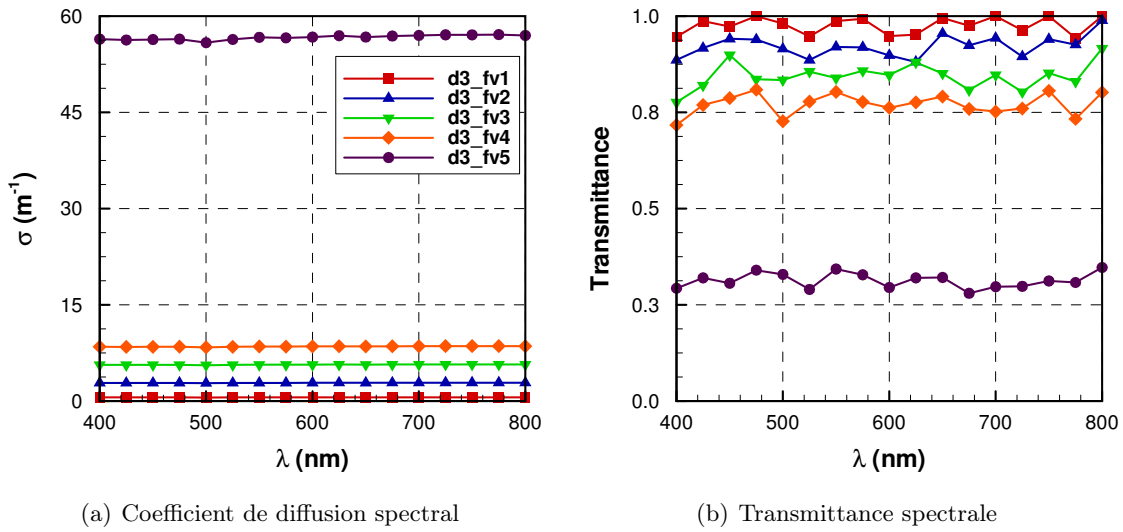


FIGURE 3.19 – Coefficients de diffusion et transmittances spectraux pour différentes valeurs de fraction volumique en eau

l'évaluation de la visibilité a peu d'influence dans ce cas. Les mesures faites sur le spray seul ainsi que les calculs pourront être réalisés à une longueur d'onde puis extrapolés à tout le spectre.

3.3 Étude sur la notion de contraste

Les calculs de transmittance renseignent sur l'opacité du milieu, mais une analyse complémentaire doit être réalisée pour évaluer la visibilité à travers le milieu semi-transparent.

La notion de contraste est utilisée, notamment dans l'évaluation de la distance de visibilité. La visibilité est définie comme on l'a vu par la notion d'un contraste seuil, en deçà duquel un objet n'est plus perceptible. Cette valeur est estimée à 0,02 dans la plupart des études (par exemple dans le domaine météorologique pour la sécurité routière).

Une Mire de résolution de type USAF1951 est utilisée (Figure 3.20). Elle mesure 5 cm de côté. La Mire USAF1951 a l'avantage d'offrir la possibilité de calculer le contraste pour plusieurs éléments de résolution différente. Un élément de résolution est composé de 3 bandes noires de même taille séparées par un intervalle blanc (le motif peut être horizontal ou vertical). On qualifiera de faible résolution les éléments avec des lignes espacées et inversement de grande les éléments avec des lignes serrées. Les éléments sont classés par groupe de 6. Les groupes sont numérotés de -2 à 4, la résolution maximale correspondant au numéro de groupe le plus élevé. La taille des éléments est divisée par 2 à chaque fois que l'on passe d'un groupe à un groupe inférieur. La résolution (Tableau 3.6) est calculée en nombre de paires de lignes rapporté à 1 mm. La résolution et les dimensions des barres sont données par l'expression :

$$\text{Résolution (lp/mm)} = 2^{\text{groupe} + (\text{élément} - 1)/6} \quad (3.23)$$

Dans le cadre de notre étude, les groupes supérieurs à 1 ne seront pas considérés. Les 4 groupes

utilisés (de -2 à 1) sont entourés sur la Figure 3.20 et les 6 éléments du premier groupe sont numérotés en bleu. La numérotation des éléments est répétée pour les groupes inférieurs.

L'inverse de la résolution donne la taille de deux lignes (une noire et une blanche) positionnées l'une à côté de l'autre. Par exemple, une résolution de $0,500$ paire/mm correspond à une bande noire suivie d'une bande blanche mesurant 1 mm de largeur chacune.

Cette étude est menée sur un milieu purement diffusant, estimant que l'absorption ne pénalise pas directement le contraste d'un objet. L'étude s'étend sur des valeurs de coefficients de diffusion comprises entre $0,1$ et 10 m^{-1} . La fonction de phase de Mie est calculée pour un paramètre de taille égale à 173 . La lentille est convergente et mesure 4 cm de diamètre. Le rayon du domaine de calcul est de 1 m et la distance entre le plan objet et la lentille est variable selon le coefficient de diffusion. Pour un faible coefficient de diffusion de $0,1 \text{ m}^{-1}$, le calcul est fait pour une série de distances comprises entre $0,5$ et 15 m. Lorsqu'on prend un coefficient plus grand, 10 m^{-1} par exemple, le calcul est réalisé entre 0 et 2 m, les quanta ayant très peu de chance d'atteindre une lentille située au-delà dans ces conditions de diffusion.

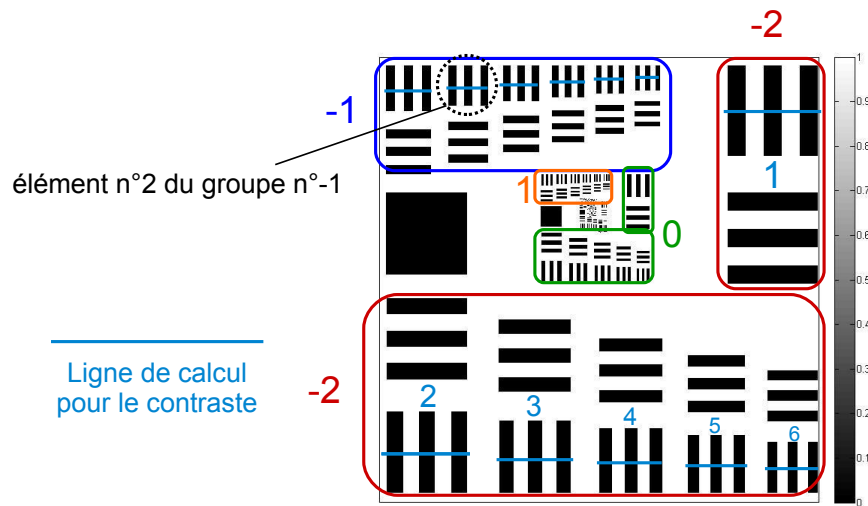


FIGURE 3.20 – Mire de résolution USAF1951 utilisée pour le calcul du contraste

Nombre de paires de lignes / mm				
n° de groupe				
élément	-2	-1	0	1
1	0.250	0.500	1.000	2.000
2	0.281	0.561	1.122	2.245
3	0.315	0.630	1.260	2.520
4	0.354	0.707	1.414	2.828
5	0.397	0.794	1.587	3.175
6	0.445	0.891	1.782	3.564

TABLEAU 3.6 – Résolution de la Mire USAF1951 en nombre de paires de lignes pour 1 mm

La Mire vue au travers de 3 milieux purement diffusants et de 3 épaisseurs différentes est présentée sur la Figure 3.21. La Mire est reconstruite par le produit de convolution entre l'objet et la PSF calculée pour chaque milieu (tenant compte de la distance et du coefficient de diffusion entre le dispositif optique et l'objet). De ce fait, l'image reconstruite correspond à ce qu'un observateur (selon le dispositif optique) pourrait voir au travers d'un milieu comportant de fines gouttes d'eau en suspension. À première vue, l'image de la Mire semble dégradée. Cependant, à 1 m et pour $\sigma=1,0 \text{ m}^{-1}$, la Mire est encore assez nette, les bandes noires et blanches peuvent être distinguées les unes des autres jusqu'au groupe numéro 0. Pour un même milieu diffusant, l'augmentation de l'épaisseur du milieu tend à faire disparaître progressivement les éléments du groupe 0. Le résultat est le même si la distance est fixée et que le coefficient diffusant du milieu augmente. L'image est moins nette.

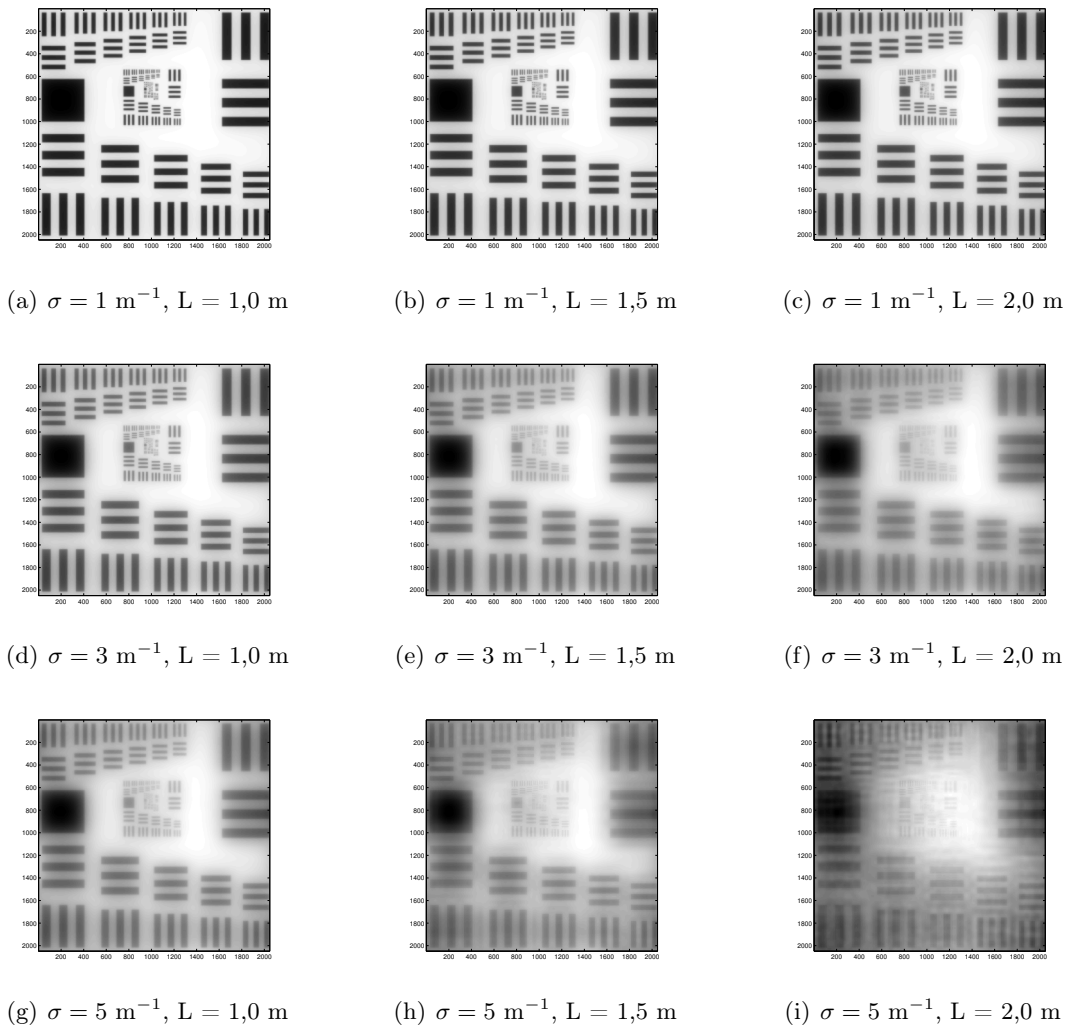


FIGURE 3.21 – Mire de résolution vue au travers de 3 milieux diffusant et 3 distances optiques différentes

L'image de l'objet est un ensemble de pixels ayant chacun une valeur d'intensité lumineuse qui lui est propre. Cette intensité est fonction de l'objet lumineux observé et de l'étalement du point (PSF). Le calcul du contraste peut être global, c'est-à-dire pour toute la Mire reconstruite

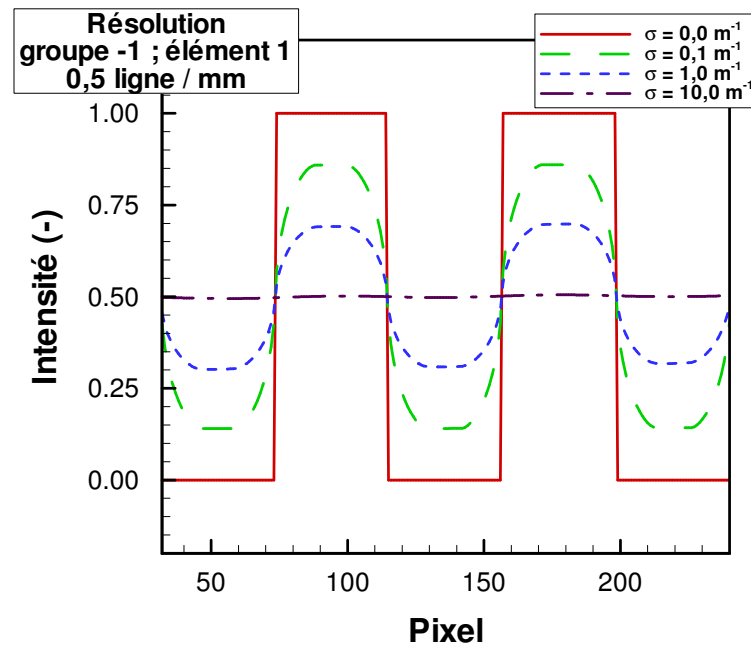


FIGURE 3.22 – Intensité lumineuse en fonction des pixels pour un élément de la Mire et 4 milieux diffusants

ou alors il peut être fait sur chaque élément en isolant chaque groupe de pixels de chacun des 24 éléments. Sur un groupe de pixels (pour la Mire totale ou pour un élément), la valeur maximale d'intensité correspond à la zone la plus claire (1 pour un fond blanc) et la valeur minimale d'intensité correspond à la zone la plus foncée (0 pour un objet noir). La Figure 3.22 présente l'évolution de l'intensité calculée sur une ligne de pixels d'un élément de la Mire vue à 1 m et pour 4 coefficients de diffusion. En rouge, le cas non diffusant montre une « frontière » très marquée entre les bandes noires (intensité égale à 0) et les bandes blanches (intensité égale à 1). Lorsque le milieu devient diffusant, les bandes noires s'éclaircissent (intensité supérieure à 0) et les bandes blanches deviennent plus foncées (intensité inférieures à 1) et la différence entre les deux types de bandes tend à se réduire. Il y a donc une perte de contraste. Pour une valeur de coefficient de diffusion trop importante, par exemple pour 10 m^{-1} , il n'est plus possible de faire la différence entre deux bandes noire et blanche.

Le calcul du contraste est appliqué sur les 24 premiers éléments¹⁵ de la Mire (Tableau 3.6). Le contraste dépend à la fois de la distance et du coefficient de diffusion. Le contraste est tracé en fonction de la distance objet-lentille pour chaque coefficient de diffusion (Figure 3.23), pour 4 valeurs différentes de résolution 0,250 paire de lignes/mm (faible résolution, élément le plus gros), 0,500 paire de lignes/mm, 1,000 paire de lignes/mm et 2,000 paires de lignes/mm (grande résolution). Le contraste diminue avec l'augmentation de la distance, du coefficient de diffusion et de la résolution. Par exemple, prenons pour référence l'élément de résolution 0,500 paire de lignes/mm (c'est-à-dire l'élément 1 du groupe -1 de la Mire) et $\sigma=1,0 \text{ m}^{-1}$, le contraste est de 0,76 à 0,5 m alors qu'il est de moins de 0,02 à environ 8 m. Le même milieu ($\sigma=1,0 \text{ m}^{-1}$) à 0,5 m donne un contraste de 0,6 pour une résolution plus élevée 1,000 paire de lignes/mm (élément 1

15. 4 Groupes -2 à 1 ; 6 Éléments

du groupe 0). Enfin, à distance égale et pour l'élément de résolution de 0,500 paire de lignes/mm (élément 1 du groupe -1), le contraste est de 0,54 pour $\sigma=3,0 \text{ m}^{-1}$.

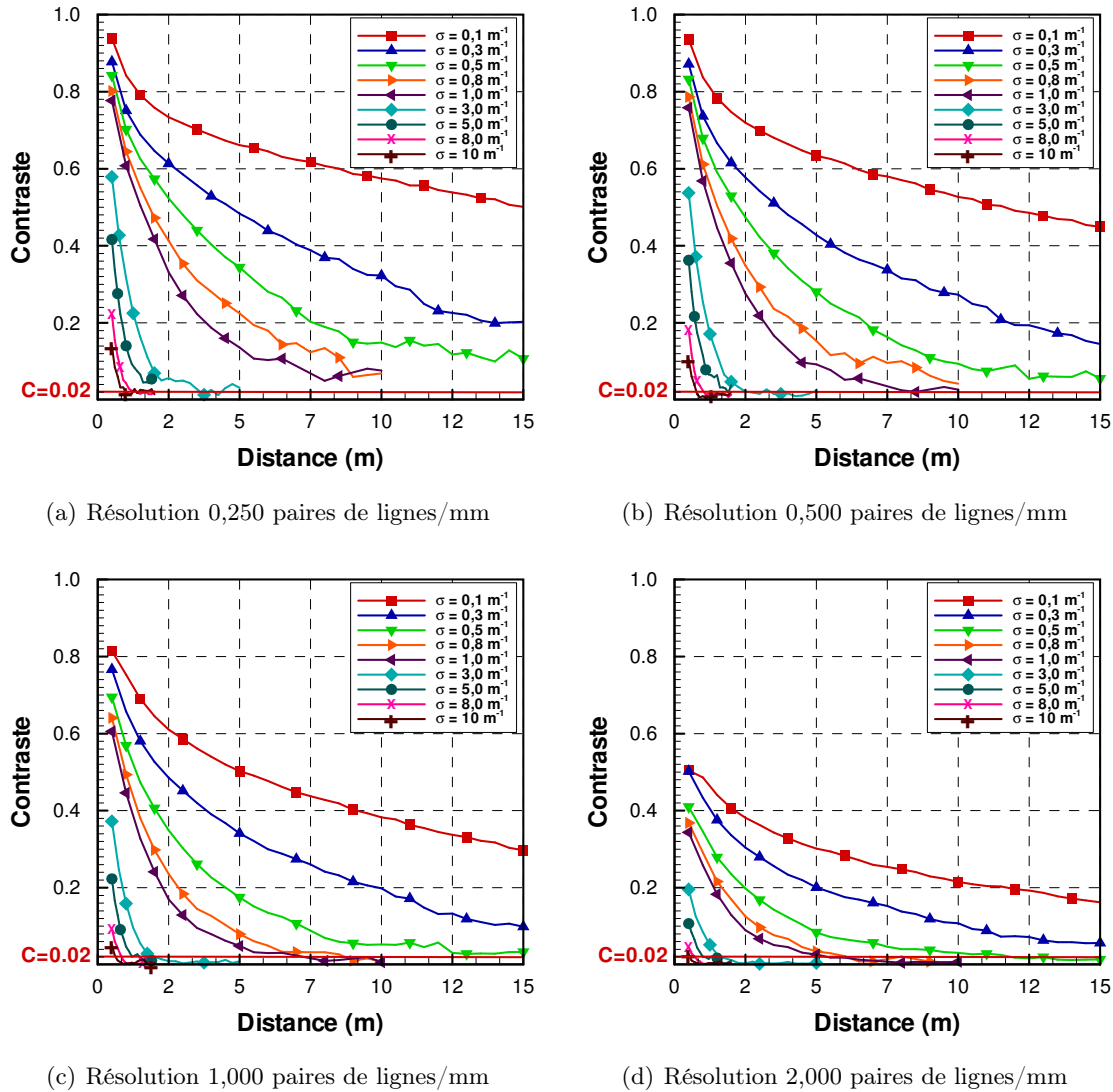


FIGURE 3.23 – Détermination de la distance de visibilité par la notion de contraste seuil à 0,02 - pour 4 éléments de résolution

La distance de visibilité est définie comme étant la valeur de la distance pour laquelle le contraste devient inférieur à 0,02. La distance moyenne de visibilité pour l'ensemble des éléments de résolution est représentée sur la Figure 3.24. La distance de visibilité basée sur un contraste seuil de 0,02 décroît avec l'augmentation du coefficient de diffusion. Par exemple, pour un milieu de coefficient $\sigma=0,5 \text{ m}^{-1}$, la distance de visibilité est d'environ 13 m et pour $\sigma=10 \text{ m}^{-1}$, la distance n'est plus que de 0,65 m. À l'instar de la corrélation de Jin¹⁶ qui définit la visibilité de manière empirique pour un panneau lumineux par $\beta.V = 8$ où β est le coefficient d'extinction et V la

16. En fait, Jin définit $V = \frac{[5 - 10]}{\beta}$ puis il prend pour valeur moyenne une constante égale à 8 dans le cas d'un panneau lumineux

distance de visibilité, la distance de visibilité moyenne d'une Mire de résolution est liée au coefficient de diffusion par $\sigma.V = 6,5$ pour un panneau lumineux. En considérant, une résolution maximale de 2 paires de lignes/mm, la corrélation devient $\sigma.V = 4,5$ et pour une résolution minimale de 0,25 paire de lignes/mm, la corrélation est $\sigma.V = 9,6$. Autrement dit, pour un milieu de coefficient d'extinction de 3 m^{-1} et la Mire de résolution USAF1951, Jin évaluerait la distance de visibilité à 2,67 m alors que pour ce même milieu, en basant le raisonnement sur la notion de contraste, la distance moyenne de visibilité serait de 2,17 m. En considérant cette fois la résolution, la distance de visibilité basée sur la notion de contraste serait de 1,53 m pour une bonne résolution et 3,20 m pour une résolution réduite.

Cela montre à la fois les limitations de la corrélation de Jin dans le sens où la notion de résolution n'est pas prise en compte et en même temps sa capacité à donner un bon ordre de grandeur de la distance de visibilité puisque la distance calculée par la corrélation de Jin est vérifiée par l'étude de la notion de contraste.

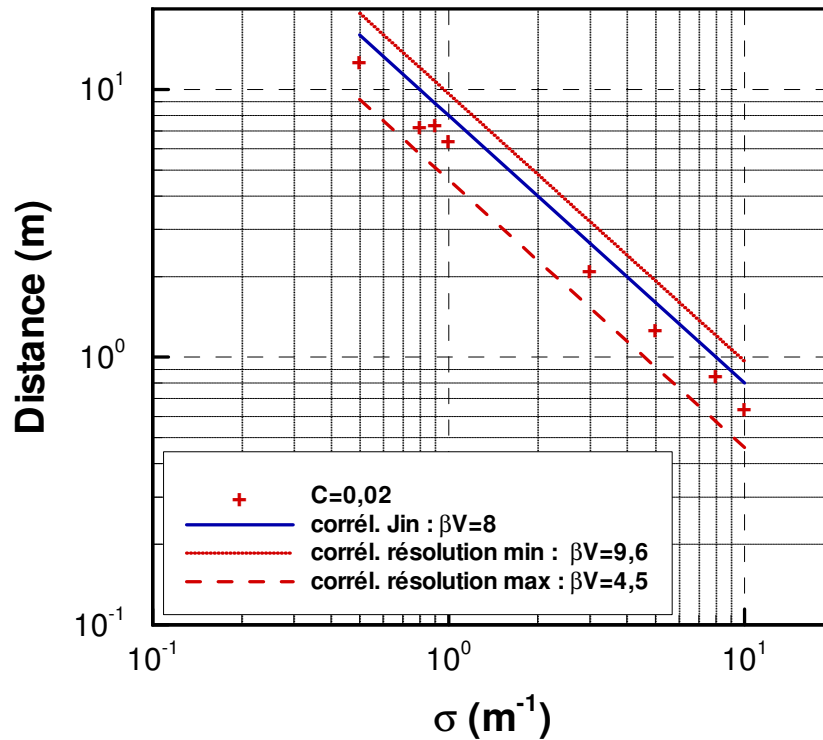


FIGURE 3.24 – Distance de visibilité en fonction du coefficient de diffusion

En réalité, l'estimation de visibilité par le contraste seuil peut être limitée dans le cas où le milieu est fortement absorbant. Dans cette étude, on suppose que l'intensité lumineuse est suffisante pour que l'image soit perçue par l'observateur. Toutefois, de la même manière qu'un contraste seuil a été défini, il serait nécessaire de définir une valeur seuil d'intensité lumineuse. Pour chaque cas traité, on vérifiera la valeur du flux transmis. Cette approche est moins conventionnelle mais pourrait devenir nécessaire en milieu absorbant.

3.4 Conclusion du chapitre

La possibilité d'estimer la distance de visibilité dans un milieu chargé en gouttes par la méthode de Monte-Carlo a été montrée. La visibilité est sensible à la densité de gouttes dans le spray et à leur taille. La transmittance diminue significativement avec l'augmentation de la densité de gouttes et la réduction du diamètre de Sauter. On a également pu montrer que les variations spectrales de transmittance étaient faibles dans le spectre visible pour un milieu composé de fines gouttelettes d'eau, ce qui permet de choisir une longueur d'onde pour les essais sans que cela n'influence les résultats sur la transmission laser. En d'autres termes, les résultats expérimentaux ne devraient pas être différents que l'on choisisse une longueur d'onde de 405, 520, 642 ou 785 nm (longueurs d'onde disponibles pour la source laser voir Chapitre 2).

L'importance de la résolution spatiale dans l'estimation de la distance de visibilité a été mise en avant. En effet, la distance peut être plus ou moins grande en fonction de l'objet que l'on cherche à observer. Par exemple, on pourrait estimer deux distances de visibilité différentes l'une permettant de lire une inscription sur un panneau et l'autre pour simplement voir le panneau lumineux au travers du milieu semi-transparent.

Ce chapitre s'est attaché essentiellement à présenter la méthode basée sur une approche Monte-Carlo et à étudier les paramètres de sensibilité essentiels dans un milieu type asper-sion mais les outils pour évaluer et intégrer les propriétés radiatives des suies (essentiellement absorbantes) ont également été données. L'application de la méthode au Chapitre 5 dans la configuration pièce-couloir d'essai portera donc bien sur un mélange gouttes et suies. Dans le cas d'un milieu absorbant, l'estimation de la distance de visibilité par la notion de contraste seuil ne suffit pas et doit être complétée par une autre étude basée sur l'intensité lumineuse.

Chapitre 4

Configuration d'essais et résultats expérimentaux

Sommaire

4.1	Dispositif expérimental	85
4.1.1	Configuration d'essais	85
4.1.2	Foyer mis en œuvre	86
4.1.3	Systèmes d'aspersion	88
4.1.4	Instrumentation des essais	90
4.2	Résultats de l'étude expérimentale	97
4.2.1	Avant aspersion	99
4.2.2	Activation du sprinkler BP	106
4.2.3	Activation du sprinkler HP	113
4.2.4	Activation du brouillard d'eau	119
4.3	Étude de l'atténuation du rayonnement par un spray	126
4.4	Conclusion du chapitre	128

Ce chapitre a pour objectif de décrire l'étude réalisée pour caractériser et comprendre les effets de l'aspersion sur un milieu enfumé et notamment l'étude des interactions thermique et optique eau/fumée. Il est découpé en 3 parties suivies par la conclusion et comprend la comparaison de chaque technologie d'aspersion et de leurs effets.

La première partie comporte 4 sections. La première section décrit la configuration expérimentale utilisée, composée d'une pièce et d'un couloir. Ensuite, dans la deuxième section, une attention particulière est portée sur le choix du foyer mis en œuvre dans les essais. Le foyer se doit d'être répétable et n'est utilisé que comme une source de production de chaleur et de fumée. La troisième section permet de comparer les trois technologies d'aspersion et de mettre en avant leurs caractéristiques différentes dans nos conditions d'essai bien définies. Enfin, dans la quatrième section, l'instrumentation mise en place dans les essais est décrite, notamment sur la mesure de la masse du combustible durant l'essai, la mesure des champs de température et la métrologie optique développée dans le cadre de la thèse. La répétabilité des essais et les incertitudes de mesures sont également expliquées.

La deuxième partie présente les résultats expérimentaux de quelques essais sélectionnés. La première section décrira les phénomènes observés avant aspersion. Nous verrons que la répétabilité des essais permet de comparer les essais avant aspersion via une valeur moyenne et des écarts-types prenant en considération les 15 essais présentés. Les sections suivantes concernent les phases d'activation de chaque spray. Dans un premier temps l'effet du système sprinkler basse pression est détaillé. Puis, l'effet du sprinkler haute pression et enfin, dans la dernière partie, l'effet de l'aspersion par brouillard d'eau.

La troisième partie traite des essais d'atténuation radiative réalisés dans la configuration pièce-couloir. La comparaison entre les trois systèmes est faite notamment sur leur capacité à atténuer le rayonnement infrarouge.

Une conclusion permettra de faire le bilan sur les trois technologies d'aspersion et surtout, sur leurs différences. De plus, cette partie recensera sous la forme d'un tableau l'ensemble des essais réalisés au CSTB en collaboration avec le LEMTA dans le cadre de la thèse.

4.1 Dispositif expérimental

4.1.1 Configuration d'essais

La configuration d'essais consiste en une pièce de surface 12 m^2 et de hauteur 2,15 m, connectée à un couloir via une ouverture (Figure 4.1). Le couloir mesure 9 m de long sur 2,40 m de haut. Sa largeur, égale à 1,40 m, correspond à 2 Unités de Passage (UP). L'ouverture entre la pièce et le couloir, dénommé le « sas », mesure 80 cm de large sur 1,90 m de haut.

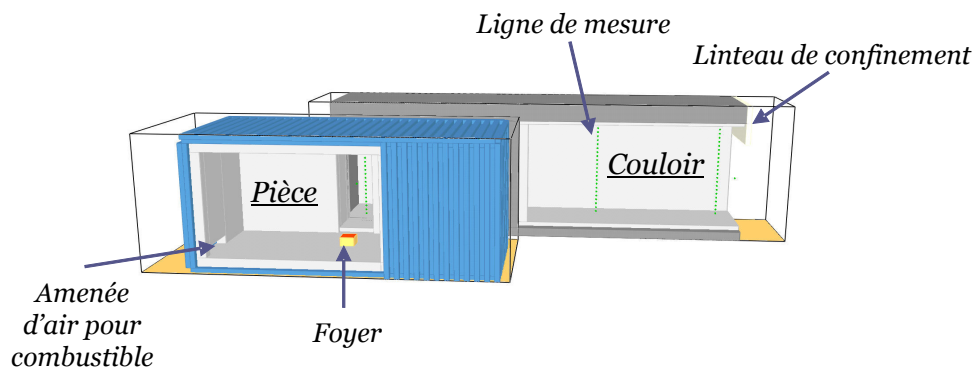


FIGURE 4.1 – Configuration expérimentale pour les essais d'aspersion

Une ouverture de 90 cm de large sur 40 cm de haut est créée en partie basse de la pièce, pour favoriser un apport en oxygène au foyer durant l'essai et limiter l'impact de l'aspersion sur l'activité du foyer. L'extrémité du couloir est ouverte sur l'extérieur. Le linteau est à 40 cm sous le plafond de manière à favoriser une épaisseur homogène de la couche de fumée le long du couloir. Ces éléments ont fait l'objet d'un travail numérique et expérimental préalable afin de dimensionner au mieux la surface de l'ouverture de la pièce et la hauteur du linteau.

La pièce est un container métallique, dont le sol est recouvert de béton cellulaire de type SIPOREX et les murs de plaques de plâtre PROMAT résistantes aux hautes températures. Les murs du couloir ainsi que le sas entre la pièce et le couloir sont construits en béton cellulaire de type SIPOREX. Le sol ainsi que le plafond sont constitués de dalles en béton (Figure 4.2).

Toutes les parois verticales et horizontales de la pièce et du couloir sont recouvertes par 5 mm de mortier projeté résistant aux hautes températures et dont la rugosité est relativement importante. Les caractéristiques thermiques des matériaux ont été mesurées dans une étude préalable [11]. Cette caractérisation figure dans le Tableau 4.1. À titre indicatif, ce tableau donne également l'épaisseur de chacun des matériaux précités ainsi que les caractéristiques thermiques représentatives qui ont été considérées dans la phase numérique du Chapitre 5.

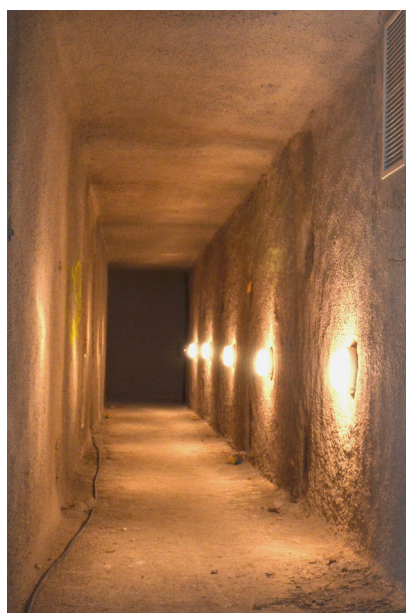
Trois Blocs Autonomes d'Éclairage de Sécurité (BAES) sont disposés dans le plan longitudinal médian du couloir, sur la section 4, à trois hauteurs, 40 cm, 1,00 m et 1,40 m du sol (Figure 4.3). Durant les essais, ils fonctionnent de façon autonome sur batterie. Ils sont disposés de manière à ce qu'un observateur puisse évaluer la visibilité de manière qualitative, depuis l'extérieur du couloir.

Matériaux	Conductivité Thermique W/(m · K)	Chaleur spécifique kJ/(kg · K)	Masse volumique kg/m ³	Épaisseur m
Béton	0,92	0,88	2200	0,4
Ciment projeté	0,357	1,1	969	0,05
Plâtre	0,35	1,09	2790	0,01
Siporex	0,09	1,0	350	0,2

TABLEAU 4.1 – Caractéristiques thermiques des matériaux constitutifs des parois et du plafond



(a) Vue du sas depuis la pièce



(b) Vue du couloir

FIGURE 4.2 – Photographies de la configuration d'essais avant instrumentation

4.1.2 Foyer mis en œuvre

Les essais mettent en jeu un combustible liquide (heptane), placé dans un bac de section carrée de côté 32 cm et de hauteur 15 cm. Ce bac est disposé dans la pièce de manière à limiter l'interaction entre l'activité du foyer et l'aspersion d'eau située dans le couloir (Figure 4.3).

Le choix du combustible heptane vise à limiter les incertitudes relatives à l'activité du foyer, faciliter la mise en œuvre des essais et favoriser la répétabilité des mesures. En effet, ce type de foyer présente l'intérêt d'avoir une surface de combustible quasi-constante au cours du temps et l'heptane en particulier est bien documenté dans la littérature scientifique [7].

La géométrie du foyer (sa section et sa hauteur) est définie de sorte que les niveaux de température et d'opacité atteints dans le couloir permettent d'évaluer une stratification de l'environnement en régime établi suffisamment long (les essais présentent une phase quasiment stationnaire de 10 minutes). La puissance théorique d'un combustible liquide est proportionnelle à la surface

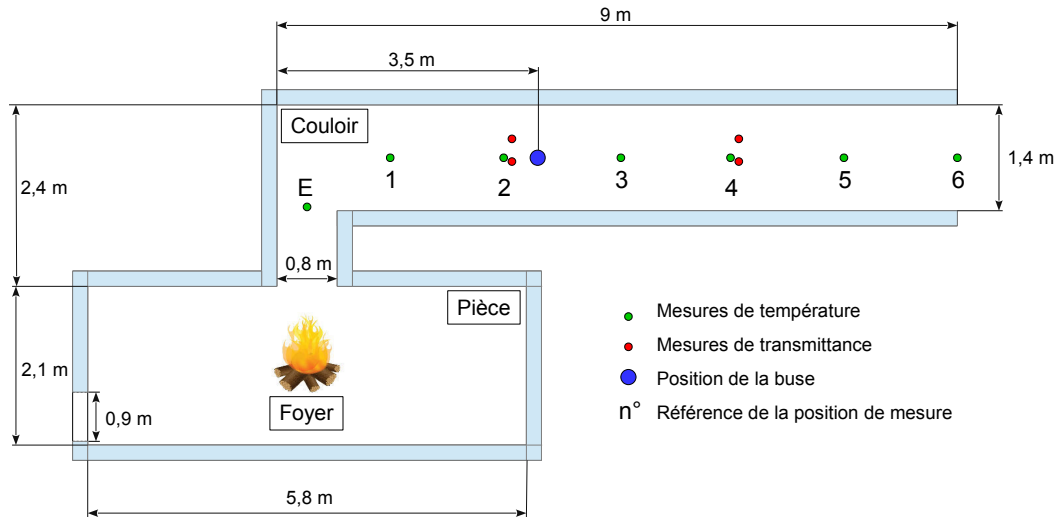


FIGURE 4.3 – Position du foyer, du dispositif d'aspersion et de l'instrumentation

de la nappe de liquide. La surface de la nappe A égale à $0,09 \text{ m}^2$ est suffisamment grande pour que la puissance libérée par le foyer à l'air libre soit estimée par la relation de Zabetakis et Burgess [7] :

$$\dot{Q}_c = \Delta H_c \cdot \dot{m}''_{\infty} A \left(1 - \exp^{-k \cdot D}\right) \quad (4.1)$$

où D désigne le diamètre de la nappe considérée, ΔH_c la chaleur de combustion de l'heptane et \dot{m}''_{∞} le débit massique surfacique « limite » du combustible. Le paramètre k dépend de la nature du combustible mis en jeu. Babrauskas propose les valeurs suivantes pour l'heptane [7] :

$$\Delta H_c = 44,8 \text{ MJ.kg}^{-1}, \quad \dot{m}''_{\infty} = 0,101 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}, \quad k = 1,1 \text{ m}^{-1} \quad (4.2)$$

En reprenant les dimensions du bac d'heptane employé dans la campagne d'essais, la puissance libérée par un tel foyer à l'air libre est estimée à 150 kW. Il faut toutefois noter que le confinement de la pièce (parois) n'est pas pris en compte dans cette relation bien qu'il soit susceptible d'influencer la puissance libérée par le feu notamment par les phénomènes de rayonnement (par contre, l'entrée d'air aménagée dans la pièce et l'évacuation des fumées dans le couloir laissent bien penser que le régime de combustion n'est pas sous-ventilé). La hauteur du bac conditionne la quantité d'heptane et donc la durée théorique de la combustion. En l'occurrence, chaque essai nécessite environ 15 L d'heptane. Pour une puissance théorique de 150 kW, l'essai devrait durer une cinquantaine de minutes. Cette estimation de la durée ne considère pas non plus l'évolution de la puissance du feu d'une nappe d'hydrocarbure au cours du temps. En effet, généralement, la puissance d'un feu de bac présente une croissance très rapide suivie d'un régime établi, de durée plus ou moins importante en fonction de la hauteur du bac, puis en fin d'essai, un pic de puissance.

4.1.3 Systèmes d'aspersion

Trois systèmes d'aspersion sont installés dans le dispositif d'essais, deux systèmes de type sprinkler (pour les différencier nous les référencerons par la suite soit « BP » pour basse pression, soit « HP » pour haute pression) et un système de brouillard d'eau haute pression. Le réseau mis en place permet d'alimenter une rampe équipée de la buse ou de la tête suivant le système testé (Figure 4.4), depuis le réseau d'eau de ville pour le système brouillard d'eau et le système sprinkler BP et depuis une cuve servant de réserve d'eau pour un groupe de pressurisation pour le système sprinkler HP. La rampe est située près du plafond, sur l'axe médian longitudinal du couloir. Dans le cas des essais présentés ci-après, le dispositif ne comprend qu'une buse/tête activée, placée à 10 cm du plafond et à 3,5 m comptés depuis l'extrémité du couloir côté pièce (Figure 4.3).

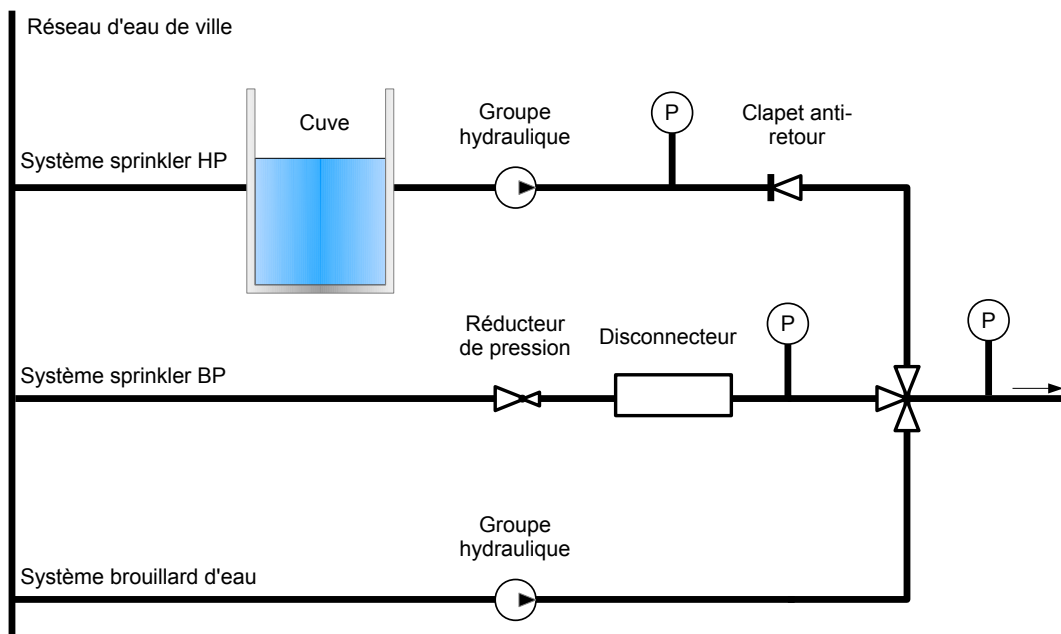


FIGURE 4.4 – Réseau hydraulique du dispositif expérimental

4.1.3.1 Systèmes sprinkler BP et HP

Selon le risque lié à l'activité du bâtiment, la réglementation préconise l'utilisation de certaines buses. La réglementation définit une surface de mouillage au sol puis un taux d'application surfacique de pulvérisation. En fonction de ce débit, les buses sont classées par leur nombre de débit K . Afin de comparer un système de brouillard d'eau haute pression avec un système sprinkler, le choix est fait de considérer une configuration pièce-couloir comme étant une représentation de chambre d'hôtel. D'après l'APSAD R1 et la norme AFNOR PR NF EN 12845, la pièce-couloir peut être classée en risque moyen de type 1 : OH1 (« Ordinary Hazard »). Les buses utilisées sont donc de type OH1.

Le système sprinkler dit BP est directement connecté au réseau d'eau de ville. La pression de la rampe est réglée par le biais d'un réducteur de pression. La pression d'alimentation relevée au niveau du régulateur de pression est proche de 2,8 bars. La pression mesurée au droit de la tête dans le couloir est d'environ 0,27 bar.

La rampe du système sprinkler HP est mise sous pression par une pompe reliée à une cuve de 1 m³ d'eau. La pression d'alimentation relevée juste en aval de la pompe est proche de 13 bars. La pression mesurée au droit de la tête dans le couloir est d'environ 1,3 bars.

La même tête est utilisée pour les deux systèmes sprinkler. La Figure 4.5 montre sa géométrie et précise ses dimensions. Il s'agit d'une tête correspondant à un risque OH1 dont le facteur K est égal à 80 L/(min · bar^{1/2}). Aux pressions relevées, le débit d'aspersion théorique avoisine 41 L/min pour le sprinkler BP et 91 L/min pour le sprinkler HP.

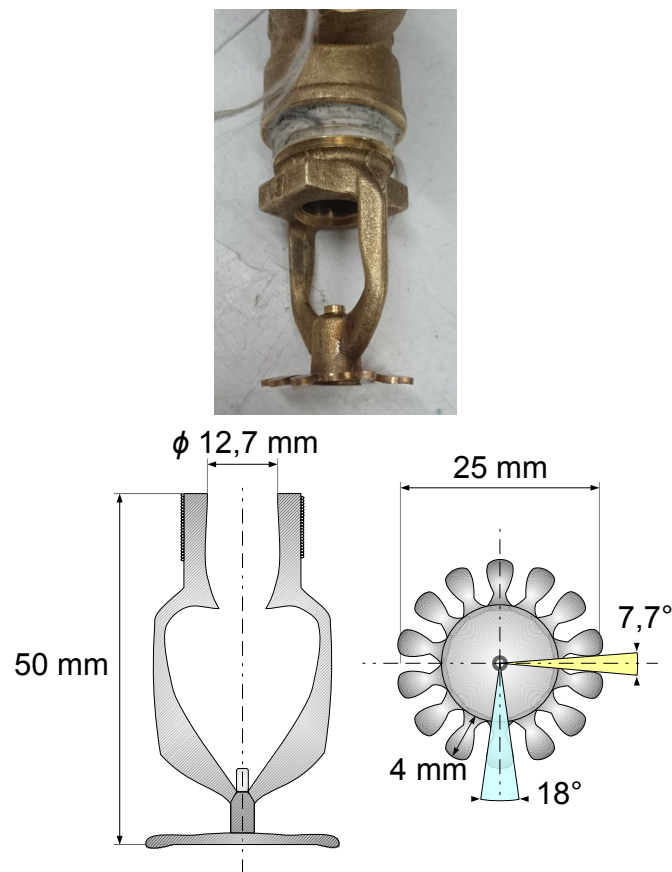


FIGURE 4.5 – Photographie et représentation schématique de la tête de sprinkler employée

4.1.3.2 Système brouillard d'eau

Le système brouillard d'eau est constitué d'une pompe de mise en pression alimentée en eau du réseau. La pression relevée en sortie de pompe est proche de 100 bars. Il s'agit donc d'un système brouillard d'eau haute pression.

La buse utilisée dans la campagne d'essais comprend six orifices latéraux disposés en couronne. La Figure 4.6 montre sa géométrie et précise ses dimensions. La buse correspond à un risque OH1 dont le facteur K est égal à $2,75 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{bar}^{1/2})$. Sous une pression de 100 bars, le débit d'eau pulvérisé correspondant est d'environ 27,5 L/min.

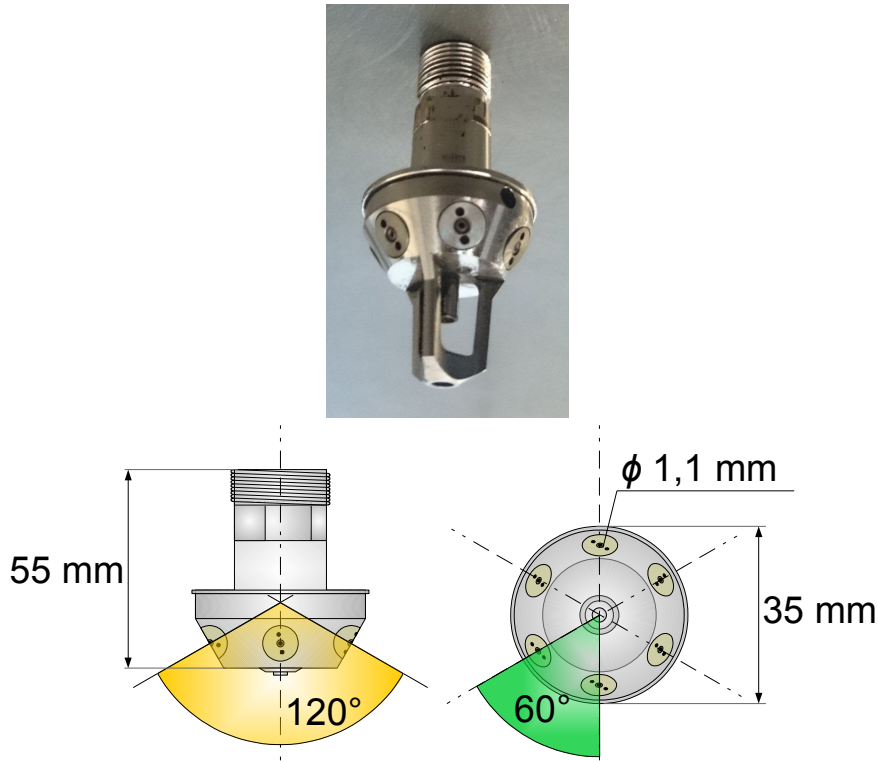


FIGURE 4.6 – Photographie et représentation schématique de la buse brouillard d'eau employée

Chaque orifice délivre un spray elliptique de demi-angle non connu. Sur la base de photographies, le demi-angle de pulvérisation du spray généré par les six orifices est estimé à environ 60° . Les données constructeur donnent la valeur de $23,53 \mu\text{m}$ pour le diamètre de Sauter (des gouttes) de la pulvérisation à 1 m de la buse, sous la pression d'opération de 100 bars (Figure 4.7).

4.1.4 Instrumentation des essais

Plusieurs sections de mesure sont réparties dans le couloir, en amont et en aval de l'aspersion. Les mesures portent sur la perte de masse du foyer au cours de l'essai, la température de gaz et la transmittance du milieu. La position de chaque section associée à la grandeur mesurée ainsi que la numérotation des différents capteurs sont indiquées sur la Figure 4.3. Toutes les distances et les numéros de section dans le couloir seront référencés à partir de l'extrémité du couloir du côté de la pièce.

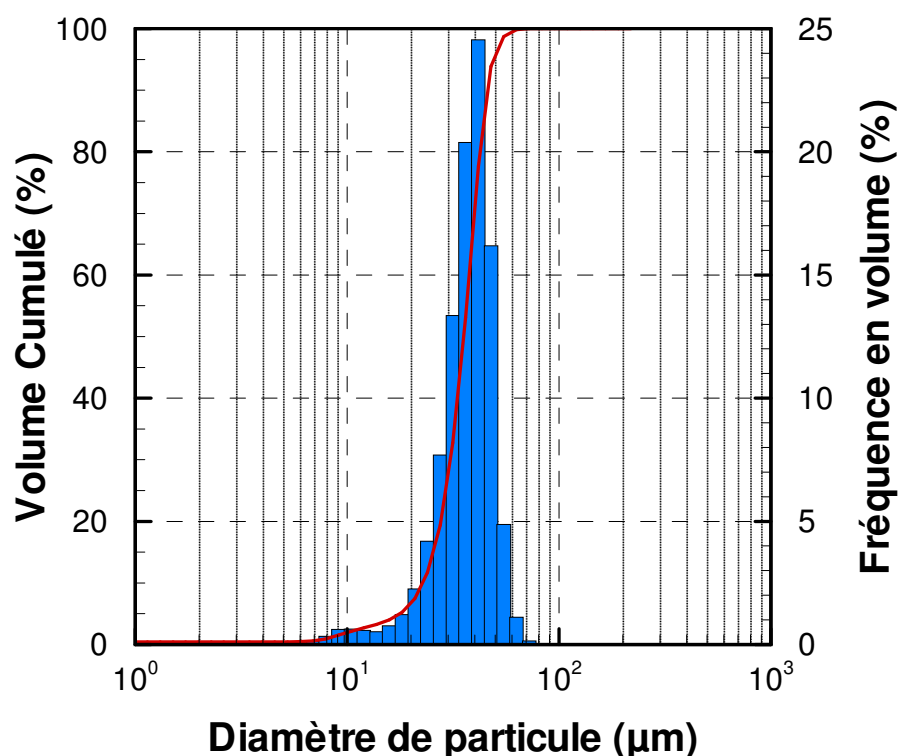


FIGURE 4.7 – Granulométrie fournie par le constructeur pour le brouillard d'eau

4.1.4.1 Mesure de la puissance du feu

La masse du combustible est mesurée et enregistrée tout au long de l'essai. La puissance du feu est estimée traditionnellement à partir de la perte de masse du foyer, de sorte que :

$$\dot{Q}_c = \chi \Delta H_c \cdot \dot{m} \quad (4.3)$$

Cette relation suppose que la perte de masse est égale à la masse d'éléments volatiles générés et venant alimenter les flammes. En d'autres termes, cela suppose que les produits de combustion sont totalement oxydés. Or, même, pour des feux en milieu complètement ouvert ou avec un seul type de combustible, les produits de combustion contiennent des espèces non totalement oxydées (suies, monoxyde de carbone, etc). La relation précédente doit donc être pondérée d'un coefficient dit d'efficacité, noté χ auquel on ne peut donner qu'une valeur estimative. Si celle-ci est fixée à 1, on obtient alors une limite supérieure, la combustion ne pouvant pas produire plus d'énergie par kg de combustible évaporé. Dans le cadre de la présente recherche, une valeur de 0,92 est considérée [124].

Le foyer est donc pesé en continu au cours de l'essai. Cette pesée est réalisée par trois pesons de la marque HBM. À partir des informations transmises par chacun des pesons, la perte de masse du foyer est estimée de la manière suivante :

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\Delta (m_1 + m_2 + m_3)}{\Delta t} \quad (4.4)$$

La gamme de mesure de chaque peson s'étend entre 0 et 20 kg. Les trois pesons sont reliés à une centrale d'acquisition (HBM, modèle QuantumX 840A). La centrale transmet la tension mesurée à l'ordinateur et la conversion de celle-ci en masse est effectuée. La période d'acquisition est de 1 s.

