



Modélisation du terme source d'incendie : montée en échelle à partir d'essais de comportement au feu vers l'échelle réelle : approche "modèle", "numérique" et "expérimentale"

Giacomo Erez

► To cite this version:

Giacomo Erez. Modélisation du terme source d'incendie : montée en échelle à partir d'essais de comportement au feu vers l'échelle réelle : approche "modèle", "numérique" et "expérimentale". Thermique [physics.class-ph]. Université de Lorraine, 2019. Français. NNT : 2019LORR0189 . tel-02499461

HAL Id: tel-02499461

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02499461>

Submitted on 5 Mar 2020

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
Laboratoire central de la préfecture de police de Paris
Laboratoire énergies, mécanique théorique et appliquée – UMR 7563
Sciences et ingénierie des molécules, des produits, des procédés et de l'énergie –
ED 608

Modélisation du terme source d'incendie : montée en échelle à partir d'essais de comportement au feu vers l'échelle réelle Approche « modèle », « numérique » et « expérimentale »

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 10 octobre 2019

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine
(spécialité Énergie et Mécanique)

par

Giacomo EREZ

Composition du jury

<i>Président :</i>	Paul-Antoine SANTONI	Professeur, Université de Corse, SPE
<i>Rapporteurs :</i>	Bernard PORTERIE	Professeur, Aix-Marseille Université, IUSTI
	Patrick van HEES	Professeur, Université de Lund, FSE
<i>Examinatrice :</i>	Armelle MULLER	Directrice, Département Feu et Environnement, CNPP
<i>Encadrants :</i>	Pascal BOULET	Professeur, Université de Lorraine, LEMTA
	Anthony COLLIN	Maître de conférences habilité, Université de Lorraine, LEMTA
	Mathieu SUZANNE	Ingénieur, Laboratoire central de la préfecture de police

Remerciements

Pour commencer, j'aimerais exprimer toute ma gratitude à mes directeurs de thèse au LEMTA, Pascal Boulet et Anthony Collin, ainsi que mon encadrant au LCPP, Mathieu Suzanne, pour la confiance qu'ils m'ont accordée et la passion avec laquelle ils se sont impliqués dans ces travaux. Merci pour votre bienveillance et tous vos précieux conseils. Vous êtes pour moi des exemples, que ce soit pour l'aspect scientifique ou de nombreux autres domaines qui me tiennent à cœur.

Merci à Bernard Porterie et Patrick van Hees, les rapporteurs de cette thèse, pour le temps qu'ils m'ont accordé et leur remarques constructives, ainsi qu'aux autres membres du jury, Paul-Antoine Santoni et Armelle Muller, pour les échanges enrichissants qui ont eu lieu lors de la soutenance.

Je tiens aussi à remercier ceux qui m'ont fait confiance au LCPP, Pierre Carlotti et Hervé Bazin, anciens directeur et chef de pôle respectivement, et surtout Aurélien Thiry-Muller, chef de la section Ingénierie du feu (maintenant Sciences du feu et électricité) pour l'intérêt qu'il a porté à cette thèse, les moyens qu'il a mis à ma disposition et pour m'avoir fait profiter de son expérience.

Je suis extrêmement reconnaissant envers Gilles Parent pour tout le temps qu'il a consacré aux travaux présentés ici, de l'acquisition des données à leur valorisation, et pour tout ce que j'ai appris à ces occasions.

Rien n'aurait été possible sans les membres de la section IDF, Delphine Cendra, Manel Chaouchi, Christophe Czekaj, Nicolas Dreuille, Sylvie Dupont, Eddie Faure, Renato Mole-Antoniazza, Jean-Luc Paillat et Adissa Traoré. Merci pour votre implication, tout ce que vous m'avez transmis et tous les bons moments que nous avons partagés ! Merci aussi à tous ceux que j'ai côtoyés au LCPP : les permanents (par exemple le Goth pour ses blagues nulles à midi), les apprentis et les stagiaires, en particulier Adrien qui a directement contribué aux travaux présentés ici.

Un grand merci à Zoubir Acem, Olivier Carrivain, Solange Ferriere, Samia Haouari Harak, Rabah Mehaddi et Lucas Terrei, les membres de l'équipe Feux, pour leur aide et les bons moments que j'ai pu passer à leurs côtés au LEMTA, à la Bouzule ou en conférence. Merci aussi aux anciens membres, Thomas Gasparotto, Alexandre Jenft, Alexis Marchand et Nicolas Trévisan, pour leurs conseils avisés. Je dois aussi des remerciements aux équipes techniques du LEMTA, avec qui j'ai moins eu l'occasion d'échanger mais qui ont grandement contribué aux travaux expérimentaux présentés ici. Merci à David Lacroix pour avoir accepté de faire partie de mon comité de suivi, ainsi qu'à Irène Léonard et Valérie Reichhart pour leur efficacité remarquable et leur grande gentillesse.

Encore merci à Armelle Muller, Nicolas Trévisan et les autres personnels du CNPP sans qui la campagne expérimentale finale n'aurait sûrement pas été possible.

Ils ont déjà été cités, mais tiens à remercier encore tous ceux qui ont pris le temps de relire ce manuscrit.

Big-up à tous les doctorants, Anas, Mehdi, Mylène, Axel, Juan, Julian, Philippe, Giovanni, Jérémy et bien d'autres, pour les discussions autour de nos travaux, la résolution de mes problèmes de trigonométrie ou de lancer rayons, la création de la *disposition galactique*[®], les discussions psycho-socio et les moments de détente. Mentions spéciales à Silvio, Lucas, Renato et Morgan, avec qui j'ai eu de nombreux échanges enrichissants (et partagé des soirées mémorables). Et courage à ceux qui n'ont pas fini! ☺

Je ne serais certainement pas là sans ceux qui m'ont montré la voie et aiguillé, comme Anne Thiry-Muller (dès Mulhouse), Olivier Vauquelin, Fabien Candelier et Eric Casalé (depuis Marseille) : un grand merci à vous.

Si j'ai pu suivre cette voie c'est surtout grâce au soutien de ma famille, qui m'a toujours permis de m'épanouir sans me poser de question : un merci est bien peu pour tout ce que je vous dois, mais j'espère que vous savez à quel point je suis reconnaissant.

Mention spéciale à Philippe aussi, pour avoir été le meilleur coloc' que j'ai jamais eu et m'avoir supporté en période de rédaction !

Dédicace au *LCPP Running* et à ses supporters, notamment Caro (oui, je suis fier de mes « feux de matelas »!).

Enfin, merci à tous les autres : les voyageurs m'ayant fait découvrir Vernon ; tous ceux avec qui j'ai partagé de bons moments, autour d'un thé par exemple ; les copains bordelais, mulhousiens, marseillais, nancéiens, vosgiens et parisiens. Je pense sincèrement que tout mon entourage, professionnel et personnel, a contribué à cette thèse et je n'aurais pu espérer meilleur environnement : je souhaite à tout doctorant d'évoluer dans les mêmes conditions !

Tables des matières

Table des figures	i
Liste des tableaux	s
Acronymes	u
Nomenclature	w
 Partie I Introduction	 1
 Chapitre 1 Contexte et généralités	 3
1.1 Contexte	3
1.2 Généralités	5
1.2.a Incendie : principaux phénomènes	5
1.2.b Simulation numérique des incendies	7
1.2.c Récapitulatif	8
 Chapitre 2 État de l’art	 9
2.1 Rayonnement	9
2.1.a Éléments théoriques et expérimentaux	9
2.1.b Modèles disponibles	14

2.2	Décomposition et propagation	25
2.2.a	Éléments théoriques et expérimentaux	25
2.2.b	Modèles disponibles	27

Approche retenue 33

1	Objectifs	33
2	Méthodologie	33
3	Limites	35

Partie II Campagnes expérimentales 37

Chapitre 3 Vue d'ensemble 39

3.1	Combustibles	40
3.1.a	Blocs de mousse polyuréthane	40
3.1.b	Feux de bac	41
3.1.c	Bûchers de bois	43
3.2	Sites d'essais	44
3.2.a	Échelle réelle	46
3.2.b	Cône calorimètre	46

Chapitre 4 Métrologie 53

4.1	Mesures classiques	53
4.1.a	Pesée	53
4.1.b	Fluxmétrie	54
4.2	Mesures relatives à la flamme	55
4.2.a	Imagerie visible	55

4.2.b	Opacimétrie et spectrométrie	58
4.3	Mesures de la propagation	62
4.3.a	Thermométrie	62
4.3.b	Imagerie visible	63
4.3.c	Photogrammétrie	66
	Résumé	69
	 Partie III Rayonnement de la flamme	 71
	 Chapitre 5 Données expérimentales sur le rayonnement	 73
5.1	Géométrie de flamme	74
5.1.a	Hauteur de flamme	74
5.1.b	Forme de flamme simplifiée	81
5.2	Propriétés radiatives	92
5.2.a	Coefficient d'absorption	92
5.2.b	Température de flamme équivalente	96
5.3	Densités de flux thermiques	100
	 Chapitre 6 Modélisation du rayonnement	 107
6.1	Modèle académique	107
6.1.a	Éléments utilisés pour le lancer de rayons	107
6.1.b	Comparaison du lancer de rayons à l'expérience	108
6.2	Évaluation de Fire dynamics simulator	112
6.2.a	Étude de convergence pour FDS	112
6.2.b	Comparaison de FDS à l'expérience et au lancer de rayons . . .	115