Les incertitudes de mesures sont calculées par le biais de la répétabilité des essais et des erreurs induites par la chaîne d'acquisition. L'incertitude totale $u(\dot{Q})$ est définie comme étant égale à deux écarts-types de manière à obtenir un taux de confiance égale à 95 % [68, 69] :

$$\sigma(\dot{Q}) = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta\bar{m}}{\Delta t}\right)^2 \cdot \sigma^2(\chi\Delta H_c) + \left(\chi\Delta H_c \cdot \frac{1}{\Delta t}\right)^2 \cdot \sigma^2(\Delta m) + \left(\chi\Delta H_c \cdot \frac{\Delta\bar{m}}{\Delta t^2}\right)^2 \cdot \sigma^2(\Delta t)} \quad (4.5)$$

L'incertitude est liée à la relation entre la puissance et la perte de masse, à la discrétisation de cette formule, à la pesée du foyer par la chaîne de mesure (balance, traitement du signal reçu par la centrale, conversion du signal de la centrale vers l'ordinateur) et à la date du mesurage. L'incertitude totale est évaluée en combinant des incertitudes de types A et B. Concernant l'incertitude sur la chaleur de combustion, nous supposons une loi rectangle entre la valeur de combustion parfaite et la valeur estimée :

$$\sigma(\chi\Delta H_c) = \frac{44,6 \cdot 10^3 - 41,2 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \approx 2080 \text{ kJ/kg} \quad (4.6)$$

L'estimation de l'incertitude sur la pesée a été estimée directement sur le dispositif expérimental avec des masses étalon de 1 à 60 kg. L'étalonnage a donné une incertitude sur la masse de :

$$\sigma_{\text{étal.}}(\Delta m) \approx \frac{1,7 \text{ \%} \cdot \Delta m}{\sqrt{3}} \text{ en g} \quad (4.7)$$

L'incertitude liée à la répétabilité est calculée par une loi de Student¹⁷ :

$$\sigma_{\text{répét.}}(\Delta m) = \frac{2,015}{\sqrt{5}} \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum_i (\Delta m_i - \Delta\bar{m})^2} \quad (4.8)$$

Ainsi, l'incertitude liée à la masse mesurée est calculée :

$$\sigma^2(\Delta m) = \sigma_{\text{étal.}}^2(\Delta m) + \sigma_{\text{répét.}}^2(\Delta m) \quad (4.9)$$

Les sources et les valeurs considérées dans l'estimation de l'incertitude sur la pesée du foyer sont données dans le Tableau 4.2.

17. La meilleure estimation de l'écart-type pour n mesures est donnée par $\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i (x_i - \bar{x})^2}$. L'écart-type de la moyenne est donné par : $\sigma_{\bar{x}} = t \times \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}$ où t est appelé *coefficient de Student*. Il est tabulé en fonction du niveau de confiance et du nombre de points moyennés et peut être utilisé dans le cas où la moyenne est effectuée sur peu de mesures. Par exemple, pour un niveau de confiance de 95 % et une moyenne effectuée sur 5 valeurs, le coefficient t est égal à 2,015.

Composante d'incertitude	Source	Valeur	Loi	Facteur	Écart-type	Unité
Répétabilité	Type A	-	Loi de Student	2,015	$\sigma_{\text{répét.}} (\Delta m)$	g
Chaîne de mesure	Type A	1,7 % Δm	-	$1/\sqrt{3}$	$\frac{1,7 \% \cdot \Delta m}{\sqrt{3}}$	g

TABLEAU 4.2 – Liste, valeur et source des composantes d'incertitudes prises en compte pour la pesée du foyer [11]

4.1.4.2 Mesure de la température de l'air

La température de l'air est mesurée avec des thermocouples¹⁸ de type K (Chromel/Alumel) sur sept sections. Six sont réparties dans le couloir uniformément et une se situe au niveau de l'ouverture entre la pièce et le couloir (Figure 4.3).

Les thermocouples sont disposés en échelle, les uns au-dessus des autres. Chaque échelle du couloir comprend en tout dix-huit thermocouples tandis que celle de l'ouverture en compte quatorze du fait de la hauteur réduite sous plafond (plafond à 2 m pour le sas et à 2,40 m pour le couloir).

Sur chaque section de mesure, les thermocouples sont placés de manière à caractériser la couche de fumée. En ce sens, l'écart entre les thermocouples est réduit en partie haute du couloir. Cet écart est de 20 cm jusqu'à 1 m du sol, il est réduit à 10 cm au-dessus (Figure 4.8). L'étiquette et les noms utilisés pour les thermocouples sont répertoriés dans le Tableau 4.3 en fonction de la hauteur de mesure et pour chaque échelle (E et 1 à 6).

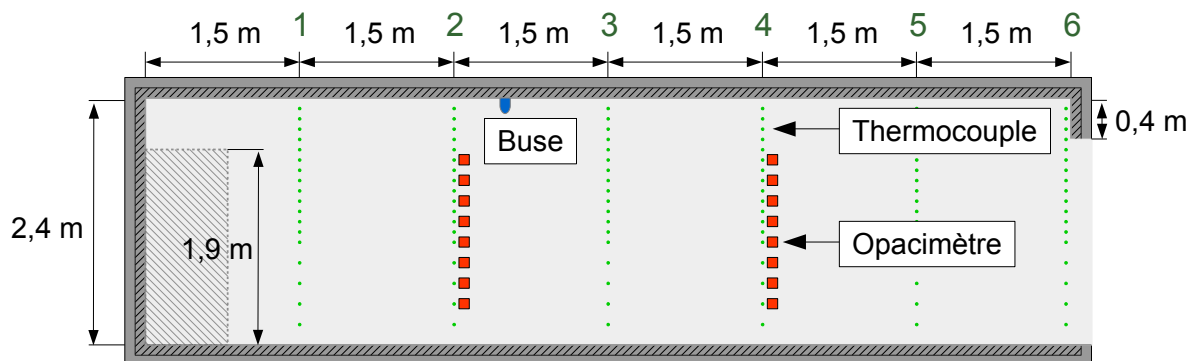


FIGURE 4.8 – Coupe longitudinale médiane du couloir indiquant la disposition de l'instrumentation

Les thermocouples sont raccordés à une centrale et à une carte d'acquisition (KEITHLEY, modèles 2750 et 7708). Cette centrale génère à l'aide d'une carte d'acquisition (KEITHLEY,

18. Il existe de nombreuses méthodes permettant de mesurer la température. Elles peuvent être basées sur la variation d'une résistance électrique, sur la dilatation d'un liquide ou encore sur l'effet Seebeck (génération d'un potentiel électrique entre deux matériaux en fonction du gradient de température), c'est le cas des thermocouples.

Hauteur (m)		Nom du capteur					
Échelle	E	1	2	3	4	5	6
0.2	TE-020	T1-020	T2-020	T3-020	T4-020	T5-020	T6-020
0.4	TE-040	T1-040	T2-040	T3-040	T4-040	T5-040	T6-040
0.6	TE-060	T1-060	T2-060	T3-060	T4-060	T5-060	T6-060
0.8	TE-080	T1-080	T2-080	T3-080	T4-080	T5-080	T6-080
1.0	TE-100	T1-100	T2-100	T3-100	T4-100	T5-100	T6-100
1.1	TE-110	T1-110	T2-110	T3-110	T4-110	T5-110	T6-110
1.2	TE-120	T1-120	T2-120	T3-120	T4-120	T5-120	T6-120
1.3	TE-130	T1-130	T2-130	T3-130	T4-130	T5-130	T6-130
1.4	TE-140	T1-140	T2-140	T3-140	T4-140	T5-140	T6-140
1.5	TE-150	T1-150	T2-150	T3-150	T4-150	T5-150	T6-150
1.6	TE-160	T1-160	T2-160	T3-160	T4-160	T5-160	T6-160
1.7	TE-170	T1-170	T2-170	T3-170	T4-170	T5-170	T6-170
1.8	TE-180	T1-180	T2-180	T3-180	T4-180	T5-180	T6-180
1.9	TE-190	T1-190	T2-190	T3-190	T4-190	T5-190	T6-190
2.0	-	T1-200	T2-200	T3-200	T4-200	T5-200	T6-200
2.1	-	T1-210	T2-210	T3-210	T4-210	T5-210	T6-210
2.2	-	T1-220	T2-220	T3-220	T4-220	T5-220	T6-220
2.3		T1-230	T2-230	T3-230	T4-230	T5-230	T6-230

TABLEAU 4.3 – Étiquette et position des mesures de température

modèle 7708), une différence de potentiel relative aux deux mesurandes relevées par le thermocouple. Puis, elle convertit ce signal analogique en un signal digital et l'envoie vers l'ordinateur. L'étendue de mesure de la centrale d'acquisition est comprise entre -200 et 1372 °C. Selon la fiche de données techniques de la centrale et de la carte d'acquisition, l'association de ces deux modèles est capable de traiter 200 entrées à la vitesse de 120 entrées par seconde relatives à une température et 28 entrées par seconde relatives à une tension. La période d'acquisition de chaque température est de 10 s. L'incertitude totale sur la température de l'air $\sigma(T)$ est définie comme étant égale à deux fois la racine carrée de la somme des carrés des écarts-types de manière à obtenir un taux de confiance égal à 95 % [68, 69] :

$$\sigma(T) = 2 \cdot \sqrt{\sigma_{\text{répét.}}^2(T) + \left(\frac{0,0075 \cdot T}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,0001}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1572}{2^{22}2\sqrt{3}}\right)^2} \quad (4.10)$$

En faisant l'hypothèse que la température mesurée par un thermocouple est égale à celle de la phase gazeuse¹⁹, l'incertitude résulte de l'estimation de la tension de sortie du thermocouple par la centrale et la carte d'acquisition, de la traduction de cette tension en température et de la conversion de cette grandeur en un signal digital. L'incertitude totale est évaluée en combinant des incertitudes de types A et B.

Les sources d'erreur considérées sont regroupées dans le Tableau 4.4. L'incertitude liée à la

¹⁹. En réalité, on mesure la température de l'extrémité du thermocouple. L'hypothèse posée faisant correspondre la température du milieu à la température de l'extrémité est vraie pour des thermocouples à boule de faible diamètre.

répétabilité des essais est calculée par une loi de Student :

$$\sigma_{\text{répét.}}(T) = \frac{2,015}{\sqrt{5}} \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum_i (T_i - \bar{T})^2} \quad (4.11)$$

Composante d'incertitude	Source	Valeur	Loi	Facteur	Écart-type	Unité
Répétabilité	Type A	-	Loi de Student	2,015	$\sigma_{\text{répét.}}$	°C
Thermocouple						
Précision	Type B	0,75 % de la valeur	Rectangle	$1/\sqrt{3}$	$\frac{0,0075 \cdot T}{\sqrt{3}}$	°C
Dérive	-	-	-	-	-	-
Temps de réponse	Type B	1,5 s pour 90 % du signal	Normale	1/3	1,5/3	s
Centrale et carte d'acquisition						
Résolution	Type B	0,0001 °C	Rectangle	$2/\sqrt{3}$	$\frac{0,0001}{2\sqrt{3}}$	°C
Précision	Type B	1 °C	Normale	1/3	1/3	°C
Dérive	-	-	-	-	-	-
Conversion en 22 bits	Type B	pleine échelle/ 2^{22} = $1572/2^{22}$	Rectangle	$2/\sqrt{3}$	$\frac{1572}{2^{22}2\sqrt{3}}$	°C
Temps de réponse	Type B	-	Normale	1/3		s

TABLEAU 4.4 – Liste, valeur et source des composantes d'incertitude prises en compte pour la température de gaz [11]

4.1.4.3 Mesure de l'opacité

L'opacité est mesurée sur deux sections distantes de 3 m, l'une placée à 0,5 m en amont de l'aspersion et l'autre à 2,5 m en aval de l'aspersion (Figure 4.3). Chaque section comporte huit opacimètres disposés en échelle de manière à caractériser la stratification optique. Les opacimètres sont disposés tous les 20 cm à partir de 40 cm du sol jusqu'à 1,8 m. Leur position dans le couloir est représentée sur la Figure 4.8. Le chemin optique entre émetteur et récepteur est de 30 cm. Le principe et le développement de cette technique de mesure ont été décrits au Chapitre 2.

La transmittance est calculée en faisant le rapport entre le signal reçu pendant l'essai U et le signal reçu avant essai U_0 . En fait, l'instrumentation et la centrale sont allumées quelques minutes avant le début de l'essai afin que le signal se stabilise, puis il est moyenné sur cette période.

$$Tr = \frac{\text{Flux reçu durant essai}}{\text{Flux reçu avant essai}} = \frac{U}{U_0} \quad (4.12)$$

À noter que la transmittance vaut 1 si le milieu est transparent et 0 s'il est opaque.

Hauteur (m)	Nom du capteur	
	1	2
Échelle		
0.4	Tr1-040	Tr2-040
0.6	Tr1-060	Tr2-060
0.8	Tr1-080	Tr2-080
1.0	Tr1-100	Tr2-100
1.2	Tr1-120	Tr2-120
1.4	Tr1-140	Tr2-140
1.6	Tr1-160	Tr2-160
1.8	Tr1-180	Tr2-180

TABLEAU 4.5 – Étiquette et position des mesures de transmittance

Le dispositif d'opacimétrie est connecté à une centrale d'acquisition (AGILENT, modèle 34970A) associée à une carte (KEITHLEY, modèle 7708). Le système de mesure optique par atténuation laser fait également l'objet d'une étude d'incertitude. L'incertitude totale de la chaîne d'acquisition est estimée par les tests de justesse (ou d'exactitude) menés durant le développement de la métrologie optique (Chapitre 2). Au regard de cet étalonnage, en supposant que l'erreur mesurée sur une atténuation laser théorique de 10 % est représentative de l'intervalle de mesure des essais (entre 0 et 100 %), l'incertitude est donnée par :

$$\sigma_{\text{précision}} = \pm 0,67 \% \cdot \text{Tr} \quad (4.13)$$

De plus, la répétabilité est prise en compte. D'après la loi étendue réduite, la composante d'incertitude basée sur la répétabilité peut être calculée par :

$$\sigma_{\text{répét.}}(T) = \frac{2,015}{\sqrt{5}} \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum_i (\text{Tr}_i - \bar{\text{Tr}})^2} \quad (4.14)$$

Les composantes d'erreur et les valeurs utilisées sont regroupées dans le Tableau 4.6.

Composante d'incertitude	Source	Valeur	Loi	Facteur	Écart-type	Unité
Répétabilité	Type A	-	Loi de Student	2,015	$\sigma_{\text{répét.}}$	(-)
Centrale, chaîne d'acquisition et capteur						
Précision	Type B	0,67 % de la valeur	Rectangle	$1/\sqrt{3}$	$\frac{0,0067 \cdot \text{Tr}}{\sqrt{3}}$	(-)

TABLEAU 4.6 – Liste, valeur et source des composantes d'incertitude prises en compte pour la transmittance [11]

4.2 Résultats de l'étude expérimentale

Dans la configuration de pièce-couloir présentée, quinze essais ont été réalisés : cinq essais de répétabilité pour chacune des trois technologies d'aspersion (Tableau 4.7). En d'autres termes, les essais sont reproduits cinq fois suivant le même protocole expérimental et cela, pour les deux systèmes sprinklers et le système brouillard d'eau.

Le protocole expérimental utilisé est le fruit d'un travail préliminaire à la fois numérique et expérimental faisant varier configuration, dimensions de la source, position de la métrologie et durée d'essai. Au final, un essai type est retenu.



FIGURE 4.9 – Photographie du foyer pendant un essai

L'essai démarre lorsque le foyer est allumé, l'instant est noté t_0 . La Figure 4.9 montre les flammes produites durant un essai de feu dans la pièce. L'aspersion est activée après $t=t_0 + 7$ min (420 s). Cet instant est choisi de manière à ce que la puissance du feu ait atteint le régime établi. L'aspersion est arrêtée à $t=t_0 + 12$ min (720 s), toujours pendant la phase de régime établi. Ainsi, la phase d'aspersion dure 5 min. La fin de l'essai correspond à l'épuisement du combustible.

La masse moyennée sur les cinq essais de répétabilité est tracée sur la Figure 4.10 pour chacune des trois technologies. La masse d'heptane mise en jeu initialement avoisine 9 kg. Le feu est déclenché à l'instant t_0 . À mesure que l'heptane brûle, la masse diminue jusqu'à ce qu'elle devienne nulle. Cet instant correspond à l'extinction du foyer et à la fin de l'essai.

La Figure 4.10 met en évidence quatre phases dans l'évolution de la masse. Durant les cinq premières minutes, la masse diminue. Cette diminution évolue au cours du temps, la perte de

Technologie testée	Date et heure de l'essai	Nom de l'essai
Sprinkler BP	17/03/2015 à 10h00	2015-03-17_SPKBP_FEU_1
	19/03/2015 à 10h45	2015-03-19_SPKBP_FEU_2
	20/03/2015 à 10h45	2015-03-20_SPKBP_FEU_3
	25/03/2015 à 10h00	2015-03-25_SPKBP_FEU_4
	26/03/2015 à 10h30	2015-03-26_SPKBP_FEU_5
Sprinkler HP	16/03/2015 à 16h30	2015-03-16_SPKHP_FEU_1
	17/03/2015 à 16h15	2015-03-17_SPKHP_FEU_2
	19/03/2015 à 15h15	2015-03-19_SPKHP_FEU_3
	24/03/2015 à 16h50	2015-03-24_SPKHP_FEU_4
	25/03/2015 à 16h35	2015-03-25_SPKHP_FEU_5
Brouillard d'eau	25/02/2015 à 10h00	2015-02-25_WM_FEU_1
	25/02/2015 à 14h50	2015-03-19_WM_FEU_2
	16/03/2015 à 16h30	2015-03-20_WM_FEU_3
	20/03/2015 à 14h30	2015-03-25_WM_FEU_4
	24/03/2015 à 11h00	2015-03-26_WM_FEU_5

TABLEAU 4.7 – Liste des essais de répétabilité réalisés

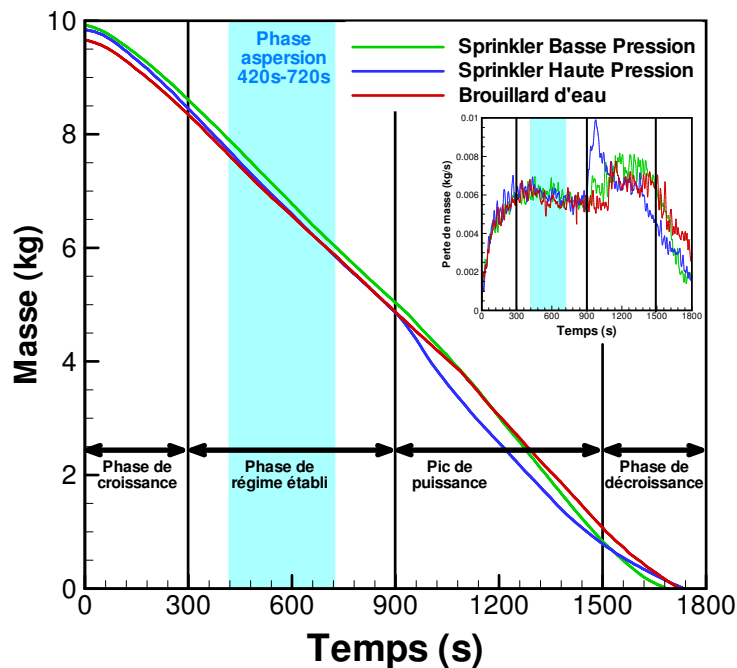


FIGURE 4.10 – Mesure de la masse au cours du temps et évolution temporelle de la perte de masse pour les trois technologies

masse s'accélère. Ensuite, la perte de masse devient stationnaire, ce jusqu'à 15 min (900 s). Puis, une accélération de la perte de masse est observée, jusqu'à environ 25 min (≈ 1500 s). Enfin, entre 25 et 30 min, la masse du foyer chute fortement.

La pente de la courbe de masse renvoie à la perte de masse et donc à l'activité du foyer. 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.

La Figure 4.11 représente l'évolution temporelle de la puissance du feu moyennée, pour chacune des trois technologies, sur les cinq essais de répétabilité. La durée représentée (900 s) correspond à celle exploitée dans le cadre du présent travail. La puissance durant la phase de régime établi est comprise entre 250 et 300 kW. La puissance mesurée est supérieure à celle estimée dans la Section 4.1.2 du fait du rayonnement des parois non pris en compte dans les calculs d'estimation. La Figure 4.11 montre que l'évolution de la puissance du feu, sa valeur et les incertitudes sont similaires entre les trois technologies. En d'autres termes, l'activité du foyer apparaît répétable entre les essais et l'aspersion a un faible impact sur cette activité quelle que soit la technologie.

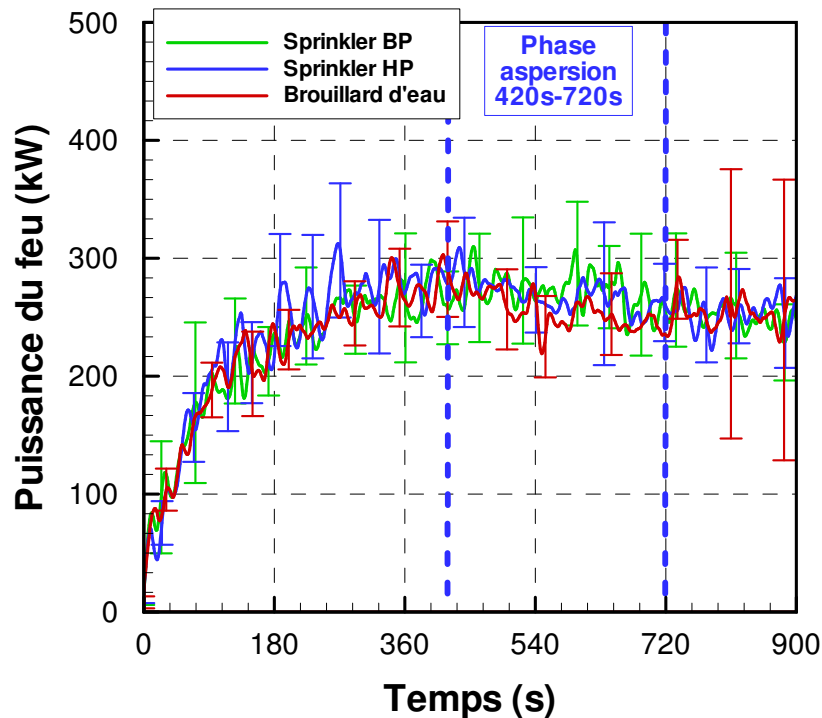


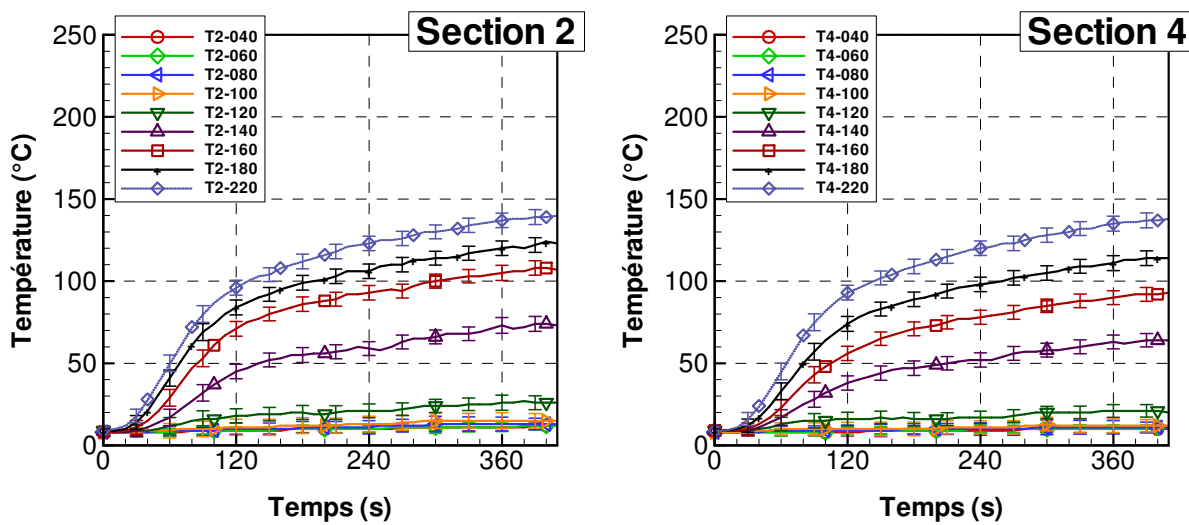
FIGURE 4.11 – Évolution temporelle de la puissance du feu pour les trois technologies

4.2.1 Avant aspersion

La partie précédant l'aspersion est moyennée et présentée avec des barres d'erreurs correspondant aux 15 essais de répétabilité.

La fumée produite par le foyer se déverse très rapidement dans la couloir via le « sas ». La Figure 4.12 présente l'évolution des températures moyennées avant aspersion pour les 15 essais

dans le couloir pour les sections 2 et 4 (situées respectivement à 3 et 6 m du bout du couloir vers la pièce). Dans un souci de lisibilité, seules 9 hauteurs de mesures sont représentées, comprises entre 0,4 et 2,2 m. L'augmentation de la température dans le couloir suit la courbe de HRR avec une élévation rapide pendant environ 2 minutes suivie d'une élévation progressive jusque 420 s. Le gradient vertical de température apparaît clairement dès les premiers instants de l'essai aussi bien en section 2 qu'en section 4. À 2,2 m de hauteur, la température relevée à l'instant $t=420$ s est de 140 °C alors qu'en partie basse, à 40 cm du sol au même instant la température est de 10 °C. Un saut de température est visible sur les deux sections entre les mesures Ti-120 située à 1,2 m et Ti-160 située à 1,6 m. Ce saut de température marque le passage de la zone d'air frais à la zone de fumée. Les barres d'erreur représentent la variabilité des résultats sur 15 essais effectués avant la phase d'aspersion.



(a) Section 2

(b) Section 4

FIGURE 4.12 – Évolution des températures dans le couloir avant le déclenchement de l'aspersion pour les 15 essais de répétabilité

En parallèle, les mesures de transmittances moyennées pour les 15 essais suivent une évolution inversée (Figure 4.13), mettant en évidence l'établissement d'un gradient vertical de transmittance. Une chute rapide de la transmittance est observée durant les 120 premières secondes pour les mesures situées au-dessus de 1,2 m. Les mesures situées sous 1,2 m ne présentent pas d'atténuation, indiquant qu'il n'y a pas de fumée. Sur ce constat, et pour des questions de présentation des résultats dans la suite de ce manuscrit, les opacimètres placés sous 1 m de hauteur seront dits « en partie basse » et ceux placés au-dessus de 1,2 m seront dits « en partie haute ». Ensuite, la transmittance mesurée semble se stabiliser pour presque toutes les mesures excepté pour Tri-160 (sur les deux sections) qui continue de décroître jusqu'à la valeur de mesure de Tri-180. Cela laisse penser que la nappe de fumée se densifie et qu'elle est de composition homogène au-dessus de 1,6 m. Les barres d'erreur plus grandes indiquent une plus grande étendue des résultats de mesure sur la transmittance.

Les profils de températures à différents instants sont représentés sur la Figure 4.15. Ils mettent en avant le phénomène de stratification thermique de l'environnement enfumé avant la phase d'aspersion. Le niveau de température atteint dans le couloir en partie haute diminue au fur

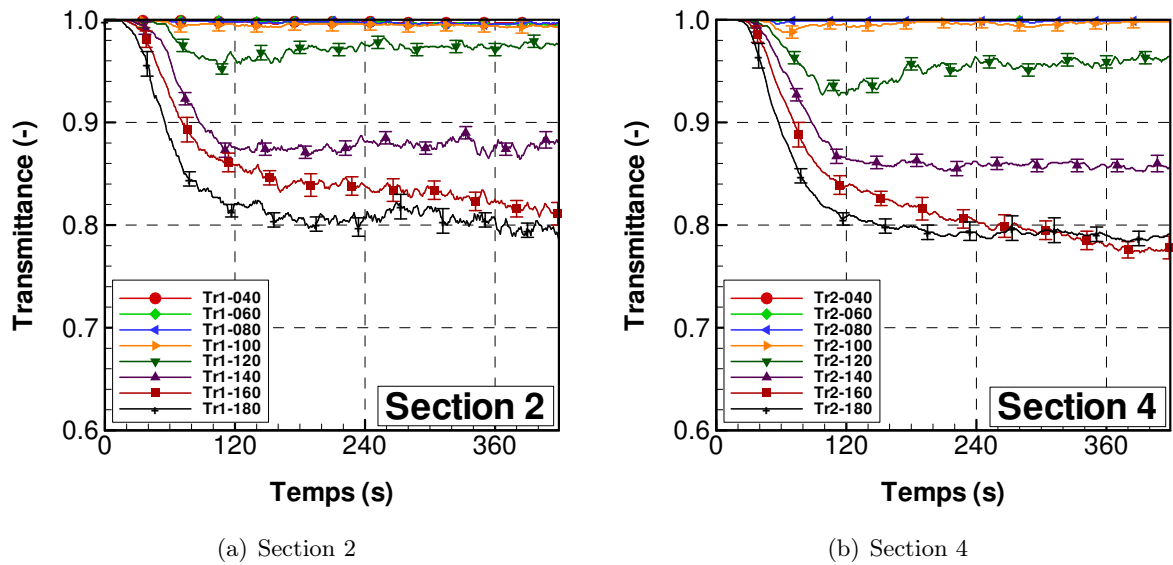


FIGURE 4.13 – Évolution des transmittances dans le couloir avant le déclenchement de l'aspersion pour les 15 essais de répétabilité

et à mesure que la fumée s'approche de la sortie du couloir. Le refroidissement de la nappe de fumée relativement faible est dû d'une part au flux perdu par rayonnement notamment vers la partie basse et d'autre part à la chaleur échangée avec les parois. Bien qu'il y ait quelques pertes thermiques, la nappe de « fumée thermique » semble stable et homogène dans la longueur du couloir.



FIGURE 4.14 – Photographie de la stratification observée durant un essai avant aspersion

Les profils de transmittance à plusieurs instants avant l'aspersion sont représentés sur la

Figure 4.16 en échelle inversée afin de faire le lien avec la notion de stratification évaluée thermiquement. La stratification est également évidente sur les profils de transmittance avec en partie basse une zone où elle vaut 1 sur un trajet optique de 30 cm, synonyme d'espace libre de fumée tandis qu'elle chute à 80 % en partie haute indiquant la présence d'un milieu opacifiant autrement dit la fumée. Les observateurs ont relevé des hauteurs de fumée comprises entre 1 et 1,2 m en se basant sur des graduations tracées sur les murs et sur les niveaux des appareils de mesures (Figure 4.14). La nappe montrait quelques fluctuations lors de certains essais mais la hauteur libre restait tout de même comprise entre ces valeurs. Les observations vont dans le même sens que les mesures.

Les méthodes d'estimation présentées dans le Chapitre 1 de la hauteur libre de fumée sont appliquées sur ce cas réel. En général, ces méthodes s'appliquent aux températures, elles sont étendues en les appliquant aux transmittances mesurées durant les essais. Le calcul de la hauteur d'interface et des températures et transmittances de zone basse et de zone haute est fait à l'instant $t=420$ s. La hauteur d'interface est estimée entre 1,13 m et 1,40 m selon le choix de la méthode et du critère. Les méthodes proposées par He [47] donnent toutes une valeur de hauteur libre de fumée de 1,40 m quel que soit le critère choisi (transmittance ou température). L'incertitude sur la valeur estimée par cette méthode est grande. En effet, le point d'inflexion correspond nécessairement à un point de mesure. Il y a donc une incertitude de ± 10 cm, l'écartement entre deux capteurs étant de cette valeur. À noter également qu'à cette hauteur (1,4 m), il y a un mélange de fumée et d'air. Par exemple, à 1,40 m au niveau de la section 2, la température atteint presque 70 °C et le niveau de transmittance est de moins de 90 % ce qui correspond à une fraction volumique de suie supérieure à $5.10^{-8} \text{ m}^3/\text{m}^3$. Sur la base du profil de température, Janssens [62] évalue la hauteur libre de fumée à 1,20 m en section 2 et 1,25 m en section 4. Malgré le peu de mesures de transmittance, la hauteur évaluée par un critère optique est sensiblement équivalente, entre 1,16 et 1,19 m.

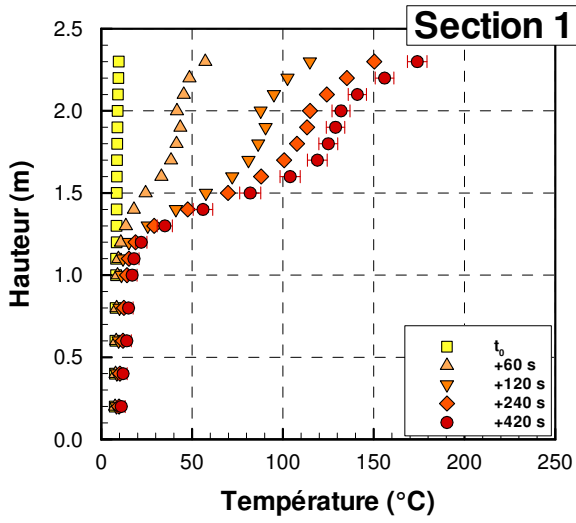
Méthode	Température		Transmittance	
	Section 2	Section 4	Section 2	Section 4
10 %	1,18 m	1,22 m	1,21 m	1,13 m
15 %	1,23 m	1,26 m	1,23 m	1,20 m
20 %	1,26 m	1,30 m	1,25 m	1,22 m
Janssens	1,20 m	1,25 m	1,19 m	1,16 m
Integral Ratio	1,40 m	1,40 m	1,40 m	1,40 m
Least-squares	1,40 m	1,40 m	1,40 m	1,40 m

TABLEAU 4.8 – Calcul de la hauteur libre de fumée par les différentes méthodes appliquées aux profils de température et de transmittance

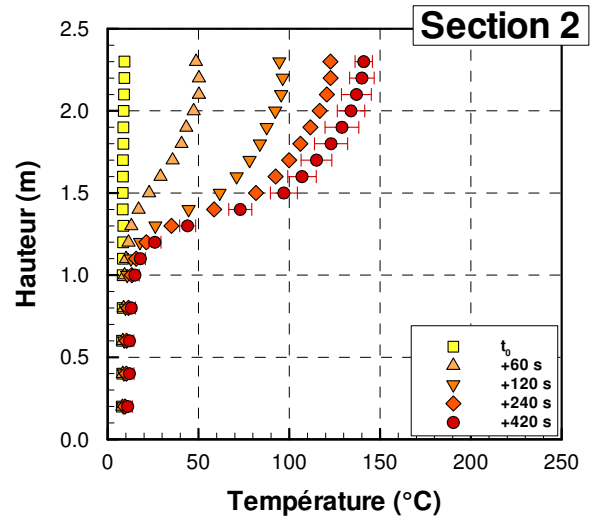
En appliquant la méthode de Janssens, l'évolution de la hauteur de la zone libre de fumée au cours des 420 premières secondes d'essai montre la formation rapide de deux zones dont l'interface est située au milieu de la hauteur du couloir (Figure 4.17). La petite différence observée entre la hauteur optique et la hauteur thermique dans les premiers instants (120 s) se réduit durant le régime établi. Les températures et les transmittances de la zone haute (située entre le plafond et H_{int}) indiquées sur la Figure 4.17 sont calculées en moyennant les valeurs dans cette partie à l'instant $t=420$ s, juste avant le déclenchement de l'aspersion. En partie basse, ces valeurs

correspondent aux valeurs de l'air ambiant au niveau de mesure le plus bas.

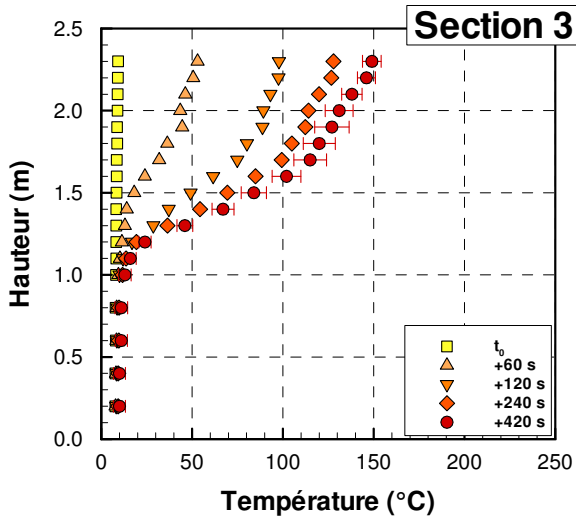
Le lien entre les stratifications thermique et optique a été observé. Le critère sur lequel se base le calcul de la hauteur de fumée peut être soit la mesure de transmittance soit la mesure de température. Les incertitudes relatives permettent de donner un intervalle de confiance dans les résultats des essais.



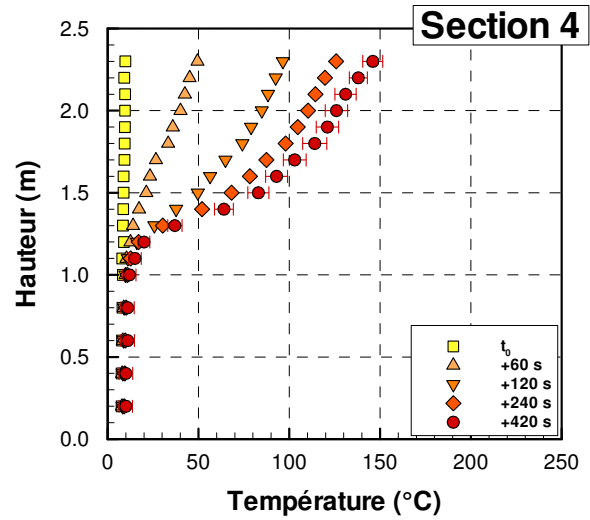
(a) Section 1



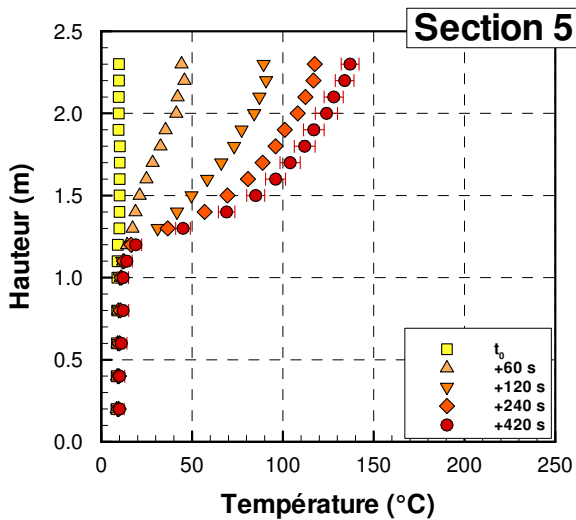
(b) Section 2



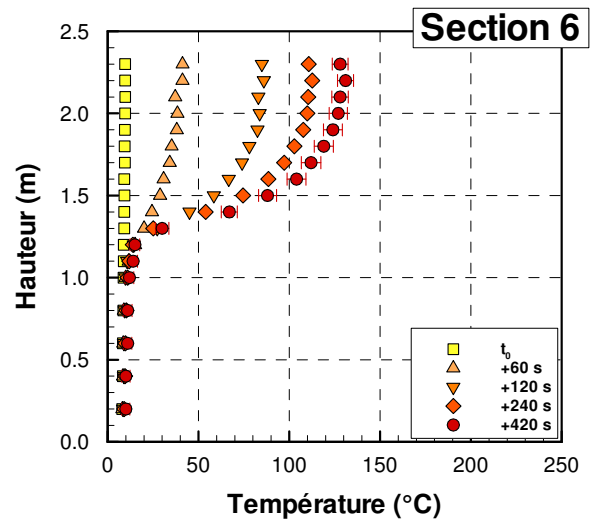
(c) Section 3



(d) Section 4



(e) Section 5



(f) Section 6

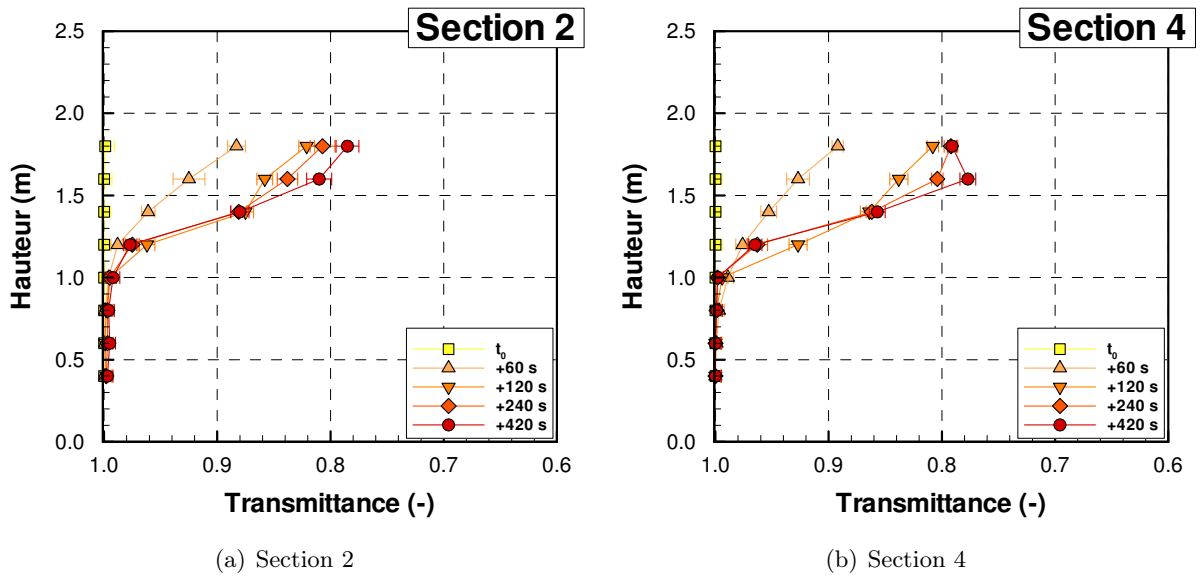


FIGURE 4.16 – Profils de transmittance moyenne sur les 15 essais avant aspersion

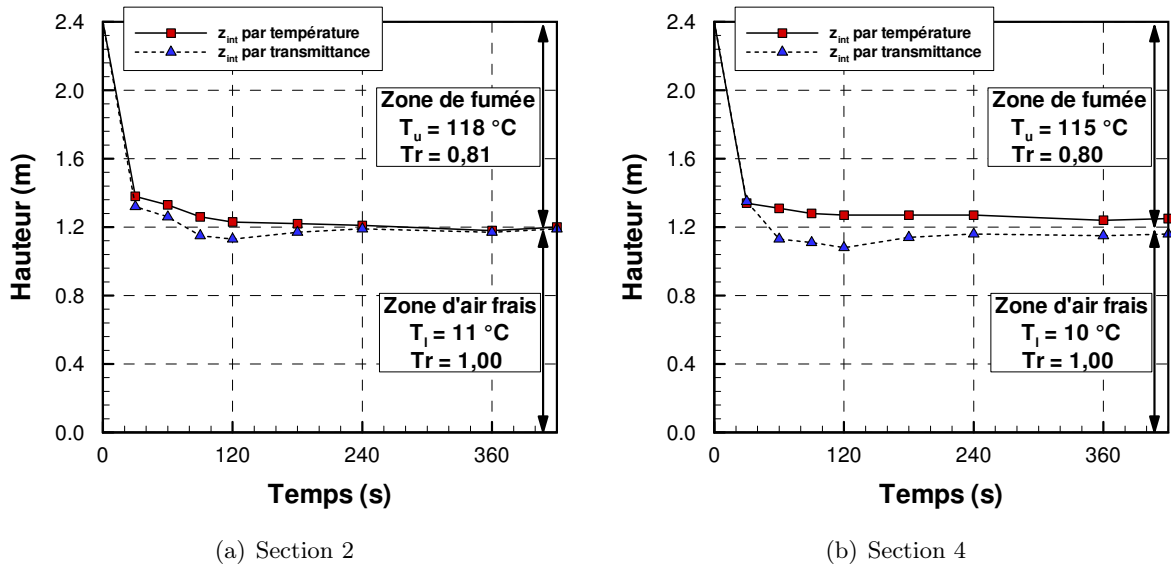


FIGURE 4.17 – Hauteur de l'interface entre la fumée et l'air calculée par la méthode de Janssens [62] appliquée à des mesures de transmittance et de température moyennes pour les 15 essais

4.2.2 Activation du sprinkler BP

Les résultats pour un essai sprinkler BP sont présentés dans cette partie (essai #36 du Tableau 4.14). Le système sprinkler BP est activé au bout de 420 s, lorsque le régime de puissance du feu est établi. Visuellement, l'effet n'est pas immédiat et il faut patienter quelques secondes avant de voir l'entraînement de la nappe de fumée vers la zone libre de fumée. Les mesures de température (Figure 4.18) et de transmittance (Figure 4.19) montrent les effets thermique et optique de la pulvérisation sur le milieu enfumé.

D'un point de vue thermique, la température mesurée en sections 2 (en amont de l'aspersion) et 4 (en aval de l'aspersion) en partie haute baisse tandis que la température en partie basse s'élève. Cet effet est principalement dû au fait que le milieu enfumé est brassé créant ainsi un mélange eau/air/fumée. Le refroidissement apparaît plus nettement au niveau des températures entre 1,4 et 2,0 m au niveau de la section 2 qu'au niveau de la section 4 où le gradient de température est toujours visible. La température moyenne dans le couloir est de 44 °C pendant l'aspersion contre 70 °C avant le déclenchement du sprinkler BP. À la fin de la phase d'aspersion, la combustion continuant de produire des gaz de combustion chauds, le milieu se restructurise et le gradient de température réapparaît.

D'un point de vue optique, l'effet de l'aspersion est également bien observé. En effet, au niveau de la section 2, toutes les mesures de transmittances tombent à des niveaux inférieurs à 0,85. En section 4, l'effet de la pulvérisation se fait principalement sentir dans la partie située sous 1,2 m, les transmittances situées au-dessus ne subissant pas de chute significative. En faisant abstraction de la mesure Tr1-180 pour laquelle l'alignement du système optique s'est dérégulé, toutes les mesures reviennent à leur niveau de transmittance avant aspersion. Le milieu se restructurise également optiquement.

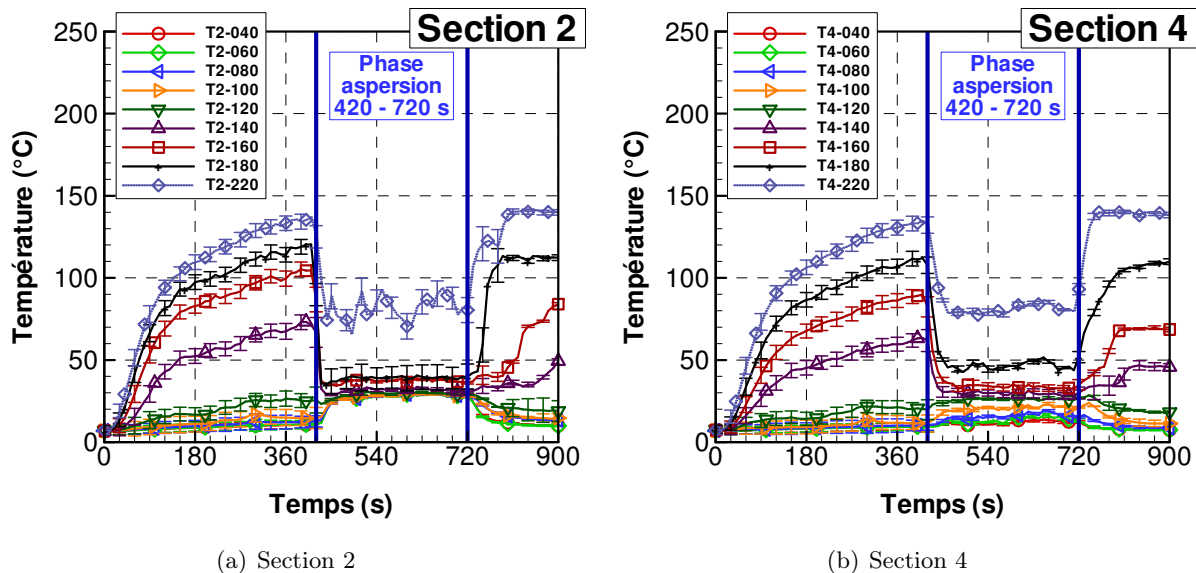


FIGURE 4.18 – Évolution des températures dans le couloir pour l'essai avec aspersion par sprinkler basse pression

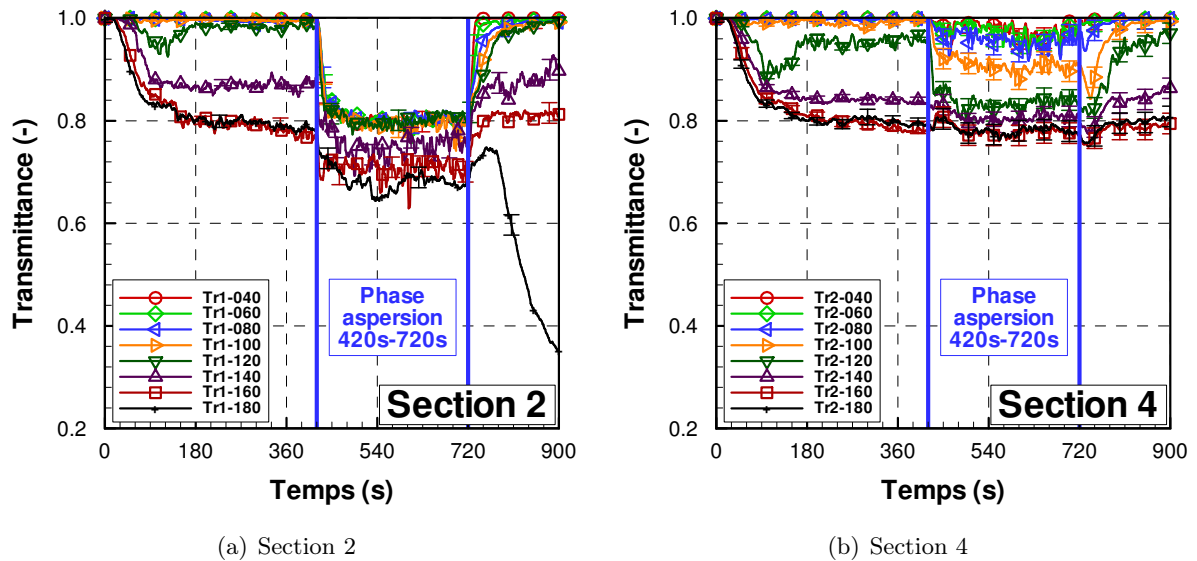


FIGURE 4.19 – Évolution des transmittances dans le couloir pour l'essai avec aspersion par sprinkler basse pression

Les profils permettent d'avoir une vue globale de l'environnement enfumé durant la phase d'aspersion. La Figure 4.20 (respectivement Figure 4.21) montre les profils de température (transmittance) à 3 instants pendant l'aspersion et pour chaque section de mesure. On rappelle au lecteur que les sections 1 et 2 sont situées en amont de l'aspersion et que la tête sprinkler est placée à 3,5 m dans le couloir depuis la pièce.

Les trois profils instantanés proposés à des temps distincts (480, 600 et 720 s) sur la Figure 4.20 mettent en évidence le peu d'évolution de la température durant les 5 minutes d'aspersion. Ceci peut être expliqué par le fait que la combustion n'est pas touchée par l'aspersion. La température élevée en section 1 permet de le vérifier. Les sections 2, 3 et 4 sont directement affectées par la pulvérisation par le sprinkler. Le rayon d'action de l'aspersion est de 2,5 m. La température est quasi-homogénéisée et le gradient thermique est compris entre 25 et 40 °C sous 2 m en section 2 et 3 et entre 10 et 35 °C sous 1,5 m en section 4. En partie haute, la zone chaude est conservée puisque la température est de 100 °C à 2,3 m. En sortie de couloir, la température de la nappe de fumée est refroidie par rapport au cas sans aspersion bien que l'environnement soit toujours stratifié. En effet, la température à 2,3 m en section 6 est inférieure à 100 °C alors qu'elle était proche de 150 °C avant aspersion.

Les profils de transmittance mesurés sur les sections 2 (en amont de l'aspersion) et 4 (en aval de l'aspersion) montrent deux effets différents du spray dans la longueur du couloir (Figure 4.21). La transmittance sous 1,2 m en section 2 est de 0,81 alors qu'elle était de 1 avant le déclenchement de l'aspersion. Au-dessus de 1,2 m, on observe un gradient de transmittance, la mesure faite à 1,8 m étant de 0,7. La stratification optique est conservée en section 4. D'ailleurs, les transmittances mesurées sont du même ordre qu'avant l'aspersion, la présence limitée de gouttes d'eau n'affectant pas l'opacité.

Le milieu qui semblait être homogène thermiquement en-dessous de 1,8 m en section 2 ne l'est

pas lorsqu'il est regardé sur le critère optique. De plus, bien que la fumée ait été refroidie en section 4, on constate qu'elle est toujours aussi opaque puisque le niveau de transmittance atteint en partie haute est de 0,8, comme avant la phase d'aspersion.

Durant l'aspersion, les critères optique et thermique apportent des informations différentes sur les phénomènes de brassage. Les valeurs dans le Tableau 4.9 reprennent les évolutions de la Figure 4.22 et permettent de comparer l'importance du choix du critère pour l'évaluation de la « hauteur d'interface ». La méthode utilisée est celle de Janssens. Cette méthode est généralement utilisée pour prédire une hauteur libre de fumée en ce basant sur le gradient de température (et ici également appliquée aux transmittances). Or, la configuration d'essai est telle que les fumées chaudes continuent à circuler en partie haute tandis que l'injection de gouttes conduit à une homogénéisation par brassage et refroidissement sous la buse. En section 2, en amont de l'aspersion, le critère appliqué ici montre un gradient (de température et de transmittance) mais cela ne peut pas être interprété comme une indication de la stratification ou de hauteur libre de fumée. D'ailleurs, sous 1,9 m la température durant aspersion est plus élevée (29 °C) que la température ambiante (10 °C), ce qui indique que le milieu a été brassé. Le constat est le même selon le critère optique, indiquant la présence d'eau et de fumée. Au niveau de la section 4, les température et transmittance moyennes mesurées en zone inférieure correspondent aux valeurs ambiantes, ce qui permet de conclure que les hauteurs calculées correspondent bien à la zone d'interface entre l'air et la fumée. On remarque également une différence entre la hauteur calculée selon le critère thermique (1,1 m) et la hauteur calculée selon le critère optique (0,88 m).