Résumé	127
 Partie IV Propagation pour la mousse polyuréthane	 129
 Chapitre 7 Données expérimentales sur le comportement au feu de la mousse polyuréthane	 131
7.1 Perte de masse au cône calorimètre	132
7.1.a Résultats expérimentaux	132
7.1.b Choix des fonctions	134
7.1.c Corrélations avec l'éclairement	135
7.1.d Prédictions	137
7.1.e Discussion	140
7.2 Propagation à échelle réelle	141
7.2.a Propagation en surface	141
7.2.b Propagation en profondeur	146
7.2.c Perte de masse	151
7.2.d Comparaison des résultats	151
 Chapitre 8 Modélisation de la propagation	 157
8.1 Implémentation FDS	157
8.1.a Fonctions concernées	158
8.1.b Ajouts et modifications	160
8.2 Application	163
8.2.a Simulation de blocs $1,00 \times 1,00 \times 0,05 \text{ m}^3$: FDS original	165
8.2.b Simulation de blocs $1,00 \times 1,00 \times 0,05 \text{ m}^3$: FDS modifié	167
8.2.c Comparaisons	167

8.2.d Échantillons plus épais	170
Résumé	175
Partie V Conclusion	177
Chapitre 9 Conclusions et perspectives	179
9.1 Conclusions	179
9.2 Perspectives	181
9.2.a Consolidation et valorisation de l'existant	181
9.2.b Développement des outils et méthodes	182
Bibliographie	185
Annexes	201
Annexe A Liste des biais potentiels	201
Annexe B Différences entre essais ADP et PROMETHEI	205
Annexe C Détails des modèles de rayonnement	215
Annexe D Exploitation préliminaire des mesures de température	225

Table des figures

1.1	Exemple des dégâts causés par un incendie (reconstitution pour une formation).	4
1.2	Représentation simplifiée des phénomènes intervenant lors d'un feu de compartiment (inspiré de [14]).	6
2.1	Spectre électromagnétique : longueurs d'ondes λ associées aux différents domaines.	12
2.2	Panneau radiant et capteur horizontal.	14
2.3	Illustration de la relation permettant de calculer le facteur de forme entre les surfaces S_1 et S_2 (voir aussi Équation 2.10).	15
2.4	Panneau radiant et capteur (noir), avec 1000 positions et directions de départ tirées aléatoirement (vert).	17
2.5	Panneau radiant et capteur (noir), avec les positions et les rayons de départ (rayons impactant le sol à l'avant du panneau en vert, ceux impactant le capteur en rouge [2 sur 1000 ici], les autres en gris).	17
2.6	Panneau radiant et capteur (noir), avec 1000 positions et directions de départ tirées aléatoirement (vert).	18
2.7	Panneau radiant et capteur (noir), avec les positions et les rayons de départ (rayons impactant le plan du panneau en vert, ceux impactant le panneau en rouge [71/1000 ici], les autres en gris).	19
2.8	Densité de flux calculée numériquement (méthodes directe et réciproque) et analytiquement, en fonction du nombre de rayons lancés.	19
2.9	Forme de flamme simplifiée et capteur horizontal.	20
2.10	Illustration de la relation permettant de calculer le « facteur de forme » entre un volume et une surface (voir aussi Équation 2.17).	20
2.11	Exemple de 1000 positions de départ tirées aléatoirement pour une géométrie cône sur cylindre (base et haut du cylindre en noir).	21

2.12 Répartition du flux au sol pour une géométrie cône sur cylindre , et des propriétés de flamme arbitraires ($r_{cy} = 0,2\text{ m}$, $h_{cy} = 0,3\text{ m}$, $h_{co} = 0,3\text{ m}$, $\kappa = 1$ et $T = 1200\text{ K}$). Isocontours en pointillés, base de la flamme en traitillés.	22
2.13 Flux reçu au sol en fonction de la distance au centre d'une flamme cône sur cylindre (propriétés de flamme arbitraires, voir Figure 2.12). Rayon de la flamme en traitillés.	23
3.1 Vue d'ensemble des essais réalisés. Les dimensions des locaux sont indiquées sous leurs noms.	40
3.2 Échantillon de mousse pour le cône calorimètre ($10 \times 10 \times 5\text{ cm}^3$).	42
3.3 Allumage d'un bûcher de $360 \times 320\text{ m}^2$ à ADP (photo CTICM).	44
3.4 Exemples de palettes pour les petites échelles (essais PROMETHEI).	45
3.5 Aperçus d'essais à ADP. Une partie de la métrologie est visible sur la Figure 3.5b : arbres de thermocouples (chaînes verticales), fluxmètres (mâts verticaux à droite), réception du système d'opacimétrie (structure en béton cellulaire devant le foyer).	47
3.6 Aperçu d'un essai mousse polyuréthane de 6 m^2 sur le site du CNPP.	48
3.7 Aperçu d'un essai kérosène de $0,5\text{ m}^2$ à la Bouzule (PROMETHEI).	49
3.8 Structure d'essais au fort de la Briche (LCP/BSPP).	49
3.9 Cône calorimètre du LCP.	50
3.10 Configurations A, B et C (de gauche à droite).	51
3.11 Comparaison des trois configurations pour un éclairage reçu de 35 kW m^{-2}	52
4.1 Schéma de la disposition des fluxmètres verticaux et horizontaux à PROMETHEI (premier plan) et ADP (arrière plan). Échelles non respectées.	55
4.2 Exemples d'images instantanées prises lors d'essais kérosène à ADP (70 cm, rangée du haut) et PROMETHEI (30 cm, rangée du bas). De gauche à droite : les images brutes, les images seuillées, les contours de flamme. Les Figures d et e sont quasiment identiques en raison des réglages des caméras utilisées à PROMETHEI.	57
4.3 Éléments du montage opacimétrique.	59
4.4 Dispositif d'opacimétrie : (a) émission, (b) détection.	60
4.5 Exemple du support pour les blocs de 1,00 m après un essai. Les thermocouples visibles sont mis en évidence par des cercles rouges.	62

4.6	Position des thermocouples pour les blocs de mousse polyuréthane de 20 cm d'épaisseur (trois largeurs différentes). La croix rouge représente la position d'allumage (centre des blocs) et les cercles concentriques en traitillés les quatre distances auxquelles étaient positionnés les thermocouples. Les côtés des blocs sont donnés en traits pleins et les coordonnées en mètres.	64
4.7	Illustration de l'hypothèse de propagation symétrique utilisée pour exploiter les mesures de température. Exemple des thermocouples D (face arrière) pour un bloc de 1,00 m de côté (coordonnées en mètres). Les marqueurs pleins représentent les positions auxquelles étaient faites les mesures, ceux vides les positions auxquelles les résultats ont été supposés égaux aux mesures (à profondeur égale).	65
4.8	Schémas de la propagation à la surface d'un bloc, avec les axes appelés x et y (par rapport à la caméra exploitée). Vue schématique depuis une caméra (à gauche) et image après correction grâce à la DLT [136, 139] (à droite). .	66
4.9	Exemples de photos brutes pour le bloc éteint à un diamètre de 20 cm (1 photo sur 6 représentée).	67
4.10	Vues, dans CloudCompare, d'un nuage de points texturé (bloc avec un diamètre dégradé de 20 cm).	68
5.1	Hauteur de flamme pour les bacs de kérosène de 1 m de côté.	74
5.2	Hauteur de flamme selon deux caméras perpendiculaires pour deux essais de kérosène de 0,3 m de côté.	75
5.3	Hauteur de flamme en fonction du diamètre du foyer pour le kérosène (essais selon le protocole défini pour chaque site).	76
5.4	Corrélations entre la hauteur de flamme et diamètre du foyer pour le kérosène.	77
5.5	Vitesse de perte de masse surfacique en fonction du diamètre du foyer pour le kérosène (essais selon le protocole défini pour chaque site).	78
5.6	Hauteur de flamme en fonction de la vitesse de perte de masse pour le kérosène (essais selon le protocole défini pour chaque site).	79
5.7	Hauteur de flamme pour les blocs de mousse polyuréthane de 1 m de côté.	80
5.8	Hauteur de flamme en fonction du diamètre des blocs pour la mousse polyuréthane. Les hauteurs pour le plus grand diamètre sont sûrement sous-estimées (flammes en dehors du cadre de la caméra).	81
5.9	Ensemble des formes de flamme simplifiées évaluées dans le cadre de ce travail, avec leurs paramètres.	82
5.10	Exemple de contour de flamme (kérosène 1 m ²) et de l'ajustement des formes simples.	83

5.11	Erreur quadratique moyenne de chaque forme simplifiée en fonction du diamètre du foyer pour le kérosène (sélection d'essais). Les deux parties de l'axe des ordonnées ne sont pas à la même échelle afin de mieux visualiser tous les points.	84
5.12	Erreur quadratique moyenne de chaque forme simplifiée en fonction du diamètre des blocs pour la mousse polyuréthane (sélection d'essais). Les deux parties de l'axe des ordonnées ne sont pas à la même échelle afin de mieux visualiser tous les points.	85
5.13	Hauteurs des formes de flamme simplifiées cône et cône sur cylindre en fonction du diamètre du foyer pour le kérosène. La hauteur de flamme calculée en Section 5.1.a.i est rappelée pour comparaison.	87
5.14	Hauteurs des formes de flamme simplifiées cône et cône sur cylindre en fonction du diamètre des blocs pour la mousse polyuréthane. La hauteur de flamme déterminée en Section 5.1.a.i est rappelée pour comparaison. Les hauteurs pour le plus grand diamètre sont probablement sous-estimées (flammes en dehors du cadre de la caméra).	88
5.15	Aperçu d'un essai mousse polyuréthane de 3 m ² sur le site du CNPP. . . .	89
5.16	Valeurs des paramètres de la forme cône sur cylindre pour les foyers de kérosène.	90
5.17	Valeurs des paramètres de la forme cône pour les foyers de mousse polyuréthane.	91
5.18	Transmittances (échelle log) pour un foyer de kérosène de 70 cm de côté (quatre longueurs d'onde visible-proche infrarouge).	93
5.19	Épaisseurs optiques moyennes en fonction de la longueur d'onde pour les foyers de kérosène (voir largeurs des bacs en légende). Échelle log-log en base 2.	94
5.20	Paramètres de l'Équation 4.6 pour les foyers de kérosène.	95
5.21	Exemple de spectres « instantanés » pour un foyer de kérosène de 50 cm de large.	97
5.22	Spectres d'émission moyens pour des feux de kérosène jusqu'à 100 cm de large (lignes continues) et résultats de l'ajustement de l'Équation 4.7 en ne fixant que α (traitillés et symboles).	98
5.23	Paramètres de l'Équation 4.7 pour les foyers de kérosène ($\alpha = 1,07$). . . .	99
5.24	Densités de flux pour des foyers de kérosène (haut, 1 m de côté) et de mousse polyuréthane (bas, 70 et 175 cm de côté). Un symbole par fluxmètre, donnés à titre indicatif.	101

5.25	Évolution de la densité de flux en fonction de la hauteur pour des foyers de kérosène. Capteurs orientés verticalement, distance par rapport au bord du bac : $(1,2 \pm 0,2)$ m. Un marqueur/une couleur par répétition, croix noires pour les données de la littérature.	102
5.26	Évolution de la densité de flux en fonction de la distance par rapport au bord du foyer pour des bacs de kérosène (repérés par leur largeur). Capteurs orientés verticalement et situés à deux hauteurs (1 et 2 m par rapport au bord du bac). Un marqueur/une couleur par répétition.	103
5.27	Évolution de la densité de flux en fonction de la hauteur pour les foyers de mousse polyuréthane. Capteurs orientés verticalement, distance par rapport au bord du bloc : $(1,2 \pm 0,2)$ m pour les bacs de 30 à 70 cm et $(2,5 \pm 0,5)$ m pour les bacs de 100 à 250 cm. Un marqueur/une couleur par répétition. . .	105
5.28	Positions des fluxmètres orientés verticalement pour les feux de kérosène. Un essai par taille, repéré par sa largeur en centimètres (voir couleurs). La hauteur et la distance sont données par rapport au bord du bac.	106
6.1	Comparaison des densités de flux mesurées (+) et calculées (×) pour des foyers kérosène de 30 et 50 cm. Les figures de gauche représentent les évolutions à distance fixée $((1,2 \pm 0,2)$ m), capteurs orientés verticalement, et les figures de droite les évolutions à hauteur fixée $((0,0 \pm 0,2)$ m), capteurs orientés horizontalement.	109
6.2	Comparaison des densités de flux mesurées (+) et calculées (×) pour des foyers kérosène de 175 et 250 cm. Les figures de gauche et de droite représentent les évolutions en fonction de la distance par rapport au bord du foyer à deux hauteurs. Tous les capteurs étaient orientés verticalement. . .	110
6.3	Comparaison des densités de flux mesurées (+) et calculées (×) pour des foyers de mousse polyuréthane de 175 et 250 cm. Les figures de gauche représentent les évolutions à distance fixée $((2,4 \pm 0,3)$ m), capteurs orientés verticalement, et les figures de droite les évolutions à hauteur fixée $((0,0 \pm 0,1)$ m), capteurs orientés horizontalement.	111
6.4	HRRPUV le long de l'axe du foyer pour différentes tailles de maille.	113
6.5	Température le long de l'axe du foyer pour différentes tailles de maille. . .	114
6.6	Densité de flux reçue horizontalement pour différents nombres d'angles solides (mailles de 2 cm). Valeurs moyennes sur dix secondes pour les simulations et la phase stationnaire pour l'essai, les barres représentent les écarts-type.	116
6.7	Densité de flux reçue verticalement pour différents nombres d'angles solides (mailles de 2 cm). Valeurs moyennes sur dix secondes pour les simulations et la phase stationnaire pour l'essai, les barres représentent les écarts-type. . .	117

6.8	Comparaison des densités de flux mesurées (+) et calculées, par lancer de rayons (×) et FDS (○), pour des foyers kérosène de 30 et 50 cm. Les figures de gauche représentent les évolutions à distance fixée ((1,2 ± 0,2) m), capteurs orientés verticalement, et les figures de droite les évolutions à hauteur fixée ((0,0 ± 0,2) m), capteurs orientés horizontalement.	119
6.9	Comparaison des densités de flux mesurées (+) et calculées, par lancer de rayons (×) et FDS (○), pour des foyers kérosène de 70 et 100 cm. Les figures de gauche et de droite représentent les évolutions en fonction de la distance par rapport au bord du foyer à deux hauteurs. Tous les capteurs étaient orientés verticalement.	120
6.10	Comparaison des densités de flux mesurées (+) et calculées, par lancer de rayons (×) et FDS (○), pour des foyers kérosène de 175 et 250 cm. Les figures de gauche et de droite représentent les évolutions en fonction de la distance par rapport au bord du foyer à deux hauteurs. Tous les capteurs étaient orientés verticalement.	121
6.11	Comparaison des densités de flux mesurées (+) et calculées, par lancer de rayons (×) et FDS (○), pour des foyers de mousse polyuréthane de 30 et 50 cm. Les figures de gauche représentent les évolutions à distance fixée ((1,1 ± 0,1) m), capteurs orientés verticalement, et les figures de droite les évolutions à hauteur fixée ((0,0 ± 0,1) m), capteurs orientés horizontalement.	122
6.12	Comparaison des densités de flux mesurées (+) et calculées, par lancer de rayons (×) et FDS (○), pour des foyers de mousse polyuréthane de 70 et 100 cm. Les figures de gauche représentent les évolutions à distance fixée ((1,0 ± 0,1) m ou (3,0 ± 0,1) m), capteurs orientés verticalement, et les figures de droite les évolutions à hauteur fixée ((0,0 ± 0,1) m), capteurs orientés horizontalement.	123
6.13	Comparaison des densités de flux mesurées (+) et calculées, par lancer de rayons (×) et FDS (○), pour des foyers de mousse polyuréthane de 175 et 250 cm. Les figures de gauche représentent les évolutions à distance fixée ((2,4 ± 0,3) m), capteurs orientés verticalement, et les figures de droite les évolutions à hauteur fixée ((0,0 ± 0,1) m), capteurs orientés horizontalement.	124
7.1	Vitesses de perte de masse (MLR) expérimentales au cône calorimètre à différents éclairagements.	133
7.2	Schéma des MLR observés au cône calorimètre pour des éclairagements de 45 kW m ⁻² et plus, avec le nom des paramètres utilisés par la suite.	134
7.3	Détermination des paramètres à partir du MLR expérimental (moyenne des résultats à 60 kW m ⁻²).	136

7.4	Exemples de valeurs pour des paramètres des Équations 7.1 et 7.2 en fonction de l'éclairement (croix rouges), ainsi que les corrélations retenues (traitillés noirs).	137
7.5	Valeurs finales pour σ (croix noires), et corrélation initiale (traitillés noirs).	138
7.6	Comparaison des MLR expérimentaux (moyennes des répétitions, points bleus) et prédits (traits rouges) pour différents éclairagements.	139
7.7	Masse brûlée (intégrale du MLR), pour les essais (aire bleue) et le modèle (points noirs).	140
7.8	Rayons de la zone en feu calculés par traitement d'images pour les essais sur des blocs de 30 et 175 cm de côté. Rayons selon la direction x en traits pleins et y en traitillés (y étant l'axe de la caméra, voir Figure 4.8), une couleur par répétition.	142
7.9	Évolutions moyennes du rayon de la zone en feu pour chaque taille de bloc (indiquées sur le graphe). Les demi-largeurs sont représentées en traitillés.	143
7.10	Étapes de l'ajustement des mesures de rayon avec l'Équation 7.6. Exemple pour les blocs de 70 cm de côté (moyenne sur trois essais).	144
7.11	Rayons de la zone en feu (points) et ajustements avec l'Équation 7.6 (traits pleins). Les données ajustées sont les valeurs moyennes pour chaque taille de bloc (indiquées sur le graphe). Les demi-largeurs sont représentées en traitillés.	145
7.12	Rayons de la zone en feu sur des blocs de mousse polyuréthane, obtenus dans le cadre de ce travail par traitement vidéo (traits pleins, données recalées) et par Mizuno et al. [126, p. 35] (croix).	146
7.13	Aires de la zone en feu (points) et ajustements avec l'Équation 2.24 (traits pleins). Les données ajustées sont les valeurs moyennes pour chaque taille de bloc (indiquées sur le graphe). Les demi-largeurs sont représentées en traitillés.	147
7.14	Données pour les différents thermocouples placés dans un bloc de mousse polyuréthane de 1,00 m de côté, et temps sélectionnés pour représenter l'arrivée du front de décomposition (première augmentation de température supérieure à $10\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$, voir croix rouges).	148
7.15	Position estimée du front de décomposition au cours du temps pour tous les blocs de mousse polyuréthane de $1,00 \times 1,00 \times 0,20\text{ m}^3$. Un graphe par profondeur, voir lettres et valeurs entre parenthèses (données par rapport à la surface du bloc).	149