Critère	Thermique		Optique	
	section 2	section 4	section 2	section 4
Position				
z_{int}	1,90 m	1,13 m	1,10 m	0,88 m
couche inférieure	29 °C	11 °C	0,81	0,97
couche supérieure	100 °C	62 °C	0,69	0,80

TABLEAU 4.9 – Hauteur d'interface entre les couches supérieure et inférieure pendant la pulvérisation par sprinkler BP et valeurs moyennes de température et de transmittance pour chaque couche

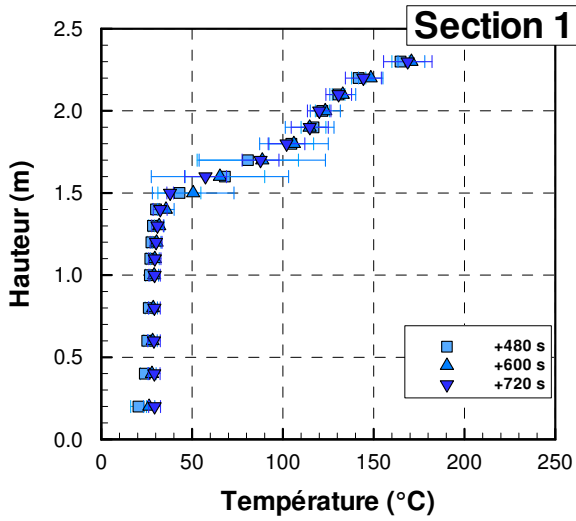
Un Bloc Autonome d'Éclairage de Sécurité (BAES) installé à 1,4 m du sol au niveau de la section 4 permet d'avoir une vision qualitative de la perte de visibilité induite par la fumée. Ce bloc est en mode autonome, c'est-à-dire qu'il est plus lumineux, simulant une panne d'électricité. L'observateur est placé 1 m en retrait du couloir, à 4 m du bloc. On peut voir, la photographie du BAES positionné à 1,4 m prise pendant l'essai de sprinkler BP à trois instants différents sur la Figure 4.23 :

- t_0 , au départ du feu, il n'y a encore pas de fumée dans le couloir et le BAES est visible, presque éblouissant,
- t_0+420 s, à l'instant précédent la phase d'aspersion, on peut voir que le BAES est plus sombre. L'éblouissement observé sans fumée s'estompe mais l'information donnée par ce bloc est toujours visible,
- t_0+600 s, 3 minutes après le déclenchement de la phase d'aspersion, le BAES disparaît un peu plus, il n'est plus possible de voir les bords du bloc par rapport au fond mais l'information inscrite sur le bloc est toujours visible.

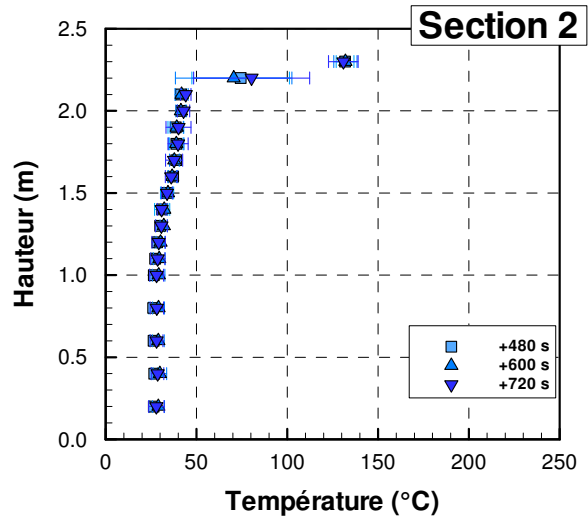
Ces observations concordent avec les mesures de transmittance. En effet, à l'instant t_0 , la trans-

mittance relevée est de 1, à t_0+420 s (7 minutes de feu) elle est de 0,86 et à l'instant t_0+600 s de 0,8. Tout comme les observations, les mesures montrent une opacification de l'environnement à 1,4 m.

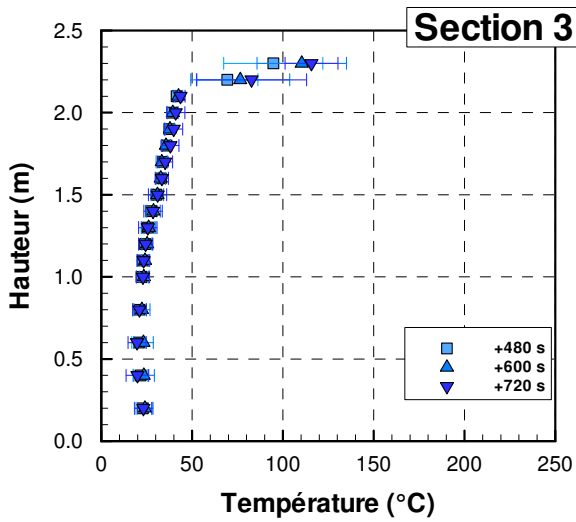
On peut supposer que la déstratification modérée induite par le sprinkler basse pression provient du fait que la taille des gouttes est assez importante et que le débit est faible. Le refroidissement entraîné par l'évaporation des gouttes est limité. L'activité du foyer continue, ce qui contribue à conserver la stratification thermique et optique dans une grande partie du couloir.



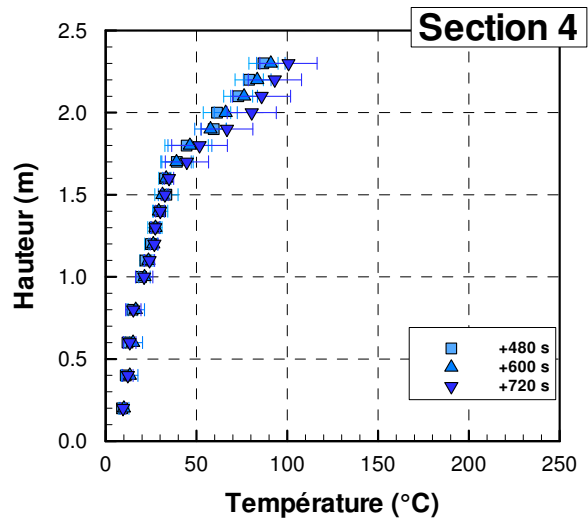
(a) Section 1



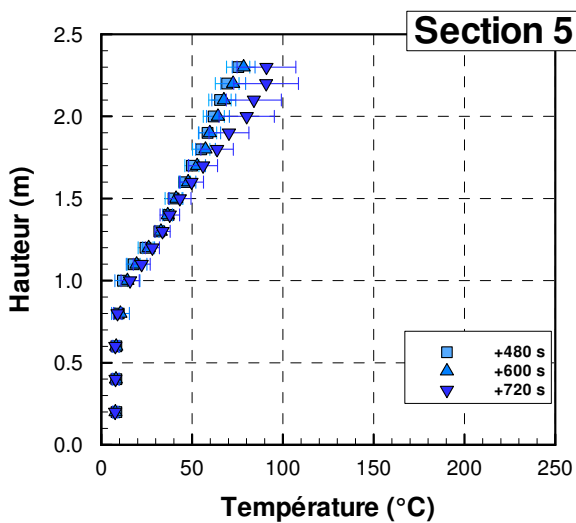
(b) Section 2



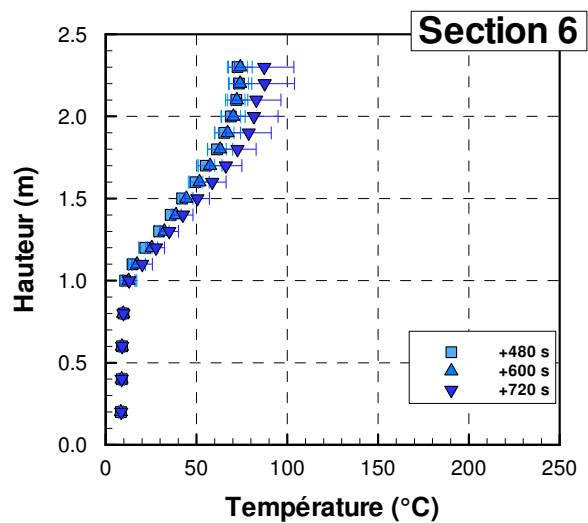
(c) Section 3



(d) Section 4



(e) Section 5



(f) Section 6

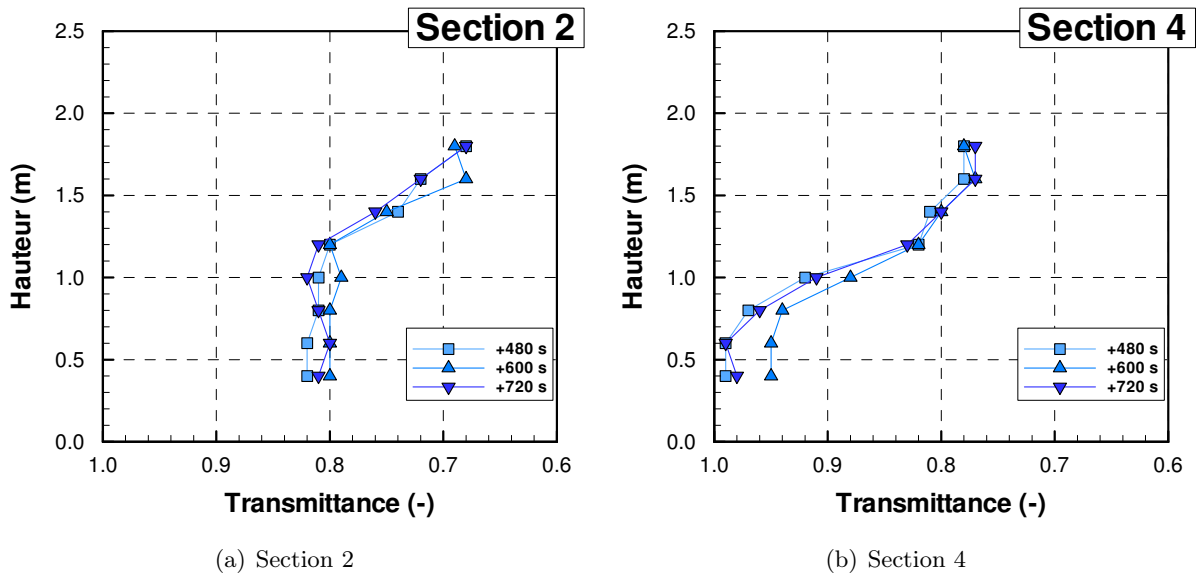


FIGURE 4.21 – Profils de transmittance pendant aspersion par sprinkler basse pression

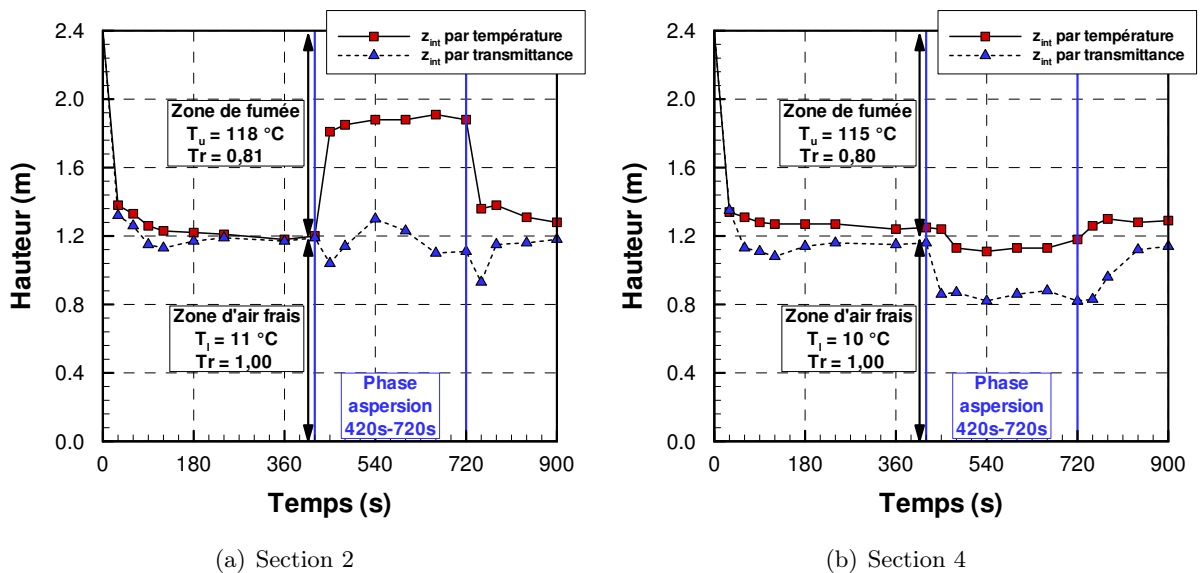


FIGURE 4.22 – Hauteur de l'interface entre la fumée et l'air calculée par la méthode de Janssens [62] appliquée à des mesures de transmittance et de température pour l'aspersion par sprinkler BP

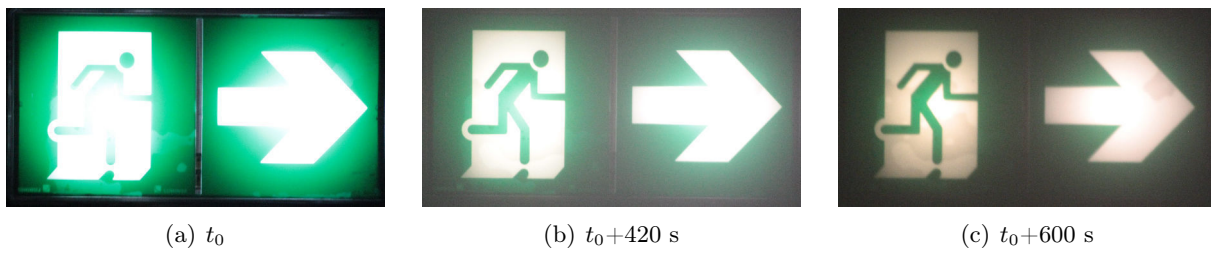


FIGURE 4.23 – BAES vu dans le couloir à 1,4 m du sol au niveau de la section 4 pour trois instants durant un essai avec sprinkler BP

4.2.3 Activation du sprinkler HP

Les résultats pour un essai sprinkler HP sont présentés dans cette partie (essai #42 du Tableau 4.14). Le sprinkler HP est activé à 420 s sur la nappe de fumée dans le couloir. L'effet de la pulvérisation par sprinkler haute pression apparaît immédiatement. Le milieu est mélangé et la fumée est entraînée dans la zone précédemment libre en partie basse. Les évolutions temporelles de température (Figure 4.24) et de transmittance (Figure 4.25) montrent l'effet de la pulvérisation sur le milieu enfumé.

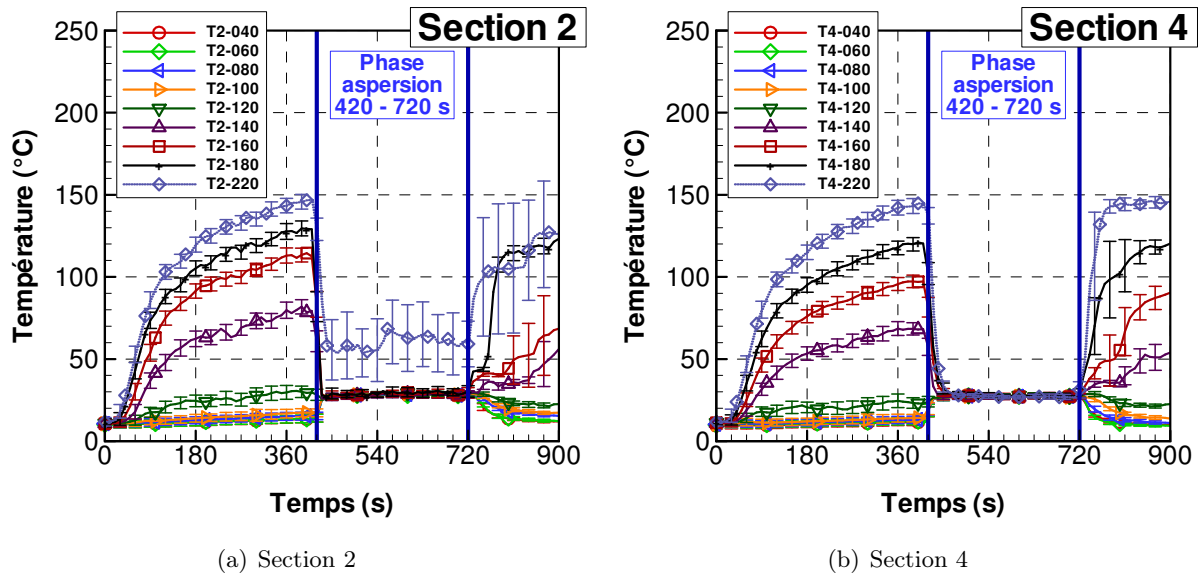


FIGURE 4.24 – Évolution des températures dans le couloir pour l'essai avec aspersion par sprinkler haute pression

Thermiquement, les températures mesurées en partie haute chutent immédiatement tandis que les températures mesurées en partie basse augmentent. Le champ de température qui présentait un gradient avant aspersion montre une température moyenne de 36 °C durant la phase d'aspersion (contre plus de 70 °C avant le déclenchement du sprinkler). Cela traduit le brassage de l'environnement gazeux par le spray. De plus, le régime est rapidement stable durant l'aspersion. Une fois le milieu brassé et refroidi par la pulvérisation de l'eau, la température quasi-homogène du milieu gazeux n'évolue plus (elle ne l'est pas tout à fait en section 2). À l'arrêt de l'aspersion, les niveaux de température remontent à leur niveau avant aspersion, c'est-à-dire que les fumées retournent en partie haute et l'air pénètre de nouveau dans le couloir par effet de tirage.

Optiquement, l'effet est également bien visible sur les mesures de transmittance avec une chute brutale en section 2 pour toutes les mesures et une chute plus modérée en section 4, principalement visible sur les mesures en partie basse. Cela vient confirmer les observations faites durant l'essai concluant à un milieu entièrement mélangé par le sprinkler haute pression et ce, jusqu'à la section 4. En section 2, la transmittance à 1,6 m atteint moins de 0,35, signe d'une forte atténuation par le milieu composé de gouttes et de fumée. En section 4, le milieu semble homogène en transmittance, autour de 0,8. De même que pour les températures, à la fin de l'aspersion, le milieu se restructifie optiquement.

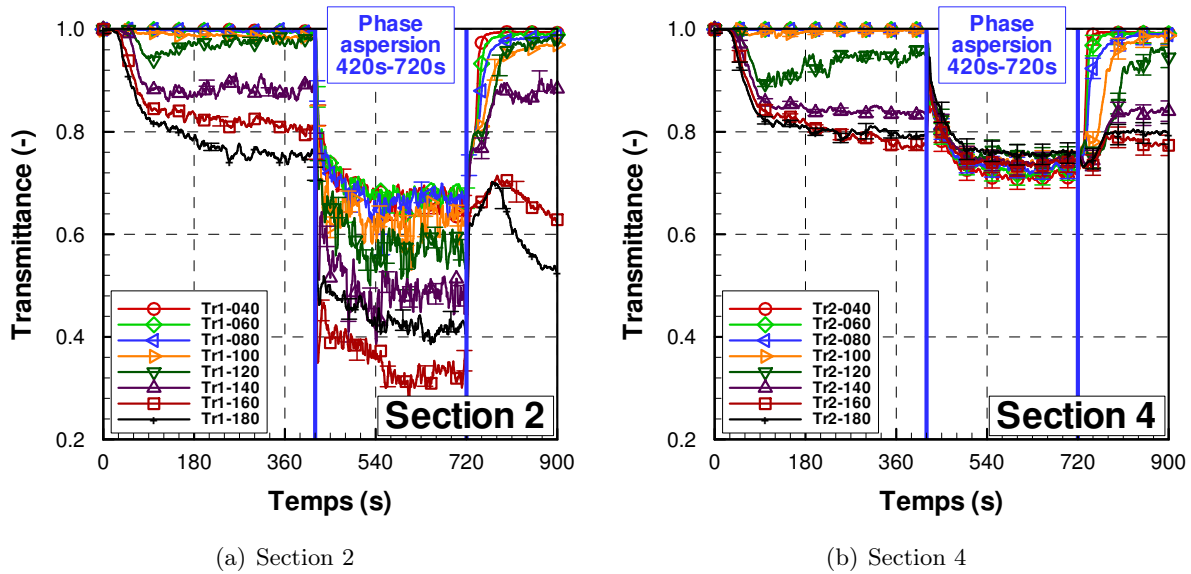


FIGURE 4.25 – Évolution des transmittances dans le couloir pour l'essai avec aspersion par sprinkler haute pression

Les profils de température sont représentés à trois instants différents durant l'aspersion (Figure 4.26). L'homogénéisation de la température est évidente sur les sections 3, 4 et 5 situées en aval de l'aspersion à respectivement 4,5 m, 6,0 m et 7,5 m dans le couloir (soit 1 m, 2,5 m et 4,0 m de l'aspersion). En amont de l'aspersion, sur les sections 1 et 2, la fumée produite par le foyer contribue à conserver des températures plus élevées en partie haute. Le milieu est tout de même brassé puisque la température sous 1,5 m en 1 et sous 2 m en 2 atteint 30 °C, température supérieure à la température ambiante de l'air mesurée à 10 °C dans cette partie avant aspersion. En sortie de couloir (6), une température proche de l'ambiante est relevée en partie basse. Les forces de flottabilité agissent toujours sur le mélange eau/fumée/air qui reste plus chaud que l'air ambiant.

À l'instar des profils de température, les profils de transmittance permettent de mettre en évidence le brassage du milieu gazeux. En section 2, l'environnement reste stratifié optiquement bien que le niveau de transmittance sous 1 m soit réduit par rapport à la mesure avant aspersion. En effet, sous 1 m la transmittance était de 1 alors qu'elle est de moins de 0,7 durant l'aspersion. Il y a donc la présence de gouttes d'eau et/ou de fumée dans la partie basse du couloir. La mesure à 1,8 m (0,45) est inférieure à la mesure à 1,6 m (0,4 voire moins à l'instant t_0+600 s). Cela laisse penser que la partie sous 1,6 m est plus affectée par la pulvérisation. En section 4, le milieu mélangé semble plus homogène en gouttes d'eau et en fumée du fait de la transmittance constante d'environ 0,75 sur l'ensemble du profil. Qualitativement, le milieu est sombre, voire noir sur toute la hauteur du couloir (Figure 4.29). La section 4 est difficilement visible depuis le bout du couloir (environ 4 m pour les observateurs) mais il est cependant possible de voir un Bloc Autonome d'Éclairage de Sécurité (BAES) situé à cette distance. Chaque panneau est vu de la même manière, qu'il soit situé à 0,4, 1 ou 1,4 m au-dessus du sol. La Figure 4.29 montre trois photographies prises à trois instants durant l'essai avec aspersion par sprinkler HP. Au fur et à mesure de l'essai, le BAES semble disparaître, à t_0+420 s à cause de la présence de fumée et à t_0+600 s à cause du mélange fumée et gouttes.

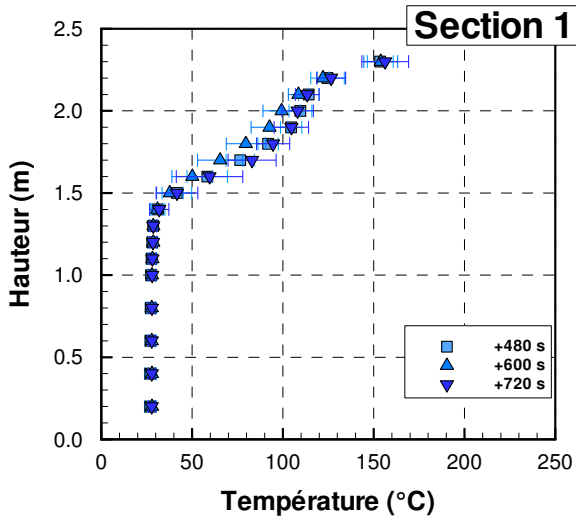
L'impact du sprinkler haute pression est très marqué thermiquement et optiquement (Figure 4.28 et Tableau 4.10). En section 2, tout comme pour le sprinkler BP, la hauteur d'interface semble remonter thermiquement. En réalité, il ne s'agit pas d'une interface entre l'air et la fumée. Cette hauteur calculée sur la base des profils de température et de transmittance traduit la présence d'un gradient thermique et optique conservé au niveau de cette section en amont de l'aspersion. Cette zone ne peut pas permettre l'évacuation des personnes : la température est de 28 °C et la transmittance est comprise entre 0,4 et 0,7 en dessous de 2 m, ce qui traduit la présence d'un mélange de fumée et de gouttes dans cette partie.

Le rayon d'action du sprinkler HP est important et il touche la totalité du couloir. Le refroidissement est important du fait de la taille des gouttes et de leur vitesse mais surtout de la quantité d'eau pulvérisée dans le milieu. En effet, durant 5 minutes d'essai, 450 L d'eau sont pulvérisés dans le couloir. Le milieu semble plus homogène en eau et en suie au niveau de la section 4 compte tenu de l'homogénéité des mesures de température et de transmittance à ce niveau.

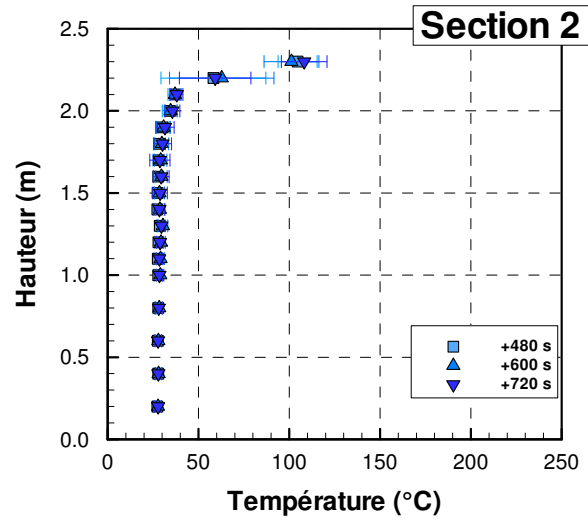
Bien qu'il y ait un effet constaté sur les températures et les transmittances, il est différent en fonction du critère regardé. Par exemple, en section 2 en amont de l'aspersion, le profil de température sous 2 m est homogène alors qu'on observe un gradient de transmittance au même endroit. En section 4 en aval de l'aspersion, les niveaux de température et de transmittance sont caractéristiques d'un milieu gazeux homogène en suie et en gouttes d'eau.

Critère	Thermique		Optique	
	section 2	section 4	section 2	section 4
Position				
z_{int}	2,03 m	0,00 m	1,07 m	0,00 m
couche inférieure	28 °C		0,68	
couche supérieure	84 °C	28 °C	0,43	0,77

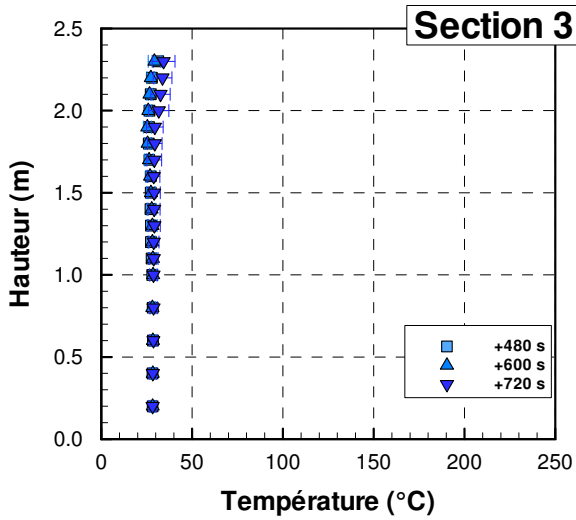
TABLEAU 4.10 – Hauteur d'interface entre les couches supérieure et inférieure pendant la pulvérisation par sprinkler HP et valeurs moyennes de température et de transmittance pour chaque couche



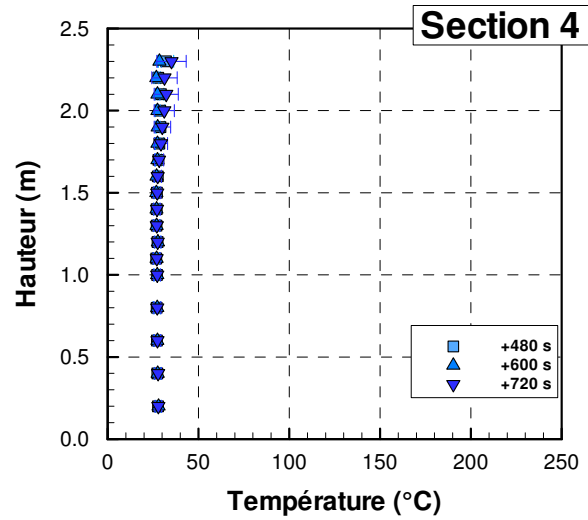
(a) Section 1



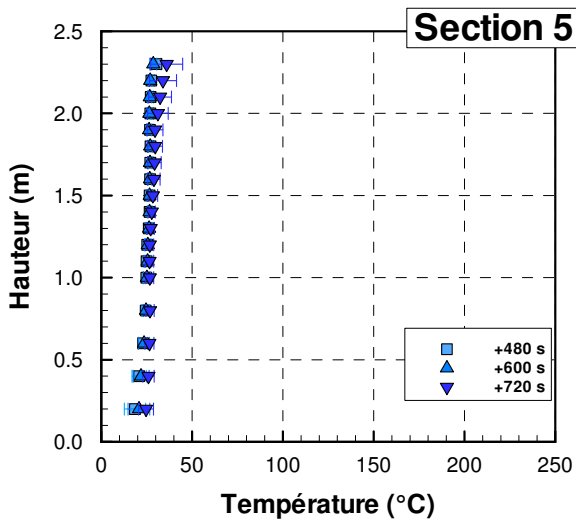
(b) Section 2



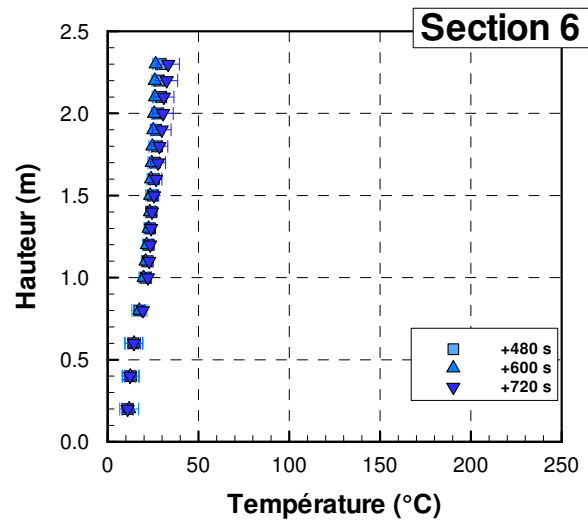
(c) Section 3



(d) Section 4



(e) Section 5



(f) Section 6

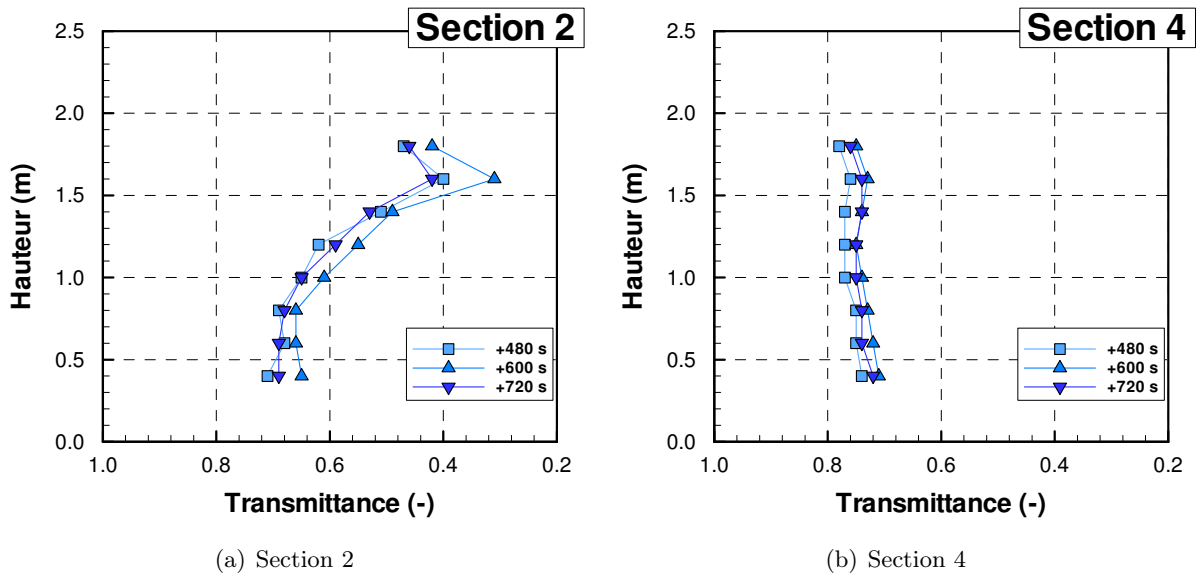


FIGURE 4.27 – Profils de transmittance pendant aspersion par sprinkler haute pression

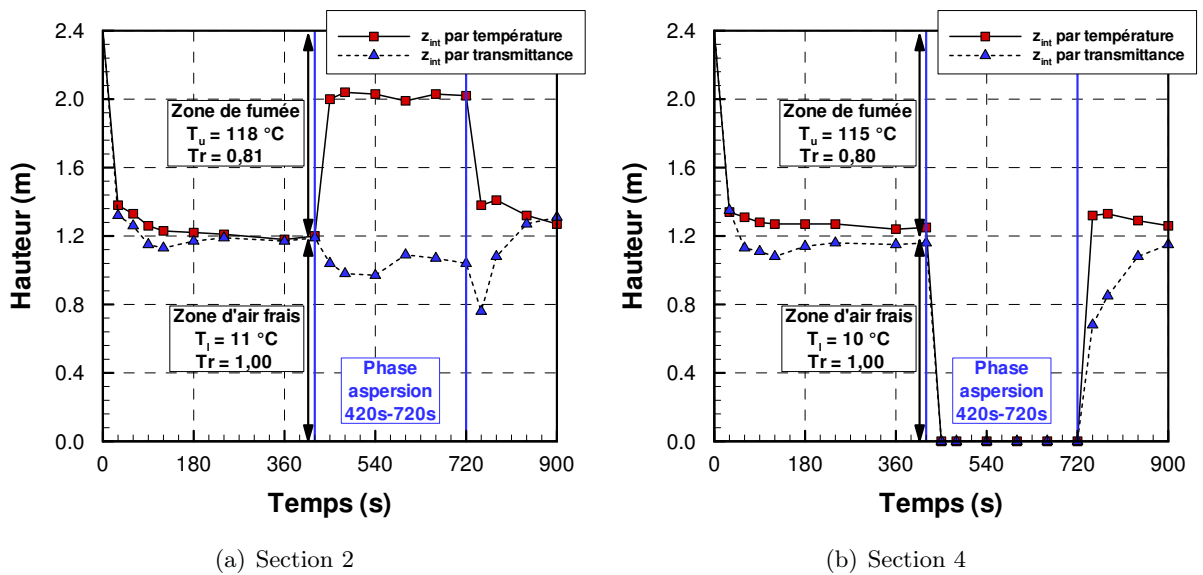


FIGURE 4.28 – Hauteur de l'interface entre la fumée et l'air calculée par la méthode de Janssens [62] appliquée à des mesures de transmittance et de température pour l'aspersion par sprinkler HP

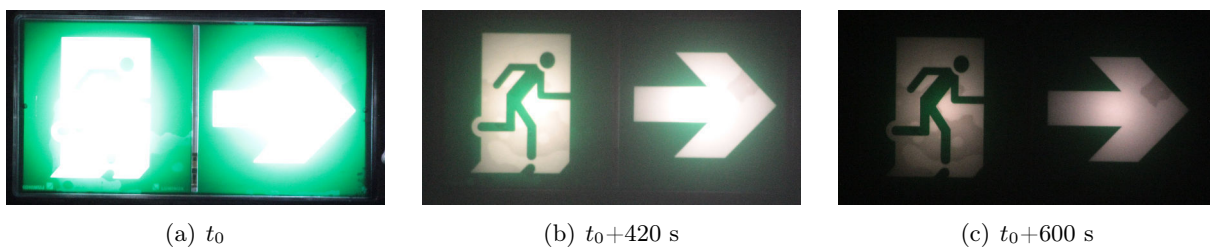


FIGURE 4.29 – BAES vu dans le couloir à 1,4 m du sol au niveau de la section 4 pour trois instants durant un essai avec sprinkler HP

4.2.4 Activation du brouillard d'eau

Un essai brouillard d'eau est présenté (essai #47 du Tableau 4.14). Le brouillard d'eau est activé sur la nappe de fumée à t_0+420 s, durant le régime de combustion établi. Les évolutions temporelles de température (Figure 4.30) et de transmittance (Figure 4.31) montrent un effet évident de brassage de l'environnement gazeux. Instantanément, la nappe de fumée est emportée vers le bas et le milieu est complètement mélangé. L'observation de la déstratification est sensiblement la même que pour le sprinkler HP.

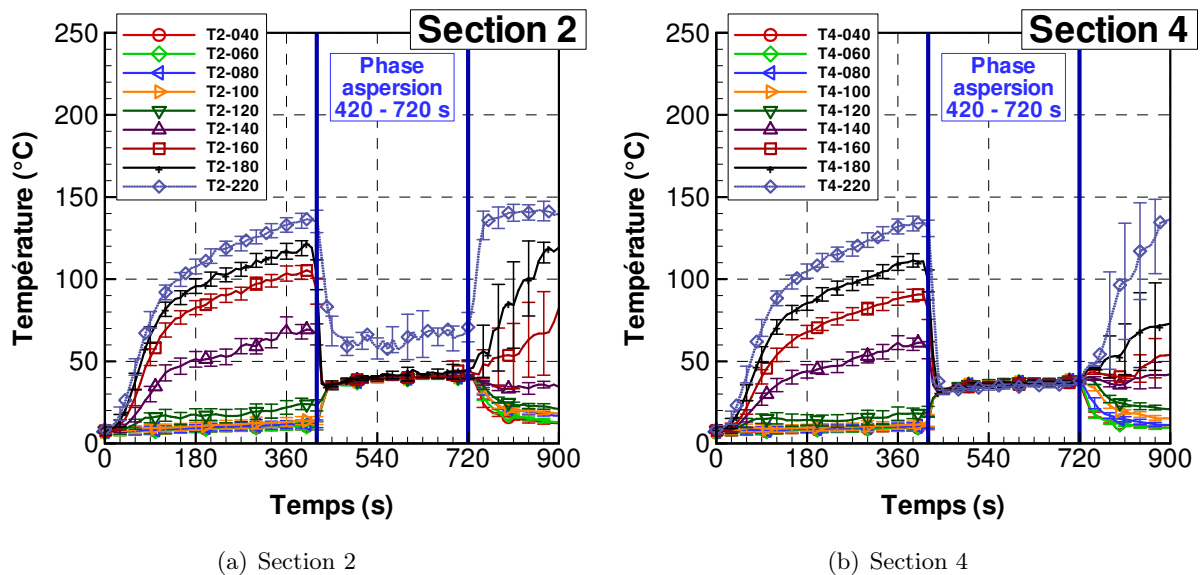


FIGURE 4.30 – Évolution des températures dans le couloir pour l'essai avec aspersion par brouillard d'eau

D'un point de vue thermique, le milieu est homogénéisé. Les températures mesurées en partie haute sont réduites et le milieu ambiant en partie basse s'échauffe. La température moyenne dans le couloir durant la phase d'aspersion est de 38 °C alors qu'en moyenne elle est de 70 °C avant aspersion. Le niveau de température augmente légèrement durant la phase d'aspersion. À la fin de l'aspersion, la température remonte à sa valeur initiale.

D'un point de vue optique, le milieu est également perturbé par le déclenchement de l'aspersion par brouillard d'eau. En effet, toutes les transmittances chutent juste après le déclenchement du spray. Au niveau de la section 2, la perte de transmittance est d'autant plus marquée que la mesure est haute dans le couloir. Le gradient est donc conservé avec une atténuation comprise entre 30 et 60 %. En section 4, l'ensemble des transmittances est compris entre 0,6 et 0,5. La transmittance évolue durant la phase d'aspersion, elle baisse d'environ 5 à 10 % durant les 5 minutes d'aspersion. À la fin de la phase d'aspersion, les niveaux de transmittance se rétablissent à la valeur mesurée avant aspersion.

Les profils de température montrent un milieu thermique homogène dans le couloir (Figure 4.33). Au regard des profils instantanés, la température s'élève très faiblement durant les 5 minutes d'aspersion, en moyenne moins de 5 °C. En sortie, la zone plus froide est toujours observée. Cette zone plus froide, tout comme pour l'essai avec sprinkler haute pression est due au fait

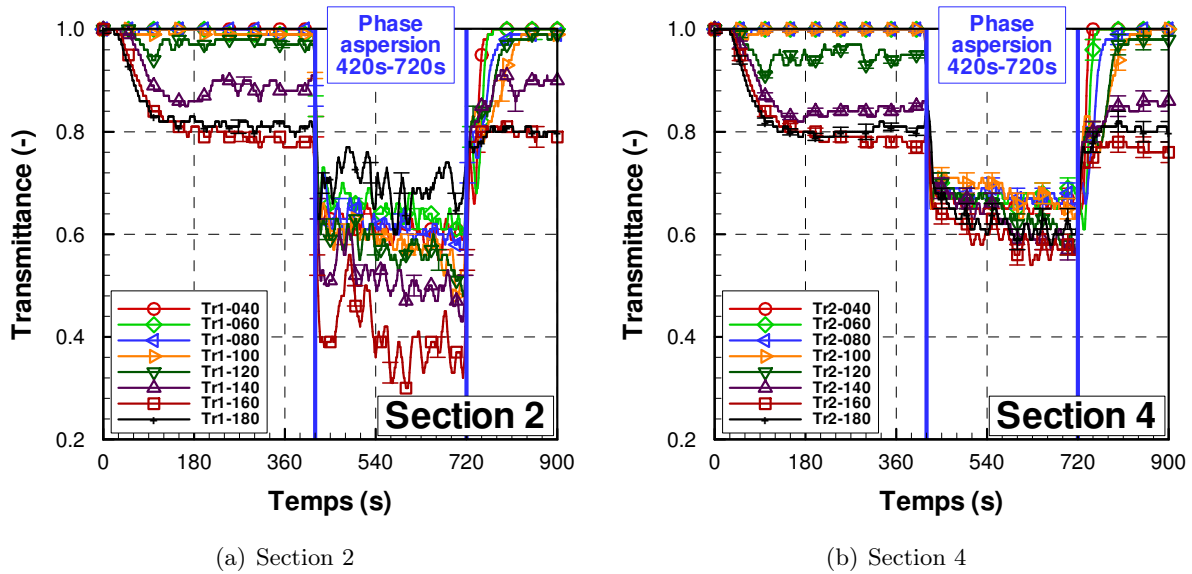


FIGURE 4.31 – Évolution des transmittances dans le couloir pour l'essai avec aspersion par brouillard d'eau



FIGURE 4.32 – Photographie du mélange fumée/eau en sortie du couloir s'élevant sous l'effet des forces de flottabilité

que la température du milieu est supérieure à la température ambiante, ce qui, sous l'effet des forces de flottabilité entraînent les fumées à s'échapper du couloir en partie haute comme le

montre la Figure 4.32. Deux choses sont remarquables sur cette photographie prise à la sortie du couloir, d'une part, les fumées continuent de s'élever et d'autre part, la fumée paraît blanche (Figure 4.32). Sa couleur indique qu'elle est chargée de gouttelettes d'eau diffusantes.

Les profils de transmittance sont du même ordre de grandeur en section 2 et en section 4 (Figure 4.34). La transmittance mesurée durant la phase d'aspersion est de l'ordre de 60 %. En amont de l'aspersion (section 2), la décroissance observée sur la transmittance au cours de l'aspersion est significativement plus élevée que celle observée sur les mesures de température. Le niveau de transmittance perd 5 à 10 % entre le début de l'aspersion et la fin de l'aspersion. Cet effet peut être attribué au fait que le spray crée un écran à la fumée dans le couloir. Ainsi, la fumée s'accumule en amont de l'aspersion bien qu'une partie continue de sortir du couloir (Figure 4.32). L'effet est plus visible sur les transmittances car le rayonnement est fortement atténué par les suies et les gouttes de petite taille. Malgré des niveaux de température similaires entre le sprinkler HP et le brouillard d'eau, le milieu optique semble plus homogène dans le cas de ce dernier.

Critère	Thermique		Optique	
	section 2	section 4	section 2	section 4
Position				
z_{int}	2,00 m	0,00 m	0,00 m	0,00 m
couche inférieure	39 °C	34 °C	0,57	0,61
couche supérieure	74 °C			

TABLEAU 4.11 – Hauteur d'interface entre les couches supérieure et inférieure pendant la pulvérisation par brouillard d'eau et valeurs moyennes de température et de transmittance pour chaque couche

L'évolution de la hauteur d'interface au cours du temps est représentée sur la Figure 4.35. Optiquement, la hauteur d'interface calculée est de 0 en amont (section 2) et en aval (section 4) de l'aspersion (Tableau 4.11). De la même manière que pour le sprinkler HP, une zone plus chaude en partie haute en amont de l'aspersion indique que les fumées continuent d'être produites par la combustion et arrivent dans le couloir. De même que pour les sprinklers BP et HP, la hauteur calculée ne traduit pas l'interface entre une zone libre et la fumée généralement calculée dans les études ISI pour l'évacuation des occupants mais elle délimite une zone de mélange de gouttes et de fumée refroidie par l'injection et une zone supérieure (au-dessus de 2 m) plus chaude, essentiellement composée de fumée. Pour une personne, il ne serait pas possible de se déplacer librement dans cette zone. En moyenne, sur la durée de la phase d'aspersion, la transmittance est quasi-homogène en sections 2 et 4, calculée respectivement à 0,57 et 0,61 (Tableau 4.11). À l'arrêt de l'aspersion, le retour à la hauteur d'interface initiale (avant aspersion) est progressif. En effet, le milieu se restratifie au bout de 2 minutes.

Le Bloc Autonome d'Éclairage de Sécurité (BAES) installé à 1,4 m du sol au niveau de la section 4 permet d'avoir une vision qualitative de la perte de visibilité induite par la fumée. L'observateur est placé 1 m en retrait du couloir, à 4 m du bloc. On peut voir sur la photographie du BAES prise pendant l'essai de brouillard à trois instants différents sur la Figure 4.36 :

- t_0 , au départ du feu, la fumée n'est pas encore dans le couloir et le BAES est visible,
- t_0+420 s, à l'instant précédent la phase d'aspersion, le BAES est plus sombre. L'intensité lumineuse est plus faible mais le bloc est toujours visible, il est possible de comprendre et

suivre les indications

- t_0+600 s, 3 minutes après le déclenchement de la phase d'aspersion, le BAES disparaît complètement, il est même impossible de connaître sa présence.

Ces observations viennent appuyer les mesures de transmittance à 1,4 m. À l'instant t_0 , la transmittance relevée est de 1, à t_0+420 s (7 minutes de feu) elle est de 0,86 et à l'instant t_0+600 s elle est de 0,6.

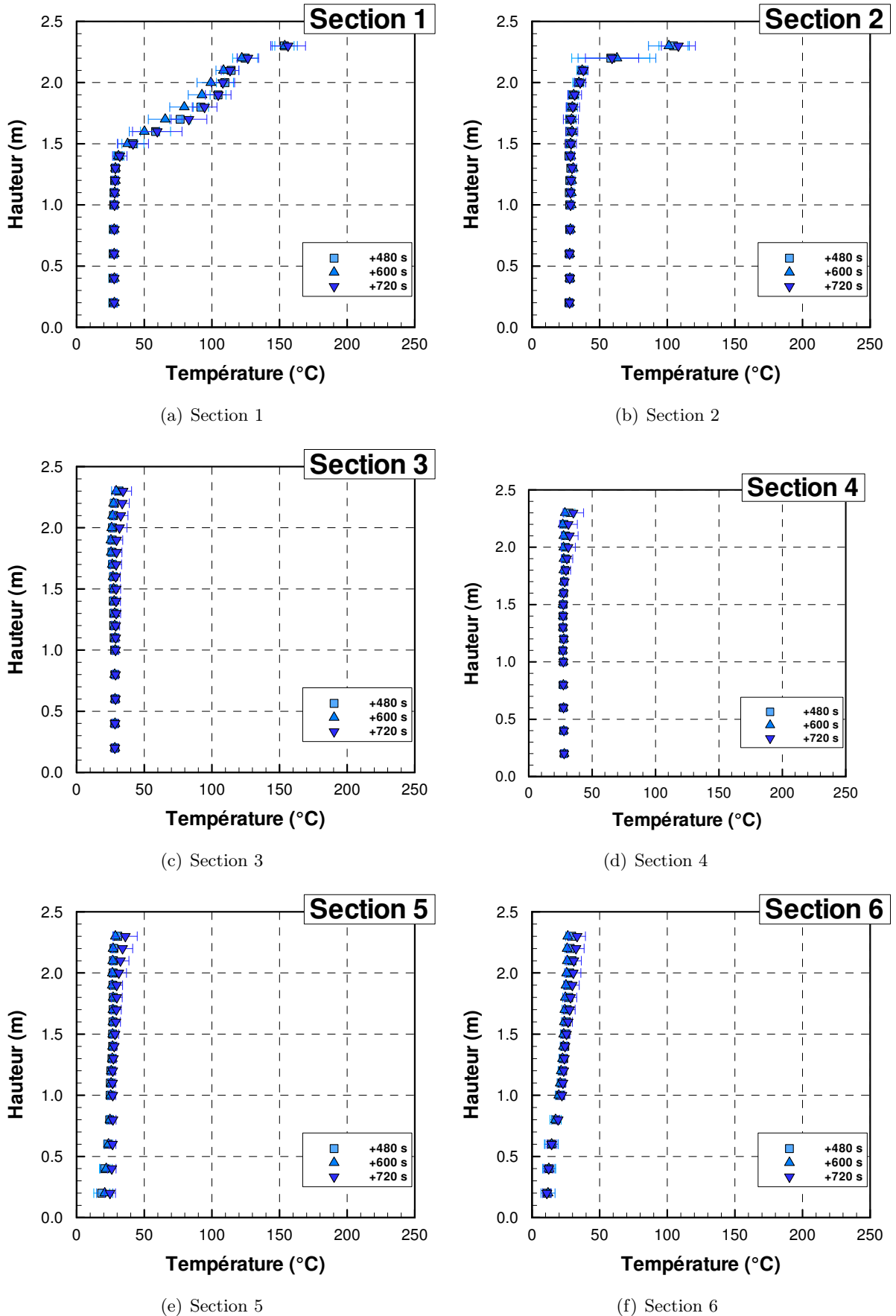


FIGURE 4.33 – Profils de température pendant l'aspersion par brouillard d'eau

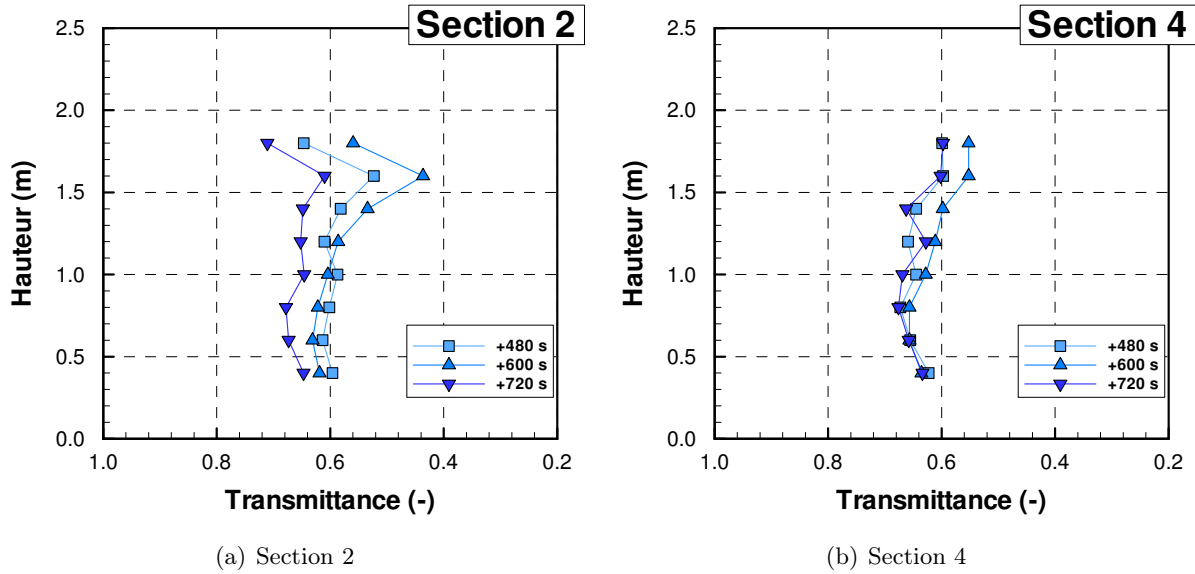


FIGURE 4.34 – Profils de transmittance pendant l'aspersion par brouillard d'eau

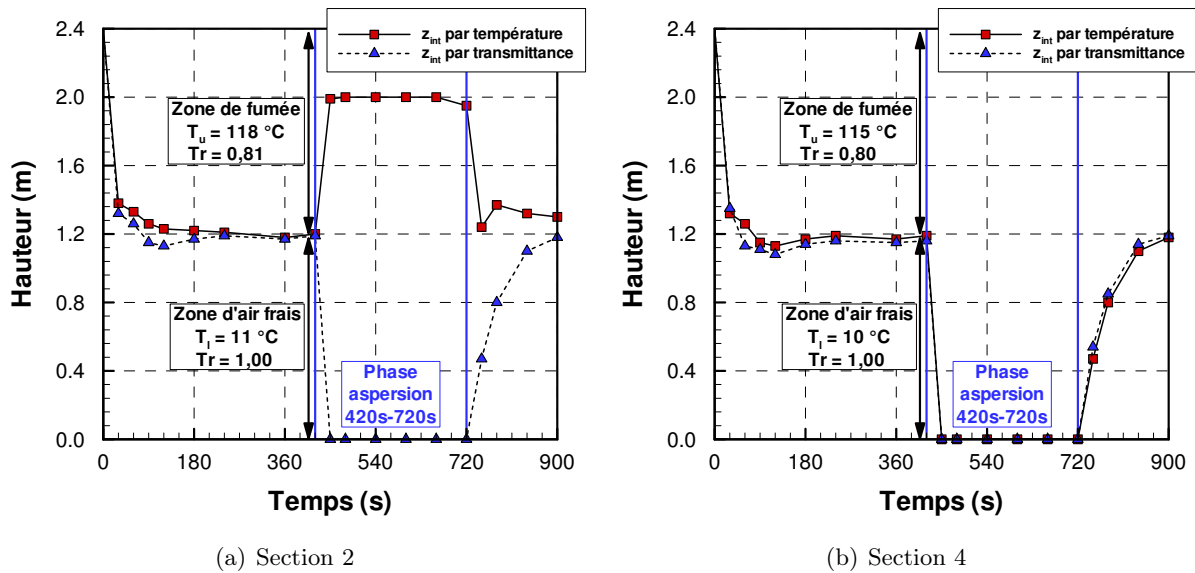


FIGURE 4.35 – Hauteur de l'interface entre la fumée et l'air calculée par la méthode de Janssens [62] appliquée à des mesures de transmittance et de température pour l'aspersion par brouillard d'eau

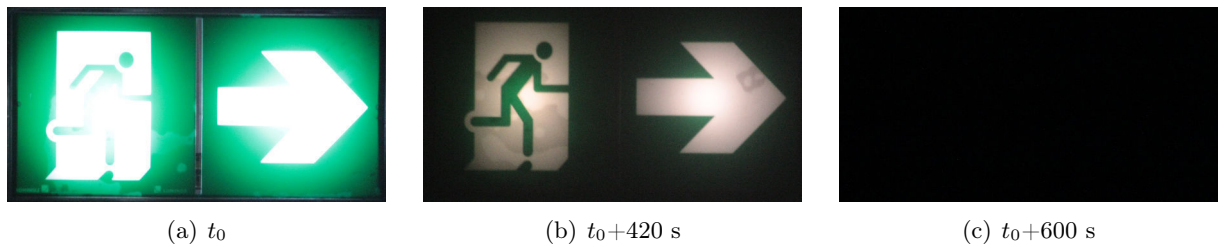


FIGURE 4.36 – BAES vu dans le couloir à 1,4 m du sol au niveau de la section 4 pour trois instants durant un essai avec le brouillard d'eau

4.3 Étude de l'atténuation du rayonnement par un spray

D'autres essais, annexes au travail de thèse ont visé à mesurer la capacité d'atténuation du rayonnement par le spray (brouillard d'eau et sprinkler) dans l'infrarouge dans la configuration pièce-couloir. Dans ces tests, la tête sprinkler ou la buse brouillard d'eau est placée en face de la pièce à 0,7 m du mur du bout du couloir comme le montre la Figure 4.37. La mesure effectuée par caméra et spectromètre infrarouge permet d'évaluer l'atténuation d'une source de type corps noir par une aspersion d'eau. La mesure de transmission est faite dans l'infrarouge entre 5000 et 1000 cm^{-1} (nombres d'onde correspondant respectivement à des longueurs d'onde de 2 et $10\text{ }\mu\text{m}$). Le niveau de confiance est évalué sur la base de la répétabilité de différents spectres successifs, typiquement 20, réalisés lors d'un essai unique. En d'autres termes, le corps noir est allumé et lorsque le régime est établi, le spray est déclenché durant une période de 10 minutes. La mesure spectrale est réalisée 20 fois puis comparée à la mesure faite avant le déclenchement du spray. Ainsi, on obtient un ensemble de transmittances spectrales pour chaque essai de pulvérisation. La moyenne des spectres successifs est effectuée. On applique la méthode de Student pour estimer les incertitudes liées à la répétabilité. L'intervalle de confiance est de 95 %.