7.16	Nuages de points pour des blocs dont la propagation a été arrêtée à des diamètres de 75 cm et 40 cm respectivement (blocs d'environ 100 et 75 cm de côté). Les profils en $x = 0$ et $y = 0$ sont aussi donnés en Figure a (lignes noires), et la zone dégradée est mise en évidence sur la Figure b (cercle rouge, noirci à l'intérieur).	150
7.17	Profils médians de la cuvette formée par la propagation sur les blocs de mousse polyuréthane. L'exemple de détermination du profil médian (Figure a) correspond au bloc dont la propagation a été arrêtée à 75 cm. . . .	151
7.18	Vitesses de perte de masse (MLR) pour les essais de mousse polyuréthane exploités (un graphe par largeur de bloc, une courbe par répétition).	152
7.19	Représentations de la zone dégradée suivant deux techniques : traitement vidéo pour le cercle noir (blocs de 70 cm à 103 s) et photogrammétrie pour la surface restante (bloc de 100 cm à 130 s).	153
7.20	Profils de la décomposition de blocs de mousse polyuréthane, obtenus dans le cadre de ce travail par photogrammétrie (traits pleins) et traitement vidéo (+, × et o pour des blocs de 100 ; 175 et 250 cm resp.) ainsi que par Mizuno et al. [126, p. 36] (traitillés et temps précédés d'un astérisque). Temps donnés en secondes.	154
7.21	Estimations de l'aire en feu suivant deux mesures permettant de caractériser la zone dégradée visible en surface (traitement vidéo et photogrammétrie) ou en profondeur (photogrammétrie). Les ajustements des mesures par photogrammétrie avec l'Équation 2.24 sont aussi donnés. Un décalage temporel de 27 s est appliqué aux résultats de la photogrammétrie.	155
7.22	Vitesse de perte de masse (MLR) et estimations de l'aire en feu par traitement vidéo (traitillés noirs) pour les essais de 70 cm (Figure a, données calées en temps), ainsi que le rapport de ces grandeurs (vitesse de perte de masse surfacique, MLRPUA, Figure b ; seule la partie centrale est présentée).156	
8.1	Fonctionnement basique de FDS avant implémentation, articulation des variables et procédures.	159
8.2	Fonctionnement basique de FDS après implémentation, articulation des variables et procédures.	162
8.3	Débits calorifiques pour un bloc de mousse polyuréthane de $1,00 \times 1,00 \times 0,05 \text{ m}^3$, en entrée et en sortie d'une simulation avec le code FDS non modifié. Le HRR en entrée a été obtenu avec le modèle de Sayada [129].	166
8.4	Valeurs de flux incident à la surface du foyer (figures de gauche) et de débit massique de combustible (figures de droite) tirées d'une simulation FDS (bloc de mousse polyuréthane de $1,00 \times 1,00 \times 0,05 \text{ m}^3$) à deux instants arbitraires.	168

8.5	Vitesses de perte de masse (MLR) pour des blocs de mousse polyuréthane de $1,00 \times 1,00 \times 0,05 \text{ m}^3$. Comparaison des résultats d'essais, du modèle « simple » de Sayada [129] et de FDS (avec les implémentations présentées plus tôt). Les données ont été recalées en temps.	169
8.6	Changement d'épaisseur au cône calorimètre : résultats expérimentaux à gauche (50 kW m^{-2} , tirés de [124]) et principe de la correction apportée aux données à droite (masse supplémentaire illustrée par le rectangle gris). . . .	171
8.7	Vitesses de perte de masse (MLR) pour des blocs de mousse polyuréthane de $1,00 \times 1,00 \times 0,10 \text{ m}^3$. Comparaison des résultats expérimentaux et numériques (FDS avec les implémentations présentées plus tôt). Données recalées en temps.	172
8.8	Vitesses de perte de masse (MLR) pour des blocs de mousse polyuréthane de $1,00 \times 1,00 \times 0,20 \text{ m}^3$. Comparaison des résultats expérimentaux et numériques (FDS avec les implémentations présentées plus tôt). Données recalées en temps.	173
B.1	Exemples représentatifs de la répétabilité des mesures (bac de 50 cm de côté, une courbe par répétition).	205
B.2	Illustration des différences entre les résultats obtenus à PROMETHEI et ADP (traitillés) pour les bacs de 70 cm de côté (une courbe par répétition).	206
B.3	Évolution de la vitesse de perte de masse et de la hauteur de flamme avec la taille du bac, et comparaison à des corrélations de la littérature (rappels des Figures 5.5 et 5.4). Les cercles en Figure (a) représentent les valeurs obtenues en augmentant la quantité de combustible.	207
B.4	MLR en fonction du temps pour les essais de kérosène de 50 cm de côté sans eau à PROMETHEI (légendes : masse de combustible et d'eau en grammes).	208
B.5	MLR en fonction du temps pour les essais de kérosène de 50 cm de côté avec et sans eau à PROMETHEI (légendes : masse de combustible et d'eau en grammes).	209
B.6	MLR en fonction du temps pour les essais de kérosène de $0,5 \text{ m}^2$ avec eau à PROMETHEI (légendes : masse de combustible et d'eau en grammes).	210
B.7	Épaisseurs optiques moyennes sur la phase stationnaire pour différentes longueurs d'ondes et différents essais de kérosène en $0,50 \text{ m}^2$ (marqueurs), moyennes et écarts-types pour les essais PROMETHEI (traits et plages de couleur).	212
B.8	Épaisseurs optiques en fonction du temps pour les essais de kérosène de 70 cm. Deux longueurs d'ondes communes à tous ces essais.	213
B.9	Épaisseur optique en fonction du temps pour deux essais de $0,50 \text{ m}^2$ (1500 et 4500 g de kérosène respectivement, le double d'eau).	214

C.1	Modèle de flamme cône sur cylindre (base et haut du cylindre en noir), avec 1000 positions de départ : celles dont les rayons impactent le sol en vert (ces 501 rayons sont aussi représentés), les autres en gris.	223
D.1	Position du front de décomposition au cours du temps pour les blocs de 1,00 m de côté, à différents instants. Les croix représentent les points de mesure.	225
D.2	Isocontours de temps (arrivée estimée de la flamme, en secondes). Coupes en $x = 0$ pour différentes tailles de bloc.	226
D.3	Isocontours de temps (arrivée estimée de la flamme, en secondes). Comparaisons des résultats moyens pour chaque taille de bloc, seules les valeurs pour $x = 0$ et $y > 0$ sont représentées.	227
D.4	Isocontours de temps avec une correction arbitraire de +100 s pour les blocs de 1,00 m. Résultats moyens pour chaque taille de bloc, seules les valeurs pour $x = 0$ et $y > 0$ sont représentées.	228
D.5	Limites de la zone dégradée suivant plusieurs approches, pour différentes tailles de bloc de mousse polyuréthane : rayons en surface d'après le traitement vidéo (croix), profils en profondeur d'après la photogrammétrie et l'exploitation des thermocouples (lignes continues et discontinues respectivement). Les temps sont donnés en secondes, seules les valeurs pour $x = 0$ et $y > 0$ sont représentées. Les données de l'exploitation des thermocouples pour les blocs de 1,00 m sont décalées de +100 s.	229

Liste des tableaux

2.1	Valeur de α (Équation 2.23) pour différentes vitesses de croissance [101]. . .	30
3.1	Dimensions des blocs de mousse polyuréthane utilisés.	41
3.2	Caractéristiques des bacs utilisés pour les feux de liquides. La hauteur libre (estimée) est celle du début d’essai.	42
3.3	Essais avec/sans eau suivant les tailles de foyer (pas d’essai heptane avec les bacs LCPP).	43
3.4	Caractéristiques des bûchers de bois.	43
4.1	Principales caractéristiques des balances utilisées.	54
4.2	Principales caractéristiques des fluxmètres utilisés.	54
4.3	Principales caractéristiques des caméras et objectifs utilisés. Rés. max. pour résolution maximale et FPS pour nombre d’images par seconde (<i>frames per second</i>). Si une seule valeur de FPS est donnée, elle correspond à la résolution maximale.	56
6.1	Valeurs de certains paramètres utilisés pour les simulations de feux de kérosène avec FDS.	118
6.2	Valeurs de certains paramètres utilisés pour les simulations de feux de mousse polyuréthane avec FDS.	119
7.1	Corrélations entre les paramètres des Équations 7.1 et 7.2 et l’éclairement.	138
7.2	Valeurs des paramètres pour les Équations 7.6 et 2.24 décrivant les rayons et aires de la zone en feu à la surface des blocs de mousse polyuréthane et erreur quadratique moyenne (RMSE).	145
7.3	Valeurs des paramètres pour l’Équation 2.24 décrivant l’aire de la zone en feu à la surface et en profondeur de blocs de mousse polyuréthane. Valeurs obtenues par photogrammétrie (« Photo. ») et traitement vidéo (résultats tirés du Tableau 7.2).	154

8.1	Principaux ajouts et modifications (*) au code source de FDS.	164
8.2	Valeurs de certains paramètres utilisés pour les simulations de feux de mousse polyuréthane avec FDS (en plus de ceux donnés dans le Tableau 6.2).	165

Acronymes

ADP	Groupe ADP, anciennement Aéroports de Paris
Anses	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
ATG	Analyseur thermogravimétrique
BSPP	Brigade de sapeurs-pompiers de Paris
CBHF	<i>California bureau of home furnishings</i>
CBUF	<i>Combustion behaviour of upholstered furniture</i>
CFAST	<i>Consolidated model of fire and smoke transport</i>
CFD	<i>Computational fluid dynamics</i>
CNPP	Centre national de prévention et de protection
CTICM	Centre technique industriel de la construction métallique
DAT	Diaminotoluène
DLT	<i>Direct linear transform</i>
DNS	<i>Direct numerical simulation</i>
DSC	<i>Differential scanning calorimetry</i>
ESIA	École des sciences des incendies et applications
ETR	Équation du transfert radiatif
FDS	<i>Fire dynamics simulator</i>
FPA	<i>Fire propagation apparatus</i>
FPS	<i>Frames per second</i>
HRR	<i>Heat release rate</i>
HRRPUA	<i>Heat release rate per unit area</i>
HRRPUV	<i>Heat release rate per unit volume</i>
IR	Infrarouge
LCPP	Laboratoire central de la préfecture de police de Paris
LEMTA	Laboratoire énergies, mécanique théorique et appliquée
LES	<i>Large eddy simulation</i>
LIFT	<i>Lateral ignition and flame spread test</i>

Acronymes

MLR	<i>Mass loss rate</i>
MLRPUA	<i>Mass loss rate per unit area</i>
NFIRS	<i>National fire incident reporting system</i>
NIST	<i>National institute of standards and technology</i>
PROMETHEI	Plateforme de recherche opérationnelle en métrologie thermique dédiée aux essais incendies
PU	Polyuréthane
RANS	<i>Reynolds averaged Navier-Stokes simulation</i>
RCCI	Recherche des causes et circonstances d'incendie
RMSE	<i>Root mean square error</i>
SBI	<i>Single burning item</i>
SYLVIA	Système de logiciels pour l'étude de la ventilation de l'incendie et de l'aérocontamination
TDI	Toluène diisocyanate

Nomenclature

Lettres latines

A	Aire [m^2]
C	Constante
c_0	Vitesse de la lumière dans le vide ($299\,792\,458\,\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
c_p	Capacité calorifique [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
D, d	Diamètre [m]
D^*	Diamètre adimensionné $[-]$
E	Énergie [J]
e	Distance parcourue dans la flamme ou épaisseur de celle-ci [m]
F	Facteur de forme $[-]$ ou fraction (de MLRPUA p. ex.) $[-]$
g	Pesanteur normale ($9,80665\,\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
h	Hauteur [m] ou constante de Planck ($6,62607015 \times 10^{-34}\,\text{J} \cdot \text{s}$)
k_B	Constante de Boltzmann ($1,380649 \times 10^{-23}\,\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$)
L	Luminance [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$]
l	Largeur [m]
$\dot{m}$	Débit massique [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]
n	Indice de réfraction du milieu $[-]$
$\vec{n}$	Normale
P	Puissance [kW]
$\dot{Q}$	Débit calorifique (HRR) [kW]
$\dot{q}$	Flux thermique [kW]
R	Nombre pseudo-aléatoire $[-]$
R^*	Taille de maille adimensionnée $[-]$
S	Sensibilité [$\mu\text{V} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$] ou surface [m^2]
s	Distance [m]
T	Température [$^{\circ}\text{C}$]
t	Temps [s]

Nomenclature

U	Tension [V]
V	Volume [m ³]

Lettres grecques

α	Exposant de l'Équation 4.6 [-] ou coefficient des Équations 2.23 [kW · s ⁻²] ou 7.6 [m · s ⁻²]
β	Coefficient d'extinction [m ⁻¹]
Δ	Différence, variation
ΔH	Enthalpie de réaction [kJ · kg ⁻¹]
δx	Taille de maille [m]
ϵ	Émissivité [-]
κ^a	Coefficient d'absorption [m ⁻¹]
κ^d	Coefficient de diffusion [m ⁻¹]
λ	Longueur d'onde [µm]
ν	Fréquence [Hz]
φ	Angle azimutal [rad]
ρ	Masse volumique [kg · m ⁻³]
σ	Nombre d'onde (cm ⁻¹)
σ_{SB}	Constante de Stefan–Boltzmann ($5,670374 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)
$\mathcal{T}$	Transmittance [-]
τ	Épaisseur optique [-]

Exposants et indices

"	Surfacique [m ⁻²]
0	Référence
·	Dérivée/variation temporelle [s ⁻¹]
CN	Corps noir
c	Capteur
co	Cône
comb	Combustion
cond	Conduction
conv	Convection
cy	Cylindre
eff	Efficace
f	Flamme
GE	Grande échelle
inc	Incident

∞	Milieu ambiant
p	Panneau
PE	Petite échelle
rad	Rayonnement

Première partie

Introduction

Chapitre 1

Contexte et généralités

Sommaire

1.1	Contexte	3
1.2	Généralités	5
1.2.a	Incendie : principaux phénomènes	5
1.2.b	Simulation numérique des incendies	7
1.2.c	Récapitulatif	8

1.1 Contexte

Le Laboratoire Central de la Préfecture de Police (LCP) assure, parmi d'autres missions, la Recherche des causes et circonstances d'incendie (RCCI) pour les sinistres survenant à Paris et dans la petite couronne (Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis et Val-de-Marne). Cette activité consiste à relever les traces et indices afin de déterminer l'origine et la cause du feu ainsi que la manière dont il s'est développé, en établissant ainsi un ou plusieurs scénarios. Un exemple de scène est donné en Figure 1.1. Il s'agit ici d'images d'un brûlage contrôlé, destiné à la formation des investigateurs, mais l'image de droite est tout à fait représentative d'un cas réel.

Pour certaines enquêtes, des prélèvements peuvent aussi être faits en vue d'une analyse au Laboratoire (p. ex. recherche d'accélération, expertise électrique). De plus, des affaires particulièrement complexes et/ou importantes justifient le recours à des outils numériques, afin de valider ou d'infirmer le(s) scénario(s) établis par l'enquêteur.

La possibilité et l'intérêt de comparer les relevés sur le terrain (dégradations thermiques et/ou mécaniques) à des résultats de simulation avaient été établis lors de travaux au LCP [1], en définissant ainsi des « points de comparaison ». Cette approche avait été approfondie, notamment en étudiant comment caractériser les matériaux dégradés à l'Analyseur thermogravimétrique (ATG) pour remonter aux niveaux d'exposition (temps et



FIGURE 1.1 – Exemple des dégâts causés par un incendie (reconstitution pour une formation).

température) [2], ou encore comment exploiter les dépôts de suies [3]. En complément de ces travaux, qui ont donc fixé le cadre d'utilisation des outils numériques pour l'investigation post-incendie et précisé l'exploitation des points de comparaison (dégradations et dépôts), il est apparu important de bien décrire le foyer, c'est-à-dire le « terme source » de la simulation incendie car c'est la principale source d'espèces chimiques et de chaleur, qui seront ensuite transportées et transformées lors des calculs. En effet, même si des améliorations sont apportées aux modèles décrivant des phénomènes particuliers (p. ex. écoulement de fumées, dépôts de suies), les résultats de simulation ne seront jamais satisfaisants si les données d'entrée ne sont pas précises. Il est donc essentiel pour toute simulation de définir précisément le terme source, et encore plus pour celles utilisées dans le cadre de l'investigation post-incendie, où la précision des résultats, notamment au niveau temporel, est primordiale.

Il serait d'autant plus intéressant d'améliorer la description de termes sources souvent rencontrés lors des enquêtes. D'après les retours des investigateurs du LCPP, il apparaît que la mousse polyuréthane est souvent impliquée dans les incendies domestiques sous la forme de meubles rembourrés (matelas, canapé...). Ce matériau, très répandu dans les habitations, présente des propriétés physico-chimiques qui peuvent le rendre dangereux pour les occupants en cas d'incendie. Différentes sources décrivent la dangerosité de ce combustible, comme par exemple Paul et King [4] qui écrivaient déjà en 1990 :

It is nearly 20 years ago that the unacceptable fire behaviour of 'modern' upholstered furniture became highlighted in the UK by Fire Brigade reports of domestic fires. The poor performance was blamed on the use of flexible PU foam upholstery and demands were made to ban PU foam, or at least to insist on the use of flame-retarded polyurethane (FRPU) foam.

Ce constat est appuyé par différentes statistiques, récoltées principalement aux États-Unis avec le NFIRS (*National fire incident reporting system*). Ainsi, si l'on considère uniquement les incendies domestiques, 2 à 3,4 % des départs de feu ont été identifiés sur

un meuble rembourré, et ces feux seraient responsables de 18 à 19 % des décès [5-8]¹, voire 24 % si l'on inclut les incendies où le mobilier rembourré n'était pas la source mais le combustible principal [7]. Bien que les statistiques soient moins riches en Europe², ces tendances semblent similaires [5, 9, 10], ce qui fait de la mousse polyuréthane un combustible récurrent mais surtout particulièrement meurtrier : il joue donc un rôle central dans de nombreuses investigations. Concernant les retardateurs de flamme, leur efficacité ainsi que leur impact sanitaire et environnemental sont étudiés depuis longtemps et sujets à controverse [11-13]. Leur utilisation n'est de toute façon pas systématique, et l'intérêt d'étudier la combustion de la mousse polyuréthane non traitée reste donc entier : c'est pourquoi une grande partie des travaux présentés ci-après y sera consacrée.

1.2 Généralités

Avant d'aborder plus en détails l'état de l'art et les travaux réalisés, il est intéressant de rappeler les principaux mécanismes mis en jeu lors d'un incendie. Ceci permettra entre autres de mieux comprendre l'orientation des travaux.