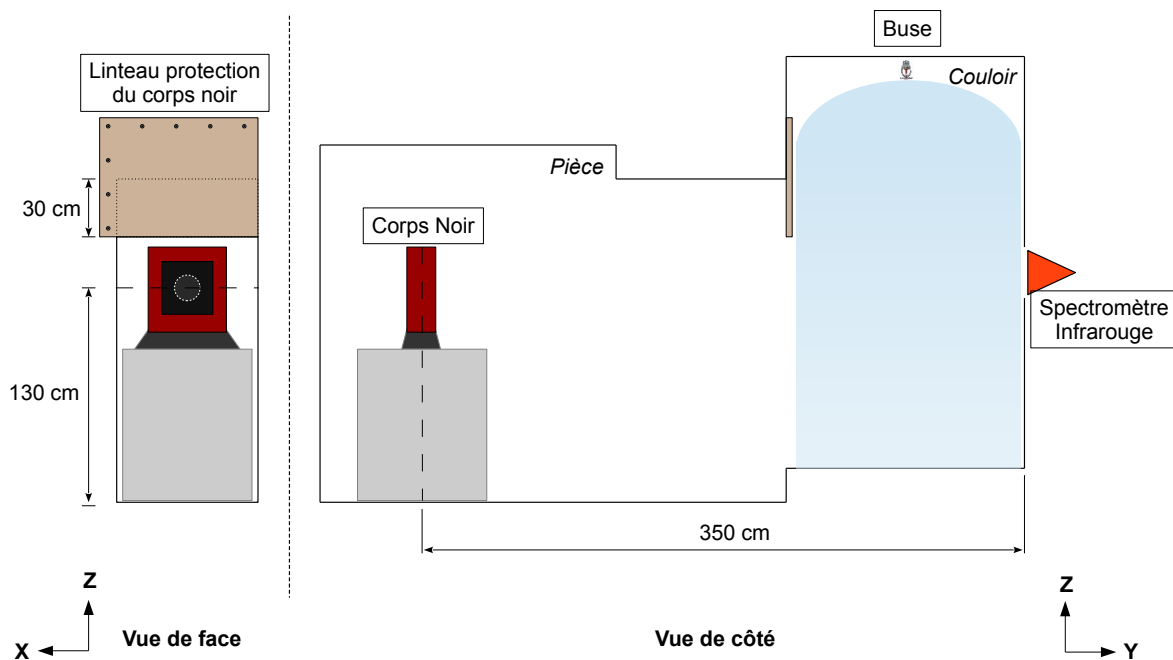


FIGURE 4.37 – Plan de la configuration utilisée pour les essais d'atténuation par pulvérisation d'eau sprinkler BP et brouillard d'eau

La Figure 4.38 présentent les résultats de transmission évaluée pour les trois technologies d'aspersion. Les niveaux d'incertitude sont donnés pour les trois cas. Sur ces spectres de transmission on observe des pics d'atténuation attribués à certaines espèces gazeuses. Les pics observés pour 1500 cm^{-1} et 3700 cm^{-1} traduisent la présence de vapeur d'eau. La pulvérisation d'eau peut entraîner une augmentation de la quantité de vapeur d'eau dans le milieu et ainsi expliquer l'absorption dans le spectre à 1500 cm^{-1} et 3700 cm^{-1} . Le pic, plus faible à environ 2300 cm^{-1} est attribué au CO_2 et potentiellement au CO (en présence de combustion, ce qui n'est pas le cas

ici). L'absorption par le CO_2 est moins marquée parce qu'il y a peu de changement avec et sans spray voire même aucun théoriquement. Cependant, le spray peut induire une perturbation.

Le niveau global de transmission pour les différentes technologies est très variable. L'atténuation globale est due à la pulvérisation de gouttes d'eau dans le milieu gazeux entre le corps noir et le spectromètre. Les effets couplés de taille de gouttes et de quantité d'eau induisent des niveaux de transmission différents. En effet, l'atténuation du rayonnement infrarouge par le sprinkler basse pression est de 20 % alors qu'elle atteint près de 60 % pour le sprinkler haute pression et 90 % pour le brouillard d'eau. L'atténuation est plutôt constante dans la totalité du spectre.

En résumé, le brouillard d'eau réduit fortement le rayonnement (90 %) du corps noir (ou des flammes) reçu par le combustible potentiel dans les locaux et/ou par les occupants. Les sprinklers basse et haute pression ont montré une atténuation beaucoup plus faible, de l'ordre de 20 % pour le premier et de 60 % pour le second dans la même gamme de nombres d'onde, montrant ainsi l'importance de la taille des gouttes dans les phénomènes d'atténuation du rayonnement. En effet, bien que les quantités d'eau pulvérisées par les sprinklers soient plus importantes la transmission est plus grande que pour le brouillard d'eau. Le brouillard d'eau apparaît, dans nos conditions d'essai, comme un moyen alternatif pour préserver les locaux et/ou les occupants vis à vis du rayonnement thermique en utilisant des quantités d'eau réduite.

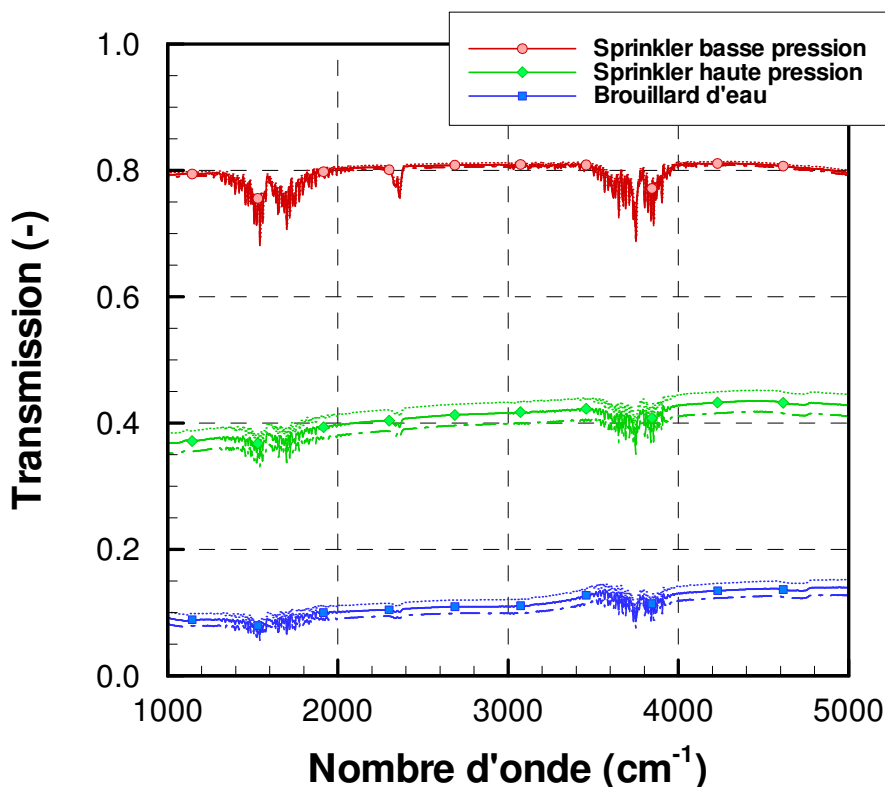


FIGURE 4.38 – Spectres de transmittance dans l'infrarouge pour les trois technologies d'aspersion

4.4 Conclusion du chapitre

L'effet de déstratification par l'aspersion a été mesuré selon deux critères : optique et thermique. Ces deux critères, pourtant corrélés avant aspersion ont montré des différences durant les phases d'aspersion par différentes technologies (Figure 4.39 et 4.40).

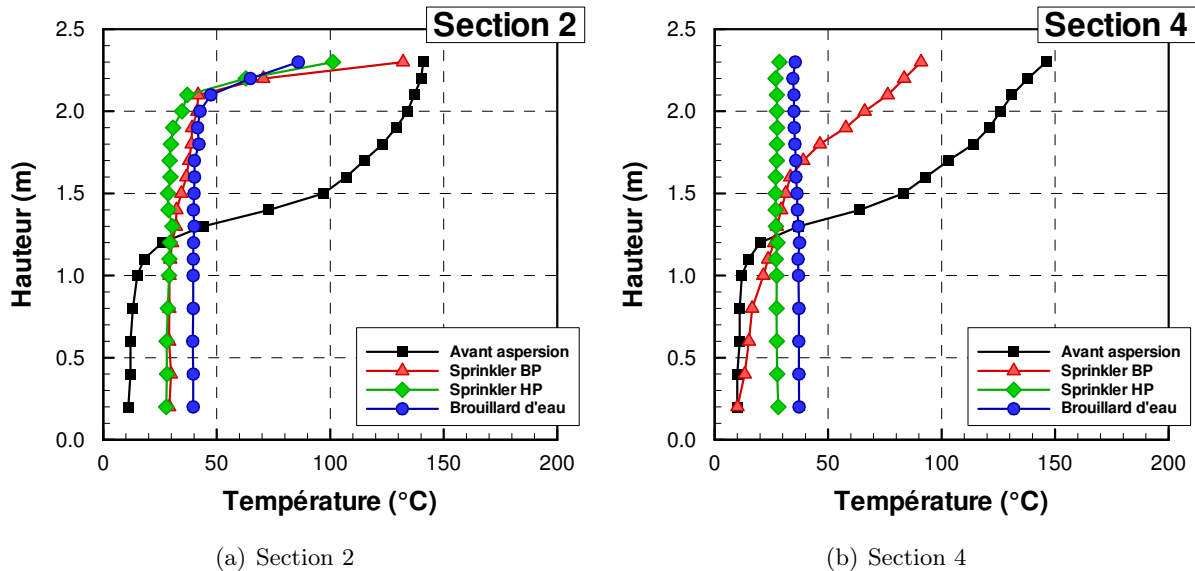


FIGURE 4.39 – Profils de température comparant l'effet des trois technologies d'aspersion sur la stratification thermique

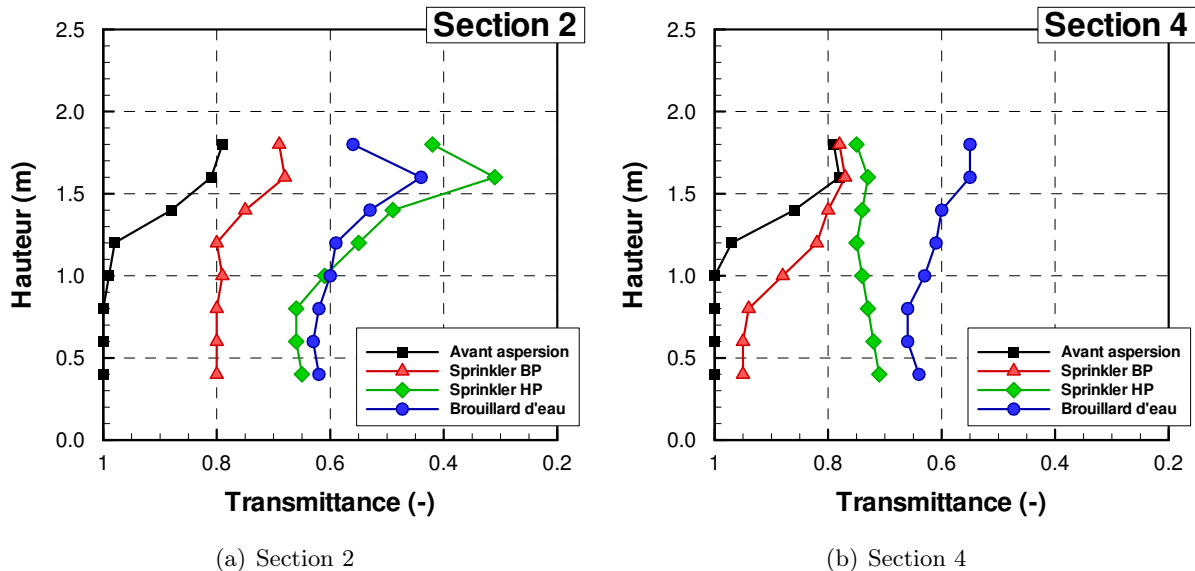


FIGURE 4.40 – Profils de transmittance comparant l'effet des trois technologies d'aspersion sur la stratification optique

La déstratification thermique par le sprinkler basse pression est plutôt locale, au niveau de

l'aspersion (Figure 4.39). Les mesures indiquent un refroidissement de la fumée en aval de l'injection du spray. Le niveau de transmittance baisse également en amont de l'injection (Figure 4.40), bien que le milieu optique conserve une stratification (avec des niveaux de transmittance différents par rapport aux niveaux avant le déclenchement). La température moyenne mesurée dans tout le couloir passe de 70 °C à 44 °C. En moyenne, le niveau de transmittance global dans le couloir passe de 0,92 (deux phases de 1,2 m d'épaisseur de transmittances égales à 0,8 et 1) avant aspersion à 0,83 durant l'aspersion (avec des phases plus difficiles à distinguer).

La déstratification par le sprinkler haute pression est très marquée, à la fois thermiquement et optiquement et touche une plus grande partie du couloir (Figure 4.39 et 4.40). Cependant, un gradient de transmittance semble être conservé en amont de l'aspersion (sur 1,8 m de hauteur) alors que la température est homogène sur cette partie. Bien que le couloir soit refroidi de manière homogène, la concentration en eau et en fumée dans le milieu doit être différente suivant la hauteur. En deuxième section, la transmittance constante suivant la hauteur est en-dessous de la transmittance mesurée en fumée seule indiquant la présence de gouttes d'eau contribuant à une atténuation supplémentaire. En moyenne, la température passe de 75 °C avant aspersion à 36 °C pendant. Le niveau de transmittance moyen est également affecté passant de 0,92 à 0,67 pendant la pulvérisation par le sprinkler HP.

Le brouillard d'eau produit également une déstratification importante de l'environnement. Les mesures thermiques et optiques montrent moins de différences dans la longueur du couloir que pour les autres technologies (Figure 4.39 et 4.40). En effet, le niveau de température est identique sous 2 m en amont et en aval de l'aspersion (sections 2 et 4), environ 30 °C, de même que les transmittances qui sont proches de 0,65. Le brouillard semble cependant créer un effet de barrière plus important pouvant induire un remplissage par la fumée en amont de l'aspersion. Également, la fumée durant aspersion paraît beaucoup plus blanche que pour les autres technologies. Cela indique une part de diffusion importante tandis que l'absorption semble plus grande pour le sprinkler HP. La température moyenne dans le couloir qui est de 70 °C avant aspersion est descendue à 38 °C durant l'aspersion par brouillard d'eau. La transmittance passe de 0,93 avant aspersion à 0,61 durant la phase d'aspersion.

D'un côté, le sprinkler haute pression entraîne un refroidissement important de l'environnement enfumé, sensiblement du même niveau que pour le brouillard d'eau. D'un autre côté, l'opacification est plus marquée pour le brouillard d'eau bien qu'elle soit également très importante pour le sprinkler haute pression. Les refroidissement et opacification importants par le sprinkler peuvent être attribués à la grande quantité d'eau injectée alors que ces phénomènes sont davantage attribués à la petite taille des gouttes pour le brouillard. Il serait utile de connaître précisément la granulométrie des sprays testés afin de donner la part due à la taille des gouttes et celle due au débit d'eau. De plus, il serait intéressant d'effectuer un bilan d'énergie pour mieux comprendre la part des phénomènes mis en jeu.

Le Tableau 4.12 donne les valeurs de transmittance et de température moyennées sur la hauteur du couloir pour les sections 2 (0,5 m en amont de l'aspersion) et 4 (2,5 m en aval).

À noter également qu'à l'arrêt de l'aspersion, le milieu se restratifie, d'abord en 3 phases : une zone libre de fumée en partie inférieure, une zone intermédiaire qui semble formée essentiellement

	Technologie	\bar{T}_r (-)	\bar{T} (°C)
Section 2	Avant aspersion	0,93	75
	Sprinkler BP	0,79	45
	Sprinkler HP	0,56	38
	Brouillard d'eau	0,59	43
Section 4	Avant aspersion	0,92	70
	Sprinkler BP	0,88	36
	Sprinkler HP	0,77	27
	Brouillard d'eau	0,61	33

TABLEAU 4.12 – Récapitulatif des valeurs de transmittance et de température mesurée pendant l'essai, avant aspersion et pour chaque technologie au niveau des sections 2 (en amont de l'aspersion) et 4 (en aval de l'aspersion)

d'eau (fumée blanche, assez diffusante) et une zone supérieure induite par la production de fumée par le foyer. La zone intermédiaire persiste entre 30 secondes à une minute selon la technologie employée. Plus la taille des gouttes est faible plus cette zone intermédiaire est persistante comme par exemple pour les essais de brouillard d'eau où la couche de fumée blanche assez épaisse (environ 20 cm) est encore visible durant une minute après l'arrêt de l'injection d'eau.

En tout, 50 essais ont été réalisés sur l'ensemble de la thèse : 14 sans aspersion, 21 essais avec brouillard d'eau, 9 avec sprinkler BP et 6 avec sprinkler HP (Tableau 4.13 et 4.14). Dans ces tableaux, sont répertoriés :

- le numéro d'essai,
- la température initiale T_{ini} mesurée au début de l'essai dans le couloir,
- le type de foyer/source utilisé (soit heptane, soit corps noir),
- la puissance du HRR en régime établi,
- la technologie d'aspersion (notée Tech. d'asp. dans le tableau) utilisée. L'acronyme « WM » pour *Water Mist* correspond au brouillard d'eau, « SpkHP » est utilisé pour désigner le sprinkler haute pression et « SpkBP » le sprinkler basse pression,
- la durée de la phase d'aspersion (asp.),
- et les objectifs principaux des essais.

N°	T _{ini} (°C)	Foyer	HRR (kW)	Tech. d'asp.	asp.	Informations complémentaires	
#1	17	Heptane	300	-	-	test de la configuration	
#2	17	Heptane	300	-	-		
#3	7	Heptane	400	-	-	test de stratification sans aspersion et test des opacimètres	
#4	7	Heptane	400	-	-		
#5	1	Heptane	400	-	-		
#6	0	Heptane	400	-	-		
#7	1	Heptane	400	-	-		
#8	1	Heptane	400	-	-		
#9	0	Heptane	400	-	-		
#10	1	Heptane	400	WM	60-120		test du système brouillard d'eau et effet de déstratification
#11	1	Heptane	400	WM	60-120		
#12	6	Heptane	130	-	-	essais présentés à Interflam et mise en évidence de la déstratification par l'ancien système d'opacimétrie placé sous 1 m de hauteur	
#13	1	Heptane	250	-	-		
#14	3	Heptane	250	-	-		
#15	10	Heptane	270	-	-		
#16	7	Heptane	280	-	-		
#17	13	Heptane	300	WM	360-660		
#18	14	Heptane	300	WM	360-660		
#19	17	Heptane	300	WM	360-660		
#20	21	Heptane	300	WM	360-660	essais sur l'atténuation du rayonnement d'une flamme par aspersion brouillard d'eau dans une configuration de bâtiment	
#21	21	Heptane	300	WM	360-660		
#22	20	Heptane	300	WM	360-660		
#23	27	Heptane	300	WM	360-660		
#24	19	Corps noir	-	WM	-		
#25	20	Corps noir	-	WM	-	essais sur l'atténuation du rayonnement d'un corps noir par aspersion brouillard d'eau dans une configuration de bâtiment	

TABLEAU 4.13 – Liste des essais réalisés

N°	T _{ini} (°C)	Foyer	HRR (kW)	Tech. d'asp.	asp.	Informations complémentaires	
#26	14	Corps noir	-	WM	-	seconde campagne d'étude de l'atténuation du rayonnement menée par le LEMTA	
#27	12	Heptane	210	WM	360-660		
#28	12	Corps noir	-	SpkBP	-		
#29	13	Heptane	240	SpkBP	360-660		
#30	14	Heptane	210	SpkBP	360-660		
#31	14	Heptane	230	WM	360-660	Test de la fibre dans les conditions d'essai feu	
#32	12	Heptane	250	SpkHP	360-380	Test de l'installation sprinkler haute pression	
#33	10	Heptane	260	SpkBP	420-720	Étude de la déstratification optique et thermique induite par la pulvérisation d'eau par différentes technologies	
#34	5	Heptane	290	SpkBP	420-720		
#35	11	Heptane	290	SpkBP	420-720		
#36	6	Heptane	260	SpkBP	420-720		
#37	6	Heptane	260	SpkBP	420-720		
#38	14	Heptane	290	SpkHP	420-720		
#39	17	Heptane	290	SpkHP	420-720		
#40	8	Heptane	260	SpkHP	420-720		
#41	9	Heptane	260	SpkHP	420-720		
#42	11	Heptane	260	SpkHP	420-720		
#43	8	Heptane	280	WM	420-720		
#44	8	Heptane	280	WM	420-720		
#45	9	Heptane	260	WM	420-720		
#46	16	Heptane	260	WM	420-720		
#47	7	Heptane	260	WM	420-720		
#48	-	-	-	SpkBP	-		tests en spray seul
#49	-	-	-	SpkHP	-		
#50	-	-	-	WM	-		

TABLEAU 4.14 – (suite) Liste des essais réalisés

Chapitre 5

Résultats numériques

Sommaire

5.1	Données d'entrée des simulations	135
5.1.1	Maillage et conditions aux limites	135
5.1.2	HRR	136
5.1.3	Modélisation des sprays	137
5.2	Simulation des sprays seuls	140
5.2.1	Sprinkler BP	141
5.2.2	Sprinkler HP	142
5.2.3	Brouillard d'eau	145
5.2.4	Comparaison des trois technologies	148
5.3	Simulation avant aspersion	148
5.4	Simulations pendant aspersion	150
5.4.1	Aspersion par sprinkler BP	151
5.4.2	Aspersion par sprinkler HP	166
5.4.3	Aspersion par brouillard d'eau	179
5.5	Conclusion du chapitre	192

Ce chapitre se découpe en 5 sections traitant des résultats numériques de pulvérisations d'eau sur un milieu enfumé. Chaque essai est simulé avec le code « Fire Dynamics Simulator » (FDS) développé par le NIST. Les caractéristiques des matériaux des parois, la configuration géométrique, le HRR mesuré et les réactifs de combustion sont des données d'entrée pour les simulations. Ces données sont présentées dans la première partie de ce chapitre.

Ensuite, la deuxième partie traite des simulations des sprays seuls réalisés pour les tests de la métrologie optique. Chaque technologie d'aspersion est testée et une comparaison est faite entre les transmittances mesurées lors des tests et les transmittances calculées numériquement.

La troisième partie traite de la simulation avant la phase d'aspersion. La stratification est étudiée, notamment par les hauteurs libres de fumée. La comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques permet de valider les simulations et les données d'entrée introduites dans le code.

La quatrième partie étudie numériquement l'effet de trois pulvérisation d'eau représentant les technologies présentées précédemment. Les simulations permettent d'avoir accès aux grandeurs tri-dimensionnelles tels que les champs de concentration en suie et en eau ainsi que les diamètres de gouttes en suspension dans le milieu. Ces données extraites permettent ensuite d'alimenter le code de calcul de la visibilité. La notion de distance de visibilité par l'étude du contraste est utilisée afin de l'estimer dans ces cas d'application.

Enfin, une conclusion sur la méthode est donnée. On pourra ainsi comparer l'effet de la variation de la taille de gouttes dans les phénomènes de refroidissement et d'atténuation du rayonnement visible.

5.1 Données d'entrée des simulations

5.1.1 Maillage et conditions aux limites

En premier lieu, la taille du maillage et la dimension du domaine de calcul sont les paramètres définis dans FDS. La taille de maille joue un rôle important, notamment pour les phénomènes dynamiques tels que les écoulements de la fumée et de la phase dispersée (gouttes en suspension). Une étude de sensibilité au maillage a été menée sur les simulations des essais préliminaires (Tableau 4.13). Trois tailles de mailles régulières et cubiques ont été testées : 5 cm ; 10 cm et 20 cm de côté. Ces tests ont montré que la taille de maille de 5 cm n'apportait pas de précision suffisamment significative par rapport au maillage de 10 cm. De plus, ce choix qui allongeait considérablement le temps de calcul faisait apparaître une insuffisance de mémoire virtuelle au moment du déclenchement de la pulvérisation d'eau. Le maillage 20 cm a très rapidement été éliminé au vue des instabilités numériques dues à l'aspersion. Ce maillage n'est pas suffisamment fin pour permettre le calcul des échanges au niveau des gouttes à l'échelle de la maille. À cela s'ajoute la difficulté de modéliser le foyer d'une taille de 30 cm par 30 cm avec des mailles de 20 cm par 20 cm.

FDS offre la possibilité de renseigner les matériaux de construction des différentes parois. La sensibilité à ce paramètre (composition des parois) a été testée en amont afin de juger de la pertinence des parois modélisées. Le test a été mené sur la simulation d'un essai sans aspersion. Le premier cas simulé considère des parois de type béton, très peu isolantes thermiquement. Le second cas est le cas limite considérant des parois adiabatiques. Enfin, le troisième et dernier cas simule les parois réelles avec les différents matériaux de construction de chaque mur et les couches successives d'isolant (Tableau 4.1). Un foyer typique des essais est simulé selon la méthode qui sera détaillée au paragraphe 5.1.2. Une comparaison est analysée entre simulations numériques et données expérimentales en régime établi aux sections E, 2, 4 et 6 telles que présentées au chapitre précédent.

Tout d'abord, le premier cas (parois béton) montre des températures inférieures aux températures mesurées expérimentalement (Figure 5.1). Cette différence grandit à mesure que l'on s'approche de la sortie du couloir. Dans la longueur du couloir, la baisse de température de la fumée à cause des échanges avec le plafond et les parois est de plus de 40 °C pour les parois en béton tandis que la température de la couche de fumée dans les essais reste relativement constante dans la longueur du couloir (autour de 150 °C sous le plafond). Ce constat était attendu²⁰, l'échange aux parois étant trop important, la couche de fumée se refroidit plus dans la simulation que durant les essais et ce phénomène croît au fur et à mesure que la fumée s'écoule dans le couloir.

À l'opposé, la simulation des parois adiabatiques montre une surestimation de la température tout au long du couloir. La simulation du cas adiabatique donne une température moyenne de la couche chaude de plus de 210 °C avec une valeur de 250 à 300 °C sous le plafond. En réalité, pour l'essai, la température moyenne de couche chaude est de 120 °C et la mesure faite dans le couloir au niveau du plafond n'est que de 150 °C.

Enfin, la simulation avec les matériaux et les épaisseurs les plus proches de ce que l'on peut observer dans la configuration étudiée reproduit correctement l'évolution des températures dans

20. Il suffit de comparer les conductivités thermiques du béton et du SIPOREX.

le couloir. En effet, la surestimation moyenne des températures par les simulations est de 9 % par rapport aux résultats expérimentaux dans la couche de fumée. Les conditions limites sont très importantes dans le milieu semi-confiné, le choix de ces conditions peut, dans notre cas d'étude, entraîner une erreur de près de 100 °C sur la couche de fumée.

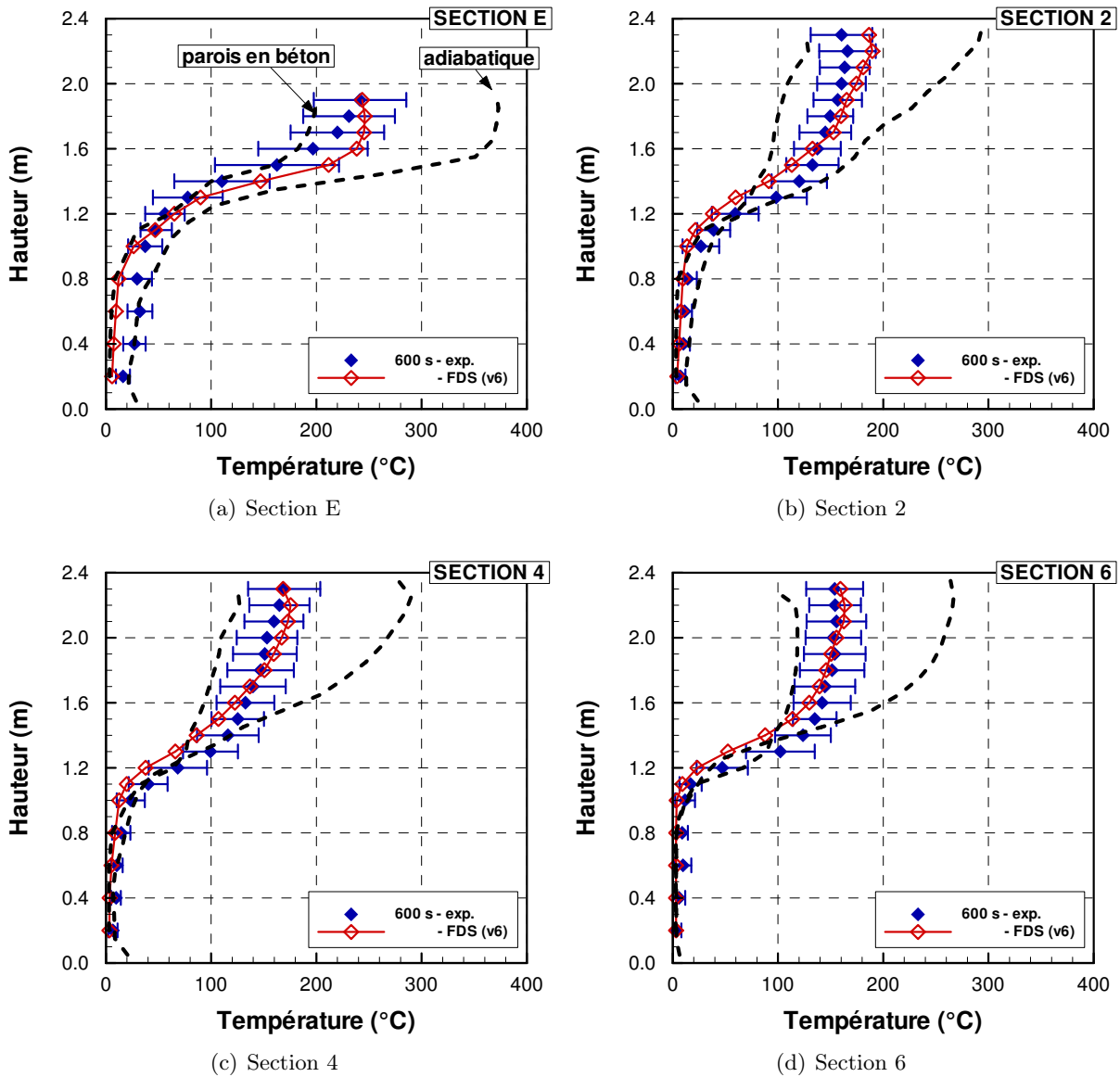


FIGURE 5.1 – Profils expérimentaux de température (essai #14 dans Tableau 4.13) comparés à trois simulations avec FDS6 pour des conditions limites aux parois différentes : 1-type béton ; 2-parois réelles et 3-parois adiabatiques

5.1.2 HRR

Le foyer employé comme un générateur de fumée et de source thermique est reproduit dans les simulations. Pour l'heptane utilisé ici, le SFPE [124] fournit les valeurs d'enthalpie et de

concentration en produits de combustion. Le Tableau 5.1 regroupe les valeurs de production de CO_2 , de CO et de suies par la combustion de l'heptane dans de bonnes conditions de ventilation.

L'influence de la fraction de suies produites a été testée numériquement pour les cas extrêmes de production nulle et de production doublée (0,074 g/g) par rapport à la valeur fournie par Tewarson [124]. Ce paramètre a une influence directe sur la chaleur de combustion et sur le rayonnement des fumées. La chaleur de combustion est de +2,9 % pour une production nulle de suies et de -2,9 % pour une production de suies doublée par rapport à la valeur nominale de 0,037 g/g. La différence de température dans le couloir est de ± 2 % dans la couche chaude. L'impact de ce paramètre sur les températures de gaz est relativement faible. Sur l'atténuation, le constat est plus marqué. Sur un chemin optique de 30 cm dans le milieu enfumé purement absorbant, la transmittance moyenne dans la partie haute calculée par la loi de Beer est de 1 pour une production nulle de suie, de 0,77 pour une production de suie de 0,037 g/g et de 0,60 pour une production doublée de suie de 0,074 g/g. La suie est le paramètre important dans les phénomènes d'atténuation en l'absence d'aspersion.

Le bac est modélisé par un solide cubique de section carrée de 30 cm de côté et de 20 cm de hauteur. La cote supérieure du bac est mesurée dans les essais à 30 cm au-dessus du sol (hauteur de la balance 15 cm + hauteur du bac réel de 15 cm). Le bac numérique est de ce fait surélevé de 10 cm dans les simulations afin que la base de la flamme soit placée au même niveau par rapport au sol que dans les essais. La hauteur du bac a une influence dans les simulations sur la hauteur de la zone libre de fumée. En effet, 4 cas ont été simulés, prenant en compte une surface réactive de bac située par rapport au sol à 0, 20, 30 et 40 cm. Les hauteurs moyennes de zone libre de fumée simulées sont respectivement de 107, 113, 117 et 120 cm (dans la longueur du couloir), soit une différence de 12 % entre les deux extrêmes. Dans la mesure où la hauteur de stratification est étudiée, ce paramètre est important pour la suite de l'étude. La position de la source dans le local a quant à elle peu d'influence dans une gamme de variation de ± 20 cm par rapport aux axes X et Y .

Le HRR simplifié est prescrit dans FDS, en trait noir sur la Figure 5.2. Bien que le calcul soit « bruité » par le déclenchement du spray, le HRR calculé par FDS est bien reproduit dans les simulations.

Combustible	y_{CO_2}	y_{CO}	y_{suies}	ΔH	ΔH_{ch}
	g/g			kJ/g	
N-heptane	2,85	0,010	0,037	44,6	41,2

TABLEAU 5.1 – Production de gaz et enthalpies de combustion pour l'heptane en conditions bien ventilée et incomplète - extrait de [124]

5.1.3 Modélisation des sprays

Certaines questions se posent sur la granulométrie des gouttes. Une première évaluation est faite sur la base de la corrélation de Dundas [36] pour le système sprinkler et sur les diamètres donnés par le constructeur à 100 bars pour le système brouillard d'eau. La pression de 100 bars est mesurée à la sortie de la pompe haute pression, il est possible qu'elle soit plus faible au niveau de

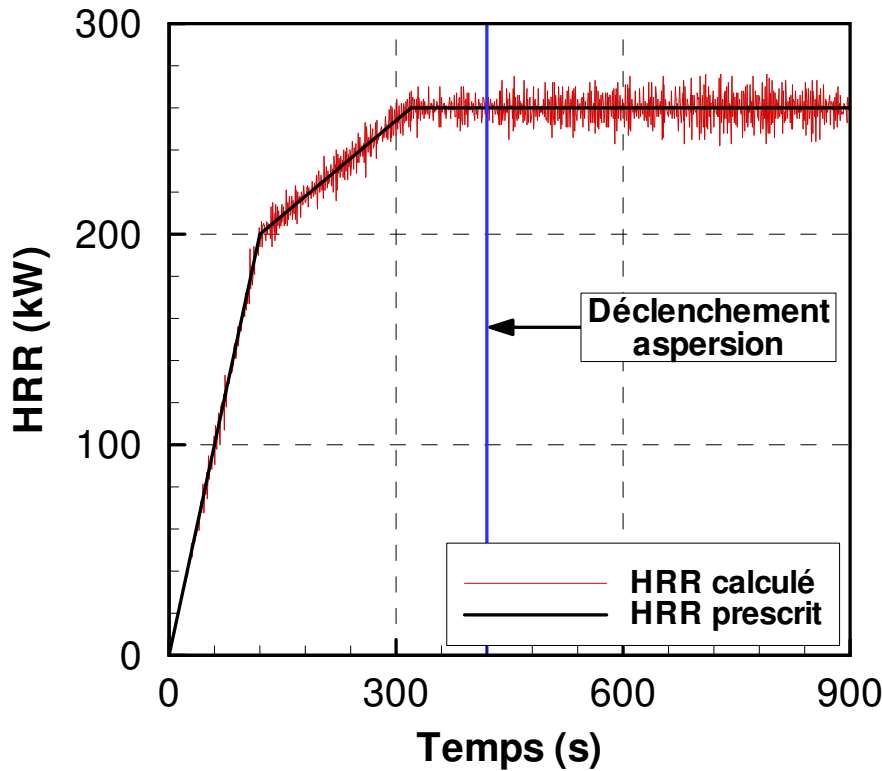


FIGURE 5.2 – Évolution temporelle de la puissance du feu prescrite pour les simulations

la buse brouillard d'eau entraînant un débit d'eau plus faible que celui calculé ici et probablement des tailles goutte plus élevées que celles données par le constructeur. On cherchera également dans un second temps qu'elle est la sensibilité au diamètre pour les résultats de transmission.

Les sprays peuvent également être modélisés par FDS. Les données importantes pour la caractérisation d'un spray sont : le débit d'eau pulvérisée, la vitesse d'injection des gouttes, leur diamètre moyen, le nombre d'injections et les angles de pulvérisation (Tableau 5.2).

Technologie	Nombre d'injection	Pression (Bar)	Nombre de débit (L/min/bar ^{0,5})	Débit (L/min)	d ₅₀ (μm)	Demi-angle (°)
Sprinkler BP	1	0,27	80	40	1700	80
Sprinkler HP	1	1,3	80	90	1000	70
WM	6	100	2,75	27,5	35,5	60

TABLEAU 5.2 – Récapitulatif des données d'entrée pour la simulation des technologies d'aspersion

Pour le brouillard d'eau, la pression est mesurée à 100 bars ± 2 % durant l'essai. Le constructeur renseigne le facteur de débit et la granulométrie des gouttes pulvérisées par la buse à la pression indiquée. La granulométrie est présentée sur la Figure 5.3c. Les angles d'injection sont évalués en utilisant la géométrie de la buse et l'orientation des sorties d'injection par rapport à la direction $-Z$. Ces valeurs d'angles sont confirmés par les photographies du spray. Cependant, la

mesure de granulométrie par le constructeur est faite dans des conditions pouvant être différentes de celles de la configuration pièce-couloir. Il peut donc y avoir un écart du fait de la pression et de la distance entre la buse et le plafond, l'air situé au-dessus de la buse affectant la pulvérisation. De plus, la granulométrie est mesurée à 1 m du point d'injection alors que la pulvérisation est définie dans FDS au point d'injection. Une étude préliminaire avait permis de confirmer que la granulométrie injectée à la buse ($d_{v50}=35,5 \mu\text{m}$) permettait de retrouver un diamètre de Sauter proche de celui fourni par le constructeur à 1 m de la buse.

Les données granulométriques et les angles des sprinklers ne sont pas renseignés. Les angles sont mesurés à l'aide des photographies des sprays faites durant l'aspersion seule. Le coefficient K est fourni par le constructeur et avec la mesure de pression à la tête, il est facile de connaître le débit d'eau pulvérisé. Le débit calculé et la géométrie de la tête notamment le diamètre nominal d'éjection permettent d'évaluer la vitesse des gouttes. La corrélation de Dundas [36] est utilisée pour calculer le diamètre moyen des gouttes. Les diamètres médians sont respectivement de 1000 et 1700 μm pour les sprinklers haute et basse pression.

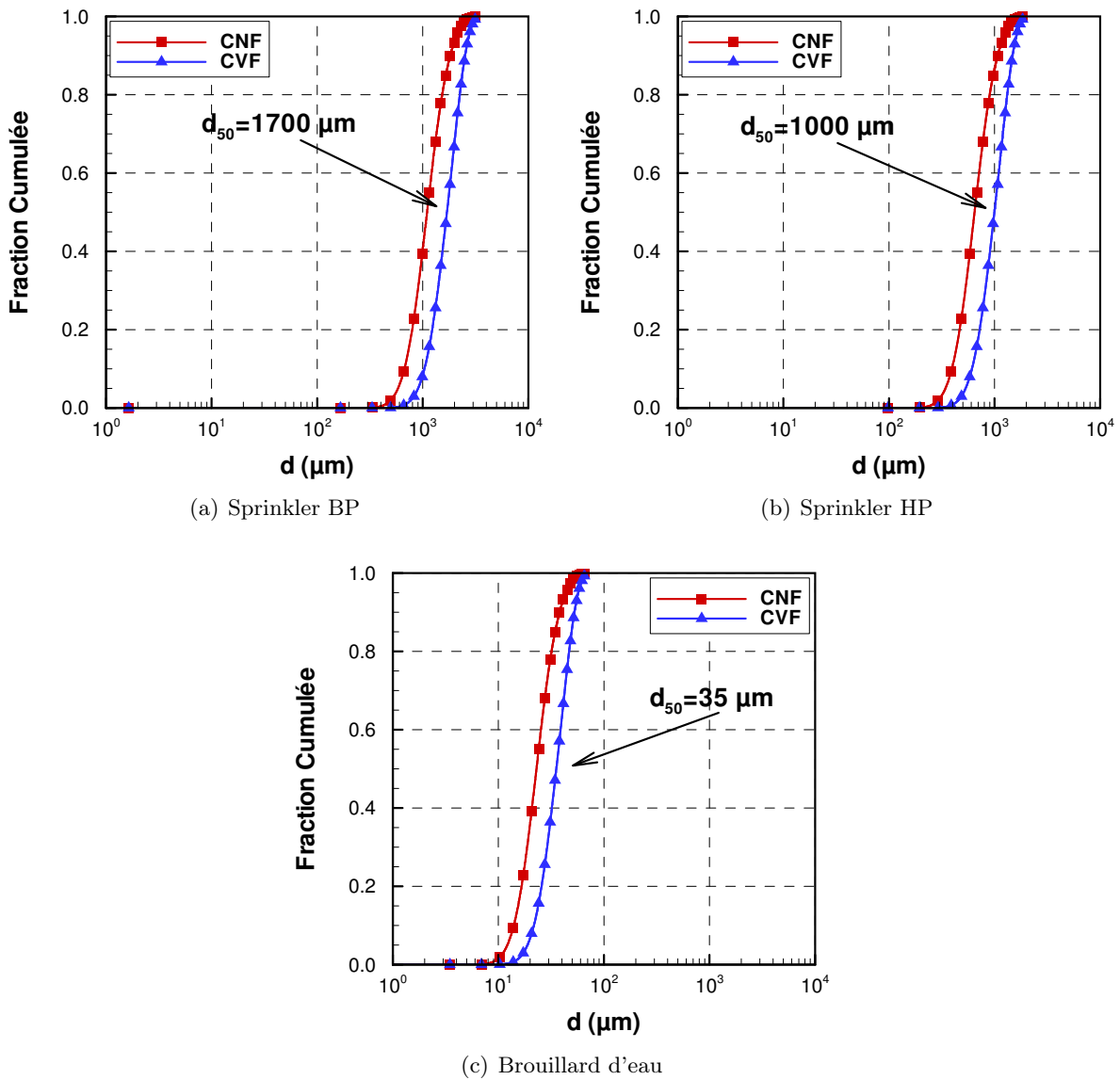


FIGURE 5.3 – Granulométrie prescrite à l’injection de la buse pour les trois technologies simulées

5.2 Simulation des sprays seuls

Des essais en spray seul ont été réalisés pour tester la robustesse et la justesse du dispositif d’opacimétrie laser (Chapitre 2). Ces tests sont simulés dans la configuration pièce-couloir afin de modéliser les pulvérisations par sprinkler et brouillard d’eau. Les paramètres d’entrée pour la modélisation des sprays sont répertoriés dans le Tableau 5.2.

L’aspersion est déclenchée durant 300 s. Les diamètres et des concentrations en eau varient peu après 10 s d’aspersion, quelle que soit la technologie employée. Toutes les valeurs extraites de FDS sont moyennées sur la durée totale d’aspersion.

5.2.1 Sprinkler BP

Le champ de concentration en eau moyen durant le régime établi montre une zone d'action locale du sprinkler BP (Figure 5.4). Peu d'eau atteint la section 4 à 2,5 m du point d'injection. La densité de gouttes est importante jusqu'à 60 cm en-dessous de l'injection, plus de $0,2 \text{ kg/m}^3$. Le gradient de concentration en eau est décroissant du haut vers le bas dans la zone de spray, de $0,4$ à $0,05 \text{ kg/m}^3$. De plus, la pulvérisation est pénalisée par la présence des boîtiers d'opacimétrie dans le champs d'action du spray.

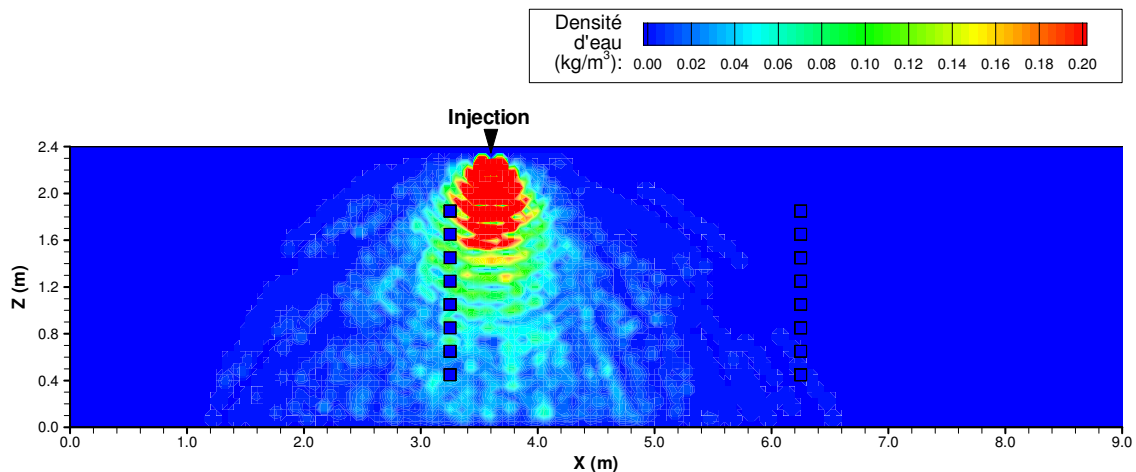


FIGURE 5.4 – Champs de concentration en eau dans le plan longitudinal de la pulvérisation par sprinkler BP

La Figure 5.5 présente en parallèle les profils de diamètre de Sauter et de fraction volumique en eau extraits de FDS au niveau des sections 2 et 4 dans le couloir. D'après les simulations, au niveau de la section 2, les gros diamètres sont proches du plafond tandis qu'en partie basse, on doit retrouver un ensemble de gouttes de taille différente. Les profils semblent montrer un diamètre de Sauter plus important en partie haute. La fraction volumique en eau est moins homogène que la taille des gouttes. En effet, une grande partie de l'eau liquide se situe à 1,5 m au-dessus du sol à cause de la forme du cône d'injection. À 1,5 m, la fraction volumique est de $3,6 \cdot 10^{-5}$. En-dessous, la fraction volumique d'eau diminue jusqu'à $2 \cdot 10^{-5}$ au niveau du sol.

Les coefficients de diffusion spectraux à 642 nm (le coefficient d'absorption est égal à 0) sont calculés par la théorie de Mie au niveau des points de mesure des sections 2 et 4. La méthode de Monte-Carlo permet de calculer numériquement la transmission du signal lumineux au travers du milieu semi-transparent de coefficient σ et d'épaisseur 0,3 m. Ces résultats sont inscrits dans le Tableau 5.3 et le Tableau 5.4 respectivement pour la partie basse et la partie haute du couloir. Les transmissions sont estimées à environ 98 %. Ces valeurs sont plus élevées que celles mesurées expérimentalement, le gradient étant dans ce cas de l'ordre de 92 à 98 %. Cette différence peut-être due 1- à une concentration en eau sous-estimée par FDS et/ou 2- au diamètre des gouttes pulvérisées calculé par la méthode [36] trop important par rapport au diamètre réel des gouttes.

En considérant un milieu homogène de fraction volumique en eau ($2,78 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^3$) et un diamètre de goutte ($1,47 \cdot 10^{-3} \text{ m}$) moyens dans le couloir, la transmittance est évaluée à 0,99

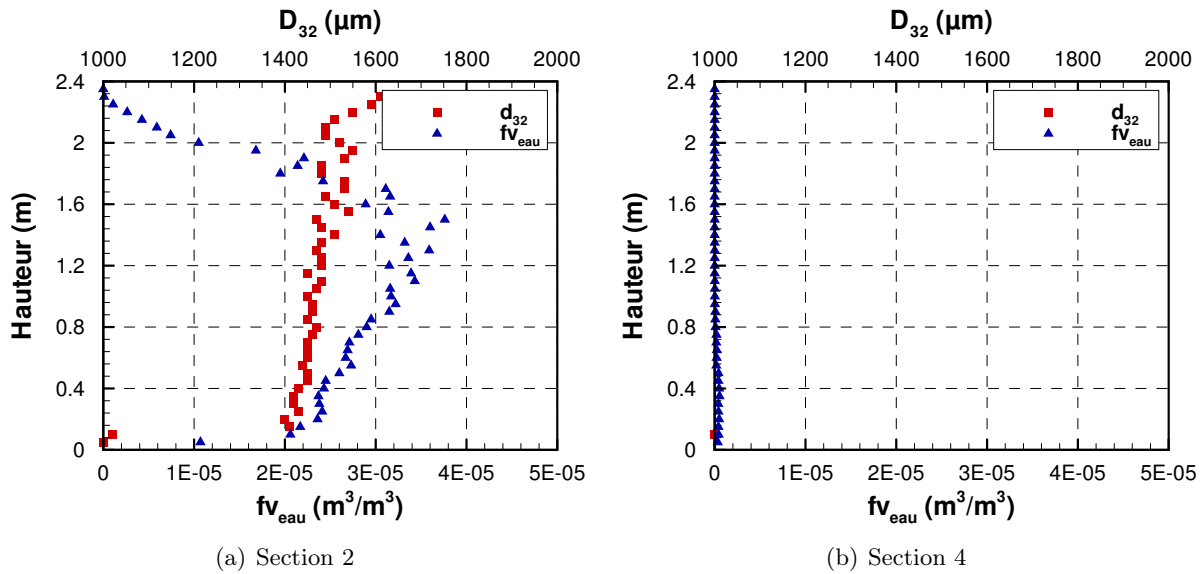


FIGURE 5.5 – Profils de diamètre de Sauter et de concentration en gouttelettes d’eau dans le couloir extraits de FDS : sprinkler BP

numériquement contre 0,96 expérimentalement. Une fraction volumique d’eau doublée c’est-à-dire pour $f_v = 5,56 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^3$ et une valeur de diamètre réduite de moitié soit $d_{32} = 7,35 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ entraîneraient respectivement une diminution de la transmission de 1,4 % et de 0,6 %. L’effet combiné de ces deux paramètres serait de -2,6 % par rapport à la moyenne de transmittance dans le cas numérique. La transmittance moyenne résultant serait de 0,96. Cette valeur est identique à la valeur expérimentale de 0,96. Cela laisse penser que la taille des gouttes injectées numériquement est supérieure à la taille des gouttes réellement pulvérisées et que la fraction volumique en eau est réduite par rapport à la réalité.