1.2.a Incendie : principaux phénomènes

Les incendies, c'est-à-dire des feux hors de contrôle, sont le siège de nombreux phénomènes physico-chimiques couplés, si complexes qu'en faire une description complète serait impossible. Une vue simplifiée est donnée en Figure 1.2 pour les feux survenant dans un local (p. ex. incendie domestique). Un apport d'énergie va initier la décomposition du combustible. Ceci va entraîner la production d'espèces volatiles, qui vont migrer à travers la phase condensée puis être transportées dans la phase gazeuse. Là, elles pourront rencontrer de l'oxygène et, si une énergie suffisante est disponible, s'enflammer, contribuant ainsi à la combustion. Cette dernière va libérer de l'énergie et des produits, visibles sous forme de flammes et de fumées. Une part de cette énergie sera transmise au combustible, et ainsi entretenir sa décomposition, tandis qu'une autre part va impacter l'environnement du foyer, comme par exemple les murs du compartiment. En plus des échanges thermiques, ceux-ci vont aussi jouer un rôle sur la ventilation du feu, en contrôlant la dispersion des fumées et l'approvisionnement en oxygène.

L'apport d'énergie initial peut avoir plusieurs origines. Ainsi, certaines études se sont focalisées sur les sources d'allumage usuelles, par exemple [15]. Une fois les réactions de décomposition initiées, la caractérisation d'un foyer se fait généralement en décrivant son

1. Statistiques sur une période entre 1985 et 2014. La part des départs de feu sur du mobilier rembourré peut sembler faible, mais il est notable qu'elle entraîne autant de décès. Ainsi, 1/13 de ces incendies entraîne un décès [8].

2. En France par exemple, l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) écrit clairement : « Les données disponibles ne permettent donc pas de quantifier la part des incendies en France dont les meubles rembourrés constituent le premier élément à prendre feu dans un incendie, ni le nombre de victimes associées. » (page mise à jour en 2016).

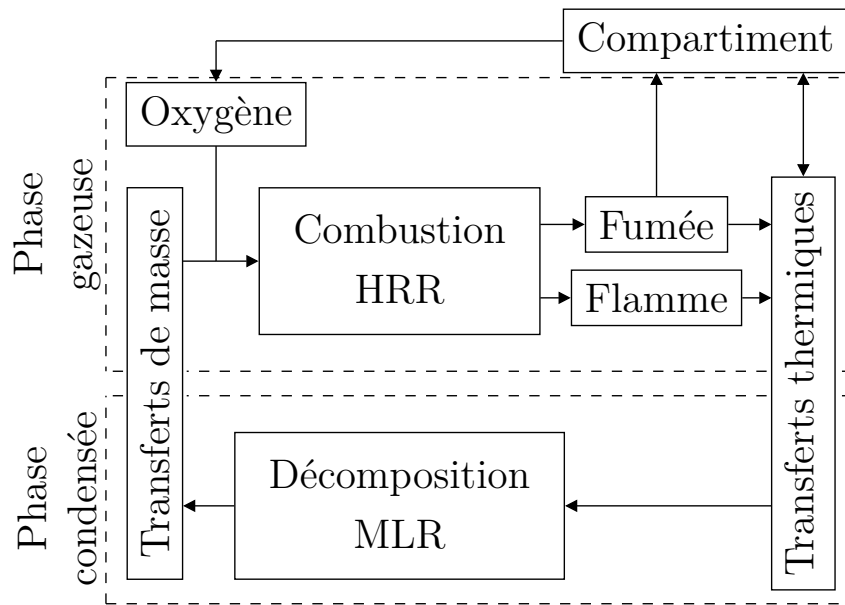


FIGURE 1.2 – Représentation simplifiée des phénomènes intervenant lors d'un feu de compartiment (inspiré de [14]).

débit calorifique, le HRR (*Heat release rate*) [16, 17], ou sa vitesse de perte de masse, le MLR (*Mass loss rate*).

La combustion et le HRR qui en résulte sont contrôlés par le débit de gaz de pyrolyse d'une part, et l'approvisionnement en oxygène de l'autre : on parle de contrôle par le combustible et par la ventilation respectivement. La concentration en oxygène peut aussi avoir une influence sur la décomposition mais ces réactions d'oxydation lente ne seront pas abordées ici.

Les transferts thermiques peuvent prendre plusieurs formes (voir p. ex. les Chapitres 2–4 et 25 dans [18]). On admet généralement que 70 % du HRR est transmis par convection, tandis que les 30 % restants sont rayonnés. Les échanges avec les fumées sont principalement convectifs, avec une part de rayonnement lorsqu'elles sont portées à haute température. La contribution des flammes est quant à elle majoritairement radiative, en tout cas pour les tailles de foyer propres à l'incendie (largeur supérieure à environ 0,2 m [19]). La chaleur peut aussi se propager à l'intérieur du combustible ou des murs du compartiment : ces transferts se feront surtout par conduction. On estime généralement que la propagation d'un foyer à échelle réelle est pilotée par le rayonnement [20–22] : c'est pourquoi ce mode de transfert sera détaillé par la suite.

Ces différents phénomènes sont généralement étudiés de manière expérimentale, que ce soit en vraie grandeur ou à échelle réduite. Cette dernière offre différents avantages relatifs à la mise en œuvre, la répétabilité, les coûts, la sécurité. . . , mais les résultats ne sont pas directement utilisables pour les applications réelles. Le changement d'échelle est donc une approche souvent adoptée en sciences du feu, et il est important de déterminer dans quelle mesure il est possible d'y recourir.

1.2.b Simulation numérique des incendies

En plus de l'approche expérimentale, qui est parfois trop contraignante ou limitée, l'étude des incendies peut aussi se faire en utilisant des outils numériques. Plusieurs types de code existent et seront ici divisés en deux grandes catégories : les codes à zones et à champs. À noter que des modèles couplés ont aussi été proposés, afin de tirer partie des avantages de chaque approche (p. ex. [23]).

1.2.b.i Codes à zones

Les feux de compartiments sont parfois décrits en considérant deux zones [24] : l'une froide (air frais) en partie basse, l'autre chaude (produits de combustion) en partie haute. Certaines approches traitent aussi le panache comme une zone distincte. Ces représentations permettent d'utiliser des relations simplifiées pour prendre en compte les transferts d'énergie et de masse, qui sont utilisables avec un tableur ou dans des logiciels dédiés, dits codes à zones [25], tels que CFAST³, SYLVIA⁴, MAGIC⁵ ou ŒIL⁶. Ces simplifications permettent d'effectuer des calculs très rapides, ce qui rend ces outils particulièrement adaptés aux géométries avec de nombreux compartiments (très grands domaines de calcul), aux études statistiques (très grand nombre de simulations) [26] ou encore aux outils d'aide à la décision (délais très courts) [27-29]. En contrepartie, les résultats ne sont pas résolus spatialement (grandeurs moyennes ou maximales pour la zone considérée) et doivent être interprétés en tenant compte des nombreuses approximations faites pour les obtenir. De plus, en raison des corrélations et équations simplifiées qu'ils utilisent, les codes à zones ne sont pas applicables à certains scénarios, comme par exemple les géométries complexes ou particulières (atriums, tunnels...). D'autres outils sont disponibles pour répondre à ces limites, comme présentés en section suivante.

1.2.b.ii Codes à champs

Les outils de mécanique des fluides numérique, ou CFD (*Computational fluid dynamics*), sont de plus en plus utilisés et le domaine de l'incendie ne fait pas exception [30]. Après avoir découpé le domaine de calcul en mailles, les écoulements sont décrits en résolvant les équations de Navier-Stokes dans chacune d'elles à chaque pas de temps. Dans la pratique, une résolution exacte est impossible, et différents modèles sont nécessaires. Ainsi, la turbulence est souvent traitée selon deux approches (LES, *Large eddy simulation*, ou RANS, *Reynolds averaged Navier-Stokes simulation*) car les calculs mieux résolus (DNS, *Direct numerical simulation*) sont trop coûteux en ressources et en temps. D'autres modèles sont utilisés pour prendre en compte les phénomènes comme la décomposition des

3. Consolidated model of fire and smoke transport, <https://pages.nist.gov/cfast/>

4. Système de logiciels pour l'étude de la ventilation de l'incendie et de l'aérocontamination, <https://www.irsnn.fr/FR/Larecherche/outils-scientifiques/Codes-de-calcul/Pages/Systeme-de-logiciels-de-calcul-SYLVIA-4577.aspx>

5. Développé par Électricité de France.

6. Développé par la Direction générale de l'armement.

matériaux ou la combustion, ainsi que les couplages qui peuvent exister. Comme pour les codes à zones, plusieurs outils de CFD adaptés à l'incendie ont été développés, comme par exemple FDS⁷, FireFOAM⁸, Saturne⁹, ISIS¹⁰ ou encore SAFIR¹¹. Ici, les résultats sont résolus temporellement mais aussi spatialement (à l'échelle de la taille de maille) et incluent davantage de grandeurs (p. ex. concentrations en espèces chimiques). Cette description plus fine engendre toutefois des temps de calcul largement supérieurs aux codes à zones, et le choix de l'outil approprié dépend donc du scénario étudié mais aussi des objectifs de l'étude. Dans le cas de l'investigation post-incendie, les outils de CFD sont souvent privilégiés, notamment parce qu'ils permettent de multiplier les points de comparaison.