L’empreinte exacte (creuse ou pleine) ainsi que la granulométrie du spray sont mal connues. Les angles d’injection sont basés sur une vision photographique extérieure du spray ce qui ne permet pas de connaître la densité de gouttes en son centre. Le spray simulé est considéré plein, ce qui peut avoir un impact sur les fractions volumiques calculées dans le couloir et ainsi changer l’estimation de la transmission au travers du spray.

5.2.2 Sprinkler HP

La coupe longitudinale du champ des concentrations présentée sur la Figure 5.6 indique que la quantité d’eau contenue dans le couloir est plus importante pour le sprinkler HP que pour le sprinkler BP. Toutefois, le spray a également une zone d’action assez locale, au delà de 2 m, il y a peu de gouttes d’eau. Sous l’injection, la densité d’eau est de plus de $0,3 \text{ kg}/\text{m}^3$ jusqu’à 80 cm du plafond. La concentration en eau est décroissante en s’approchant du sol, de plus de $0,3 \text{ kg}/\text{m}^3$ au niveau de l’injection à $0,05 \text{ kg}/\text{m}^3$ au sol. Une faible quantité d’eau est calculée en section 4, jusqu’à 1,4 m au-dessus du sol. Bien que l’angle d’injection soit réduit par rapport au sprinkler, le débit et la vitesse d’injection sont tels que l’eau est pulvérisée dans une zone étendue du couloir.

Section	Hauteur (m)	0.4	0.6	0.8	1.0
2	f_v eau (m^3/m^3)	2.43E-05	2.67E-05	2.90E-05	3.17E-05
	d_{32} (μm)	1431	1453	1466	1451
	σ (m^{-1})	0.05	0.06	0.06	0.07
	Flux transmis num.	0.99	0.99	0.99	0.98
	Flux transmis exp.	0.98	0.98	0.98	0.98
4	f_v eau (m^3/m^3)	4.78E-07	2.17E-07	9.74E-08	2.05E-08
	d_{32} (μm)	2138	2196	2311	2420
	σ (m^{-1})	0.00	0.00	0.00	0.00
	Flux transmis num.	1.00	1.00	1.00	1.00
	Flux transmis exp.	0.99	1.00	1.00	1.00

TABLEAU 5.3 – Coefficients de diffusion calculés par la théorie de Mie en partie basse du couloir et rayonnement transmis sur le chemin optique de 30 cm pour le sprinkler BP

Section	Hauteur (m)	1.2	1.4	1.6	1.8
2	f_v eau (m^3/m^3)	3.15E-05	3.05E-05	2.89E-05	1.95E-05
	d_{32} (μm)	1478	1510	1505	1482
	σ (m^{-1})	0.06	0.06	0.06	0.04
	Flux transmis num.	0.98	0.99	0.99	0.99
	Flux transmis exp.	0.98	0.96	0.94	0.92
4	f_v eau (m^3/m^3)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	d_{32} (μm)	-	-	-	-
	σ (m^{-1})	0.00	0.00	0.00	0.00
	Flux transmis num.	1.00	1.00	1.00	1.00
	Flux transmis exp.	1.00	1.00	1.00	1.00

TABLEAU 5.4 – Coefficients de diffusion calculés par la théorie de Mie en partie haute du couloir et rayonnement transmis sur le chemin optique de 30 cm pour le sprinkler BP

Au niveau de la section 2, la répartition de la taille de gouttes en fonction de la hauteur est centrée sur $750 \mu\text{m}$ et la fraction volumique est très importante dans le cône d'aspersion sous 1,4 m (Figure 5.7a). En section 4, les diamètres calculés sont de l'ordre de $1250 \mu\text{m}$ et la fraction volumique en eau est très proche de 0, excepté en partie inférieure (sous 0,8 m) où elle est d'environ 2×10^{-6} (Figure 5.7b).

Les coefficients de diffusion sont faibles, de l'ordre de $0,06 \text{ m}^{-1}$, du fait de la taille des gouttes élevée par rapport à la longueur d'onde et aux fractions volumiques en eau relativement faible (Tableau 5.5 et Tableau 5.6). En section 2, la transmittance est plus élevée dans la partie haute du couloir en rapport avec la fraction volumique en eau.

En considérant un milieu homogène équivalent, la transmittance moyenne est évaluée numériquement²¹ à 0,97 alors qu'elle était de 0,78 expérimentalement. Comme pour le sprinkler BP, la différence peut provenir de la différence de fraction volumique et/ou du diamètre de goutte

21. Transmission évaluée pour une fraction volumique en eau de $4,37 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^3$ et un diamètre de Sauter de $8,33 \cdot 10^{-4} \text{ m}$

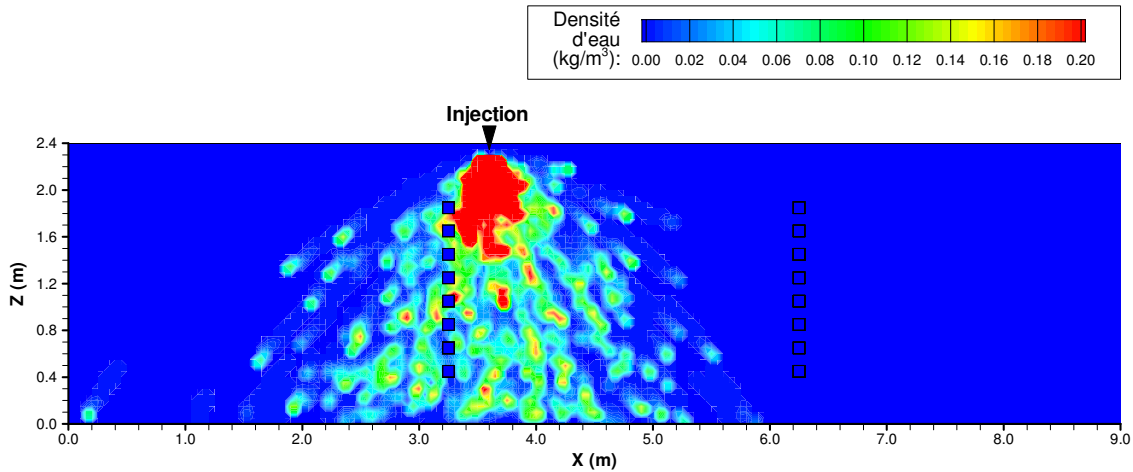


FIGURE 5.6 – Champs de concentration en eau dans le plan longitudinal de la pulvérisation par sprinkler HP

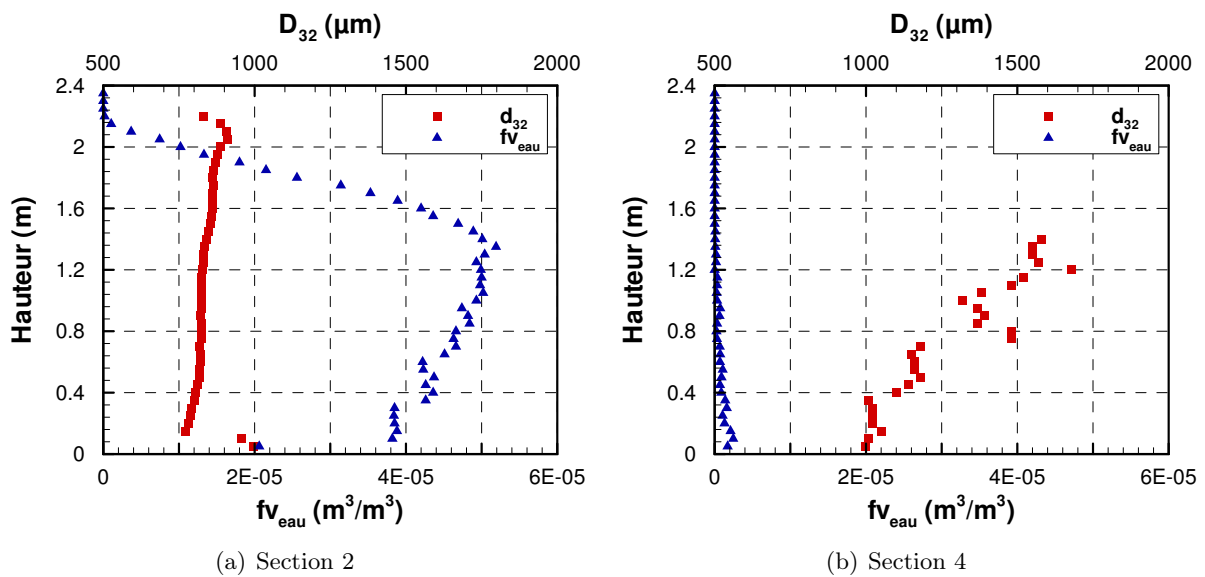


FIGURE 5.7 – Profils de diamètre de Sauter et de concentration en gouttelettes d'eau dans le couloir extraits de FDS : sprinkler HP

entre l'expérimental et le numérique. Les variations de +100 % de fraction volumique (soit $f_v = 8,74 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^3$) et de -75 % du diamètre (soit $d_{32} = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m}$) entraînent respectivement une diminution de la transmission de 2,7 % et de 6,7 % et un effet combiné de -15,2 % sur la transmittance par rapport à la valeur moyenne. La transmittance en combinant la variation des deux paramètres atteint 0,82. Cette valeur semble plus en accord avec les résultats expérimentaux. Évidemment, cela démontre uniquement qu'une forte erreur sur la fraction volumique et le diamètre des gouttes pourrait expliquer les écarts entre simulation et expérimentation, cela demanderait confirmation.

Section	Hauteur (m)	0.4	0.6	0.8	1.0
2	f_v eau (m^3/m^3)	4.36E-05	4.22E-05	4.66E-05	4.93E-05
	d_{32} (μm)	806	821	823	824
	σ (m^{-1})	0.16	0.16	0.17	0.18
	Flux transmis num.	0.97	0.97	0.97	0.97
	Flux transmis exp.	0.83	0.83	0.80	0.74
4	f_v eau (m^3/m^3)	8.77E-07	7.01E-07	2.42E-07	3.21E-07
	d_{32} (μm)	1096	1156	1480	1324
	σ (m^{-1})	0.00	0.00	0.00	0.00
	Flux transmis num.	1.00	1.00	1.00	1.00
	Flux transmis exp.	0.96	0.97	0.97	0.97

TABLEAU 5.5 – Coefficients de diffusion calculés par la théorie de Mie en partie basse du couloir et rayonnement transmis sur le chemin optique de 30 cm pour le sprinkler HP

Section	Hauteur (m)	1.2	1.4	1.6	1.8
2	f_v eau (m^3/m^3)	4.99E-05	5.01E-05	4.20E-05	2.56E-05
	d_{32} (μm)	828	840	860	861
	σ (m^{-1})	0.18	0.18	0.15	0.09
	Flux transmis num.	0.97	0.97	0.97	0.98
	Flux transmis exp.	0.74	0.60	-	0.77
4	f_v eau (m^3/m^3)	0.00E+00	6.48E-08	0.00E+00	0.00E+00
	d_{32} (μm)	1676	1575	-	-
	σ (m^{-1})	0.00	0.00	0.00	0.00
	Flux transmis num.	1.00	1.00	1.00	1.00
	Flux transmis exp.	0.98	0.98	0.98	0.98

TABLEAU 5.6 – Coefficients de diffusion calculés par la théorie de Mie en partie haute du couloir et rayonnement transmis sur le chemin optique de 30 cm pour le sprinkler HP

5.2.3 Brouillard d'eau

La quantité d'eau pulvérisée est répartie sur toute la longueur du couloir. Cela est dû à la petite taille des gouttes qui sont fortement ralenties à l'injection et qui restent plus longtemps en suspension dans le milieu. La concentration en eau est relativement homogène dans le premier tiers du couloir (en amont de l'aspersion), autour de $0,1 \text{ kg}/\text{m}^3$. Dans les deux autres tiers, la concentration en eau est de plus en plus faible en partie haute du couloir au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point d'injection. L'eau tombe sous l'effet de la gravité ce qui explique la concentration en eau plus importante en partie basse dans le couloir.

Les diamètres de gouttes et les fractions volumiques en eau sont relativement constants dans le couloir (Figure 5.9). En partie basse, les valeurs de concentration en eau et en tailles de gouttes sont à peine supérieures aux valeurs relevées en partie haute. Cela est dû au fait que les grosses gouttes retombent plus vite. Les valeurs de diamètre sont comprises entre 25 et $30 \mu\text{m}$. La fraction volumique d'eau est de $1.10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$ en section 2 et de même qu'en section 4 sous 1,2 m. Au

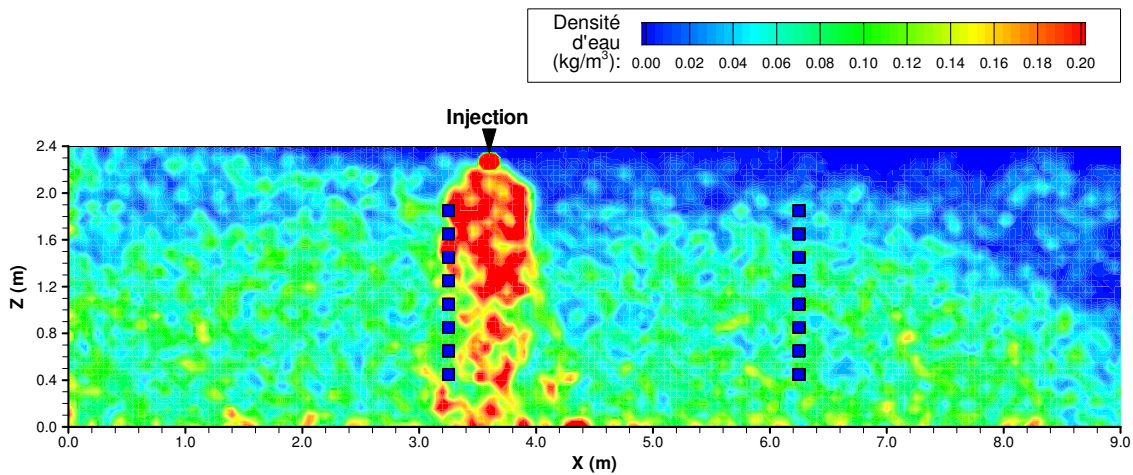


FIGURE 5.8 – Champs de concentration en eau dans le plan longitudinal de la pulvérisation par brouillard

delà, la fraction volumique en eau décroît jusqu'à 0 sous le plafond.

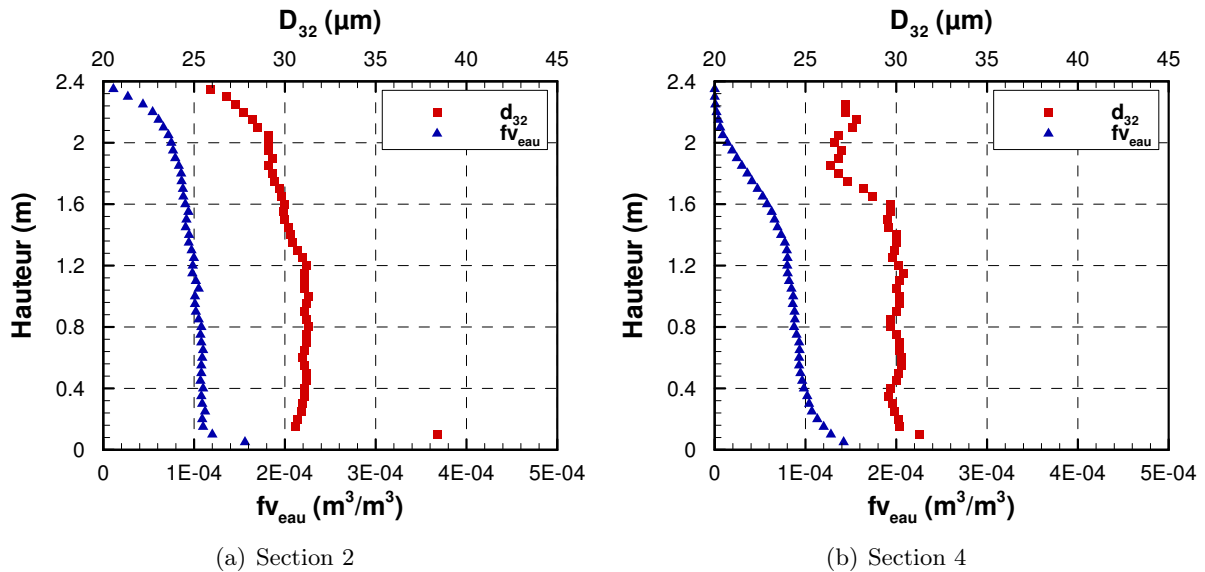


FIGURE 5.9 – Profils de diamètres de Sauter et de concentration en gouttelettes d'eau dans le couloir extraits de FDS : brouillard d'eau

Les coefficients de diffusion et les flux transmis sont calculés à la même hauteur que les points de mesure expérimentaux en section 2 et 4 (Tableau 5.7 et Tableau 5.8). Les coefficients de diffusion sont élevés car les diamètres des gouttes sont relativement faibles. Les flux transmis calculés sont très bas comparativement à ceux mesurés lors de l'essai en brouillard seul. En effet, les transmittances mesurées expérimentalement étaient de l'ordre de 40 à 80 % en section 2 et de 85 à 90 % en section 4 tandis que numériquement elles sont respectivement de moins de 20 % et de moins de 50 %.

Section	Hauteur (m)	0.4	0.6	0.8	1.0
2	f_v eau (m^3/m^3)	1.10E-04	1.09E-04	1.08E-04	1.01E-04
	d_{32} (μm)	31	31	31	31
	σ (m^{-1})	10.92	10.93	10.47	9.80
	Flux transmis num.	0.13	0.13	0.14	0.16
	Flux transmis exp.	0.63	0.63	0.59	0.58
4	f_v eau (m^3/m^3)	9.84E-05	9.30E-05	8.75E-05	8.65E-05
	d_{32} (μm)	30	30	30	30
	σ (m^{-1})	10.08	9.67	8.96	9.01
	Flux transmis num.	0.14	0.17	0.18	0.19
	Flux transmis exp.	0.86	0.87	0.88	0.90

TABLEAU 5.7 – Coefficients de diffusion calculés par la théorie de Mie en partie basse du couloir et rayonnement transmis sur le chemin optique de 30 cm pour le brouillard d'eau

Section	Hauteur (m)	1.2	1.4	1.6	1.8
2	f_v eau (m^3/m^3)	9.85E-05	9.44E-05	9.04E-05	8.57E-05
	d_{32} (μm)	31	30	30	29
	σ (m^{-1})	9.63	9.81	9.34	8.89
	Flux transmis num.	0.16	0.16	0.17	0.18
	Flux transmis exp.	0.55	0.52	0.43	0.74
4	f_v eau (m^3/m^3)	8.00E-05	7.31E-05	5.78E-05	3.60E-05
	d_{32} (μm)	30	30	30	27
	σ (m^{-1})	8.27	7.55	5.92	4.33
	Flux transmis num.	0.21	0.24	0.32	0.44
	Flux transmis exp.	0.91	0.91	0.92	0.92

TABLEAU 5.8 – Coefficients de diffusion calculés par la théorie de Mie en partie haute du couloir et rayonnement transmis sur le chemin optique de 30 cm pour le brouillard d'eau

La sensibilité des paramètres est testée au niveau des deux sections. La taille de goutte est augmentée de 100 % par rapport au diamètre moyen sur le profil. Le diamètre est $61 \mu\text{m}$ en section 2 et de $59 \mu\text{m}$ en section 4. Les transmissions moyennes calculées sont de 0,44 en section 2 et de 0,52 en section 4. Pour une fraction volumique réduite de moitié ($f_v = 4,99.10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^3$ pour la section 2 et $f_v = 3,83.10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^3$ pour la section 4), la transmission moyenne est de 0,39 en section 2 et 0,47 en section 4. En combinant les deux, les transmittances calculées sont de respectivement 0,66 et 0,72. Les mesures expérimentales moyennes donnent des valeurs pour les sections 2 et 4 de 0,55 et de 0,88.

Bien que les données granulométriques pour le brouillard soient fournies par le constructeur, il est possible qu'elles soient différentes dans nos essais. En effet, la configuration et la pression ²² peuvent induire une granulométrie différente entre les essais réalisés au CSTB et les tests de granulométrie réalisés par le fournisseur. Un diamètre de goutte moyen plus élevé s'avère plus

22. La pression n'a pu être mesurée exactement au niveau de la buse pour des raisons techniques et il se peut qu'elle soit inférieure à 100 bars entraînant ainsi une granulométrie différentes de la mesure du constructeur.

cohérent avec les essais réalisés au regard des transmissions. L'impact de ces paramètres est plus important du fait de la faible taille des gouttes.

5.2.4 Comparaison des trois technologies

L'effet de la pulvérisation par sprinkler est beaucoup plus localisé que l'effet du brouillard d'eau qui envoie de l'eau dans la totalité du couloir. En effet, l'atténuation observée par le sprinkler est principalement visible au niveau de la section 2 et pour le sprinkler BP, pas du tout visible en section 4. Ces constats ont également été faits dans la Section 2.5.2 pour les essais en spray seul. Bien que l'angle d'injection soit grand pour le sprinkler BP, on observe peu d'eau à plus de 3 m de l'injection. L'aspect général des deux sprinklers est proche malgré la différence importante de débit de pulvérisation (du simple au double) et de taille de gouttes. Le brouillard d'eau produit des gouttes plus légères qui se retrouvent plus facilement dans tout le couloir.

Dans tous les cas, la granulométrie et les angles d'injection semblent mal connus. Les gouttes produites par le sprinkler sont dans la réalité probablement plus petites que celles calculées par la corrélation de Dundas [36]. Celles produites par le brouillard semblent plus grosses que celles mesurées par le constructeur. Ces paramètres doivent à l'avenir bénéficier d'une étude plus approfondie pour la maîtrise de la modélisation des aspersion.

5.3 Simulation avant aspersion

La puissance prescrite étant numériquement la même avant et pendant l'aspersion, la simulation est identique pour les trois cas traités. L'évolution de la puissance en fonction du temps est décomposée en 3 étapes calées sur la mesure de perte de masse durant les essais. Deux phases de croissance plus ou moins rapide sont suivies d'un régime établi à partir de 300 s avec une puissance évaluée à 260 kW.

La couche de fumée se forme rapidement dans le couloir. Elle est observée par l'apparition d'un gradient de température entre le sol et le plafond mais également par l'augmentation de la concentration en suie dans la partie haute du couloir. La stratification de l'environnement est mise en avant par les champs de température et de concentration en suie dans le plan médian du couloir (Figure 5.10). Une zone libre de fumée est clairement identifiée thermiquement et optiquement, en partie basse la température du milieu étant de 10 °C et la densité de suie est nulle. Les gradients de suie et de température sont visibles dans la fumée. La nappe de fumée s'établit très rapidement et l'épaisseur de fumée (d'après les critères thermique et optique) est relativement stable dans toute la longueur du couloir.

Pour les fumées, le coefficient d'extinction peut être calculé avec la fraction volumique des suies [102, 121]. La stratification est également visible grâce aux profils de température et de coefficient d'extinction (ou de transmittance évaluée sur la base de la fraction volumique de suie en l'absence de gouttes d'eau en suspension). Les profils de température et de transmittance numériques (Figure 5.11) sont extraits de FDS avant le déclenchement de l'aspersion. Numériquement, la température calculée atteint 150 °C et le niveau de transmittance est compris entre 65 et 90 % dans la zone enfumée. Expérimentalement, la fumée atteint 135 °C soit un écart

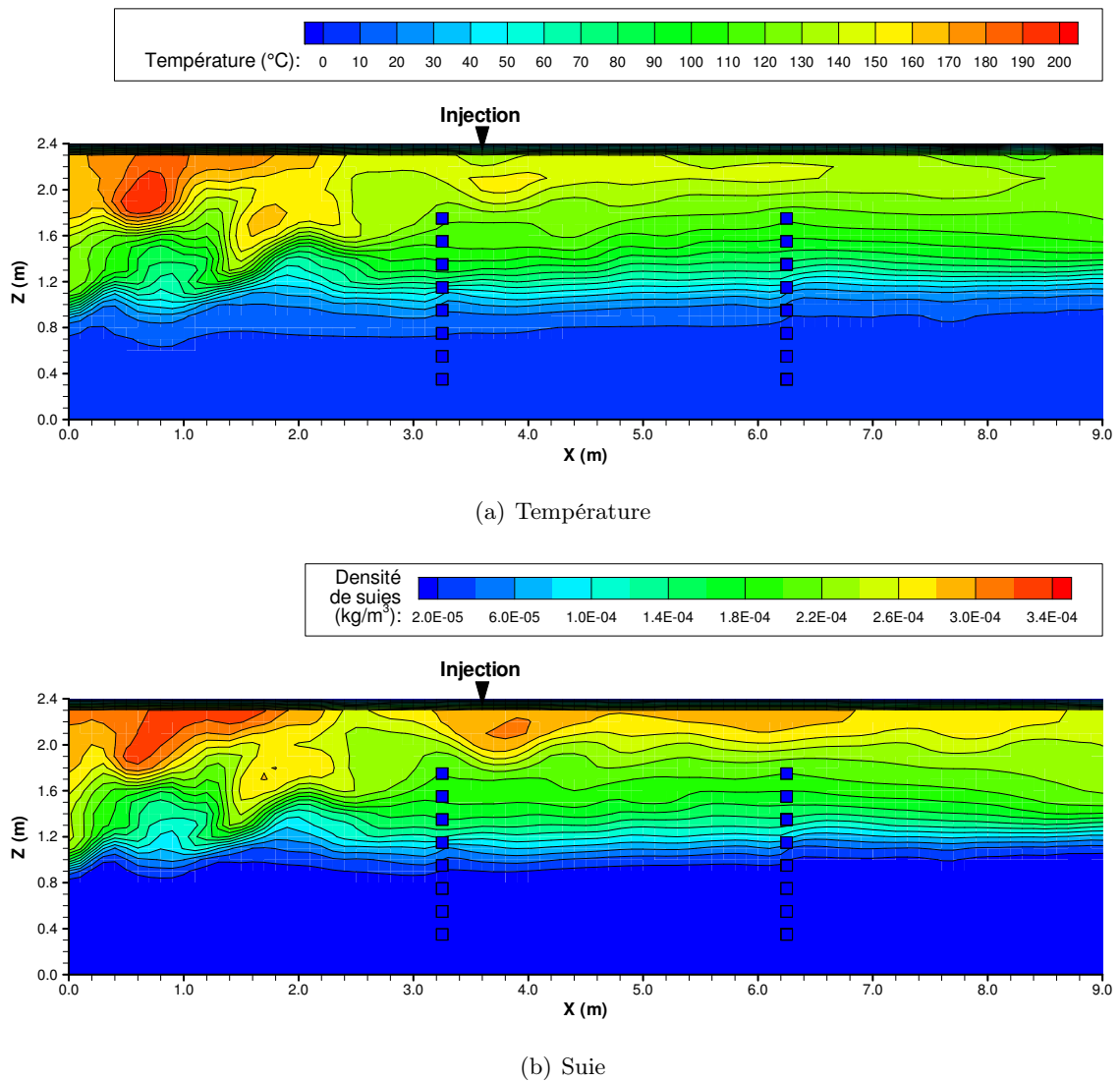


FIGURE 5.10 – Champs de température et de concentration en suie dans le plan longitudinal du couloir avant aspersion, à t_0+420 s

de -10 % par rapport à la simulation. Le niveau de transmittance expérimental dans la partie haute est compris entre 74 et 96 % (70 à 92 % pour les hauteurs numériques correspondantes). La différence entre les transmittances numériques et expérimentales peut être due à l'écart entre la quantité de suies introduite dans les simulations (0,037 g/g [124]) et la quantité réellement produite lors des essais.

Bien que les valeurs numériques de température et de coefficient d'extinction soient légèrement supérieures aux mesures, il y a une bonne concordance entre l'expérimental et le numérique avant l'aspersion. On peut donc considérer que la simulation peut être validée par les essais dans cette configuration.

Les méthodes d'évaluation [27, 47, 62] de la hauteur d'interface décrites précédemment sont utilisées pour calculer la hauteur libre de fumée. Ces méthodes sont appliquées à la fois sur les

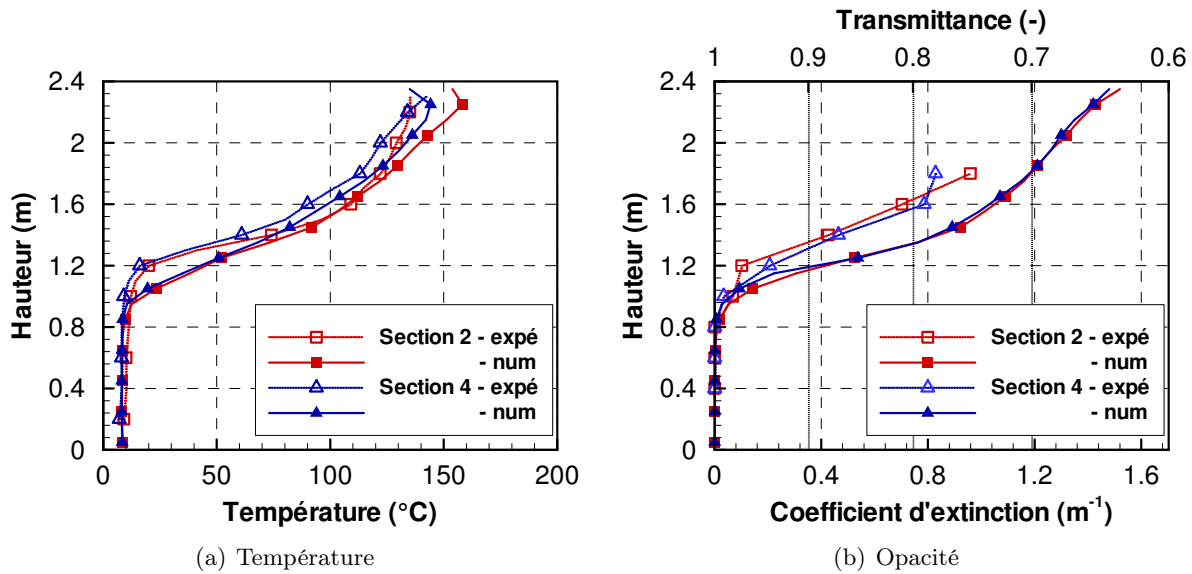


FIGURE 5.11 – Profils de température et de coefficient d’extinction (transmittance) évalués numériquement avant aspersion

profils de coefficient d’extinction et de température. Ainsi, la hauteur libre de fumée est évaluée par deux points de vue : optique et thermique.

Le Tableau 5.9 répertorie les valeurs calculées pour la hauteur libre de fumée, pour différentes méthodes basées sur la visibilité et la température. D’un point de vue général, chaque méthode permet d’évaluer une hauteur d’interface sensiblement identique quel que soit le critère choisi.

L’ordre de grandeur de la hauteur d’interface est de 1,15 m pour les méthodes de Janssens et de Cooper (méthode des N-%) tandis que la valeur est supérieure pour les méthodes proposées par He (Integral Ratio et Least-Squares). La méthode « Least-Squares » propose une hauteur basée sur le point d’inflexion de la courbe. Le point d’inflexion mathématique est situé à 1,35 m alors que la température à ce niveau est de plus de 50 °C et que le coefficient d’extinction est de 0,65 m⁻¹ (visibilité de moins de 5 m d’après la corrélation de Jin [66]). La méthode « Integral-Ratio » permet d’estimer la zone d’interface entre la fumée et l’air à 1,25 m par le biais des températures et à 1,15 m via les transmittances.

5.4 Simulations pendant aspersion

Le protocole expérimental décrit dans le Chapitre 4 est reproduit numériquement. L’aspersion est déclenchée dans le couloir, sur la nappe de fumée à t_0+420 s après l’allumage. Le point d’injection est positionné à 0,5 m en aval de la section 2 et à 2,5 m en amont de la section 4 dans le couloir.

L’étude de l’impact du spray est découpée en 3 parties pour les 3 technologies d’aspersion utilisées. Dans la première partie, on décrit qualitativement l’effet de la pulvérisation d’eau sur

Méthode	Température		Transmittance	
	Section 2	Section 4	Section 2	Section 4
10 %	1,05 m	1,05 m	1,05 m	1,10 m
15 %	1,10 m	1,10 m	1,10 m	1,15 m
20 %	1,15 m	1,15 m	1,15 m	1,15 m
Janssens	1,14 m	1,15 m	1,14 m	1,16 m
Integral Ratio	1,25 m	1,25 m	1,15 m	1,15 m
Least-squares	1,35 m	1,35 m	1,35 m	1,25 m

TABLEAU 5.9 – Calcul de la hauteur libre de fumée par les différentes méthodes appliquées aux profils de température et de transmittance

la nappe de fumée. Ces observations sont comparées à ce qui était observé durant les essais. Ensuite, dans la deuxième partie, le refroidissement de l’environnement par l’injection d’eau est mis en avant par l’intermédiaire de profils de température. Après la comparaison des profils expérimentaux et numériques, une étude de sensibilité est menée afin d’identifier les paramètres influents dans les phénomènes de refroidissement. Pour finir, l’opacification par la fumée, et la présence de gouttelettes d’eau en suspension est décrite. Les paramètres importants $f_{vsuie;eau}$ et d_{32} pour le calcul des coefficients d’absorption et de diffusion sont extraits de FDS. La méthode de Monte-Carlo permet de calculer l’atténuation numérique d’un rayon laser pour un chemin optique de 30 cm. Les valeurs numériques pourront ainsi être comparées aux valeurs expérimentales Tr1 et Tr2. Cette dernière partie est conclue par l’étude sur la visibilité évaluée numériquement sur la base du contraste seuil de 0,02. Pour le brouillard, deux objets sont traités, le premier étant une Mire de résolution USAF1951 décrite dans la Section 3.3 et le second un Bloc Autonome d’Éclairage de Sécurité (BAES) utilisé dans les Établissements Recevant du Public (ERP). Le BAES (Figure 5.12) comporte une inscription « Fire Exit » et un personnage en train d’évacuer. Trois contrastes sont calculés sur le panneau : le premier au niveau de l’inscription « Fire Exit » définit la capacité de lire une information ; le deuxième sur le personnage permet de comprendre une information (par exemple, dois-je prendre la direction de droite ou celle de gauche ?) et le troisième sur le panneau complet par rapport au fond représente la visibilité d’un objet au travers d’un milieu diffusant et absorbant.

5.4.1 Aspersion par sprinkler BP

5.4.1.1 Effet sur l’environnement stratifié

L’effet de la pulvérisation par sprinkler BP apparaît assez faiblement sur la nappe de fumée (Figure 5.13). Les champs de température et de concentration en suie sont choisis pour représenter la nappe de fumée et l’impact de la pulvérisation sur l’environnement stratifié. Les champs montrent un épaississement de la nappe de fumée en amont de l’aspersion, essentiellement entre 2 et 4 m dans le couloir.

Numériquement, l’aspersion par sprinkler BP semble avoir un faible impact sur les stratifications thermique et optique de l’environnement enfumé. Expérimentalement, la déstratification



FIGURE 5.12 – Bloc Autonome d’Éclairage de Sécurité (BAES)

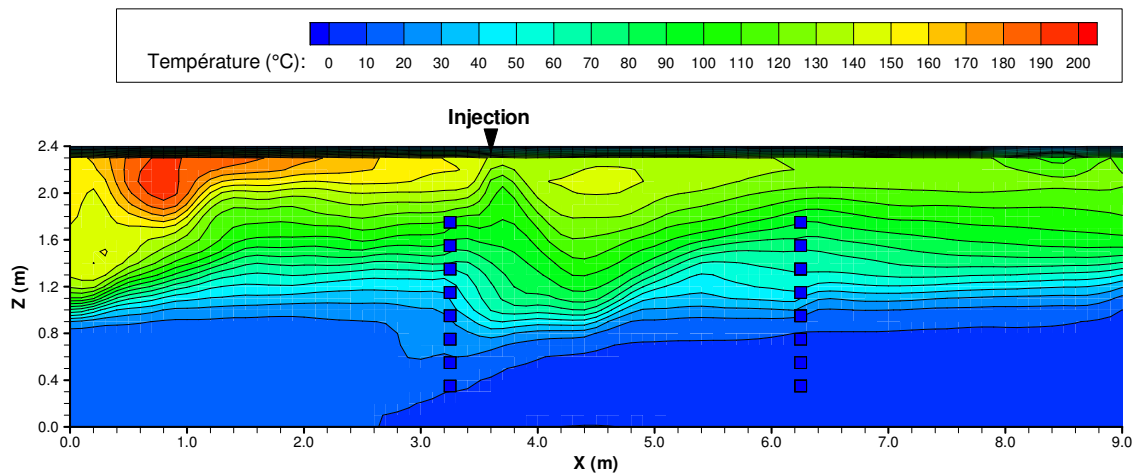
était observée au droit de la tête sprinkler mais l’environnement enfumé au-delà de 6 m conservait son caractère stratifié.

5.4.1.2 Refroidissement

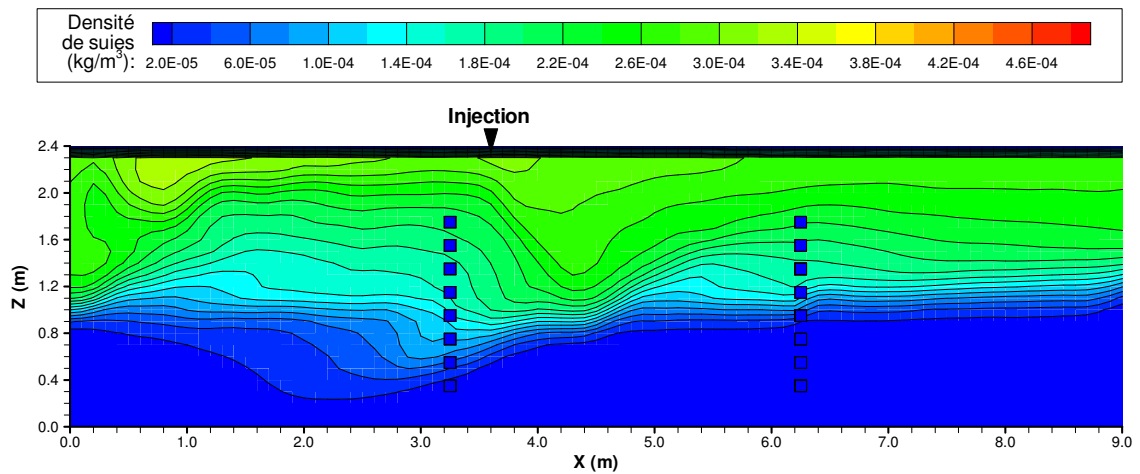
L’effet de refroidissement par le sprinkler BP est évalué d’après les données expérimentales et les résultats numériques. Plusieurs profils sont représentés sur la Figure 5.14, le cas de référence est réalisé avec les paramètres nominaux (débit, pression et diamètre des gouttes), il est représenté par un trait continu noir et est comparé aux résultats d’essais en symboles carrés noirs. D’autres simulations se rapportant à la sensibilité des paramètres sont également présentées sur cette figure.

Numériquement, la nappe de fumée est peu refroidie. L’effet de la pulvérisation est principalement observé en sections 1 et 2 dans le couloir avec une nappe de fumée plus froide qu’avant l’injection d’eau. En aval de l’aspersion, cet effet est peu visible, la température de la nappe de fumée n’ayant quasiment pas été refroidie par l’injection d’eau. La nappe de fumée est conservée jusqu’à la sortie du couloir.

Les mesures de températures faites durant les essais montrent clairement l’impact de la pulvérisation sur le refroidissement de la nappe de fumée dans tout le couloir. Aux sections 2 et 3, encadrant l’aspersion, l’environnement thermique est quasi-homogénéisé, excepté en partie haute où les températures peuvent atteindre 130 °C durant la phase d’aspersion. Dans la deuxième moitié du couloir (sections 4, 5 et 6), la température de la nappe de fumée est refroidie mais l’environnement conserve un gradient synonyme de stratification thermique. La température maximale de 135 °C avant aspersion passe à 85 °C en section 4 durant l’aspersion, soit un refroidissement



(a) Température



(b) Concentration en suie

FIGURE 5.13 – Champs de température et de concentration en suie induits par la pulvérisation par sprinkler BP sur le milieu enfumé dans le plan longitudinal médian du couloir (champs moyens durant la phase d'aspersion)

de 50 °C. Expérimentalement, la déstratification par le sprinkler BP est locale. La comparaison entre résultats numériques et expérimentaux est assez mauvaise. L'effet de refroidissement observé expérimentalement est plus important que l'effet constaté numériquement.

L'étude numérique offre la possibilité d'étudier la sensibilité aux paramètres. Le paramètre principal de l'aspersion est la pression d'opération au niveau de la tête. La pression est modifiée de plus ou moins 20 % par rapport à la valeur mesurée de 0,27 bar. La variation de ce paramètre en particulier engendre une modification à la fois du débit d'injection, de la vitesse d'éjection des gouttes et par conséquent de la granulométrie du spray.

Par rapport à la pression nominale, l'augmentation de 20 % de la pression fait augmenter le

débit de pulvérisation et la vitesse d'éjection des gouttes de 9,6 % tandis que la diminution de 20 % de la pression fait diminuer le débit de pulvérisation et la vitesse d'éjection des gouttes de 10,5 %. La granulométrie de la pulvérisation est directement liée à la vitesse d'éjection des gouttes à la puissance $-2/3$ (en rapport avec le nombre de Weber). De ce fait, l'augmentation de la pression d'alimentation engendre la formation de gouttes de taille réduite de 5,9 % et dans le cas contraire, la réduction de la pression de 20 % engendre des gouttes de taille supérieure de 7,6 %. D'après les relations entre chaque paramètre, les variations indicées « \pm » peuvent être calculées par rapport à la simulation de référence indicée « 0 » :

$$P \propto Q_v^2 \propto v_{inj}^2 \propto d_{v50}^{-3} \quad (5.1a)$$

$$\frac{P^\pm}{P^0} = \left(\frac{Q_v^\pm}{Q_v^0}\right)^2 = \left(\frac{v_{inj}^\pm}{v_{inj}^0}\right)^2 = \left(\frac{d_{v50}^0}{d_{v50}^\pm}\right)^3 \quad (5.1b)$$

Ensuite, afin de mettre en avant les paramètres influents dans les phénomènes de refroidissement, on les fait tour à tour varier en conservant la gamme de variation obtenue avec une modification de $\pm 20\%$ de la pression. Le Tableau 5.10 récapitule les noms et valeurs des paramètres pour les 9 simulations présentées.

simulation	-20%P	- Q_v	-v	+d	cas réf.	-d	+v	+ Q_v	+20%P
Q_v (L/min)	37,46	37,46	41,88	41,88	41,88	41,88	41,88	45,93	45,93
V (m/s)	4,93	5,52	4,93	5,52	5,52	5,52	6,06	5,52	6,06
d_{v50} (μm)	1830	1700	1700	1830	1700	1600	1700	1700	1600

TABLEAU 5.10 – Paramètres pour la modélisation du sprinkler BP pour les 9 simulations de sensibilité

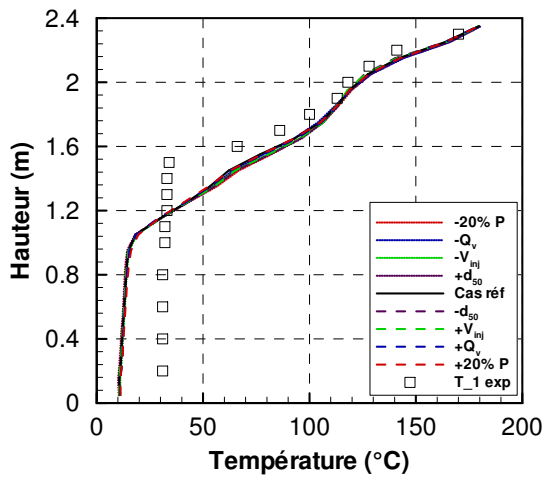
Sur la Figure 5.14, les résultats sont présentés en pointillés pour les modifications de paramètres causés par -20% de pression et en tirets pour le cas de modification de $+20\%$ la pression.

L'influence de ces paramètres n'est réellement visible qu'au niveau des sections 3 et 4. L'augmentation de la pression entraîne un épaississement de la nappe de fumée, d'environ 10 cm de plus que pour le cas de référence. Dans le cas contraire, une diminution de la pression diminue l'épaisseur de la nappe de fumée de 10 cm par rapport au cas de référence. Dans cette gamme de variation, la modification de la vitesse d'injection des gouttes n'a aucune influence sur le refroidissement de l'environnement tandis que le débit et le diamètre de gouttes ont sensiblement la même part dans le refroidissement de l'environnement en section 3.

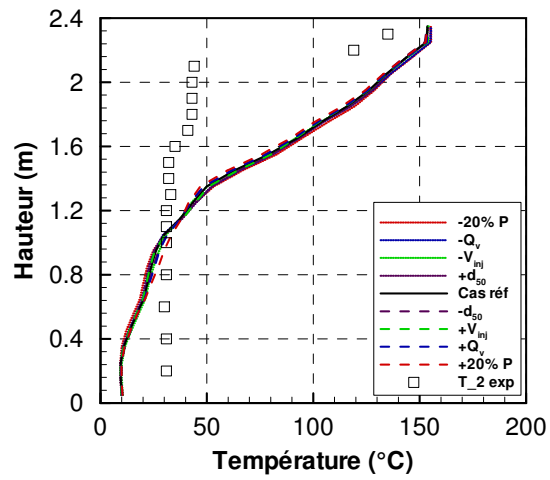
En résumé, la gamme de variation de $\pm 20\%$ de la pression n'a pas beaucoup d'influence sur le refroidissement de l'environnement enfumé. On peut noter tout de même que l'augmentation de la pression tend à augmenter légèrement le refroidissement tandis que la diminution de la pression produit l'effet inverse. Ces phénomènes semblent principalement induits par le fait que les diamètres et les débits sont eux-mêmes modifiés.

La part d'incertitude la plus importante est liée au diamètre des gouttes pulvérisées. Ce paramètre peut avoir un impact très important sur le refroidissement et donc la déstratification de

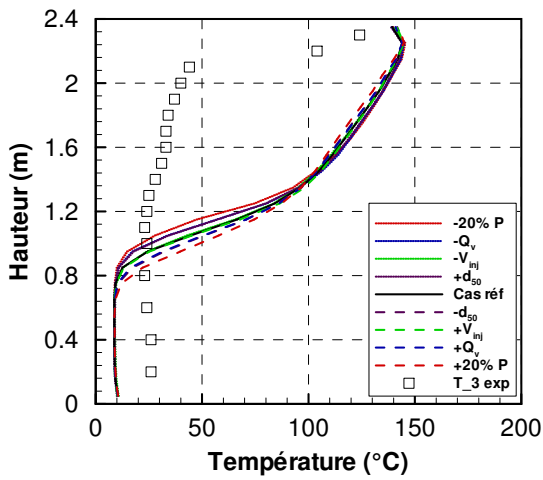
l'environnement enfumé. Trois nouveaux tests sont faits en pulvérisant des diamètres de gouttes de 300, 500 et 800 μm . Il semble qu'un diamètre de gouttes proche de 500 μm apporte une meilleure concordance entre les profils de température numériques et expérimentaux. L'étude de sensibilité au diamètre sur le spray seul avait conduit à considérer un diamètre pour le sprinkler BP de moins de 735 μm (paragraphe 5.2.1). L'étude de la transmission en spray seul et du refroidissement vont dans le même sens pour l'estimation de la taille des gouttes pulvérisées par le sprinkler BP (Figure 5.15).



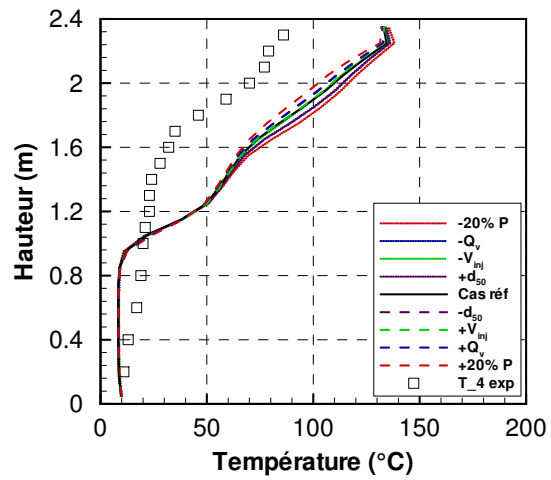
(a) Section 1



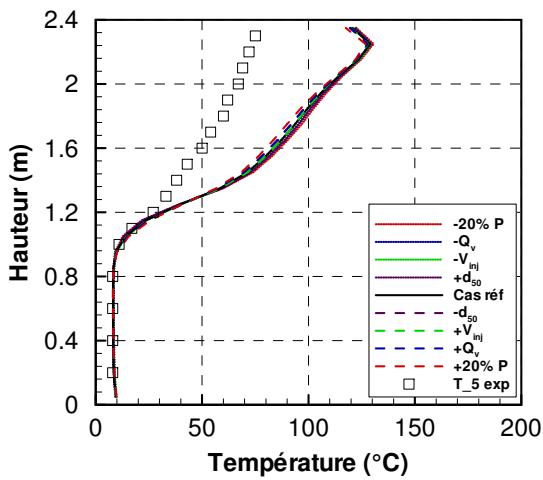
(b) Section 2



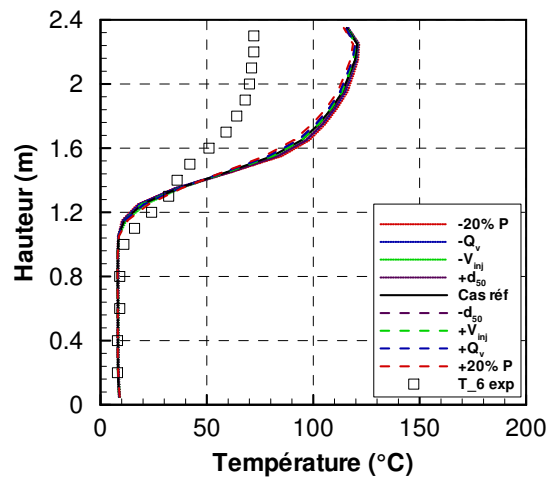
(c) Section 3



(d) Section 4



(e) Section 5



(f) Section 6

FIGURE 5.14 – Profils moyens de température extraits de FDS durant le temps d'aspersion par Sprinkler BP comparés aux profils de température expérimentaux mesurés

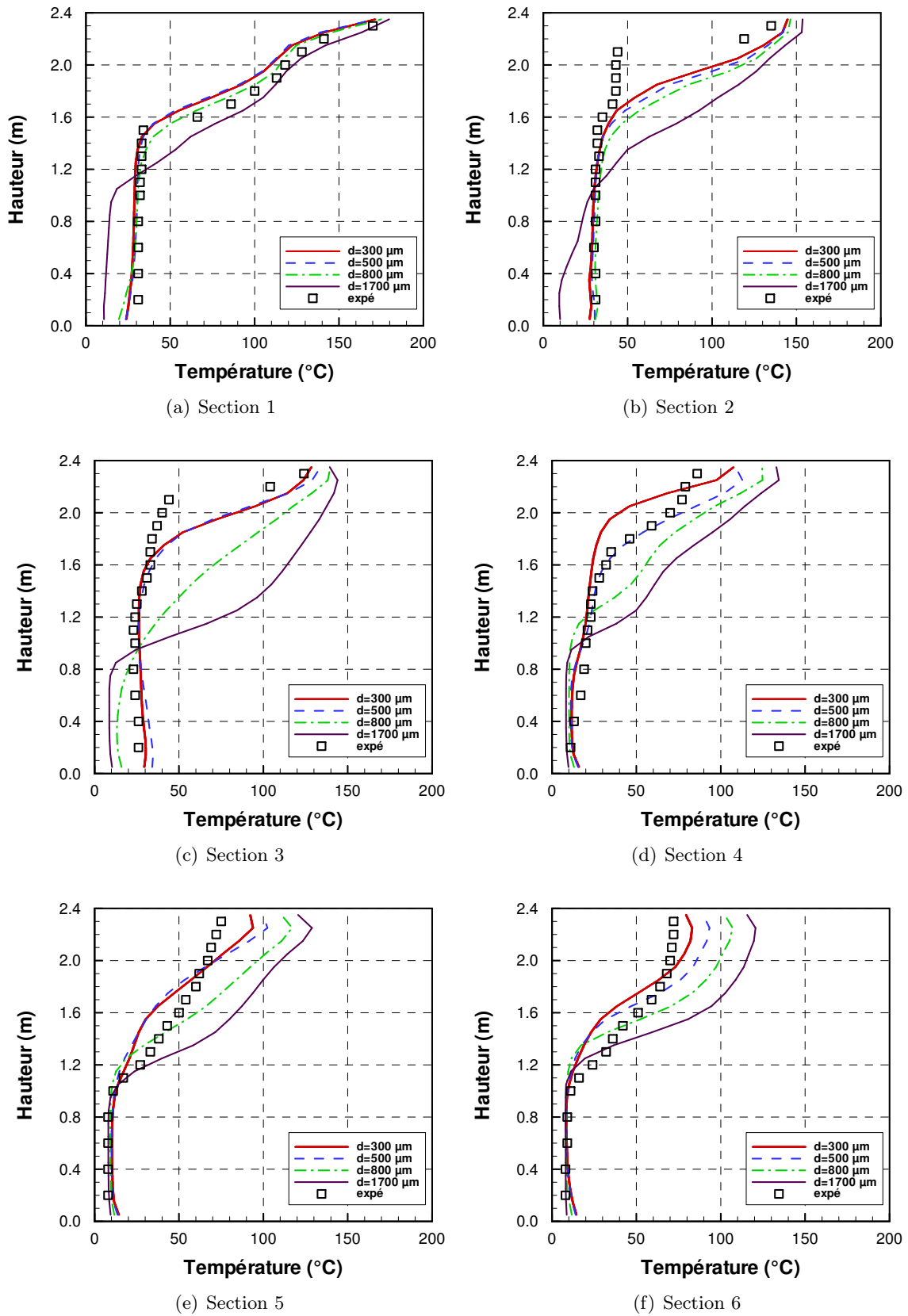


FIGURE 5.15 – Profils moyens de température extraits de FDS durant la phase d'aspersion par Sprinkler BP pour différentes tailles de gouttes

5.4.1.3 Opacification

L'opacification du milieu est attribuée à l'absorption par la fumée d'une part et d'autre part à la diffusion majoritairement par les gouttes d'eau. Pour la diffusion dans le spectre visible, le diamètre des gouttes et la proportion en eau dans le milieu sont les deux paramètres influents (Section 3.2.5). La concentration en suie, la quantité d'eau et le diamètre des gouttes en suspension sont calculés par FDS.

Les profils sur la Figure 5.16 sont extraits de FDS et utilisés pour le calcul de la visibilité au travers du milieu semi-transparent. Les diamètres de gouttes sont compris entre 1400 et 1600 μm du sol au plafond au niveau de la section 2. La concentration en eau est relativement homogène autour de $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^3$ entre 0 et 1,6 m dans le couloir. Cette zone est située directement dans le spray. En section 4, la concentration en eau est nulle au-dessus de 0,8 m du sol et est inférieure à $2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$ en-dessous. Les profils de concentration en suie sont comparables en sections 2 et 4 la valeur moyenne étant de $1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{m}^3$ au-dessus de 1,2 m (dans la couche de fumée).

Les valeurs de fraction volumique en suie et en eau et les diamètres extraits de FDS au niveau des points de mesure des sections 2 et 4 sont utilisés pour calculer les coefficients de diffusion et d'absorption par la théorie de Mie et l'approximation de Rayleigh (Tableau 5.11 et Tableau 5.12). Le flux transmis au travers du milieu est calculé par la méthode de Monte Carlo en considérant une émission des quanta quasi unidirectionnelle afin de représenter l'émission laser.

En section 2, la transmittance évaluée numériquement sur la base des fractions volumiques et des diamètres de goutte est d'environ 0,7 au-dessus de 1,2 m (Figure 5.17). De 0,4 à 1,0 m un gradient de transmittance entre 0,96 et 0,71 est observé. Ce gradient indique que la fumée est entraînée par l'aspersion jusqu'à 0,4 m. Expérimentalement au niveau de cette section située à 50 cm de la tête sprinkler, le milieu enfumé est brassé par la pulvérisation d'eau. La fumée et les gouttes se trouvent sur toute la hauteur d'où la transmittance réduite à 0,8.

En section 4, la transmittance sous 0,8 m est égale à 1. En partie haute, la transmittance diminue et est de 0,7. Le gradient de transmittance est observé ce qui indique que la stratification optique est conservée 2,5 m en aval de l'aspersion. Les valeurs numériques de transmittances sont inférieures aux mesures faites durant l'essai. La différence observée entre les profils numériques et expérimentaux dans la couche de fumée est identique à la différence avant aspersion.

Les flux transmis donnent une bonne indication de l'atténuation du rayonnement et des effets de déstratification, notamment sur l'entraînement de la fumée vers la partie basse. La quantification de la distance de visibilité est faite par l'étude de la notion de contraste. Dans un premier temps, le volume du couloir est découpé en deux parties appelés Milieux Homogènes Équivalents bas et haut respectivement MHE_{qbas} et $\text{MHE}_{\text{qhaut}}$. Les coefficients spectraux de diffusion et d'absorption moyens sont calculés sur la base des diamètres de Sauter des gouttes et des fractions volumiques en eau et en suies dans la partie basse entre 0 et 1,19 m du sol et en partie haute entre 1,2 et 2,4 m du sol. Les caractéristiques des deux volumes de calcul sont données dans le Tableau 5.13 pour la partie inférieure et le Tableau 5.14 pour la partie supérieure. La fonction d'étalement du point (PSF) est calculée pour les deux milieux bas et haut et elle est appliquée à la Mire de résolution présentée dans le Chapitre 3.

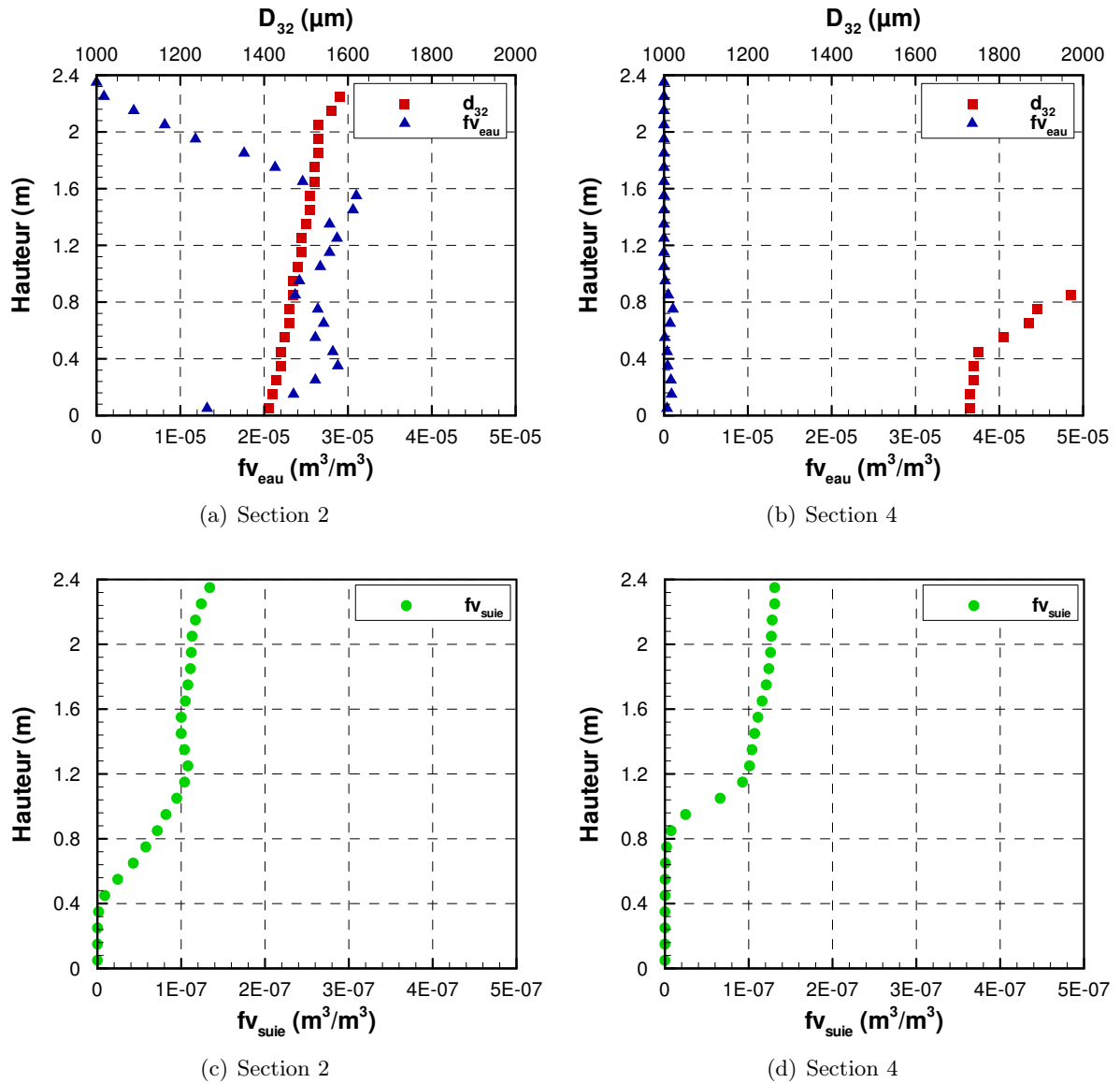


FIGURE 5.16 – Profils de diamètres de Sauter, de fractions volumiques en eau et suie extraits de FDS durant l’aspersion par sprinkler BP sur le milieu enfumé

Le contraste est calculé pour tous les éléments de la Mire. L’évolution du contraste en fonction de la distance optique L pour la partie basse et la partie haute est présentée sur la Figure 5.18 pour 4 éléments de résolution de la Mire. Sur un chemin optique de 9 m, le contraste n’atteint pas le seuil de 0,02 utilisé pour estimer la distance de visibilité. Cette méthode suppose que le flux reçu par l’observateur est suffisamment important pour être vu. Or, la transmission calculée sur un chemin optique L de 9 m est de 3,5 % en partie basse et de seulement 0,0015 % en partie haute ce qui peut indiquer que l’intensité lumineuse reçue par l’observateur est en-dessous de la limite de visibilité. Afin de compléter la démarche, il serait nécessaire de tenir compte de l’intensité lumineuse. D’après la corrélation de Jin, la distance de visibilité pour un panneau lumineux de type BAES est de plus de 15 m pour le $MHE_{q_{bas}}$ de coefficient d’extinction moyen égale à $0,35 \text{ m}^{-1}$ et de 6 m pour le $MHE_{q_{haut}}$ de coefficient d’extinction moyen égale à $1,24 \text{ m}^{-1}$.

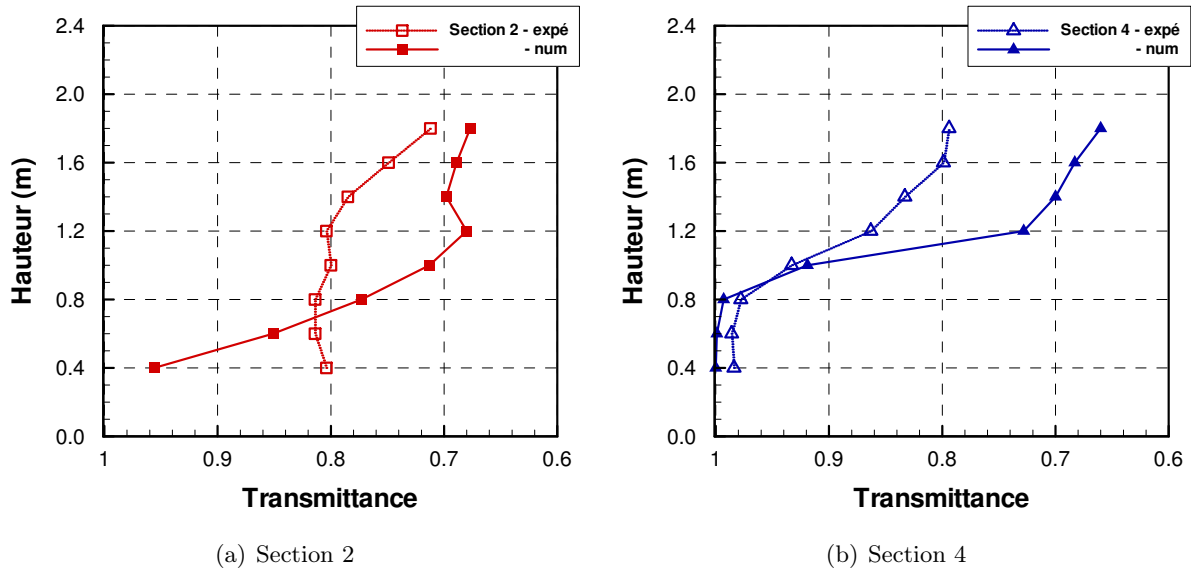


FIGURE 5.17 – Profils de transmittance évaluée numériquement sur la base des fractions volumiques et du diamètre de goutte comparés aux profils expérimentaux : sprinkler BP

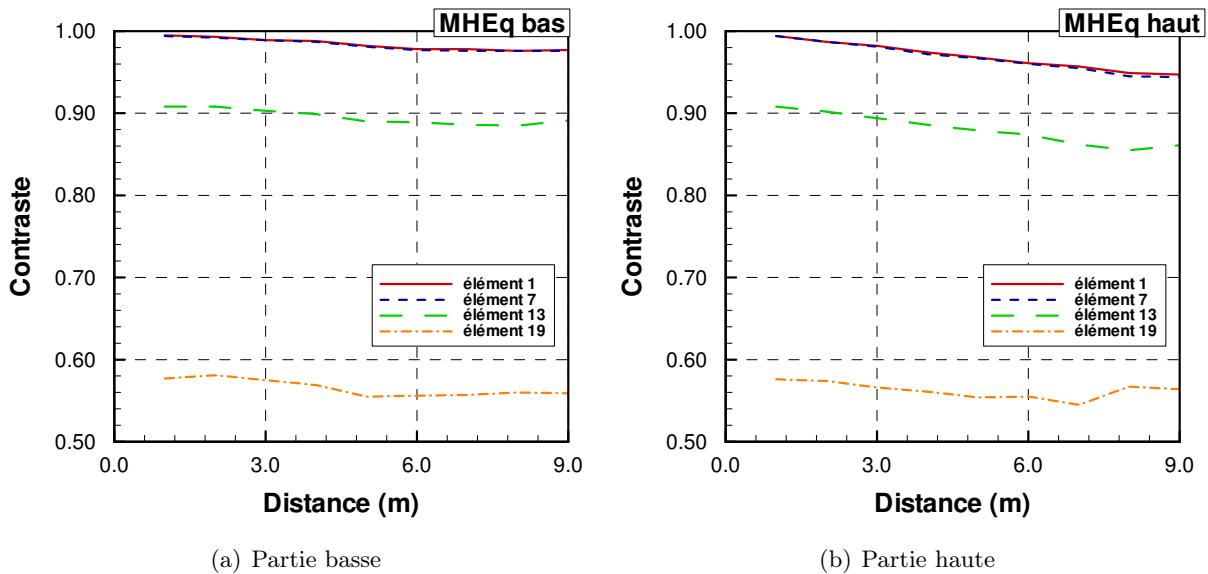


FIGURE 5.18 – Évolution du contraste en fonction de l'épaisseur du milieu homogène équivalent pour les parties basse et haute du couloir durant l'aspersion par sprinkler BP

La Figure 5.19 présente l'image reconstruite d'un BAES vu au travers d'un milieu de 3 épaisseurs optiques différentes. Les coefficients d'extinction considérés sont de $0,35 \text{ m}^{-1}$ pour la partie basse et de $1,24 \text{ m}^{-1}$ pour la partie haute. L'échelle est adaptée en fonction de l'intensité lumineuse afin de mettre en évidence l'évolution du contraste de l'objet en fonction de l'éloignement de l'observateur. En partie basse, le contraste calculé entre le BAES et le fond est de 0,98 à 3 m, de 0,97 à 6 m et de 0,96 à 9 m. En partie haute, le contraste calculé entre le BAES et le fond est de 0,97 à 3 m, de 0,94 à 6 m et de 0,92 à 9 m. La valeur de contraste ne passe jamais en-dessous

de la valeur seuil de 0,02. Cependant, l'intensité lumineuse diminue et la Figure 5.20 montre le BAES tel qu'il est perçu au travers du milieu fumée-gouttes. En partie basse, le BAES peut être vu jusqu'à 9 m au travers du milieu bien que l'image reconstruite devienne plus sombre. En partie haute, à partir de 6 m, l'intensité lumineuse reçue n'est plus suffisante pour être analysée par l'œil. Dans ce cas, l'absorption joue un rôle important dans la perte de visibilité.

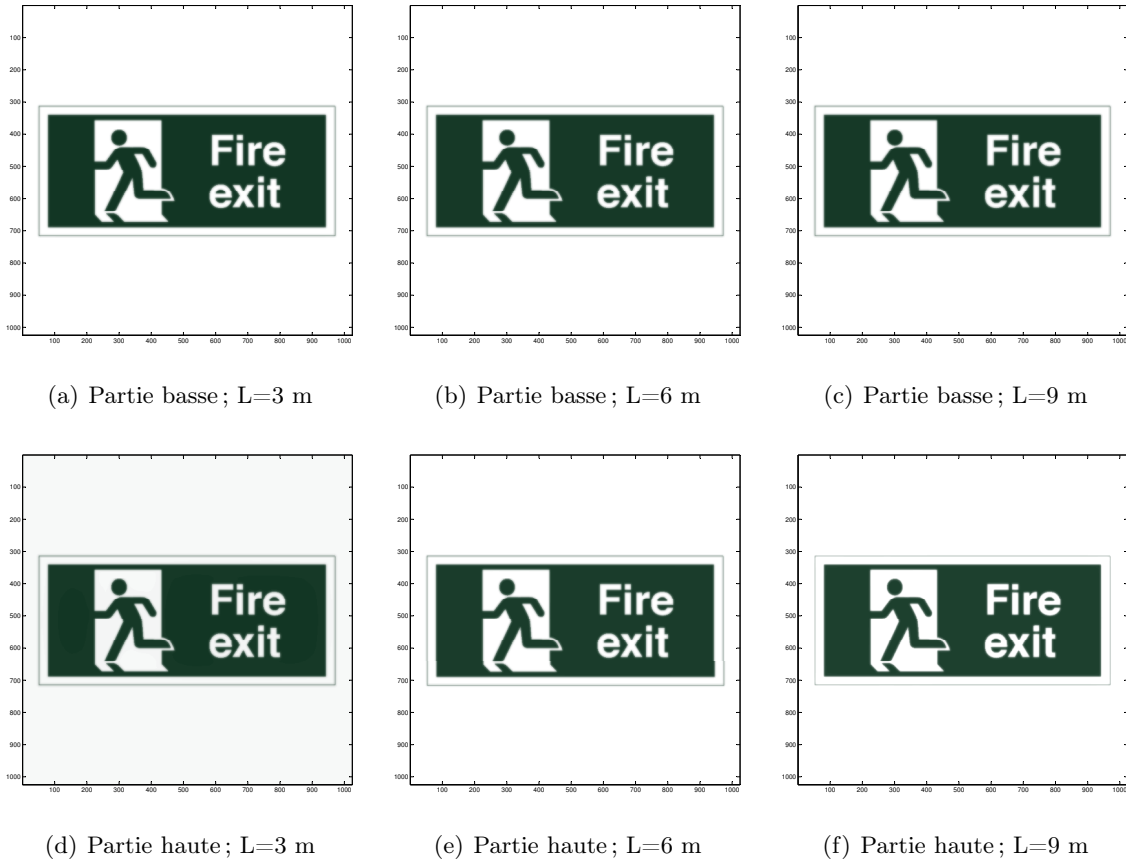
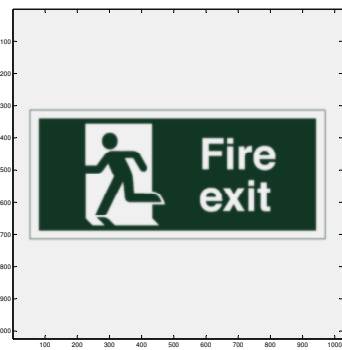


FIGURE 5.19 – BAES vu au travers de trois épaisseurs de milieu absorbant et diffusant en partie basse et haute du couloir durant l'aspersion par sprinkler BP : échelle mettant en avant la notion de contraste

L'image d'un second type de BAES utilisé dans les bâtiments en France est reconstruite afin d'évaluer l'influence du motif inscrit sur le panneau dans le calcul du contraste (Figure 5.21). Le Tableau 5.15 permet de comparer les valeurs de contraste entre les deux types de blocs lumineux. Les contrastes calculés pour les deux panneaux sont très proches. L'un ou l'autre des panneaux pourraient être utilisé pour le guidage des personnes hors du bâtiment.



(a) Partie basse ; L=3 m



(b) Partie basse ; L=6 m



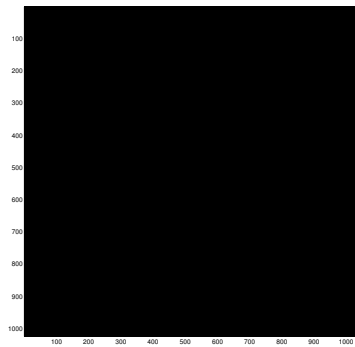
(c) Partie basse ; L=9 m



(d) Partie haute ; L=3 m



(e) Partie haute ; L=6 m



(f) Partie haute ; L=9 m

FIGURE 5.20 – BAES vu au travers de trois épaisseurs de milieu absorbant et diffusant en partie basse et haute du couloir durant l’aspersion par sprinkler BP : échelle tenant compte de l’intensité lumineuse

Section	Hauteur (m)	0,4	0,6	0,8	1,0
2	f_v suies (m^3/m^3)	8.78E-09	4.28E-08	7.15E-08	9.47E-08
	f_v eau (m^3/m^3)	2.82E-05	2.71E-05	2.37E-05	2.67E-05
	d_{32} (μm)	1444	1456	1471	1483
	κ (m^{-1})	0.08	0.37	0.61	0.81
	σ (m^{-1})	0.08	0.18	0.25	0.33
	Flux transmis	0.96	0.85	0.77	0.71
4	f_v suies (m^3/m^3)	1.09E-10	2.83E-10	2.02E-09	2.47E-08
	f_v eau (m^3/m^3)	3.77E-07	7.21E-07	5.06E-07	7.06E-09
	d_{32} (μm)	1753	1870	1967	2309
	κ (m^{-1})	0.00	0.00	0.02	0.21
	σ (m^{-1})	0.00	0.00	0.01	0.07
	Flux transmis	1.00	1.00	0.99	0.92

TABLEAU 5.11 – Valeurs de diamètre de Sauter et de concentration en suies et en eau extraites de FDS dans le cas de la pulvérisation par sprinkler BP sur la nappe de fumée - Calcul des coefficients d'absorption et de diffusion et du flux transmis : partie basse

Section	Hauteur (m)	1,2	1,4	1,6	1,8
2	f_v suies (m^3/m^3)	1.08E-07	1.00E-07	1.05E-07	1.11E-07
	f_v eau (m^3/m^3)	2.87E-05	3.06E-05	2.46E-05	1.76E-05
	d_{32} (μm)	1494	1509	1515	1527
	κ (m^{-1})	0.93	0.86	0.90	0.95
	σ (m^{-1})	0.37	0.35	0.35	0.35
	Flux transmis	0.68	0.70	0.69	0.68
4	f_v suies (m^3/m^3)	9.26E-08	1.04E-07	1.11E-07	1.21E-07
	f_v eau (m^3/m^3)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	d_{32} (μm)	-	-	-	-
	κ (m^{-1})	0.80	0.89	0.95	1.04
	σ (m^{-1})	0.27	0.30	0.32	0.35
	Flux transmis	0.73	0.70	0.68	0.66

TABLEAU 5.12 – Valeurs de diamètre de Sauter et de concentration en suies et en eau extraites de FDS dans le cas de la pulvérisation par sprinkler BP sur la nappe de fumée - Calcul des coefficients d'absorption et de diffusion et du flux transmis : partie haute

MHEq _{bas}				
\bar{f}_v suies (m ³ /m ³)	\bar{f}_v eau (m ³ /m ³)	\bar{d}_{32} (μm)	$\bar{\sigma}$ (m ⁻¹)	$\bar{\kappa}$ (m ⁻¹)
3,06E-08	1,34E-05	1720	0,11	0,26

TABLEAU 5.13 – Propriétés du milieu homogène équivalent de la partie basse du couloir pour le sprinkler BP

MHEq _{haut}				
\bar{f}_v suies (m ³ /m ³)	\bar{f}_v eau (m ³ /m ³)	\bar{d}_{32} (μm)	$\bar{\sigma}$ (m ⁻¹)	$\bar{\kappa}$ (m ⁻¹)
1,06E-07	1,27E-05	1510	0,33	0,91

TABLEAU 5.14 – Propriétés du milieu homogène équivalent de la partie haute du couloir pour le sprinkler BP

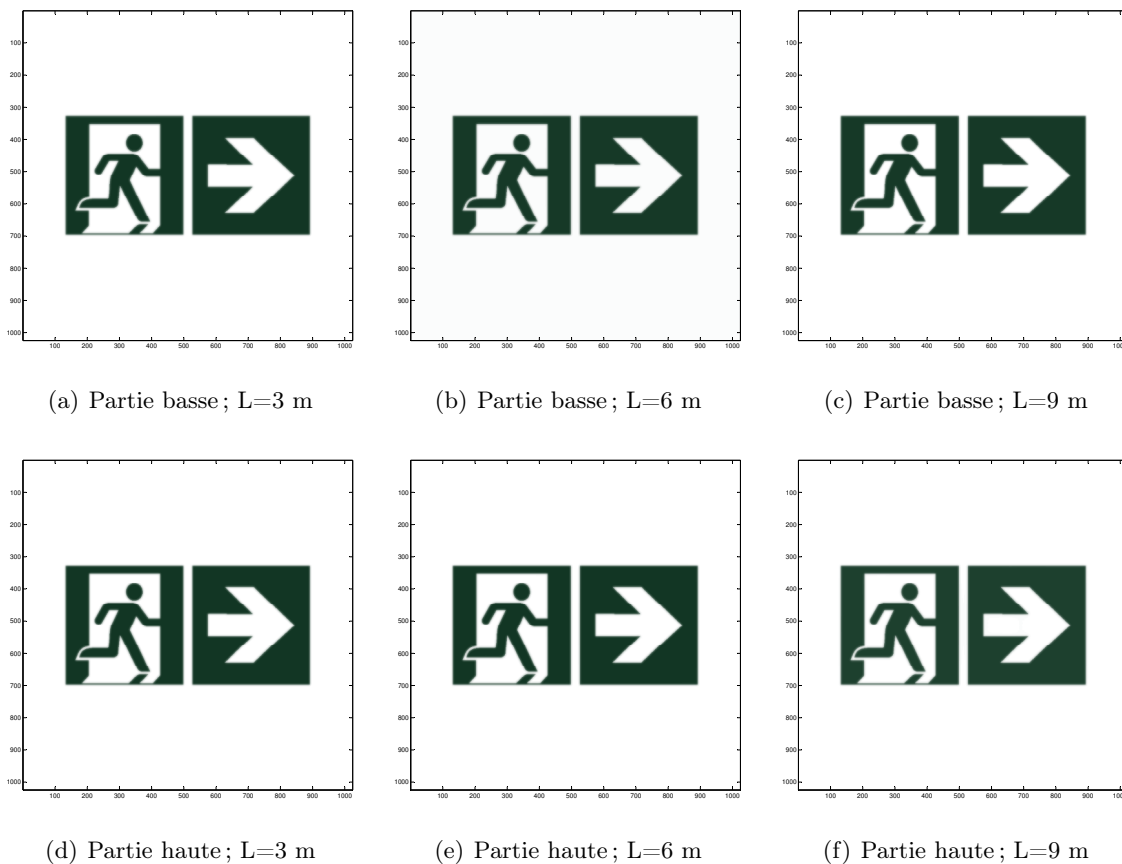


FIGURE 5.21 – Autre type de BAES vu au travers de trois épaisseurs de milieu absorbant et diffusant en partie basse et haute du couloir durant l’aspersion par sprinkler BP : échelle mettant en avant la notion de contraste

Contraste				
Distance		3 m	6 m	9 m
Partie basse	Bloc 1 (<i>Fire Exit</i>)	0,98	0,97	0,96
	Bloc 2 (<i>Flèche</i>)	0,98	0,96	0,96
Partie haute	Bloc 1 (<i>Fire Exit</i>)	0,97	0,94	0,92
	Bloc 2 (<i>Flèche</i>)	0,97	0,93	0,91

TABLEAU 5.15 – Valeurs de contraste pour deux BAES vus au travers d’un milieu semi-transparent contenant de la fumée et des gouttes injectées par le sprinkler BP

5.4.2 Aspersion par sprinkler HP

5.4.2.1 Effet sur l'environnement stratifié

Les deux tiers du couloir autour du point d'injection sont touchés par le déclenchement de l'aspersion (Figure 5.22). En amont de l'aspersion, la fumée (selon les critères thermique et optique) semble entraînée vers la partie basse du couloir et le milieu est totalement brassé (Figure 5.22). En aval de l'aspersion, la zone libre de fumée est conservée. Expérimentalement, le milieu semblait totalement brassé après le déclenchement de l'aspersion par sprinkler HP. L'environnement était noir et opaque traduisant la présence de fumée sur l'ensemble de la hauteur du couloir.

Le sprinkler HP simulé n'a pas d'effet de brassage total du milieu enfumé. La fumée est plaquée par l'injection des gouttes au niveau de la zone d'aspersion et la partie aval reste stratifiée thermiquement. Les fumées continuent d'affluer dans le couloir ce qui est confirmé par les températures en amont de l'aspersion.

5.4.2.2 Refroidissement

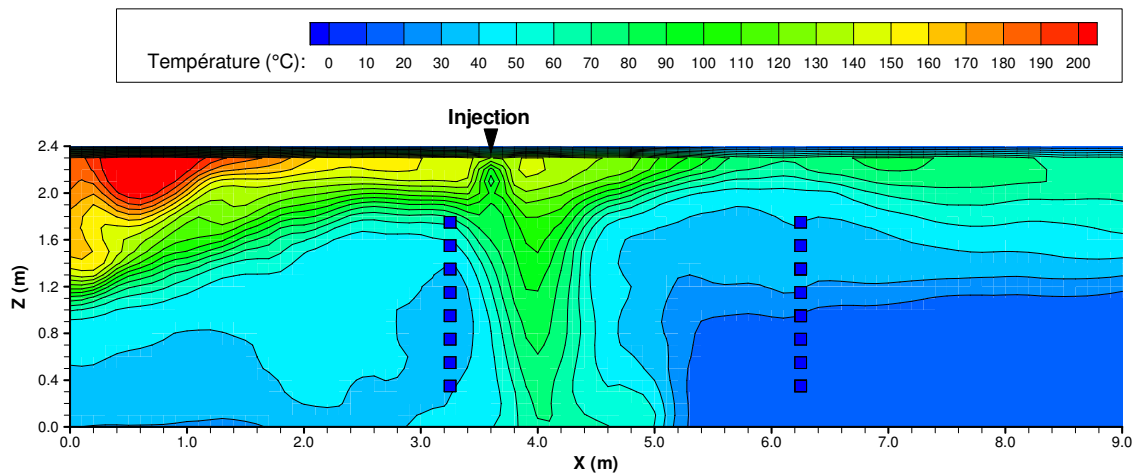
Sur la Figure 5.23 les résultats de simulation du cas nominal, en d'autres termes pour $Q_v=91,9$ L/min, $v_{inj}=12,1$ m/s et $d_{50}=1000$ μ m sont représentés par le trait continu noir. Ces résultats sont ensuite comparés aux résultats expérimentaux représentés par les symboles.

Numériquement, l'ensemble du couloir est affecté par la pulvérisation par sprinkler HP (Figure 5.23). Au niveau de la section 1, la température du milieu en partie basse est plus élevée que celle relevée avant l'aspersion. La température moyenne de 10 °C avant aspersion sous 1,2 m, c'est-à-dire dans la zone libre de fumée passe à 40 °C durant la phase d'aspersion. Le constat est identique au niveau des mesures à 3 m et 4,5 m dans le couloir (sections 2 et 3) sur une hauteur plus élevée, 1,6 m. Sur ces trois sections 1, 2 et 3, une zone plus chaude est observée sous le plafond. En fait, la combustion continue et cette zone de température plus élevée correspond à l'arrivée des fumées dans le couloir. En partie basse de la section 3, la température à 40 cm est plus élevée. L'eau du spray et la fumée impactant le sol créent des retours de fumée dans cette zone située à 1 m en aval de la tête sprinkler.

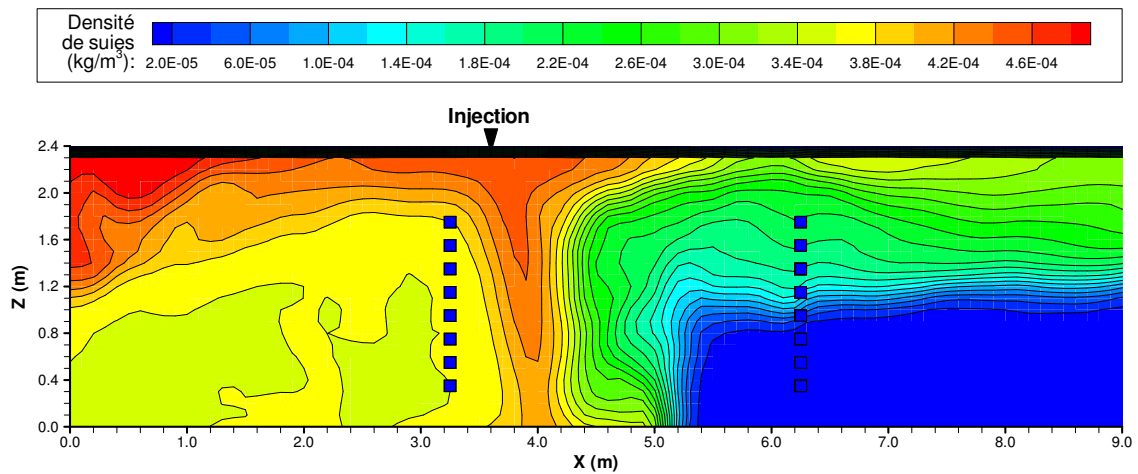
En sections 4, 5 et 6, la température de la fumée est considérablement refroidie, passant de 150 °C avant le déclenchement de l'aspersion à moins de 80 °C durant la phase d'aspersion. La température dans la partie basse est quant à elle plus élevée que la température relevée avant aspersion. Elle décroît à l'approche de la sortie du couloir (section 4 vers 6) du fait de la dépression créée par la fumée sortant et aspirant l'air en partie basse.

Expérimentalement, l'homogénéisation de la température est totale dans le couloir en aval de l'aspersion. En effet, excepté en section 6 où on observe une entrée d'air en partie basse, la température est constante et homogène sur les profils de sections 3, 4 et 5. La température des profils est de 30 °C, le milieu est considérablement refroidi.

Une étude de sensibilité similaire à celle menée pour le sprinkler BP est conduite en faisant varier dans un premier temps la pression de ± 20 % puis dans un second temps chaque paramètre



(a) Température



(b) Concentration en suie

FIGURE 5.22 – Champs de température et de concentration en suie induits par la pulvérisation par sprinkler HP sur le milieu enfumé dans le plan longitudinal médian du couloir (champs moyens durant la phase d’aspersion)

(débit, vitesse ou diamètre) à tour de rôle. Le Tableau 5.16 donne les valeurs des paramètres pour les 9 simulations de l’analyse de sensibilité.

simulation	-20%P	- Q_v	-v	+d	cas réf.	-d	+v	+ Q_v	+20%P
Q_v (L/min)	82,20	82,2	91,90	91,90	91,90	91,90	91,90	100,67	100,67
V (m/s)	10,8	12,1	10,8	12,1	12,1	12,1	13,2	12,1	13,2
d_{v50} (μm)	1080	1000	1000	1080	1000	950	1000	1000	950

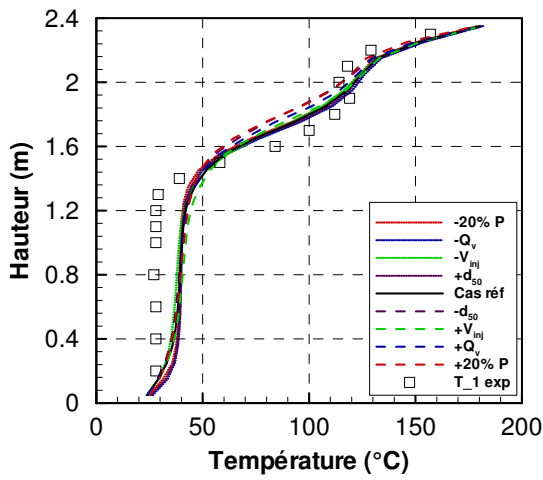
TABLEAU 5.16 – Paramètres pour la modélisation du sprinkler HP pour les 9 simulations de sensibilité

En amont de l'aspersion (1 et 2), la variation des paramètres liés à l'aspersion a peu d'effet sur le refroidissement de l'environnement dans une gamme de pression de $\pm 20\%$ (Figure 5.23). Par exemple en section 2, la température moyenne de couche chaude est de $123\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour le cas nominal tandis qu'elle est de $121\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour une pression réduite de 20% .

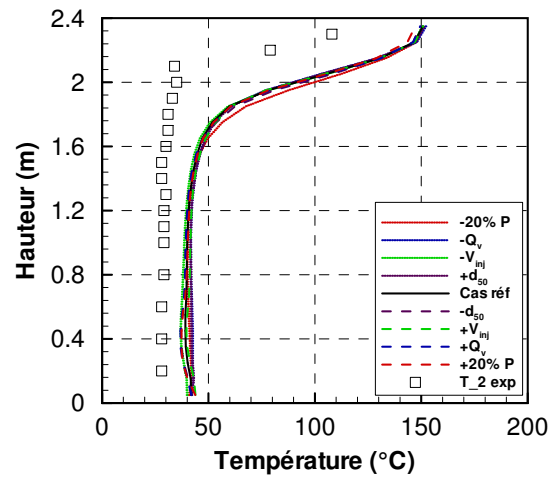
En aval, l'augmentation de la pression d'alimentation contribue à un refroidissement plus important de l'environnement, inversement lorsque la pression est réduite, le refroidissement de l'environnement est moins fort. Cependant, l'effet de la variation n'est pas symétrique par rapport au cas nominal. C'est-à-dire que la différence est plus marquée entre le cas nominal et le cas de la diminution de pression qu'entre le cas nominal et le cas de l'augmentation de la pression.

Le débit et le diamètre de gouttes sont clairement identifiés comme les paramètres moteurs dans le refroidissement de l'environnement (Figure 5.23), la part de ces deux paramètres étant quasiment identique. La vitesse d'injection des gouttes a également un impact mais de faible poids par rapport aux deux premiers paramètres. Les gouttes sont très vite ralenties par les forces de traînée à la sortie de la tête.

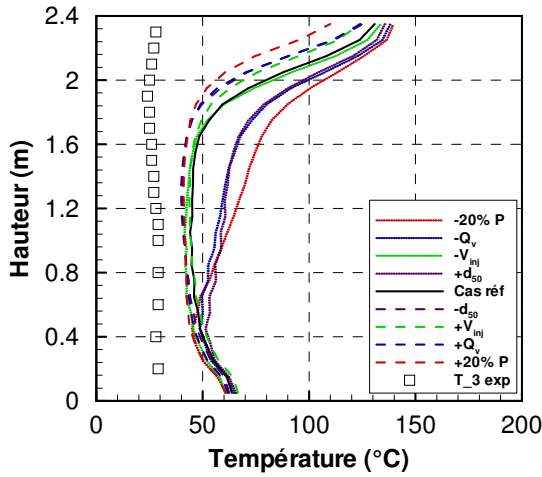
Tout comme pour le sprinkler BP, l'incertitude sur le diamètre des gouttes pulvérisées est particulièrement élevée. D'autres simulations ont été faites en considérant 3 diamètres de gouttes choisis à 300 , 500 et $800\text{ }\mu\text{m}$. Au regard des résultats, il semble qu'un diamètre médian de pulvérisation proche de $300\text{ }\mu\text{m}$ voire moins conduirait à une meilleure concordance entre les résultats numériques et expérimentaux Figure 5.24. L'étude sur le spray seul dans le couloir a montré qu'un diamètre proche de $200\text{ }\mu\text{m}$ permettait d'atteindre le niveau de transmittance mesuré expérimentalement.



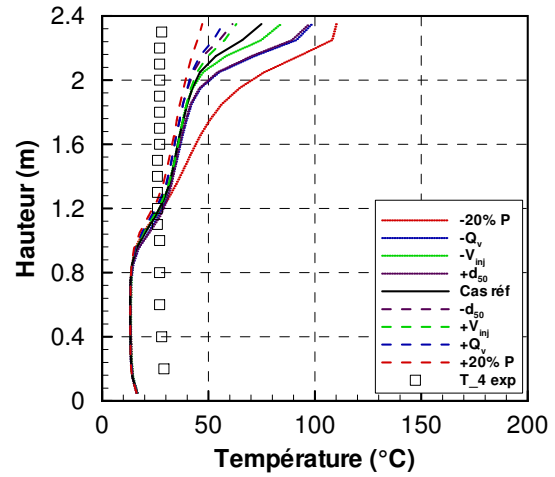
(a) Section 1



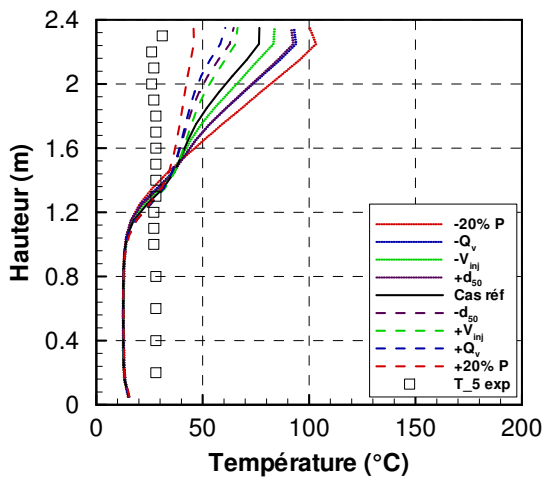
(b) Section 2



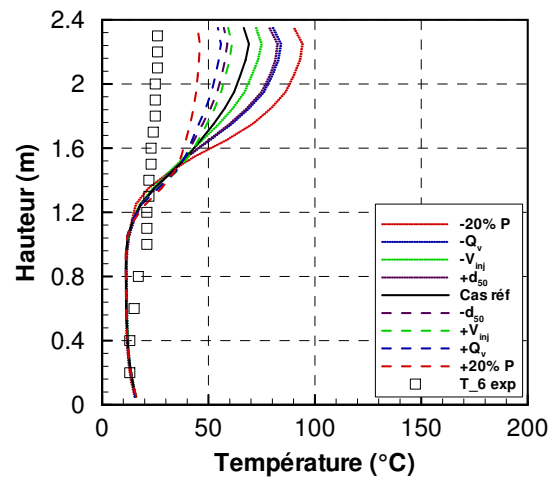
(c) Section 3



(d) Section 4

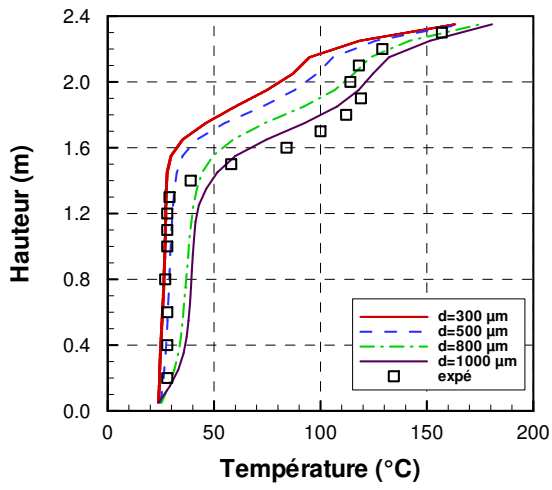


(e) Section 5

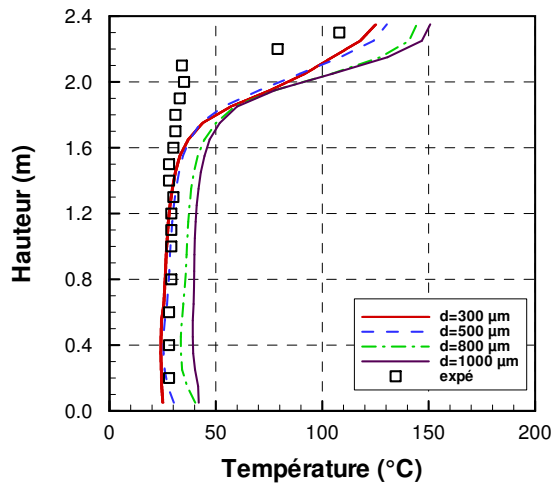


(f) Section 6

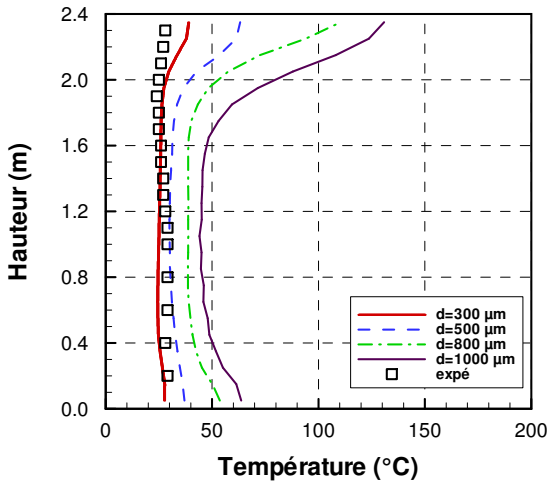
FIGURE 5.23 – Profils moyens de température extraits de FDS durant le temps d'aspersion par Sprinkler HP comparés aux profils de température expérimentaux mesurés



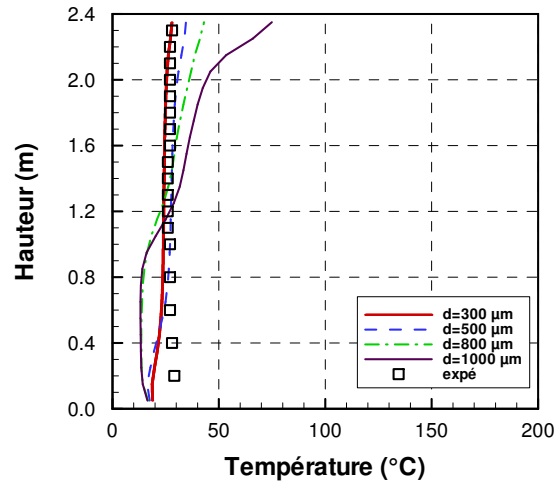
(a) Section 1



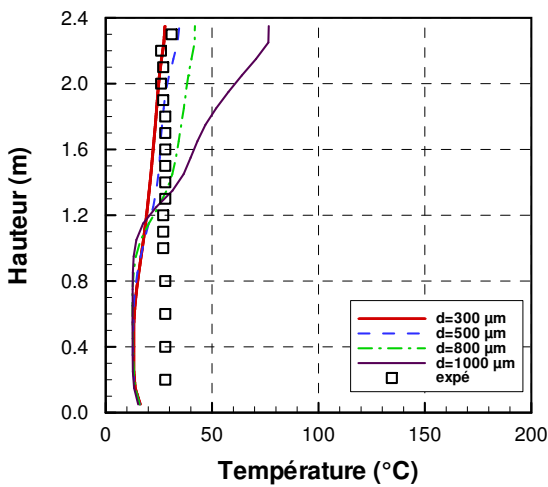
(b) Section 2



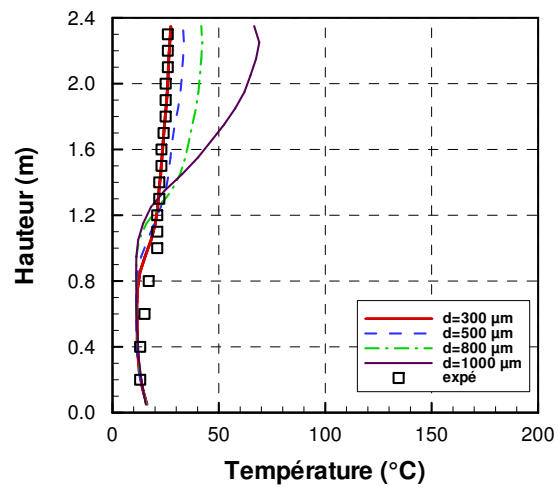
(c) Section 3



(d) Section 4



(e) Section 5



(f) Section 6

FIGURE 5.24 – Profils moyens de température extraits de FDS durant la phase d’aspersion par Sprinkler HP pour différentes tailles de gouttes

5.4.2.3 Opacification

Les profils de diamètres de gouttes et de concentrations calculés par le code FDS sont présentés sur la Figure 5.25. Les valeurs moyennes de diamètre sont comprises entre 750 et 900 μm en section 2 et supérieures à 1000 voire 1600 μm pour une valeur en section 4. Les diamètres moyens de goutte sont plus faibles en amont de l'aspersion (section 2) qu'en aval (section 4). La forme du profil de concentration en eau en section 2 laisse penser que la section 2 sous 1,6 m est située dans le spray. Sous 1,6 m, la valeur de concentration en eau est de l'ordre de $4.10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^3$. Les profils de concentration en suie ont deux allures différentes en amont et en aval de l'aspersion. L'homogénéisation est visible sur la section 2 avec en moyenne $2,3.10^{-7} \text{ m}^3/\text{m}^3$ en fraction volumique de suie. En section 4, le caractère stratifié observé thermiquement est confirmé par la valeur de fraction volumique de suies. En partie haute, la fraction volumique de suies est comprise entre 1.10^{-7} et $2.10^{-7} \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Les valeurs de fractions volumiques en suie et en eau et les diamètres de gouttes sont utilisés pour le calcul des coefficients de diffusion et d'absorption (Tableau 5.17 et Tableau 5.18). Le flux transmis est calculé par la méthode de Monte-Carlo en considérant une émission unidirectionnelle et une surface réceptrice de 30 mm^2 correspondante à la taille de la lentille réceptrice (Chapitre 2).

La transmittance calculée en section 2 est constante sur les hauteurs comprise entre 0,4 et 1,8 m (Figure 5.26), environ 0,45. L'atténuation due au brassage est importante. Expérimentalement, le milieu n'est pas totalement homogène et la transmittance est réduite significativement en partie haute par rapport à la partie basse. En effet, le gradient de transmittance est compris entre 0,68 à 0,4 m et 0,36 à 1,6 m. La transmittance est plus élevée à 1,8 m, environ 0,48. La partie située sous 1,6 m se trouve probablement dans le cône d'aspersion tandis que la mesure à 1,8 m ne voit que les fumées (moins de diffusion donc moins d'atténuation).

En section 4 le milieu reste stratifié en transmittance. En effet, la transmittance est égale à 1 sous 80 cm. Expérimentalement, le milieu est complètement mélangé en section 4. La transmittance est quasiment constante sur la hauteur entre 0,75 et 0,80.

Tout comme pour le sprinkler BP, la quantification de la distance de visibilité est faite par l'étude de la notion de contraste et d'intensité lumineuse limite reçue. Le couloir est découpé en deux volumes appelés Milieux Homogènes Équivalents bas et haut respectivement MHE_{qbas} et $\text{MHE}_{\text{qhaut}}$. Les coefficients spectraux de diffusions et d'absorption moyens sont calculés dans la partie basse entre 0 et 1,19 m du sol et en partie haute entre 1,2 et 2,4 m du sol. Les caractéristiques des deux volumes de calcul sont donnés dans le Tableau 5.20. La fonction d'étalement du point (PSF) est calculée pour les deux milieux et elle est appliquée à la Mire de résolution présentée dans le Chapitre 3.

Le contraste est calculé pour tous les éléments de la Mire. L'évolution du contraste en fonction de la distance optique pour la partie basse et haute est présentée sur la Figure 5.27 pour 4 éléments de résolution de la Mire. Comme pour le sprinkler BP, le contraste calculé sur la Mire n'atteint pas le seuil de 0,02 utilisé pour l'estimation de la distance de visibilité. En supposant que l'intensité lumineuse reçue par l'œil soit suffisante, une personne serait en mesure de lire et voire un panneau lumineux situé dans le couloir à une distance de 9 m minimum. À noter que la transmission calculée sur un chemin optique de 9 m est de près de $4.10^{-4} \%$ en partie basse et proche de 0 % en partie haute. D'après la corrélation de Jin, la distance de visibilité est de

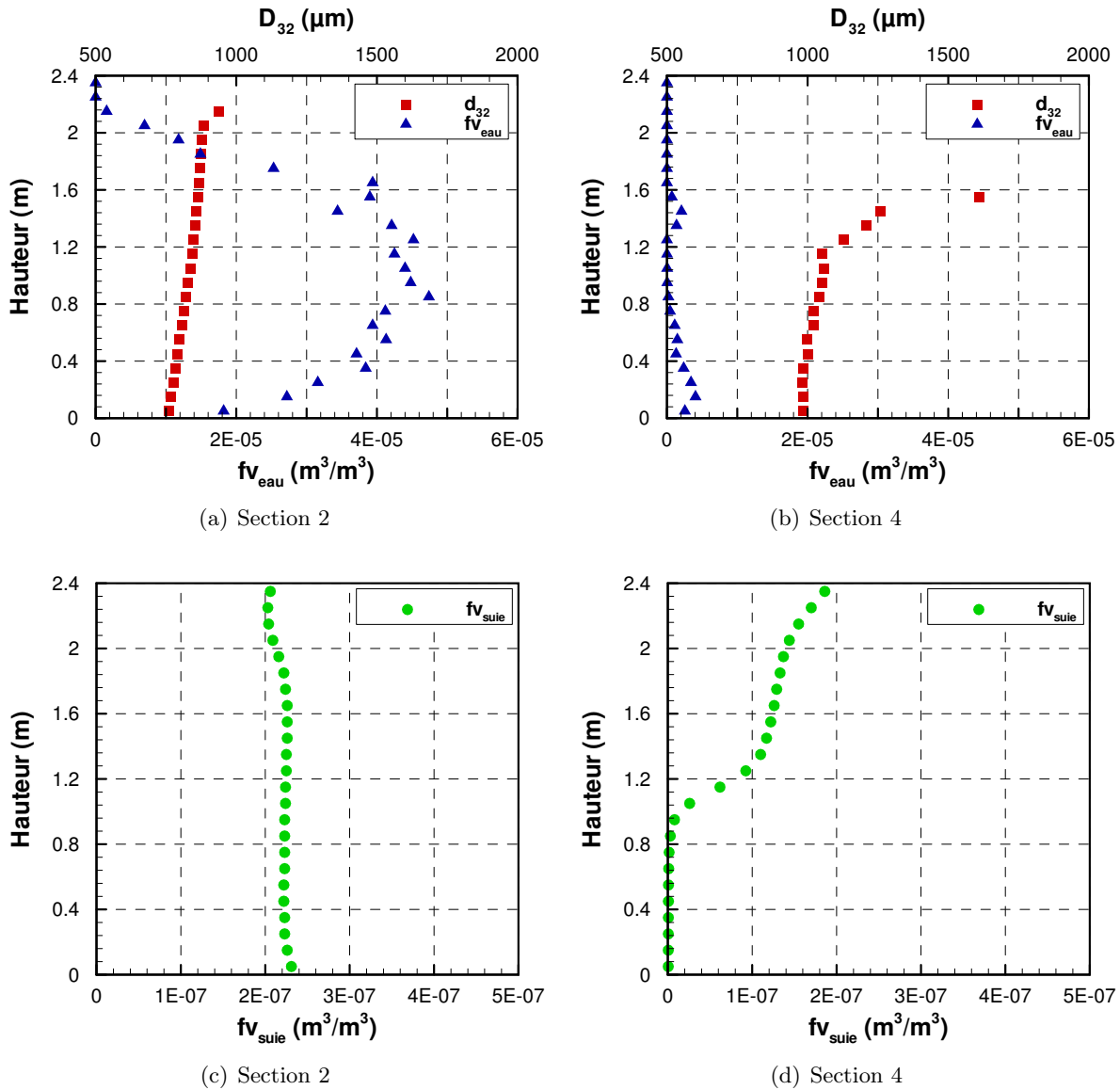


FIGURE 5.25 – Profils de diamètres de Sauter, de fractions volumiques en eau et suie extraits de FDS durant l’aspersion par sprinkler HP sur le milieu enfumé

5,8 m pour le $MHEq_{\text{bas}}$ et de 4 m pour le $MHEq_{\text{haut}}$ en se basant sur les coefficients d’extinction et calculés par la théorie de Mie ($\beta=1,39$ et $\beta=2,01$ respectivement en bas et en haut).