1.2.c Récapitulatif

La description des principaux mécanismes conduisant à un incendie (Figure 1.2) a mis en évidence le rôle central de la décomposition, qui est à l'origine des espèces combustibles qui vont alimenter le feu. Ce MLR est en grande partie piloté par les transferts thermiques, qui, à l'échelle de l'incendie, sont dominés par le rayonnement. C'est donc sur ces deux points (MLR et rayonnement) que sera focalisé le travail présenté ci-après, à commencer par l'état de l'art dans les sections suivantes. Ceci sera fait dans une démarche de montée en échelle, en essayant de définir les conditions dans lesquelles il est possible d'acquérir des données à échelle réduite pour décrire un incendie réel, et comment effectuer ce changement d'échelle.

De plus, il a été montré que les outils numériques offrent de nombreuses possibilités pour l'étude des incendies, notamment dans le cadre de l'investigation. Il est donc important de poursuivre le développement de ces codes afin de les rendre toujours plus précis et utiles. Ici, c'est FDS qui a été retenu, car la CFD permet une description plus fine que les codes à zones et que ce code est largement utilisé dans la communauté incendie, que ce soit pour des études d'ingénierie de sécurité incendie¹² ou dans le cadre de l'investigation post-incendie [1, 31-38], mais aussi pour des travaux académiques¹³. Ceci témoigne d'un important développement de l'outil, qui au fur et à mesure des implémentations, ainsi que des vérifications et validations associées (V&V), devient applicable à un nombre croissant de scénarios. En choisissant FDS, les résultats du travail présenté ici seront aussi plus facilement utilisables et améliorables par la communauté. Plus de détails concernant ce code seront donnés dans les sections suivantes.

7. *Fire dynamics simulator*, <https://pages.nist.gov/fds-smv/>

8. <https://github.com/fireFoam-dev>

9. <https://www.code-saturne.org/cms/>

10. <https://gforge.irsnn.fr/gf/project/isis>

11. Développé par la Direction générale de l'armement et l'Institut universitaire des systèmes thermiques et industriels.

12. Par exemple à l'heure actuelle FDS est le seul code à champs utilisé dans les études d'ingénierie du désenfumage examinées par le LCPP.

13. À titre d'exemple, FDS était le seul code de CFD utilisé par les participants d'une comparaison de simulations inter-laboratoires (*round-robin*) [39]. C'est aussi l'outil le plus rencontré dans la littérature : la recherche « "fire dynamics simulator" » sur Google Scholar renvoie 8360 résultats, tandis que l'on en compte 498 pour « "firefoam" » (22 juin 2019).

Chapitre 2

État de l’art

Sommaire

2.1	Rayonnement	9
2.1.a	Éléments théoriques et expérimentaux	9
2.1.b	Modèles disponibles	14
2.2	Décomposition et propagation	25
2.2.a	Éléments théoriques et expérimentaux	25
2.2.b	Modèles disponibles	27
1	Objectifs	33
2	Méthodologie	33
3	Limites	35

L’objectif de ce chapitre est de donner un rapide aperçu de l’existant concernant le rayonnement des flammes ainsi que le comportement au feu de la mousse polyuréthane. Il ne s’agit ni d’une revue exhaustive ni de descriptions détaillées : des références plus complètes seront fournies à ces effets. En plus de dresser un résumé de l’état de l’art, il s’agit surtout de présenter les grandeurs, phénomènes et modèles qui seront mentionnés ou utilisés dans la suite du travail. Des éléments seront aussi donnés concernant le fonctionnement du code FDS (*Fire dynamics simulator*), car c’est l’outil numérique retenu pour l’étude (voir Section 1.2.c).

2.1 Rayonnement

2.1.a Éléments théoriques et expérimentaux

Différentes références traitent de transferts radiatifs (p. ex. [40]), et seulement quelques généralités sont rappelées ci-après pour faciliter la compréhension des mesures et modèles présentés par la suite. Les éléments théoriques sont principalement tirés des supports de

l'École thématique rayonnement¹⁴.

Dans sa forme la plus simple, la caractérisation du rayonnement d'une flamme requiert deux paramètres :

1. la puissance émise ;
2. les directions selon lesquelles elle est émise.

Pour le premier point, il s'agit de caractériser les phénomènes mis en jeu dans l'émission, la propagation et l'absorption du rayonnement thermique. C'est ce qui est décrit dans les points suivants, avec des généralités sur les transferts radiatifs puis quelques détails sur les spécificités des flammes. Des éléments concernant la prise en compte de la géométrie sont ensuite donnés en Section 2.1.a.iii.

2.1.a.i Rayonnement : généralités

L'interaction matière-rayonnement sera ici traitée avec une approche « corpusculaire » : des photons peuvent être absorbés ou émis, ce qui entraîne des transitions énergétiques, au niveau atomique ou moléculaire. Les caractéristiques d'un photon (sa fréquence ν p. ex.) sont directement proportionnelles à la variation d'énergie au sein de la matière (ΔE) [41], en d'autres termes

$$\Delta E = h \nu, \quad (2.1)$$

h étant ici la constante de Planck. La fréquence peut aussi être exprimée en termes de longueur d'onde, $\lambda = c/\nu$, ou de nombre d'onde, $\sigma = \nu/c$, avec $c = c_0/n$ la vitesse de propagation du rayonnement (c_0 la vitesse de la lumière dans le vide et n l'indice de réfraction du milieu). Ces éléments seront utilisés de manière interchangeable dans le texte (« en fonction de la fréquence/de la longueur d'onde/du nombre d'onde »), mais par souci d'homogénéité la plupart des relations suivantes seront présentées en fonction du nombre d'onde.

Au-dessus de l'échelle matière, la caractérisation la plus fine du rayonnement est donnée par la luminance (L_σ , [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{cm} \cdot \text{sr}^{-1}$]). Elle caractérise le flux rayonné par une surface dans un angle solide et une plage spectrale donnés. Cette grandeur exprime que le rayonnement est à la fois spectral (voir aussi Équation 2.1) et directionnel (propagation dans un angle solide suivant une direction donnée). L'expression de la luminance dépend des propriétés de l'émetteur, mais elle peut être définie *a priori* pour un corps idéal. En effet, pour un corps dit « noir », elle est uniquement fonction de la température T , comme l'exprime la loi de Planck

$$L_\sigma^{\text{CN}}(T) = \frac{2 h c_0^2 \sigma^3}{n^2 \left[\exp \left(\frac{h c_0 \sigma}{n k_B T} \right) - 1 \right]}, \quad (2.2)$$

avec k_B la constante de Boltzmann. La luminance des corps réels est définie comme une fraction de celle du corps noir, c'est-à-dire

$$L_\sigma = \epsilon_\sigma L_\sigma^{\text{CN}}(T), \quad (2.3)$$

14. www.etr2017.cnrs.fr

avec ϵ_σ l'émissivité spectrale, comprise entre 0 et 1.

Un parallèle peut être fait avec les milieux participatifs¹⁵, dont l'émission (sur une épaisseur e) peut s'exprimer

$$L_\sigma = \kappa_\sigma^a L_\sigma^{\text{CN}}(T) e, \quad (2.4)$$

qui fait aussi intervenir la luminance du corps noir, ainsi que κ_σ^a , le coefficient d'absorption¹⁶. Ces milieux peuvent aussi absorber et/ou diffuser le rayonnement. Ces deux phénomènes sont caractérisés par les coefficients d'absorption κ_σ^a et de diffusion κ_σ^d respectivement, ainsi qu'une fonction qui décrit les directions selon lesquelles le rayonnement sera diffusé (fonction de phase P_σ). Prendre ces différents phénomènes en compte pour étudier l'influence d'un milieu sur un rayonnement le traversant revient à établir l'Équation du transfert radiatif (ETR), c'est-à-dire

$$\frac{dL_\sigma(s, \hat{\Omega})}{ds} = \begin{cases} +\kappa_\sigma^a L_\sigma^{\text{CN}}(T(s)) & \text{Émission (gain)} \\ -\kappa_\sigma^a L_\sigma(s, \hat{\Omega}) & \text{Absorption (perte)} \\ -\kappa_\sigma^d L_\sigma(s, \hat{\Omega}) & \text{Diffusion (perte)} \\ +\frac{1}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} \kappa_\sigma^d P_\sigma(\hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) L_\sigma(s, \hat{\Omega}') d\Omega' & \text{Diffusion (gain)} \end{cases} \quad (2.5)$$

Cette relation exprime la variation de la luminance L_σ , de son entrée en s à sa sortie en $s + ds$, selon la direction $\hat{\Omega}$. Elle offre la description la plus complète du rayonnement, avec des propriétés locales (s), directionnelles ($\hat{\Omega}$) et spectrales (σ).

Moyennant certaines hypothèses, l'ETR peut être simplifiée. Ainsi, dans le cas d'un milieu homogène isotrope isotherme et non diffusant, l'ETR (Équation 2.5) se simplifie et la luminance de ce milieu vaut

$$\begin{aligned} L_\sigma &= (1 - \mathcal{T}(\sigma)) L_\sigma^{\text{CN}}(T) \\ &= (1 - \exp[-\kappa_\sigma^a e]) L_\sigma^{\text{CN}}(T), \end{aligned} \quad (2.6)$$

où $\mathcal{T}(\sigma)$ désigne la transmittance du milieu d'épaisseur e et de coefficient d'absorption κ_σ^a . Ce type de milieu sera utilisé par la suite pour décrire le rayonnement de la flamme (voir Sections 4.2.b et 5.2). Une autre approximation courante est de négliger la dépendance spectrale du rayonnement : on parle alors de corps « gris ». Les grandeurs sont alors dites grises, c'est-à-dire qu'elles sont indépendantes de la longueur d'onde, et on travaille alors facilement sur des grandeurs totales, intégrées sur toutes les longueurs d'ondes. Le flux total rayonné par un corps noir est donné par la loi de Stefan-Boltzmann, à savoir

$$P^{\text{CN}}(T) = n^2 \sigma_{\text{SB}} T^4, \quad (2.7)$$

avec σ_{SB} la constante de Stefan-Boltzmann. Pour une surface quelconque, on peut définir le flux qu'elle émet de manière similaire à l'Équation 2.3, avec

$$P = \epsilon P^{\text{CN}}(T), \quad (2.8)$$

15. Appelés aussi semi-transparents, ces milieux vont laisser passer une partie du rayonnement tout en interagissant avec lui.