L’image reconstruite d’un BAES est représentée sur la Figure 5.28 pour 3 épaisseurs de milieu et pour les parties basse (a à c) et haute (d à f) du couloir. L’échelle d’intensité lumineuse est adaptée pour permettre d’observer le contraste de l’image. En partie basse, le contraste calculé entre le BAES et le fond est de 0,95 à 3 m, de 0,90 à 6 m et de 0,87 à 9 m. En partie haute, le contraste calculé est de 0,94 à 3 m, de 0,86 à 6 m et de 0,80 à 9 m. De même que pour le sprinkler BP, le contraste n’atteint pas le seuil de visibilité. Cependant, la Figure 5.29 permet de mettre en évidence l’effet de l’absorption du flux transmis lorsque l’on s’éloigne de l’objet dans le couloir. En partie basse, la distance de visibilité doit être comprise entre 3 et 6 m de distance

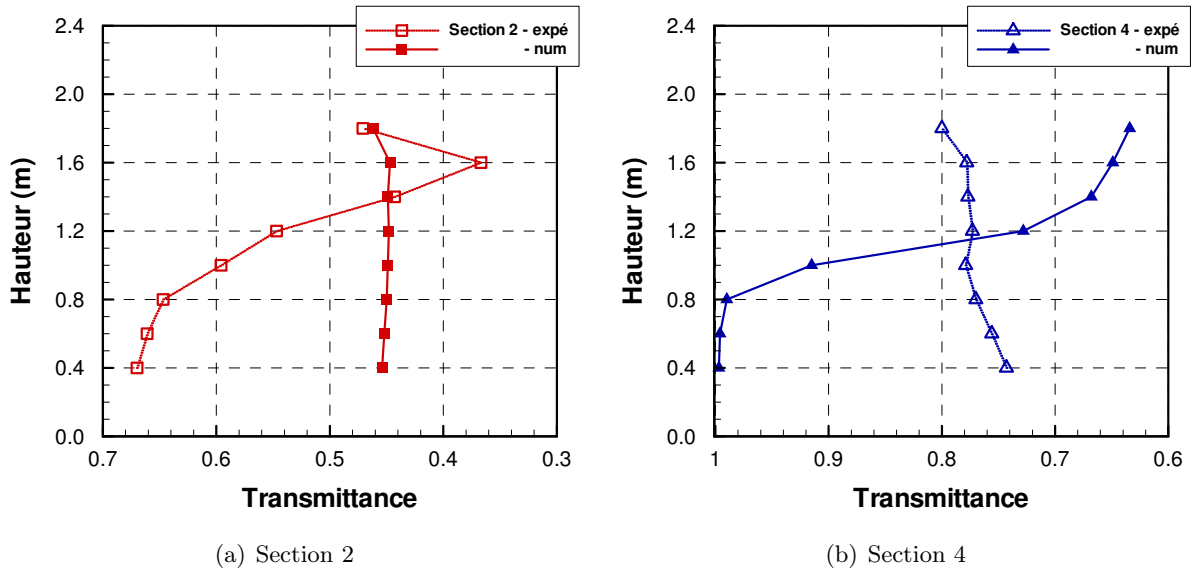


FIGURE 5.26 – Profils de transmittance évaluée numériquement sur la base des fractions volumiques et du diamètre de goutte comparés aux profils expérimentaux : sprinkler HP

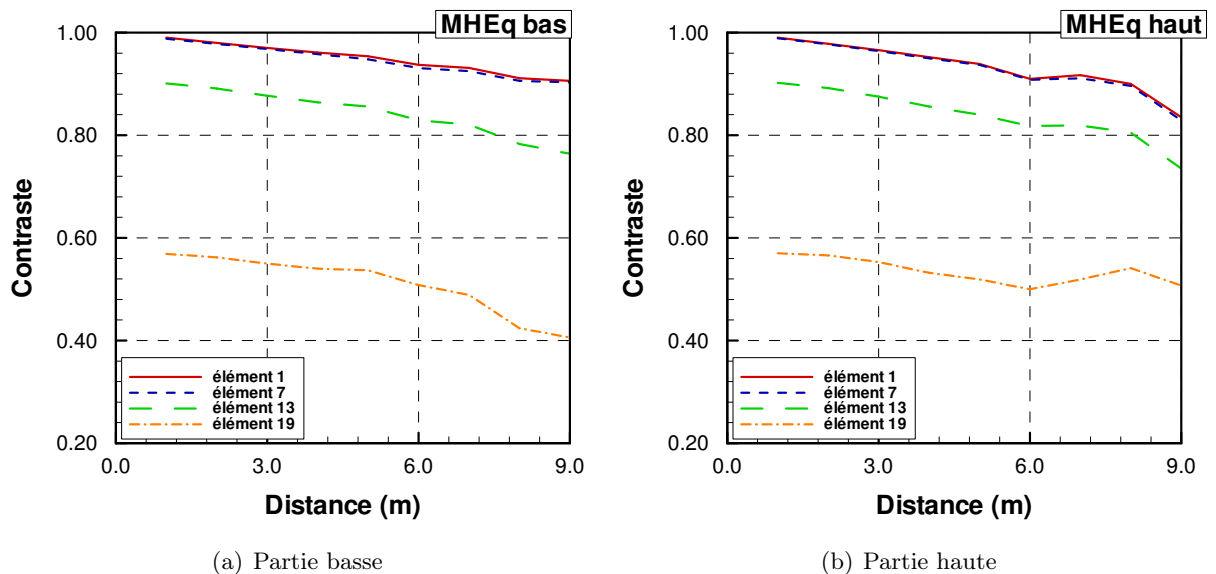


FIGURE 5.27 – Évolution du contraste en fonction de l'épaisseur du milieu homogène équivalent pour les parties basse et haute du couloir durant l'aspersion par sprinkler HP

alors que le panneau en partie haute est à peine visible à 3 m. Ces valeurs sont en accord avec la corrélation de Jin.

De la même manière que pour le sprinkler BP, un autre Bloc Autonome d'Éclairage de Sécurité est testé (Figure 5.30). Le Tableau 5.21 compare les valeurs de contraste calculées sur les deux panneaux. On peut voir que la différence est assez faible entre les deux BAES. Le choix du bloc de sécurité ne montrerait pas de différence pour le guidage de personnes se trouvant dans

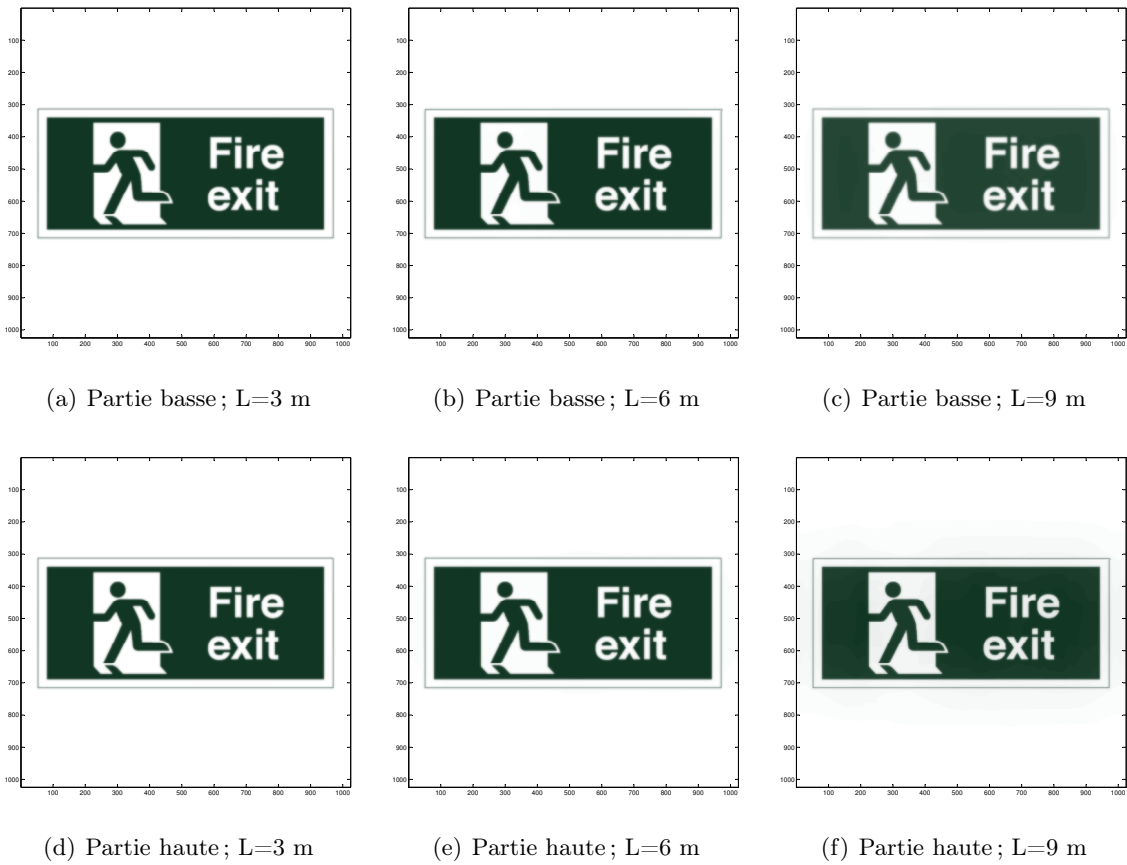


FIGURE 5.28 – BAES vu au travers de trois épaisseurs de milieu absorbant et diffusant en partie basse et haute du couloir durant l’aspersion par sprinkler HP : échelle mettant en avant la notion de contraste

cet environnement de fumée et d’eau.

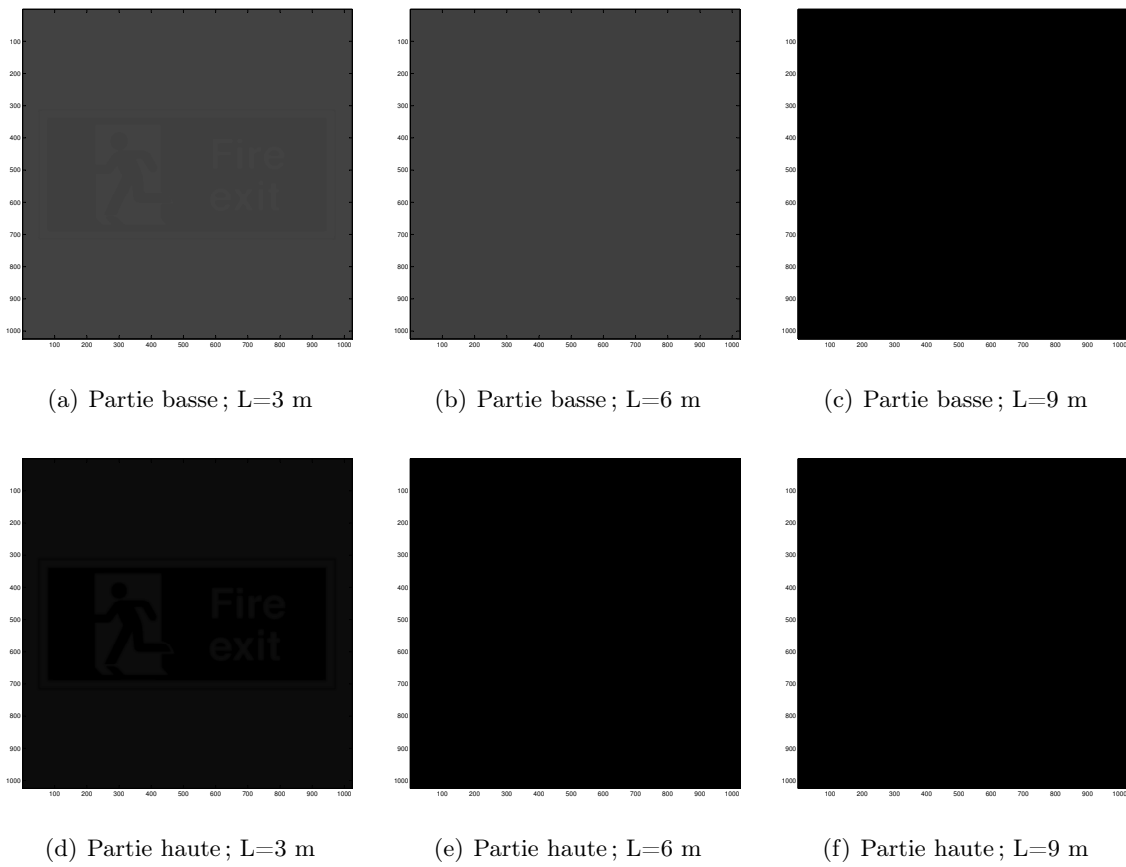


FIGURE 5.29 – BAES vu au travers de trois épaisseurs de milieu absorbant et diffusant en partie basse et haute du couloir durant l’aspersion par sprinkler HP : échelle tenant compte de l’intensité lumineuse

Section	Hauteur (m)	0,4	0,6	0,8	1,0
2	f_v suies (m^3/m^3)	2.22E-07	2.23E-07	2.23E-07	2.24E-07
	f_v eau (m^3/m^3)	3.71E-05	3.94E-05	4.74E-05	4.40E-05
	d_{32} (μm)	792	806	820	837
	κ (m^{-1})	1.91	1.92	1.92	1.93
	σ (m^{-1})	0.78	0.79	0.81	0.80
	Flux transmis	0.45	0.45	0.45	0.45
4	f_v suies (m^3/m^3)	7.18E-10	1.05E-09	3.02E-09	2.59E-08
	f_v eau (m^3/m^3)	1.29E-06	1.11E-06	2.13E-07	2.25E-08
	d_{32} (μm)	1003	1017	1037	1058
	κ (m^{-1})	0.01	0.01	0.03	0.22
	σ (m^{-1})	0.01	0.01	0.01	0.07
	Flux transmis	1.00	1.00	0.99	0.92

TABLEAU 5.17 – Valeurs de diamètre de Sauter et de concentration en suies et en eau extraites de FDS dans le cas de la pulvérisation par sprinkler HP sur la nappe de fumée pour le calcul de la visibilité en partie basse

Section	Hauteur (m)	1,0	1,2	1,4	1,8
2	f_v suies (m^3/m^3)	2.25E-07	2.26E-07	2.26E-07	2.22E-07
	f_v eau (m^3/m^3)	4.52E-05	3.44E-05	3.94E-05	1.49E-05
	d_{32} (μm)	849	857	868	873
	κ (m^{-1})	1.93	1.94	1.94	1.91
	σ (m^{-1})	0.81	0.77	0.78	0.69
	Flux transmis	0.45	0.45	0.45	0.46
4	f_v suies (m^3/m^3)	9.24E-08	1.17E-07	1.26E-07	1.33E-07
	f_v eau (m^3/m^3)	3.62E-10	2.07E-06	0.00E+00	0.00E+00
	d_{32} (μm)	1130	1265	-	-
	κ (m^{-1})	0.79	1.01	1.08	1.14
	σ (m^{-1})	0.27	0.34	0.36	0.38
	Flux transmis	0.73	0.67	0.65	0.63

TABLEAU 5.18 – Valeurs de diamètre de Sauter et de concentration en suies et en eau extraites de FDS dans le cas de la pulvérisation par sprinkler HP sur la nappe de fumée pour le calcul de la visibilité en partie haute

MHEq _{bas}				
\bar{f}_v suies (m ³ /m ³)	\bar{f}_v eau (m ³ /m ³)	\bar{d}_{32} (μm)	$\bar{\sigma}$ (m ⁻¹)	$\bar{\kappa}$ (m ⁻¹)
1,15E-07	2,13E-05	920	0,40	0,99

TABLEAU 5.19 – Propriétés du milieu homogène équivalent de la partie basse du couloir pour le sprinkler HP

MHEq _{haut}				
\bar{f}_v suies (m ³ /m ³)	\bar{f}_v eau (m ³ /m ³)	\bar{d}_{32} (μm)	$\bar{\sigma}$ (m ⁻¹)	$\bar{\kappa}$ (m ⁻¹)
1,71E-07	1,70E-05	974	0,54	1,47

TABLEAU 5.20 – Propriétés du milieu homogène équivalent de la partie haute du couloir pour le sprinkler HP

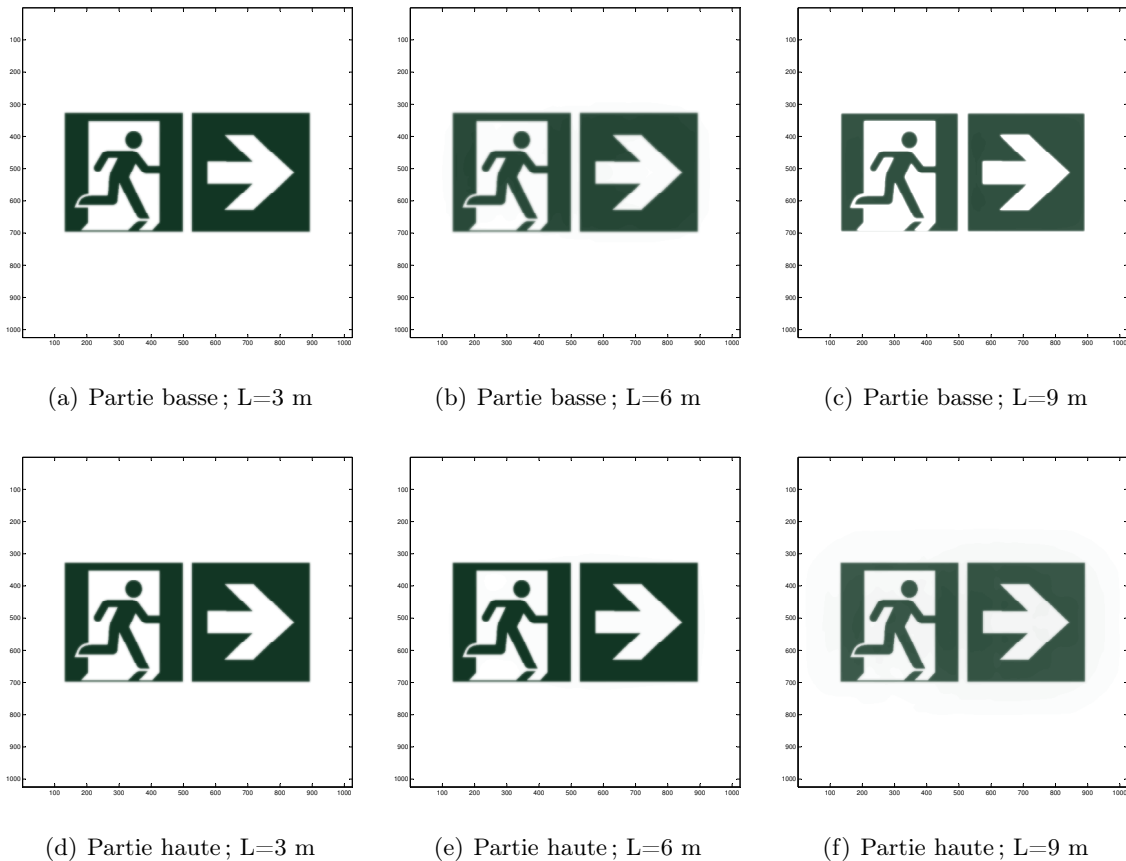


FIGURE 5.30 – Autre type de BAES vu au travers de trois épaisseurs de milieu absorbant et diffusant en partie basse et haute du couloir durant l'aspersion par sprinkler HP : échelle mettant en avant la notion de contraste

		Contraste		
Distance		3 m	6 m	9 m
Partie basse	Bloc 1 (<i>Fire Exit</i>)	0,95	0,90	0,87
	Bloc 2 (<i>Flèche</i>)	0,95	0,89	0,87
Partie haute	Bloc 1 (<i>Fire Exit</i>)	0,94	0,86	0,80
	Bloc 2 (<i>Flèche</i>)	0,94	0,85	0,77

TABLEAU 5.21 – Valeurs de contraste pour deux BAES vus au travers d’un milieu semi-transparent contenant de la fumée et des gouttes injectées par le sprinkler HP

5.4.3 Aspersion par brouillard d'eau

5.4.3.1 Effet sur l'environnement stratifié

L'effet de la pulvérisation est immédiat, la nappe de fumée semble plaquée vers le sol (Figure 5.31). Les petites gouttes pulvérisées par le brouillard sont facilement emportées par l'écoulement de fumée. La fumée, représentée par la fraction massique de suie est également présente dans tout le couloir, y compris en partie basse. L'environnement a été complètement brassé par l'injection par brouillard d'eau, thermiquement et optiquement.

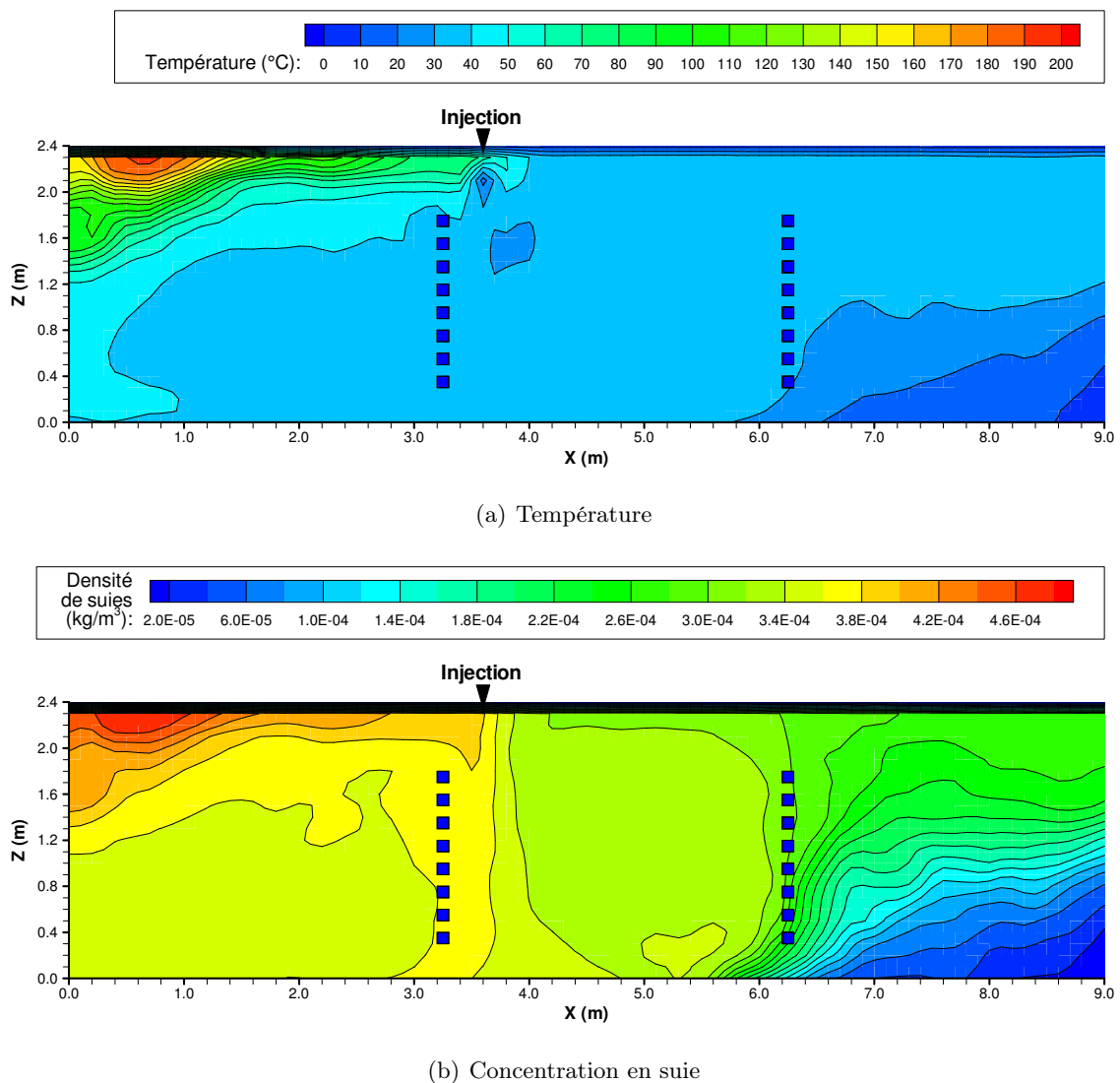


FIGURE 5.31 – Champs de température et de concentration en suie induits par la pulvérisation par brouillard d'eau sur le milieu enfumé dans le plan longitudinal médian du couloir (champs moyens durant la phase d'aspersion)

5.4.3.2 Refroidissement

Numériquement, l'environnement est refroidi dans l'ensemble du couloir (Figure 5.32). En amont de l'aspersion, à 1,5 (section 1) et 3 m (section 2) la température est homogénéisée à 35 °C sous une hauteur de 2 m. En partie haute, une zone chaude est conservée, de moins de 150 °C en section 1 et 100 °C en section 2. Cette partie chaude indique que la production de fumée continue et qu'elle arrive dans le couloir en partie haute avant d'être mélangée à l'air par entraînement et refroidissement.

Au niveau des sections 3 et 4, positionnées en aval de l'aspersion respectivement à 4,5 et 6,0 m dans le couloir, la température est de 35 °C et est constante du sol au plafond. L'environnement est complètement brassé et homogénéisé en température. Au bout du couloir, la partie plus froide en bas observée sur les profils en sections 5 et 6 indique que l'air pénètre dans le couloir par effet de tirage. L'environnement brassé et refroidi par la pulvérisation est toujours plus chaud que l'air et se trouve en partie haute en sortie de couloir.

La concordance entre les résultats expérimentaux et numériques est bonne. En effet, la température homogénéisée dans le couloir est également comprise entre 35 et 40 °C. Le brassage et le refroidissement sont bien représentés par la simulation.

Une étude de sensibilité numérique est menée sur le brouillard d'eau avec une variation de ± 20 % de la pression d'alimentation. De même que pour les technologies précédentes, l'influence de chaque paramètre sur le refroidissement est testée. La granulométrie du brouillard est renseignée par le constructeur pour une pression d'alimentation donnée et ne peut être évaluée pour des pressions différentes. Nous supposons donc que la variation de +20 % de la pression conduit à une diminution de -20 % du diamètre des gouttes pulvérisées et inversement qu'une variation de -20 % entraîne une augmentation du diamètre de +20 %.

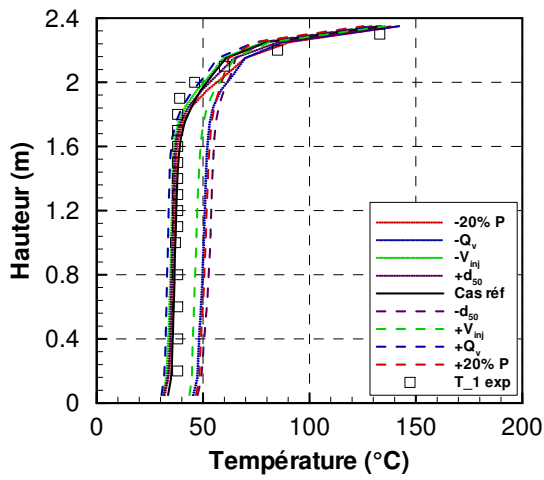
Qualitativement, les phénomènes de refroidissement sont observés quel que soit le paramètre modifié. Contrairement à ce qui a été vu pour les technologies de sprinklage, le refroidissement est plus important quand la pression d'alimentation de la buse est réduite. Pour une réduction de la pression d'alimentation de 20 %, la température moyenne du profil est de 34 °C. Dans le cas contraire, une augmentation de pression de 20 %, l'effet de refroidissement est moins efficace et la température moyenne du profil est de 50 °C. Cela peut être dû à des effets combinés d'inertie pour l'entraînement des fumées et d'évaporation pour le refroidissement. Le refroidissement par la variation de ± 20 % de la pression n'est pas symétrique autour du cas nominal.

L'augmentation du débit d'injection contribue à un refroidissement plus important de l'environnement par rapport à la simulation de référence (Figure 5.32). En effet, la température du profil est de 30 °C pour une augmentation de débit de 9,6 % contre 35 °C pour le cas nominal. Dans le cas contraire, une diminution de 10,5 % du débit par rapport au cas nominal engendre une homogénéisation de la température autour de 50 °C. L'effet de l'augmentation du débit d'eau sur le refroidissement n'est pas linéaire et un seuil semble être atteint pour un débit de 30,1 L/min.

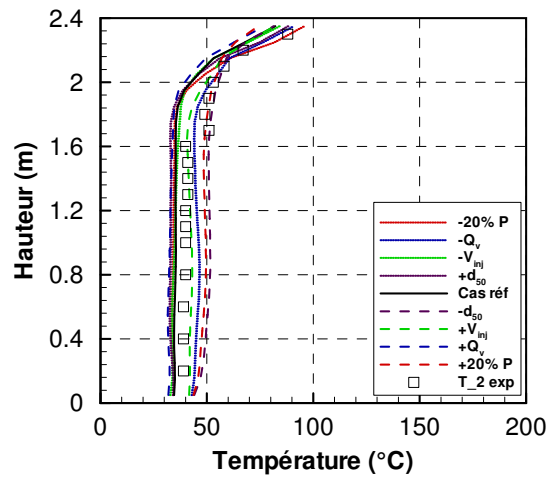
L'augmentation de 9,6 % de la vitesse d'injection a peu d'influence sur le niveau de refroidissement. En effet, la température moyenne du profil est de quelques degrés en-dessous du profil nominal. La diminution de 10,5 % de la vitesse d'injection montre une moins bonne efficacité de refroidissement, la température du profil étant de 43 °C.

Contrairement aux observations faites sur la variation des diamètres de gouttes à l'injection dans le cas des sprinklers, la diminution de la taille de gouttes pulvérisées entraîne un refroidissement moins fort que dans le cas nominal. La température moyenne du milieu est évaluée à plus de 50 °C.

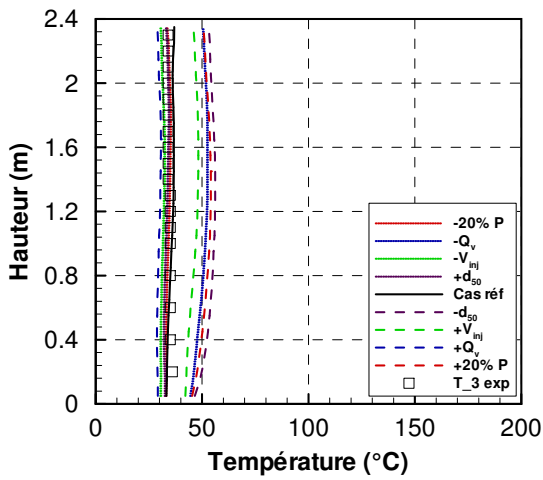
Pour conclure, chacun des paramètres a une influence sur le niveau de refroidissement par le spray. La différence entre les simulations à 100 bars et à 120 bars est plus marquée que la différence entre 80 et 100 bars. Le niveau de refroidissement est moins important pour une pression plus haute (120 bars). Il semble gouverné par l'augmentation de la vitesse et la diminution du diamètre de pulvérisation. En contre partie, l'augmentation du débit d'eau tend à mieux refroidir le milieu enfumé.



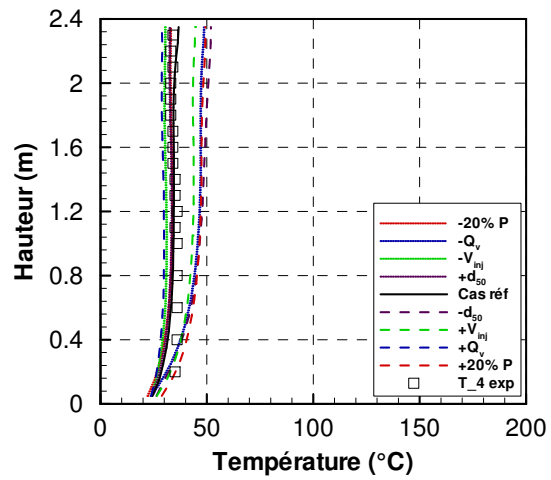
(a) Section 1



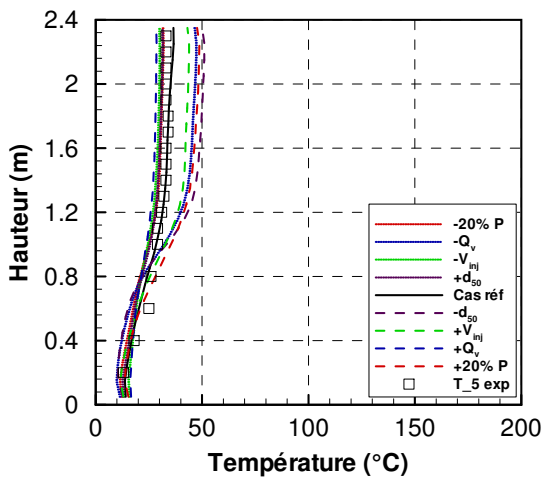
(b) Section 2



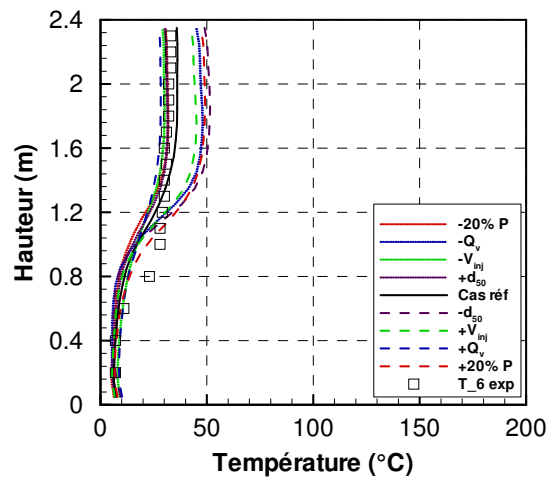
(c) Section 3



(d) Section 4



(e) Section 5



(f) Section 6

FIGURE 5.32 – Profils moyens de température extraits de FDS durant le temps d’aspersion par brouillard d’eau comparés aux profils de température expérimentaux mesurés

5.4.3.3 Opacification

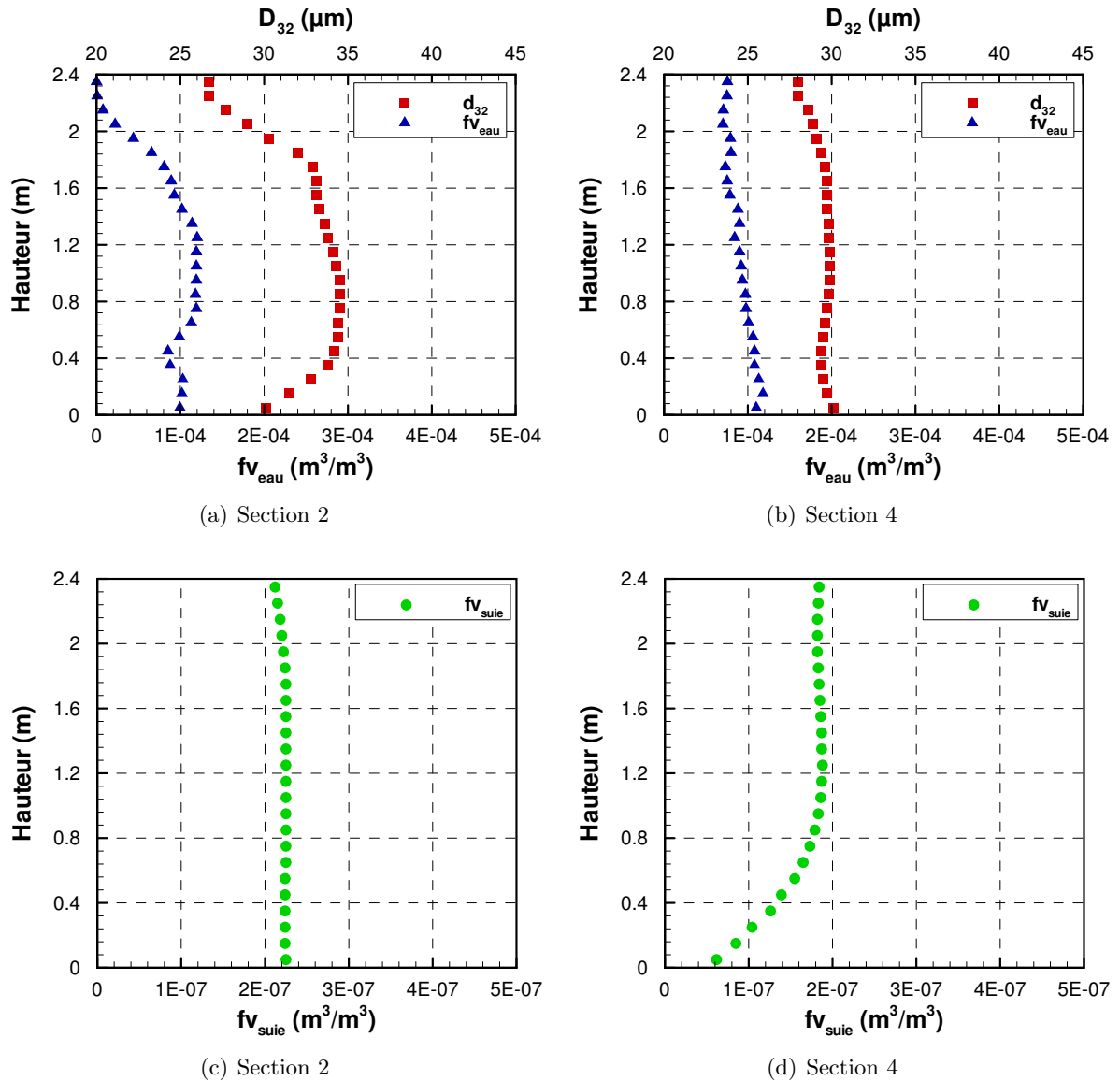


FIGURE 5.33 – Profils de diamètres de Sauter, de fractions volumiques en eau et suie extraits de FDS durant l’aspersion par brouillard d’eau sur le milieu enfumé

L’environnement gazeux est totalement brassé par la pulvérisation par brouillard d’eau. La fraction volumique en eau est homogène, autour de $1.10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$ sous 1,6 m pour la section 2 et sur toute la hauteur sur la section 4 (Figure 5.33). La fraction volumique en eau est 2 fois plus importante que celle observée pour le sprinkler HP alors que le débit de pulvérisation est presque 4 fois plus faible. Les gouttes les plus petites se retrouvent transportées au niveau de la section 4. Le diamètre de Sauter calculé est compris entre 25 et 35 μm en section 2 et autour de 30 μm en section 4. On retrouve les gouttes de plus petite taille plus proche du plafond tandis que les gouttes plus grosses sont retrouvées entre 0,4 et 1,6 m au-dessus du sol. La concentration en suie est homogène sur la hauteur du couloir à environ $2.10^{-7} \text{ m}^3/\text{m}^3$ excepté en partie basse

de la section 4 où l'air pénètre dans le couloir.

Les valeurs de fraction volumique en suie et en eau et les diamètres de gouttes responsables de l'atténuation du rayonnement ont été reportés dans le Tableau 5.22 pour la partie sous 1 m de hauteur et le Tableau 5.23 pour la partie située au-dessus. Le flux transmis (transmittance) est calculé par la méthode de Monte-Carlo en considérant une émission unidirectionnelle. Le flux transmis est très faible par rapport aux mesures expérimentales Figure 5.34. Cette différence peut être due à une estimation du diamètre de gouttes pulvérisées inférieures numériquement par rapport à la réalité. Comme il a été montré à la Section 3.2.5, l'influence du diamètre et de la fraction volumique peut être très importante sur la transmission du rayonnement. De plus, on a vu avant aspersion que la production de suie numériquement semble trop importante, ce facteur peut également contribuer à diminuer la transmittance, d'autant plus que le milieu est complètement brassé par le brouillard.

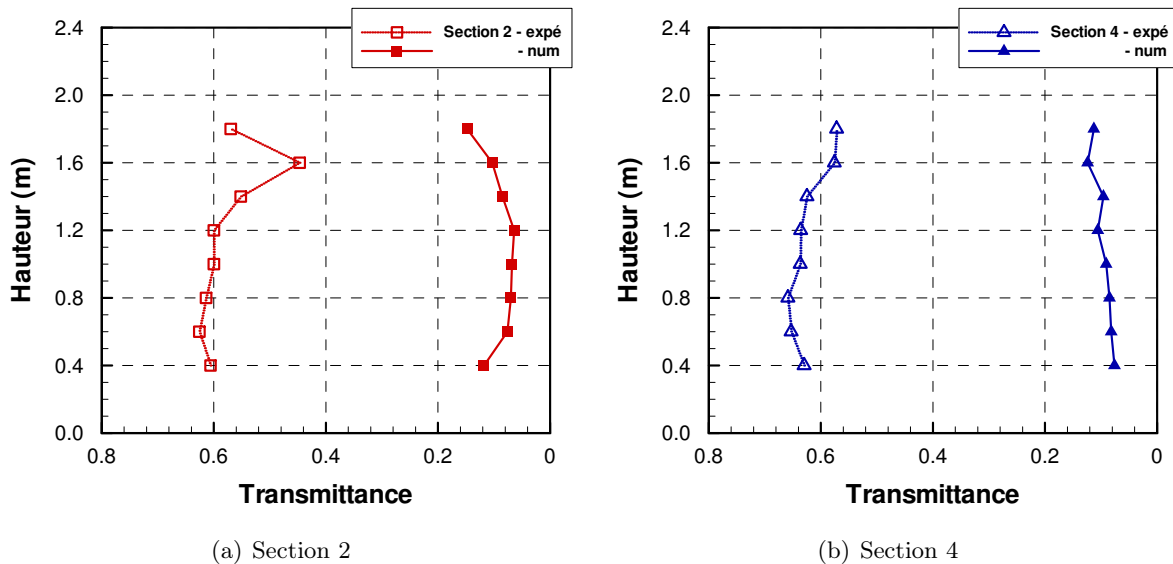


FIGURE 5.34 – Profils de transmittance évaluée numériquement sur la base des fractions volumiques et du diamètre de goutte comparés aux profils expérimentaux : brouillard d'eau

Le flux transmis ne donne pas réellement d'indication sur la distance de visibilité. L'étude sur le contraste est d'abord menée sur la Mire de résolution USAF1951 puis sur un Bloc Autonome d'Éclairage de Sécurité (BAES). Le domaine est découpé en deux parties : partie basse représentant le volume de couloir entre 0 et 1,19 m au-dessus du sol et partie haute, le volume de couloir entre 1,2 et 2,4 m. Les fractions volumiques et les diamètres des gouttes sont moyennés dans ces deux parties créant ainsi deux milieux homogènes équivalents $MHE_{q_{bas}}$ et $MHE_{q_{haut}}$ (Tableau 5.25).

La Mire de résolution permet de calculer le contraste pour différents éléments de résolution, la Figure 5.35 présente le contraste calculé pour 4 éléments de la Mire tracé en fonction de l'épaisseur du milieu considéré. La distance de visibilité évaluée pour un contraste de 0,02 tend à diminuer lorsque la résolution augmente (ou que l'épaisseur d'une paire de lignes diminue). En effet, en partie basse, pour l'élément 1 correspondant à une résolution de 0,5 paire de lignes/mm (ou un écart de 1 mm de fond blanc entre deux bandes noires de 1 mm) la visibilité est évaluée

à 1,00 m alors que pour l'élément 19 correspondant à une résolution de 2 paires de lignes/mm (4 fois plus importante), la distance de visibilité descend à 0,59 m.

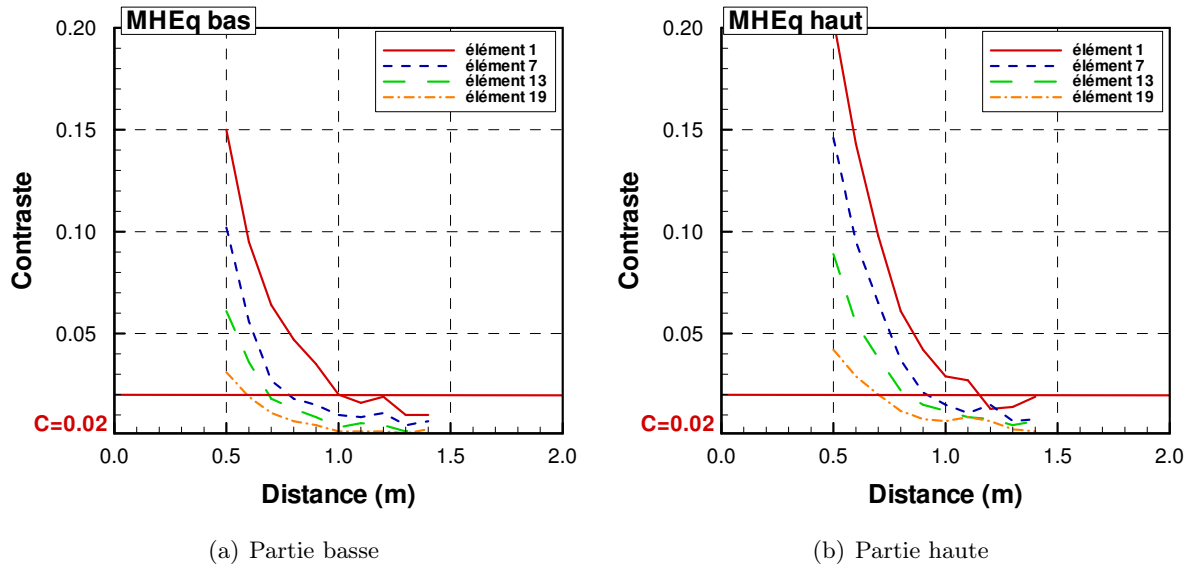


FIGURE 5.35 – Évolution du contraste en fonction de l'épaisseur du milieu homogène équivalent pour les parties basse et haute du couloir

La distance évaluée pour un contraste de 0,02 est tracée en fonction de la résolution sur la Mire (Figure 5.36). La corrélation de Jin pour un objet lumineux permet de déterminer la distance de visibilité en fonction du coefficient d'extinction. D'après Jin [67], la visibilité est de 0,65 m dans la partie basse du couloir et de 0,75 m dans la partie haute. La distance moyenne de visibilité calculée sur l'ensemble de la Mire est de 0,70 m en partie basse et de 0,82 m en partie haute du couloir.

Le calcul de l'étalement du point est appliqué au BAES (Figure 5.37) afin de reconstruire son image au travers du milieu semi-transparent. L'échelle est adaptée afin de mettre en avant la notion de contraste. Trois distances sont représentées jusqu'à 1,5 m, le contraste étant suffisamment réduit à cette distance. Pour le sprinkler, la distance maximale représentée était de 9 m, correspondant à la longueur totale du couloir. Lorsque la distance L entre l'observation et l'objet augmente, la visibilité de l'objet est de moins en moins bonne. En effet, à 0,5 m les inscriptions et les détails sur le panneau sont encore visibles alors qu'à 1,5 m, il n'est plus possible de le lire. Le panneau tend à disparaître sur le fond lorsque la distance est de plus de 1,5 m.

La distance de visibilité est calculée pour les trois éléments choisis : le lettrage « Fire Exit », le personnage et le panneau total. Le panneau est visible entre 1,65 et 1,75 m en fonction de la hauteur à laquelle il est observé. Cependant, l'inscription disparaît pour un observateur situé à plus de 1 m pour le lettrage, et le dessin n'est plus identifiable à partir de 1,25 m. Il serait donc difficile pour un occupant de suivre les indications d'un panneau bien qu'il soit en mesure de voir le panneau.

De la même manière que pour le système sprinkler (paragraphes 5.4.1.3 et 5.4.2.3), l'absorption est importante à cause de la présence des suies. La Figure 5.39 illustre l'image reconstruite du BAES vu au travers du milieu absorbant et diffusant pour 3 distances en parties basse et

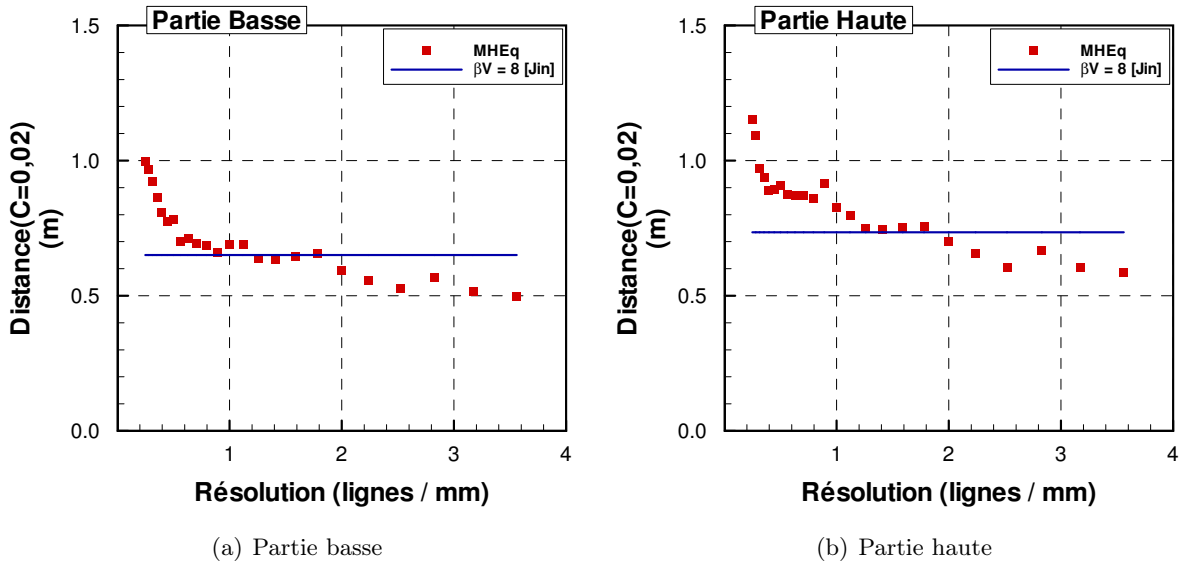


FIGURE 5.36 – Distance de visibilité pour le milieu homogène équivalent en fonction de la résolution comparée à l'évaluation de Jin

haute du couloir. Le BAES disparaît dans le mélange fumée et gouttes d'eau à environ 1 m de distance.

L'image du second BAES est reconstruite sur la Figure 5.40. Le contraste calculé est supérieur à celui calculé sur le panneau *Fire Exit* (Tableau 5.26). La distance de visibilité évaluée par la notion de contraste est légèrement supérieure dans le cas du second dispositif de guidage. En effet, elle est de près de 2 m pour ce dispositif, appelé Bloc 2 dans le Tableau 5.26 alors qu'elle est d'environ 1,7 m pour le Bloc 1 (Figure 5.38). Cependant, il est possible que de la même manière que pour le Bloc 1, l'intensité lumineuse soit limitante au-delà d'une certaine distance, d'où la nécessité de combiner le critère de contraste et d'intensité lumineuse reçue par l'œil.

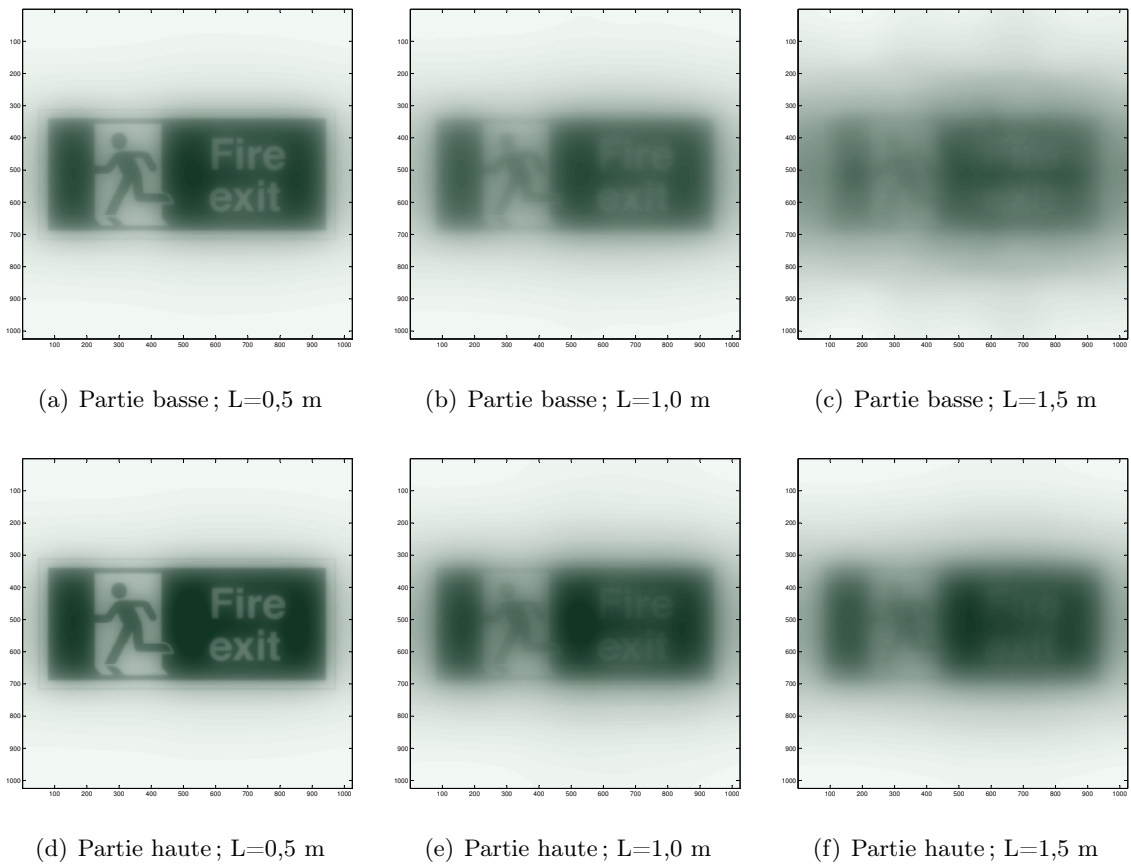


FIGURE 5.37 – BAES vu au travers de trois épaisseurs de milieu absorbant et diffusant en partie basse et haute du couloir durant l’aspersion par brouillard d’eau : échelle mettant en avant la notion de contraste

Section	Hauteur (m)	0,4	0,6	0,8	1,0
2	f_v suies (m^3/m^3)	2.24E-07	2.25E-07	2.25E-07	2.25E-07
	f_v eau (m^3/m^3)	8.53E-05	1.13E-04	1.18E-04	1.19E-04
	d_{32} (μm)	34	34	35	34
	κ (m^{-1})	1.93	1.93	1.93	1.93
	σ (m^{-1})	8.47	11.01	11.49	11.67
	Flux transmis	0.12	0.08	0.07	0.07
4	f_v suies (m^3/m^3)	1.39E-07	1.65E-07	1.79E-07	1.86E-07
	f_v eau (m^3/m^3)	1.08E-04	1.01E-04	9.72E-05	9.20E-05
	d_{32} (μm)	29	30	30	30
	κ (m^{-1})	1.20	1.42	1.54	1.60
	σ (m^{-1})	11.57	10.78	10.40	9.99
	Flux transmis	0.08	0.08	0.09	0.09

TABLEAU 5.22 – Valeurs de diamètre de Sauter et de concentration en suies et en eau extraites de FDS dans le cas de la pulvérisation par brouillard d’eau sur la nappe de fumée pour le calcul de la visibilité en partie basse

Section	Hauteur (m)	1,2	1,4	1,6	1,8
2	f_v suies (m^3/m^3)	2.25E-07	2.25E-07	2.25E-07	2.24E-07
	f_v eau (m^3/m^3)	1.20E-04	1.02E-04	8.92E-05	6.56E-05
	d_{32} (μm)	34	33	33	32
	κ (m^{-1})	1.93	1.93	1.93	1.93
	σ (m^{-1})	11.58	9.97	8.94	6.98
	Flux transmis	0.06	0.09	0.10	0.158
4	f_v suies (m^3/m^3)	1.88E-07	1.87E-07	1.85E-07	1.83E-07
	f_v eau (m^3/m^3)	8.42E-05	8.81E-05	7.54E-05	8.00E-05
	d_{32} (μm)	30	30	30	29
	κ (m^{-1})	1.62	1.61	1.59	1.57
	σ (m^{-1})	9.10	9.56	8.25	8.80
	Flux transmis	0.11	0.10	0.12	0.11

TABLEAU 5.23 – Valeurs de diamètre de Sauter et de concentration en suies et en eau extraites de FDS dans le cas de la pulvérisation par brouillard d’eau sur la nappe de fumée pour le calcul de la visibilité en partie haute

MHEq _{bas}				
\bar{f}_v suies (m ³ /m ³)	\bar{f}_v eau (m ³ /m ³)	\bar{d}_{32} (μm)	$\bar{\sigma}$ (m ⁻¹)	$\bar{\kappa}$ (m ⁻¹)
1,96E-07	1,04E-04	32	10,61	1,68

TABLEAU 5.24 – Propriétés du milieu homogène équivalent de la partie basse du couloir pour le brouillard d'eau

MHEq _{haut}				
\bar{f}_v suies (m ³ /m ³)	\bar{f}_v eau (m ³ /m ³)	\bar{d}_{32} (μm)	$\bar{\sigma}$ (m ⁻¹)	$\bar{\kappa}$ (m ⁻¹)
2,05E-07	8,80E-05	31	9,12	1,76

TABLEAU 5.25 – Propriétés du milieu homogène équivalent de la partie haute du couloir pour le brouillard d'eau

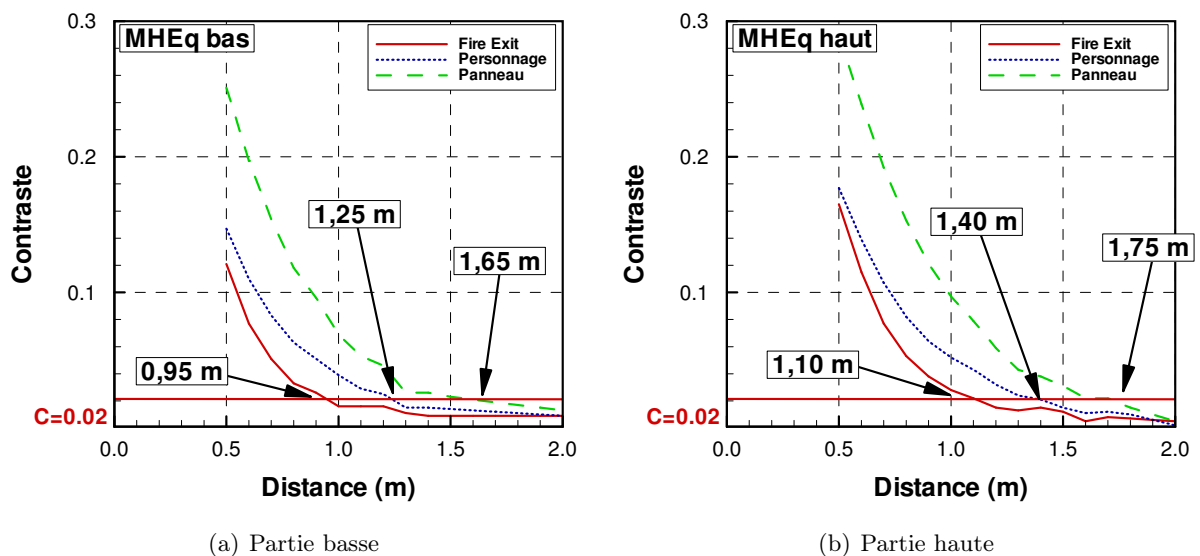
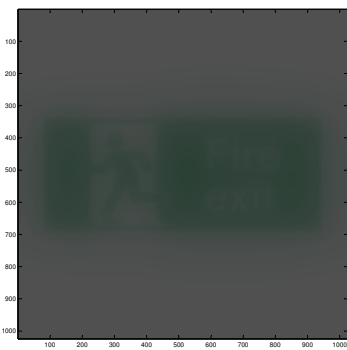


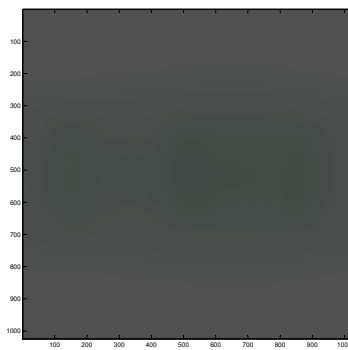
FIGURE 5.38 – Évolution du contraste des différentes indications du BAES en fonction de la distance : évaluation de la distance de visibilité par la notion de contraste

		Contraste		
Distance		0,5 m	1,0 m	1,5 m
Partie basse	Bloc 1 (<i>Fire Exit</i>)	0,25	0,07	0,02
	Bloc 2 (<i>Flèche</i>)	0,33	0,11	0,04
Partie haute	Bloc 1 (<i>Fire Exit</i>)	0,29	0,10	0,03
	Bloc 2 (<i>Flèche</i>)	0,38	0,14	0,07

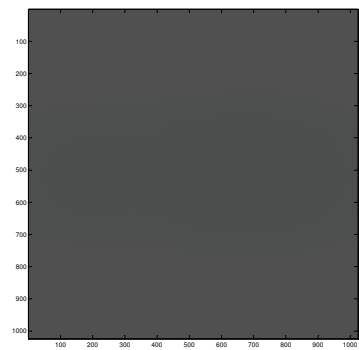
TABLEAU 5.26 – Valeurs de contraste pour deux BAES vus au travers d'un milieu semi-transparent contenant de la fumée et des gouttes injectées par aspersion par brouillard d'eau



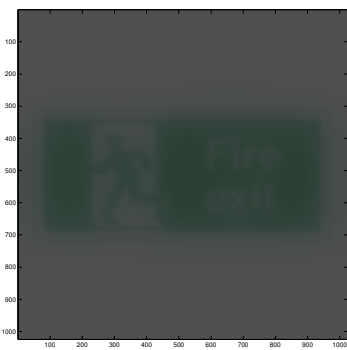
(a) Partie basse ; $L=0,5$ m



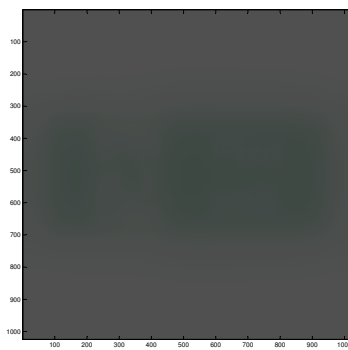
(b) Partie basse ; $L=1,0$ m



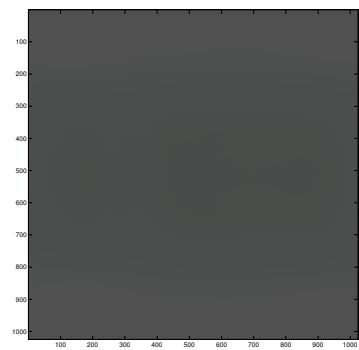
(c) Partie basse ; $L=1,5$ m



(d) Partie haute ; $L=0,5$ m



(e) Partie haute ; $L=1,0$ m



(f) Partie haute ; $L=1,5$ m

FIGURE 5.39 – BAES vu au travers de trois épaisseurs de milieu absorbant et diffusant en partie basse et haute du couloir durant l'aspersion par brouillard d'eau : échelle tenant compte de l'intensité lumineuse

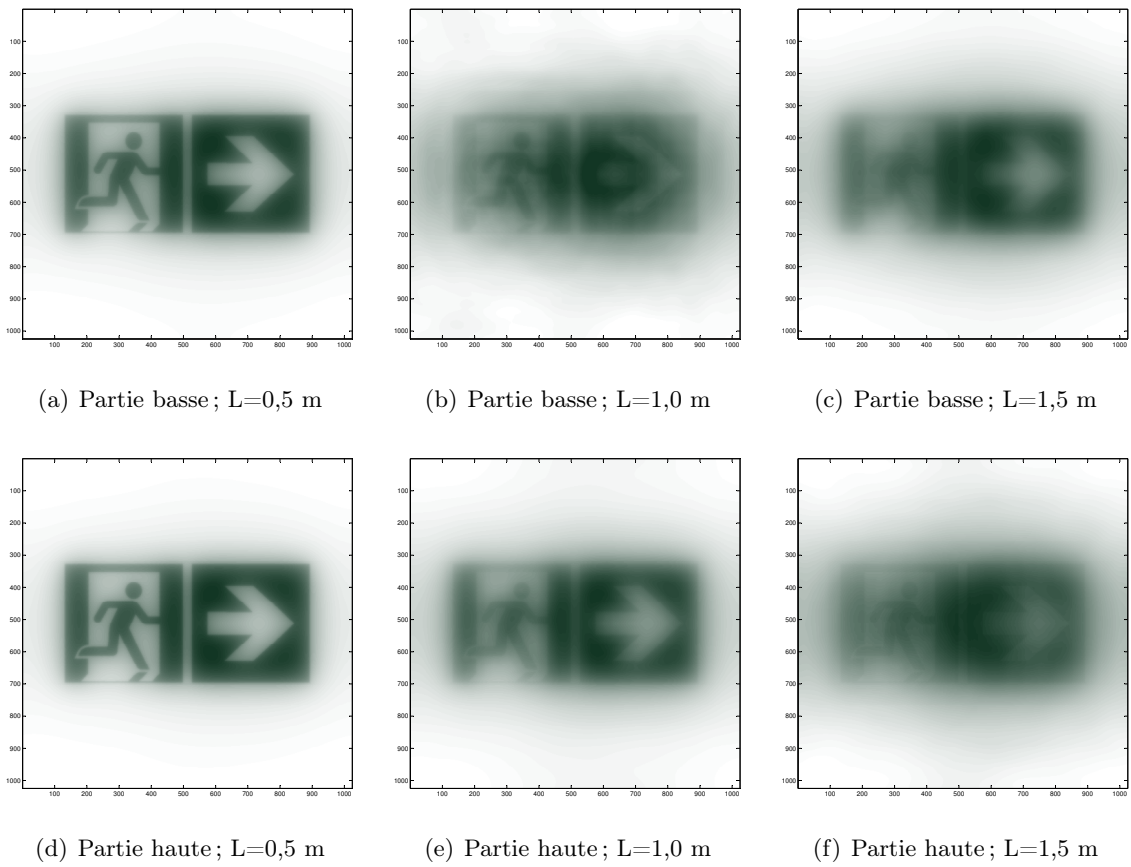


FIGURE 5.40 – Autre type de BAES vu au travers de trois épaisseurs de milieu absorbant et diffusant en partie basse et haute du couloir durant l’aspersion par brouillard d’eau : échelle mettant en avant la notion de contraste

5.5 Conclusion du chapitre

L'effet des trois technologies d'aspersion sur la déstratification est très différent. Le refroidissement par le spray semble plus efficace pour des tailles de gouttes inférieures. Les fines gouttelettes refroidissent la fumée ce qui pénalise les forces de flottabilité et ce, malgré des quantités d'eau pulvérisées moins grandes. De plus, les fines gouttelettes sont transportées plus facilement dans le milieu et créent ainsi une homogénéisation de la température dans l'ensemble du couloir contrairement au sprinkler HP refroidissant principalement la partie en amont de l'aspersion (compte tenu de la taille des gouttes injectées numériquement : 1 mm) et au sprinkler BP dont l'effet semble plus localisé au droit de la buse (pour une taille de goutte de 1,7 mm).

L'opacification est également très différente pour les trois cas simulés. En effet, la diffusion par les gouttelettes d'eau produites par la pulvérisation par brouillard est le phénomène prédominant dans la perte de visibilité d'un objet. L'absorption n'intervient que dans la perte d'intensité reçue par l'œil. En supposant que l'intensité lumineuse reçue par l'œil soit suffisante, la notion de contraste liée à la résolution spatiale d'un objet est un bon moyen de quantifier la distance de visibilité. Cependant, dans le cas d'un milieu essentiellement absorbant, cette approche semble connaître des limites et il est nécessaire de définir un nouveau critère basé sur le flux reçu par l'observateur. La méthode numérique proposée ici permet en tout cas la reconstruction d'images vues à travers un milieu donné, caractérisé par une concentration en particules, en gouttes et une distribution granulométrique.

Pour le brouillard d'eau, l'étude de la visibilité sur un boîtier de sécurité type BAES a montré l'importance du choix du paramètre à observer. En effet, le fait de lire une inscription plutôt que de voir un panneau peut conduire à des distances de visibilité 60 % plus faibles.

Des modèles sont utilisés pour évaluer les diamètres de gouttes des différentes technologies d'aspersion (d'après les données constructeurs plus ou moins fiables et éventuellement par une corrélation basée sur le nombre de Weber). L'accord entre les résultats numériques et expérimentaux n'est pas satisfaisant, on peut se poser la question des incertitudes liées aux diamètres des gouttes. Le travail numérique sur différents diamètres a montré une forte influence de ce paramètre dans les phénomènes de refroidissement notamment pour les systèmes sprinklers. Les sprays simulés semblent différents des sprays réels notamment à cause de la granulométrie mal connue pour les pulvérisations. L'étude de sensibilité au diamètre d'injection des gouttes d'eau a montré qu'une taille de gouttes pulvérisées par le sprinkler BP devrait être de 500 μm pour observer les mêmes phénomènes de refroidissement que pour les essais. Le même constat est fait sur le sprinkler HP dont la taille des gouttes devrait être de l'ordre de 300 μm d'après l'étude du refroidissement et de la déstratification du couloir. Cela n'est pas en accord avec les diamètres habituellement considérés pour cette technologie d'aspersion. La granulométrie du brouillard d'eau bien qu'elle soit renseignée par le constructeur semble également incertaine. Une taille de goutte de l'ordre d'une cinquantaine de microns paraît plus pertinente notamment par rapport au test en spray seul. La mauvaise maîtrise du diamètre rend impossible la simulation exacte des essais. Ces diamètres de gouttes devront être revus et mesurés précisément afin d'écarter ces incertitudes. Cela fait actuellement l'objet de discussions avec des partenaires du CSTB.

Conclusion générale et perspectives

En France, la stratégie actuelle de sécurité incendie dans les ERP préconise de garder un espace libre de fumée près du sol le plus longtemps possible afin de favoriser l'auto-évacuation des occupants et de permettre l'intervention des pompiers. Cette stratégie repose notamment sur le désenfumage ou l'extraction de la fumée par des systèmes de ventilation naturelle ou mécanique. De plus, la réglementation propose qu'un sprinkler puisse être exigé dans tout ou partie d'un établissement afin d'améliorer le contrôle de l'incendie et de son impact. Il existe deux grandes catégories d'aspersion : les sprinklers et les brouillards d'eau.

Des questions se posent sur les modalités d'utilisation des systèmes d'aspersion. L'objectif du projet de recherche était de comprendre, caractériser et évaluer les effets de stratification et déstratification « thermique et optique » d'un environnement enfumé dans lequel on injecte des gouttelettes d'eau produites par un système sprinkler ou un système brouillard d'eau. Un des enjeux scientifiques principaux était de permettre l'estimation du refroidissement et de la visibilité dans cet environnement.

Pour réaliser ces études, le travail de recherche s'est basé sur une approche combinée expérimentale et numérique. Tout d'abord, le CSTB s'est doté d'une configuration de bâtiment à échelle 1 composée d'une pièce attenante à un couloir de 9 m de longueur permettant d'étudier les interactions entre l'eau et les fumées durant un feu. Un système de distribution hydraulique a été installé dans le but de pouvoir comparer 3 technologies d'aspersion différentes classées en risque moyen (OH1), à savoir une tête sprinkler sous deux pressions d'opération de 0,27 et 1,3 bars et une buse brouillard d'eau sous une pression de 100 bars.

Afin de caractériser les effets thermiques, le couloir a été maillé par des thermocouples disposés de part et d'autre du point d'injection. Une instrumentation fine de mesure d'atténuation optique a été développée pour permettre d'évaluer les effets de stratification et déstratification optiques induites par la production de fumées et les pulvérisations des différentes technologies d'aspersion. De ce fait, les effets de 3 technologies d'aspersion différentes ont pu être comparés dans des configurations identiques de production de fumées dans un couloir.

Ensuite, l'estimation de l'évolution de la puissance du feu au cours des essais a permis de les simuler par le code de calcul FDS. Plusieurs études de sensibilité ont été faites notamment sur l'influence de l'isolation des parois et sur les caractéristiques des aspersions pour chaque technologie tel que le diamètre des gouttes pulvérisées, la vitesse d'éjection de l'eau et les débits d'eau. Enfin, sur la base des champs de concentration et des diamètres de gouttes extraits de FDS, les propriétés optiques du milieu enfumé ont été calculées par la théorie de Mie pour chaque cas

traité (sprinkler basse pression, sprinkler haute pression et brouillard d'eau). Un outil de calcul utilisant la méthode de Monte-Carlo, a permis de recréer l'image d'un ensemble de points au travers d'un milieu semi-transparent représentatif du mélange fumées/gouttes d'eau. La notion de visibilité a été approchée par l'analyse du contraste seuil et en comparaison aux corrélations développées par Jin.

Bilan global

La configuration d'essai et les simulations numériques ont permis une étude comparative de trois systèmes d'aspersion d'un point de vue thermique, optique et radiatif. Une synthèse pour les conclusions principales est présentée ci-dessous.

Sans aspersion, la stratification de l'environnement sur la base des critères optique et thermique a été mesurée par la métrologie disposée dans la configuration pièce-couloir. Il y a une corrélation évidente entre les deux critères résultant en une nappe de fumée chaude et opaque en partie haute (demi-couloir supérieur) et une zone d'air frais et transparent en partie basse (demi-couloir inférieur). De plus, au vue de la bonne concordance entre les simulations et les essais, le code FDS a montré une bonne aptitude à prédire les conditions thermiques et optiques au sein du couloir.

Le sprinkler basse pression a montré un effet modéré de déstratification de l'environnement enfumé. La déstratification de l'environnement intervient principalement sous le point d'injection de manière assez locale. Le refroidissement par ce système d'aspersion a été mesuré dans toute la longueur du couloir et plus particulièrement dans la zone de fumée en partie haute. La température moyenne dans le couloir est passée de plus de 70 °C avant aspersion à 45 °C durant l'aspersion par sprinkler BP. Le milieu est resté stratifié thermiquement à partir de 2,5 m en aval de l'aspersion. Le milieu s'est opacifié en partie basse en amont de l'aspersion bien qu'un gradient de transmittance ait été conservé du fait de l'arrivée des fumées en partie haute dans le couloir. En aval, l'environnement est resté stratifié optiquement. Ce constat a pu être fait par le biais des mesures de transmittance et qualitativement par les observations. Cependant, un épaissement de la nappe de fumée a été observé sur la base du critère optique mais pas sur la base du critère thermique.

Le sprinkler haute pression a montré un effet de brassage de l'environnement important dans l'ensemble du couloir. Le refroidissement par aspersion par sprinkler haute pression a été très marqué avec une baisse de la température à 28 °C sous 1,5 m en amont de l'injection et dans tout le couloir en aval alors que la température avant aspersion était en moyenne supérieure à 70 °C. Tout comme le sprinkler basse pression, une température plus élevée a été mesurée dans la partie haute en amont du point d'injection du fait de la production de fumées arrivant dans le couloir. L'opacification a pu être mesurée dans tout le couloir. En aval du point d'injection, l'opacification est importante, les niveaux d'atténuation atteignent près de 60 % à 1,5 m du sol. Le lien existant entre les critères optique et thermique avant aspersion semble avoir disparu. Dans le reste du couloir, le milieu est homogène en transmittance traduisant un environnement complètement mélangé contenant à la fois des gouttes d'eau et des suies.

Le brouillard d'eau a montré un effet de brassage semblable à celui du sprinkler haute pression. Le refroidissement est assez marqué avec des niveaux de température inférieurs à 40 °C dans le couloir. Sur le critère optique, le milieu semble également homogène avec des mesures de transmittance de l'ordre de 70 %.

L'étude a montré que les effets des trois systèmes d'aspersion pouvaient être très différents. Ces disparités proviennent de l'écart important entre les débits d'eau, les angles de pulvérisation, les vitesses d'injection et les diamètres de gouttes pulvérisés par chaque technologie. Les débits importants et les diamètres de gouttes réduits entraînent tous deux un fort refroidissement de la nappe de fumée, notamment par les phénomènes d'évaporation et d'atténuation radiative. Les effets combinés de ce refroidissement mais également de l'entraînement induisent une déstratification importante de l'environnement enfumé. Le sprinkler haute pression et le brouillard d'eau étudiés ici ont tous deux engendrés des milieux brassés et thermiquement assez homogènes pour des débits de pulvérisations respectifs de 91 L/min et 27,5 L/min. De plus, l'étude sur l'atténuation du rayonnement a montré l'efficacité du brouillard à réduire la transmission radiative d'une source vers une cible. Pour une même buse sprinkler, une pression d'alimentation peut entraîner des phénomènes très différents. Ces phénomènes proviennent de la combinaison de nombreux paramètres modifiés par la pression d'alimentation, à savoir le débit de pulvérisation, la vitesse d'injection des gouttes et leur taille.

L'étude numérique a été limitée à cause de l'incertitude sur les diamètres de gouttes pulvérisées. L'accord entre les résultats numériques et expérimentaux bien que qualitatif n'est pas pleinement satisfaisant. L'étude de sensibilité au diamètre de gouttes a également montré l'importance de ce paramètre dans les phénomènes liés au refroidissement et à l'opacification du milieu. En s'appuyant sur l'étude de sensibilité au diamètre, une granulométrie potentielle a été estimée pour expliquer les résultats expérimentaux.

L'étude de la visibilité par la notion de contraste seuil a permis de donner une bonne estimation de la visibilité pour des milieux essentiellement diffusants. Cependant, une limite apparaît lorsque le milieu devient fortement absorbant et la simple étude du contraste doit être complétée par une analyse de l'intensité lumineuse également. La technique de reconstruction d'image appliquée ici a montré tout son potentiel pour évaluer l'aspect d'un objet vu à travers un milieu semi-transparent représentant un mélange fumées/aspersion.

Perspectives

Les perspectives de travail sont nombreuses et variées, aussi bien d'un point de vue expérimental que numérique.

Tout d'abord, il est nécessaire pour la bonne compréhension des phénomènes de mesurer précisément la granulométrie pour chaque technologie d'aspersion. Cette démarche est actuellement en cours avec un partenaire du CSTB qui pourra nous fournir une estimation plus précise de la granulométrie des gouttes injectées dans le couloir.

La longueur d'onde considérée (635 nm) est représentative du spectre visible pour les phéno-

mènes de diffusion par les gouttes d'eau. Ce constat a pu être vérifié numériquement sur la base d'un calcul par la méthode de Monte-Carlo et la théorie de Mie. Il serait intéressant de confirmer cela expérimentalement pour un milieu composé de suies et de gouttes d'eau en suspension en utilisant d'autres longueurs d'onde couvrant ainsi le spectre visible.

La puissance du feu peut également jouer un rôle important. En effet, le refroidissement induit par la pulvérisation d'eau peut être différent sur une nappe de fumées de température plus élevée ou plus froide. D'autres essais pourraient donc être réalisés avec des puissances de feu différentes afin de caractériser et de comprendre la part du refroidissement dans les phénomènes de déstratification. Par exemple, un bac serait dimensionné de manière à ce que la température dans le couloir excède 50 °C, valeur critique pour les personnes (utilisée en ISI). L'épaisseur de la nappe de fumée pourrait également être modifiée en changeant la taille du linteau en sortie du couloir. La pénétration du spray dans la fumée pourrait ainsi être différente et engendrer d'autres effets.

Des configurations plus réalistes peuvent également être envisagées en particulier en mettant le couloir sous ventilation mécanique. On pourrait donc étudier les interactions entre deux systèmes de lutte pour la sécurité incendie, le désenfumage mécanique et l'aspersion. Plusieurs buses pourraient également être placées dans le couloir et ainsi, les interactions entre deux sprays pourraient être étudiées. On peut également imaginer un foyer plus fumigène, représentatif des matériaux rencontrés dans les bâtiments (bois, matelas, plastiques...) L'aspersion était dans notre cas mise en œuvre pour limiter les perturbations du foyer. Un cas d'aspersion dans la pièce pourrait être envisagé et ainsi limiter l'activité du foyer.

Numériquement, le développement du calcul de la visibilité par méthode de Monte-Carlo peut être approfondi notamment en établissant un critère de visibilité basé sur le flux reçu. Un seuil de flux à l'instar du contraste perçu pourrait venir compléter l'évaluation de la distance de visibilité pour un milieu fortement absorbant.

Enfin, une lumière ambiante et le cas d'un panneau réfléchissant pourraient être modélisés dans le code de calcul de Monte-Carlo. Le lien pourrait être fait entre cette étude et la corrélation empirique de Jin basée sur un panneau purement réfléchissant, pour compléter l'analyse réalisée ici sur un panneau lumineux.

Bibliographie

- [1] *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. National Fire Protection Association (NFPA), third edition, 2002.
- [2] APSAD-D2. Brouillard d'eau - document technique pour l'installation de systèmes de protection incendie par brouillard d'eau. Centre National de Prévention et de Protection (CNPP).
- [3] APSAD-R1. Règle d'installation - extinction automatique à eau type sprinkleur. Centre National de Prévention et de Protection (CNPP).
- [4] G. AUBERTIN. La protection de l'homme contre le rayonnement thermique en milieu industriel. In *Rencontre de la Société Française de Thermique (SFT)*, Ville d'Avray, mai 1980.
- [5] R. BABARI. *Estimation de la visibilité météorologique par caméras routières*. Thèse de doctorat, Université de Paris-Est, 2012.
- [6] V. BABRAUSKAS. Full-scale burning behavior of upholstered chairs. Rapport technique, Natl. Bur. Stand., Gaithersburg MD, 1979.
- [7] V. BABRAUSKAS. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Chapter 3 Section 1 : Heat Release Rate*. National Fire Protection Association, Quincy, Third edition, pages 3-1-3-37, 2002.
- [8] G. BACK III, C. BEYLER, R. HANSEN. A quasi-steady-state model for predicting fire suppression in spaces protected by water mist systems. *Fire Safety Journal*, 35 : 327-362, 2000.
- [9] N. BEROUR, D. LACROIX, P. BOULET, G. JEANDEL. Radiative and conductive heat transfer in a nongrey semitransparent medium. application to fire protection curtains. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 86(1) : 9 - 30, 2004.
- [10] C. L. BEYLER, L. Y. COOPER. Interaction of sprinklers with smoke and heat vents. *Fire Technology*, 37 : 9-35, 2001.
- [11] E. BLANCHARD. *Modélisation de l'interaction entre brouillard d'eau et feu en tunnel*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, France, 2011.
- [12] C. F. BOHREN, D. R. HUFFMAN. *Absorption and scattering of light by small particles*. John Wiley and Sons, New York, 1983.
- [13] P. BOULET, A. COLLIN, G. PARENT. Heat transfer through a water spray curtain under the effect of a strong radiative source. *Fire Safety Journal*, 41(1) : 15 - 30, 2006.
- [14] J. L. BRYAN. Damageability of buildings, contents and personnel from exposure to fire. *Fire Safety Journal*, 11 : 15 - 31, 1986.

- [15] R. W. BUKOWSKI. Smoke measurements in large small scale fire testing. Rapport technique NBSIR 78-1502, National Bureau of Standards, 1978.
- [16] R. W. BUKOWSKI. *Technical Reference Guide for the HAZARD 1 Fire assessment Method*, volume II. Juin 1989.
- [17] M. L. BULLEN. The effect of a sprinkler on the stability of a smoke layer beneath a ceiling. Rapport technique 1016, Fire Research Station, Borehamwood, UK, 1974.
- [18] P. BUSER, M. IMBERT. *Vision*. MIT Press, Cambridge, MA, 1993.
- [19] E. G. BUTCHER, A. C. PARNELL. Smoke control in fire safety design. *E&F N Spon Ltd*, 1979.
- [20] T. S. CHAN. Measurement of water density and droplet size distributions of selected ESFR sprinklers. *Journal of Fire Protection and Engineering*, 6 : 79–87, 1994.
- [21] W. CHOW, L. SHEK. Physical properties of a sprinkler water spray. *Fire and Materials*, 17 : 279–292, 1993.
- [22] A. COLLIN. *Transferts de chaleur couplés rayonnement-conduction-convection. Application à des rideaux d'eau soumis à une intense source radiative*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, France, 2006.
- [23] A. COLLIN, P. BOULET, D. LACROIX, G. JEANDEL. On radiative transfer in water spray curtains using the discrete ordinates method. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 92 : 85–110, 2005.
- [24] A. COLLIN, P. BOULET, G. PARENT, D. LACROIX. Numerical simulation of a water spray-radiation attenuation related to spray dynamics. *International Journal of Thermal Sciences*, 46(9) : 856 – 868, 2007.
- [25] L. Y. COOPER. The interaction of an isolated sprinkler spray and a two-layer compartment fire environment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38 : 679–690, 1995.
- [26] L. Y. COOPER. The interaction of an isolated sprinkler spray and a two-layer compartment fire environment – phenomena and model simulations. *Fire Safety Journal*, 25 : 89–107, 1995.
- [27] L. Y. COOPER, M. M. HARKLEROAD, J. J. QUINTIERE, W. W. RINKINEN. An experimental study of upper hot layer stratification in full-scale multiroom fire scenarios. *Journal of Heat Transfer*, 104(4) : 741–749, 1982.
- [28] A. COPPALLE. Fire protection : water curtains. *Fire Safety Journal*, 20 : 241–255, 1993.
- [29] T. CORNSWEET. *Visual perception*. 1970.
- [30] M. CURTAT. *Traité de physique du bâtiment - Physique du feu pour l'ingénieur*, volume 3. CSTB, Marne-la-Vallée, France, 2001.
- [31] S. DEMBÉLÉ. *Modélisation et étude expérimentale des transferts de chaleur par rayonnement dans un rideau d'eau diphasique. Application à la protection d'installations industrielles à risques*. Thèse de doctorat, INSA, Lyon, 1998.
- [32] F. DEMOUGE. *Contribution à la Modélisation numérique de la stratification des fumées dans le cas d'un incendie en tunnel routier*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon, 2002.
- [33] B. DOWNIE, C. POLYMEROPOULOS, G. GOGOS. Interaction of water mist with a buoyant methane diffusion flame. *Fire Safety Journal*, 24 : 359–381, 1995.
- [34] D. DRYSDALE. *An introduction to fire dynamics*. New York, 1985.

-
- [35] E. DUMONT. *Caractérisation, modélisation et simulation des effets visuels du brouillard pour l'usage de la route*. Thèse de doctorat, Université René Descartes - PARIS V, 2002.
- [36] P. H. DUNDAS. The scaling of sprinkler discharge : Prediction of drop size. Rapport technique 10, Factory Mutual Research Corporation, 1974.
- [37] H. W. EMMONS. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Section 2 Chapter 3 : Vent Flows*. National Fire Protection Association, Quincy, Third edition, pages 3–38 – 3–62, 2002.
- [38] Y. M. FERNG, C. H. LIU. Numerically investigating fire suppression mechanisms for the water mist with various droplet sizes through FDS code. *Nuclear Engineering and Design*, 241(8) : 3142 – 3148, 2011.
- [39] J. A. FLECK. The calculation of nonlinear radiation transport by monte carlo method. *Method in Computational Physics*, 1 : 43–65, 1961.
- [40] FMRC. Heat vents and fire curtains, effect in operation of sprinkler and visibility. Rapport technique, Factory Mutual Research Corporation, 1956.
- [41] A. FOISSAC. *Modélisation des Interactions entre gouttes en environnement hostile*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, 2011.
- [42] S. GAILLOT. *Étude thermo-aéraulique des écoulements de fumée induits par un incendie dans un tunnel ventilé longitudinalement*. Thèse de doctorat, Université de Poitiers, ENSMA, Poitiers, France, 2005.
- [43] G. GRANT, J. BRENTON, D. DRYSDALE. Fire suppression by water sprays. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(2) : 79 – 130, 2000.
- [44] E. GUILLAUME. Effets du feu sur les personnes - synthèse bibliographique. Rapport technique, LNE, 2006.
- [45] G. M. HALE, M. R. QUERRY. Optical constants of water in the 200nm to 200 μ m wavelength region. *Appl. Opt.*, 12(3) : 555–563, March 1973.
- [46] M. HAMADI, P. VERVISCH, A. COPPALLE. Radiation properties of soot from premixed flat flame. *Combustion and Flame*, 68(1) : 57 – 67, 1987.
- [47] Y. HE, A. FERNANDO, M. LUO. Determination of interface height from measured parameter profile in enclosure fire experiment. *Fire Safety Journal*, 31 : 19–38, 1998.
- [48] A. J. M. HESELDEN. The interaction of sprinkler and roof venting in industrial buildings the current knowledge. Rapport technique, Building Research Establishment (BRE), Borehamwood, UK, 1984.
- [49] G. HESKESTAD. Proposal for studying interaction of water sprays with plume in sprinkler optimization program. Rapport technique, Factory Mutual Research Corporation, 1972.
- [50] G. HESKESTAD. Engineering relations for fire plumes. *Fire Safety Journal*, 7 : 25–32, 1984.
- [51] G. HESKESTAD. Sprinkler/hot layer interaction. Rapport technique NIST-GCR-91-590, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 1991.
- [52] P. HINKLEY. The effect of vents on the open of the firs sprinkler. *Fire Safety Journal*, 11 : 211–225, 1986.
- [53] P. HINKLEY. The effect of smoke venting on the operation of sprinklers subsequent to the fires. *Fire Safety Journal*, 14 : 221–240, 1989.
- [54] P. HINKLEY, G. O. HANSELL, N. R. MARSHALL, R. HARRISON. Sprinklers and vents interaction-experiments at Ghent. *Fire Surveyor*, pages 18–23, 1992.

- [55] B. HOGNON. Feux expérimentaux à l'échelle d'un pièce d'habitation en communication aéraulique avec l'extérieur. Rapport technique, CSTB, 1980.
- [56] B. HOGNON. Étude en vrai grandeur de la toxicité des effluents de combustion de produits de construction. Rapport technique, Rapport à la Direction de Sécurité Civile (DSC), Décembre 1992. Ministère de l'intérieur.
- [57] J. R. HOWELL. Application of Monte-Carlo to heat transfer problems. volume 5 of *Advances in Heat Transfer*, pages 1 – 54. Elsevier, 1969.
- [58] B. P. HUSTED. *Experimental measurements of water mist systems and implications for modelling CFD*. Thèse de doctorat, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden, 2007.
- [59] M. IMBERT, J. F. BAUD, F. RICHTER, X. B. NOLLAND, H. JULIEN. *Toxicité aigüe des fumée d'incendie*. Encyclopédie Médico-Chirurgicale, Toxicologie - Pathologie professionnelle, Paris, 1997.
- [60] H. INGASON, B. PERSSON. Prediction of optical density using CFD. In *Fire Safety Science - Proceedings of The Sixth International Symposium*, pages 817 – 828.
- [61] L. A. JACKMAN. *Sprinkler Spray Interaction with Fire Gases*. Thèse de doctorat, South Bank University, London, UK, 1992.
- [62] M. L. JANSSENS, H. C. TRAN. Data reduction of room tests for zone model validation. *Fire Safety Journal*, 10 : 528–555, 1992.
- [63] A. JENFT. *Étude des Interactions entre phénomènes d'incendie et systèmes d'extinction à eau. Développement d'un module d'extinction dans le logiciel FDS*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2013.
- [64] T. JIN. Visibility through fire smoke. Report, Building Research Institute, Tokyo, 1971.
- [65] T. JIN. Visibility through fire smoke - part 5, allowable smoke density for escape from fire. Report 42, Fire Research Institute of Japan, 1976.
- [66] T. JIN. Studies of emotional instability in smoke. *Fire and Flammability*, 12 : 130–142, 1981.
- [67] T. JIN, T. YAMADA. Irritating effects of fire smoke on visibility. *Fire Science and Technology*, 5(1) : 79–89, 1985.
- [68] JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM). Vocabulaire international de métrologie - concepts fondamentaux et généraux et termes associés. Rapport technique, JCGM member organizations, Décembre 2007.
- [69] JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM). Évaluation des données de mesure - guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. Rapport technique, JCGM member organizations, Septembre 2008.
- [70] K. KAWAGOE. Fire behavior in rooms. Rapport technique 27, Building Research Institute, Ministry of Construction, Tokyo, Japan, 1958.
- [71] D. KINCAID. Volumetric water droplet evaporation measurement. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE)*, 32(3) : 457–463, 1989.
- [72] D. KINCAID, T. LONGLEY. A water droplet evaporation and temperature model. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE)*, 32(2) : 925–927, 1989.
- [73] U. KOYLU, G. FAETH. Carbon monoxide and soot emissions from liquid-fueled buoyant turbulent diffusion flames. *Combustion and Flame*, 87 : 61–76, 1991.

-
- [74] Y. LE GRAND. *Optique Physiologique. Tome 2 : Lumière et Couleur*. 1972.
- [75] S. LECHÊNE. *Étude expérimentale et numérique des rideaux d'eau pour la protection contre le rayonnement thermique*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, France, 2010.
- [76] S. LECHÊNE. Radiative shielding by water mist : comparison between downward, upward and impacting of droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54 : 1689–1697, 2011.
- [77] S. LECHÊNE. Upward vs downward injection of droplets for the optimization of radiative shield. *J. Phys. : Conf. Ser.*, 369, 2012.
- [78] K. Y. LI, L. H. HU, R. HUO, Y. Z. LI, Z. B. CHEN, S. C. LI, X. Q. SUN. A mathematical model on interaction of smoke layer with sprinkler spray. *Fire Safety Journal*, 44 : 96–105, 2009.
- [79] K. Y. LI, M. J. SPEARPOINT, J. JI, R. HUO, Y. Z. LI, L. H. HU. A mathematical model of the drag component of a sprinkler spray adjacent to horizontal smoke vents. *Journal of Fire Protection and Engineering*, pages 1–28, 2010.
- [80] G. D. LOUGHEED, G. V. HADJISOPHOCLEOUS. Investigation of atrium smoke exhaust effectiveness. *ASHRAE Transactions*, 103(2) : 519–533, 1997.
- [81] A. M. MAJOU. Application à la signalisation-incendie de données expérimentales de visibilité à travers la fumée. Rapport d'essais Service Sécurité au Feu, Octobre 1979.
- [82] H. L. MALHOTRA. Movement of smoke on escape routes. instrumentation and effect of smoke on visibility. *Fire Research notes*, 651, 652 et 653, 1967.
- [83] A. MARCHAND, A. COLLIN, Z. ACEM. Caractérisation des propriétés radiatives des vestes de sapeurs-pompier. Niort, janvier 2014. Rencontre du Groupe de Recherche Feu.
- [84] J. R. MAWHINNEY. A closer look at the fire extinguishing properties of water-mist. In *Fourth International Symposium on Fire Safety Science*, 1994.
- [85] J. R. MAWHINNEY, R. SOLOMON. *Fire Protection Handbook*, chapitre 15-6 Water Mist Fire Suppression Systems, pages 6–212 – 6–248. National Fire Protection Association Quincy, MA, 18 edition, 1997.
- [86] K. MCGRATTAN, A. HAMINS, D. STROUP. Sprinkler, smoke and heat vent. draft curtain interaction-large scale experiments and model development. Rapport technique, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 1998.
- [87] K. MCGRATTAN, R. J. MCDERMOTT, S. HOSTIKKA, J. FLOYD, G. FORNEY, T. KORHONEN. *Fire Dynamics Simulator (Version 6) Technical reference guide, Volume 1 : Mathematical model*. NIST, 2012.
- [88] K. MCGRATTAN, R. J. MCDERMOTT, S. HOSTIKKA, J. FLOYD, G. FORNEY, T. KORHONEN. *Fire Dynamics Simulator (Version 6) User's guide*. NIST, 2012.
- [89] K. MEREDITH, J. DE VRIES, Y. WANG, X. YIBING. A comprehensive model for simulating the interaction of water with solid surfaces in fire suppression. In E. INC., editor, *Proceedings of Combustion Intitute*, volume 34, pages 2719–2726, 2013.
- [90] R. MEYRAND. *Étude sur l'usage de brouillards d'eau en milieu tunnel - travail en réduction d'échelle*. Thèse de doctorat, Université de Poitiers, ENSMA, Poitiers, France, 2009.
- [91] A. MICHELSON. *Studies in Optics*. 1927.
- [92] M. F. MODEST. *Radiative heat transfer*. Mechanical Engineering Series, 1993.

- [93] H. P. MORGAN. Heat transfer from a buoyant smoke layer beneath a ceiling to a sprinkler spray. 1 : A tentative theory. *Fire and Materials*, 3 : 27–33, 1979.
- [94] H. P. MORGAN, K. BAINES. Heat transfer from a buoyant smoke layer beneath a ceiling to a sprinkler spray. 2 : An experiment. *Fire and Materials*, 3 : 34–38, 1979.
- [95] S. A. MORSI, A. J. ALEXANDER. An investigation of particles trajectories in two-phase flow systems. *Journal Fluid Mechanical*, 55 : 193–208, 1972.
- [96] C. MOTZKUS. *Étude de la mise en suspension de particules lors de l'impact de gouttes*. Thèse de doctorat, Université Paris 12, Créteil, France, 2007.
- [97] R. MUGELE, H. D. EVANS. Droplet size distribution in sprays. *Engineering Chemistry*, 43(6) : 1317–1324, 1951.
- [98] S. NAM. Development of a computational model simulating the interaction between a fire plume and a sprinkler spray. *Fire Safety Journal*, 26(1) : 1 – 33, 1996.
- [99] S. NAM. Numerical simulation of the penetration capability of sprinkler sprays. *Fire Safety Journal*, 32(4) : 307 – 329, 1999.
- [100] J. S. NEWMAN. Experimental evaluation of fire-induced stratification. *Combustion and Flame*, 57 : 33–39, 1984.
- [101] NFPA. Standard on water mist fire protection systems. Rapport technique, 2015.
- [102] F. X. OUF. *Caractérisation des aérosols émis lors d'un incendie*. Thèse de doctorat, Université de Rouen, 2006.
- [103] G. PARENT, P. BOULET, S. GAUTHIER, J. BLAISE, A. COLLIN. Experimental investigation of radiation transmission through a water spray. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 97(1) : 126 – 141, 2006.
- [104] PR NF EN12845. Installations fixes de lutte contre l'incendie - systèmes d'extinction automatique du type sprinkleur - conception, installation et maintenance. Comité Européen de Normalisation (CEN).
- [105] K. PRASAD, G. PATNAIK, K. KAILASANATH. A numerical study of water-mist suppression of large scale compartment fires. *Fire Safety Journal*, 37 : 569–589, 2002.
- [106] D. A. PURSER. *Toxicity Assessment of Combustion Products*. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 1988.
- [107] D. A. PURSER. *Improved fire and smoke-resistant materials for commercial aircraft interiors*. NMAB-477-1, Washington, DC, 1995.
- [108] J. G. QUINTIERE. A perspective on compartment fire growth. *Combustion Science and Technology*, 39 : 11–54, 1984.
- [109] J. G. QUINTIERE. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Section 3 Chapter 5 : Compartment Fire Modeling*. National Fire Protection Association, Quincy, Third edition, pages 3–162 – 3–170, 2002.
- [110] J. G. QUINTIERE. *Fundamentals of Fire Phenomena*. John Wiley and Sons, Ltd, University of Maryland, USA, 2006.
- [111] D. J. RASBASH. The efficiency of hand lamps in smoke. *Institute of Fire Engineers Quarterly*, 11 : 46–52, 1951.
- [112] D. J. RASBASH. Heat transfer between water sprays and flames of freely burning fires. In *Proceedings of the Symposium on the Interaction of Fluids and Particles*, pages 217–223, London, UK, June 1962.

-
- [113] D. J. RASBASH. Relevance of firepoint theory to the assessment of fire behavior of combustible material. *International Symposium on Fire safety of Combustible Materials, Université d'Edimbourg*, 1975.
- [114] D. J. RASBASH. The extinction of fire with plain water. In *Fire Safety Science*, pages 1145–1163, 1986.
- [115] T. S. RAVIGURURAJAN, M. R. BELTRAN. A model for attenuation of fire radiation through water droplets. *Fire Safety Journal*, 15(2) : 171 – 181, 1989.
- [116] G. G. ROONEY. *Buoyant Flows from Fires in Enclosures*. Thèse de doctorat, Trinity Hall, Cambridge, 1997.
- [117] G. G. ROONEY, P. F. LINDEN. Similarity considerations for non-boussinesq plumes in an unstratified environment. *Journal of Fluid Mechanics*, 318 : 237–250, 1996.
- [118] L. SCHILLER, A. NAUMANN. Über die grundlegende berechnung bei der schwerkraft aufbereitung. *V.D.I. Zeintung*, 77 : 318–320, 1935.
- [119] D. T. SHEPPARD. *Spray Characteristics of Fire Sprinklers*. Thèse de doctorat, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA, 2002.
- [120] D. T. SHEPPARD, D. R. STEPPAN. Sprinkler, heat and smoke vent, draft curtain project-phase 1 scoping tests. Rapport technique, Underwriters Laboratories, Northbrook, Illinois, 1997.
- [121] V. P. SOLOVJOV, B. W. WEBB. An efficient method for modeling radiative transfer in multicomponent gas mixtures with soot. *Journal of Heat Transfer*, 123(3) : 450–457, June 2001.
- [122] M. R. SUCHOMEL. A preliminary study of factors influencing the use of vent with ordinary-degree sprinklers. Rapport technique, Laboratories for the National Board of Fire Underwriters, July 1964.
- [123] Z. TANG, Z. FANG, J. P. YUAN, B. MERCI. Experimental study of the downward displacement of fire-induced smoke by water sprays. *Fire Safety Journal*, 55 : 35 – 49, 2013.
- [124] A. TEWARSON. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Section 3 Chapter 4 : Generation of Heat and Chemical Compounds*. National Fire Protection Association, Quincy, Third edition, pages 3–82 – 3–161, 2002.
- [125] P. H. THOMAS, P. J. HINKLEY. Design of roof-venting systems for single-story buildings. Rapport technique 10, Building Research Establishment (BRE) and Fire Research Station (FRS), Borehamwood, UK, 1964.
- [126] T. E. WATERMAN, C. E. FOXX, K. R. MNISZENEWSKI, D. L. EACRET. Fire vent of sprinklered buildings. Rapport technique, IIT Research Institute, Chicago, Illinois, July 1982. Prepared for the Fire Venting Research Committee.
- [127] C. YAO, A. S. KALELKAR. Effect of drop size on sprinkler performance. *Fire Technology*, 10, 1970.
- [128] J. YON, F. LIU, A. BESCOND, F. X. OUF, A. COPPALLE. Effects of multiple scattering on radiative properties of soot fractal aggregates. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 133(0) : 374 – 381, 2014.
- [129] H. Z. YOU. Investigation of spray patterns of selected sprinklers with the FMRC drop size measuring system. In *First International Symposium on Fire Safety Science*, pages 1165–1176, 1986.

- [130] C. F. ZHANG, R. HUO, Y. Z. LI. Stability of smoke layer under sprinkler water spray. San Francisco, 2005. Summer Heat Transfer Conference.
- [131] J. Y. ZHANG, S. LU, Q. LI, R. KWOK KIT YUEN, B. CHEN, M. YUAN, C. LI. Smoke filling in closed compartments with elevated fire sources. *Fire Safety Journal*, 54 : 14–23, 2012.
- [132] J. Y. ZHANG, W. Z. LU, R. HUO, R. FENG. A new model for determining neutral-plane position in shaft space of building under fire situation. *Building and Environment*, 43 : 1101–1108, 2008.
- [133] B. A. ZIKIRA, C. C. WESTON, M. CHODOFF, J. M. FERRER. Smoke and carbon monoxide poisoning in fire victims. *Trauma*, 12 : 641–5, 1972.

Stratification thermique et optique d'un environnement enfumé et interactions eau/fumée sous aspersion

Résumé : Ce travail est consacré à l'étude des interactions eau/fumée dans un couloir, lors du déclenchement d'un système d'aspersion dans un environnement enfumé. Il s'attache à évaluer les effets thermiques et optiques induits par une pulvérisation d'eau par sprinkler et par brouillard d'eau sur une couche de fumée générée à partir d'un foyer type bac d'heptane. Une synthèse bibliographique permet de faire l'état des travaux concernant la recherche sur l'aspersion d'eau pour le contrôle du feu lors d'un incendie en bâtiment et sur les notions de stratification des fumées. Une étude expérimentale basée sur 50 essais en grandeur réelle est présentée, impliquant des mesures thermiques et optiques. Un système d'opacimétrie laser spécifique a notamment été développé, permettant de mesurer l'opacité des fumées et les effets des interactions eau/fumée sur l'opacité et la visibilité. La partie numérique s'appuie sur le code FDS version 6 (*Fire Dynamics Simulator*) pour la simulation des essais et sur un module spécifique consacré à l'évaluation de la visibilité en parallèle. Utilisant les valeurs extraites de la simulation par FDS pour les concentrations en gouttes et en suie, ce code calcule les propriétés optiques du milieu absorbant-diffusant considéré, puis combine une méthode de Monte-Carlo et des techniques de PSF (Point Spread Function) et MTF (Modulation Transfer Function) pour évaluer l'intensité et le contraste d'images reconstruites. Les effets de déstratification thermique et optique sont comparés pour chaque technologie d'aspersion expérimentalement et numériquement.

Mots-clés: Sécurité Incendie, Fumée, Aspersion, Expérimental, FDSv6, Visibilité/Opacité



Experimental and Numerical Study of Smoke/Mist Interactions Related to Heat Transfer and Optical Properties in a Corridor

Abstract : This work was devoted to the study of water/smoke interactions in the case of water mist activation on a smoke layer. The aim was to investigate the effects observed on thermal and optical properties when injecting water particles using sprinkler or water mist devices through a smoke layer generated with an heptane pool fire. A first review was reported in order to highlight the researches devoted to water aspersion for firefighting and the smoke stratification phenomena. An experimental study based on 50 runs at real scale was presented, involving optical and thermal measurements. In particular, a laser opacimeter system was developed, which allowed measuring the smoke opacity and the effects of smoke/water interactions on opacity and visibility. Afterwards, a numerical study was conducted. On the one hand fire tests were simulated using the FDS 6th version (*Fire Dynamics Simulator*) and on the other hand a dedicated code allowed us to evaluate the visibility. The values of the soot and droplet concentrations were extracted from FDS and used into the code dedicated to visibility to calculate the optical properties of the corresponding absorbing-scattering environment. Those properties are then used in a Monte Carlo approach combined with PSF (Point Spread Function) and MTF (Modulation Transfer Function) methods to evaluate the intensity and the contrast of reconstructed images. The destratification effects based on thermal and optical criteria were compared experimentally and numerically for each technology.

Keywords: Fire Safety, Smoke, Aspersion, Experiment, FDSv6, Visibility/Opacity