16. La loi de Kirchhoff établit, à l'équilibre radiatif et pour une position, une direction et une longueur d'onde données, une égalité entre absorption et émission : κ_σ^a caractérise donc ces deux phénomènes.

où ϵ est l'émissivité totale.

Que ce soit en faisant des hypothèses (p. ex. Équations 2.6 ou 2.8) ou non, plusieurs paramètres sont nécessaires pour caractériser le rayonnement : différents exemples de travaux visant à les déterminer sont présentés ci-après pour le cas des flammes d'incendie.

2.1.a.ii Rayonnement : cas des flammes

L'Équation 2.1 met en évidence le lien entre les transitions énergétiques, propres à la matière, et la nature spectrale du rayonnement. Ainsi, suivant l'application et les phénomènes à prendre en compte, le domaine spectral à considérer sera différent. Dans le cas du rayonnement thermique, c'est-à-dire des transitions vibrationnelles, la plage de longueurs d'ondes généralement admise s'étend de 0,1 à 100 μm , principalement dans l'infrarouge (IR, voir Figure 2.1). Dans cette gamme, et en ce qui concerne les flammes, les principaux émetteurs sont les produits de combustion, qu'ils soient gazeux (CO_2 et H_2O) ou solides (suies) [42]. La contribution de chacun d'entre eux va varier, par exemple en fonction du combustible ou de la taille du foyer : le rayonnement d'une petite flamme de bois sera dominé par le rayonnement des gaz, tandis que celui d'une large flamme de fioul sera principalement dû aux suies [43-46]. La différence entre ces deux cas extrêmes est caractérisée par l'épaisseur optique (τ , [-]) : dans le premier cas la flamme sera dite « optiquement mince » (*non-luminous flame*, petit τ) tandis que dans le second elle sera dite « optiquement épaisse » (*luminous flame*, grand τ). Ces deux types de flammes sont traités différemment [21, 42] car les gaz et les suies ne présentent pas les mêmes propriétés.

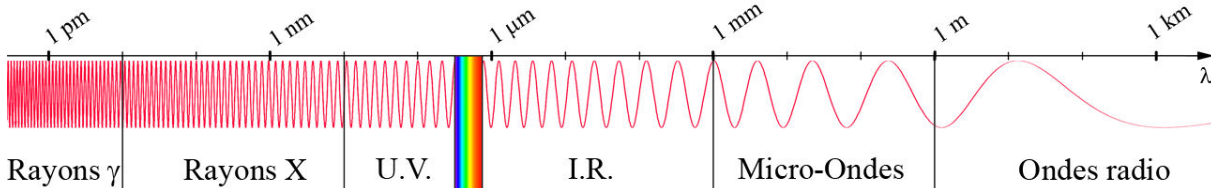


FIGURE 2.1 – Spectre électromagnétique : longueurs d'ondes λ associées aux différents domaines.

Différentes techniques ont été proposées pour caractériser les propriétés des flammes : pesée [19, 47], fluxmétrie [44, 48-50], imagerie infrarouge associée à un émetteur de référence [44, 47, 51-56], spectrométrie [45, 46, 57-59], opacimétrie [48, 49, 60] ou encore pyrométrie [61, 62]. Ces mesures permettent d'obtenir des grandeurs comme l'émissivité de l'enveloppe de la flamme (ϵ), les coefficients d'absorption, de diffusion et/ou d'extinction (κ^a , κ^d et $\beta = \kappa^a + \kappa^d$ respectivement), la température du milieu ou de ses constituants, voire des concentrations. Les grandeurs ne sont pas indicées σ car seules quelques études fournissent des résultats résolus spectralement [45, 46, 59, 62] : l'hypothèse que la flamme rayonne comme un corps gris est donc généralement admise (p. ex. [44, 47, 51-56, 63-66]).

Négliger la dépendance spectrale permet entre autres de simplifier les mesures ainsi que

les calculs effectués par la suite. De plus, différents résultats expérimentaux montrent que des grandeurs totales peuvent permettre de bien caractériser le rayonnement (p. ex. [42, 44]), et ce malgré le fait que les flammes d'incendie sont généralement non-grises (voir p. ex. [45, 46, 59, 67]). Toutefois, pour certains foyers, une prise en compte de la dépendance spectrale est nécessaire. Ainsi, elle apportera des informations supplémentaires pour les flammes d'épaisseur optique moyenne, en caractérisant par exemple le rayonnement des suies [68], et sera essentielle pour les flammes optiquement minces pour lesquelles le rayonnement est dominé par les gaz, qui émettent de manière discrète [44, 45]. Une caractérisation fine du rayonnement sera uniquement superflue pour les flammes de grande dimension (largeur de plusieurs mètres) qui selon certaines études se comportent comme des corps noirs [44, 69]. À ces considérations concernant la flamme/l'émetteur s'ajoute le fait que certains matériaux et combustibles soumis au rayonnement ne sont pas des corps gris [59, 70-73]. Ceci signifie que leurs propriétés, comme par exemple l'absorption, et donc la sollicitation thermique résultante, changent suivant la longueur d'onde du rayonnement incident : dans ces cas il est important de prendre en compte la dépendance spectrale [72].

Quelle que soit la méthode retenue pour caractériser l'émission de la flamme (surfactive ou volumique, grise ou résolue spectralement...), il est nécessaire de déterminer la part de ce rayonnement qui va impacter les cibles. Pour ce faire, la géométrie de la flamme doit être décrite, et ici aussi plusieurs approches sont possibles : un bref résumé est donné ci-après.

2.1.a.iii Géométrie de flamme

Avant de décrire la géométrie de flamme à proprement parler, une première grandeur peut être calculée, à savoir la hauteur de flamme. De nombreuses relations ont été proposées [74], les plus connues étant les relations de Thomas [75], Heskestad [76] et Zukoski [77]. La connaissance de la hauteur de flamme permet déjà de décrire une géométrie de flamme simplifiée (p. ex. cylindre ou cône), en considérant que sa largeur à la base est égale au diamètre du foyer.

Ce genre de forme est largement utilisé, que ce soient des cylindres [78-80] ou des cônes [50, 78, 81, 82], voire des combinaisons (cône sur cylindre, deux cylindres...) [80, 83]. D'autres formes, telles que des sphères, des ellipses ou des *kites* (littéralement « cerf-volants », c.-à-d. des losanges), sont parfois utilisées, principalement pour les feux torches ou autres accidents industriels [78, 81, 82]. Ces représentations simplifiées permettent souvent d'utiliser des relations analytiques pour déterminer la part d'énergie émise par la flamme qui va impacter une cible (facteurs de forme, voir p. ex. [84]). Les facteurs de forme peuvent aussi être déterminés sans utiliser de forme arbitraire (cône, cylindre...), mais en décrivant le profil de flamme par des relations analytiques [49, 85, 86]. Des dispositifs expérimentaux permettent aussi de calculer les facteurs de forme pour des géométries de flamme plus élaborées. Ainsi, Anderson [87] a utilisé un panneau radiant et un masque, correspondant à la forme de flamme étudiée, pour mesurer l'énergie reçue par un capteur, et ce pour différentes distances et inclinaisons.

Il faut mentionner que des reconstructions plus détaillées ont aussi été proposées [88-92]. Par exemple, Mason et al. [88] ont obtenu la forme d'une flamme de brûleur, en trois dimensions, à partir des images de deux caméras. Rossi et al. [89-91, 93] ont quant à eux utilisé un système de stéréovision pour reconstruire des fronts de flamme de feux de forêt.

2.1.b Modèles disponibles

Comme vu précédemment, plusieurs approches et simplifications ont été proposées pour décrire le rayonnement des flammes : quelques exemples des modèles seront donnés ici. Ils considéreront l'émission d'un corps gris (Équation 2.8) ou d'un milieu équivalent (Équation 2.6), depuis la surface ou le volume de géométries simplifiées. Cette partie inclura donc principalement des détails sur l'utilisation de facteurs de forme et de lancer de rayons. D'autres approches sont possibles, que ce soit pour la prise en compte de l'émission, avec par exemple différentes méthodes de résolution de l'ETR (Équation 2.5) [68, 94-99], mais aussi de la géométrie de la flamme, avec notamment des méthodes beaucoup plus simples comme celle dite du point source [100, 101].

2.1.b.i Émission surfacique

La géométrie la plus simple qu'il est possible de considérer pour une flamme est présentée en Figure 2.2 : il s'agit d'un panneau radiant de hauteur h_p , de largeur l_p et à température T_p . Au-delà de sa forme basique, ce modèle suppose aussi que l'émission du rayonnement ne se fait que depuis l'enveloppe de la flamme, qui est donc considérée optiquement épaisse.

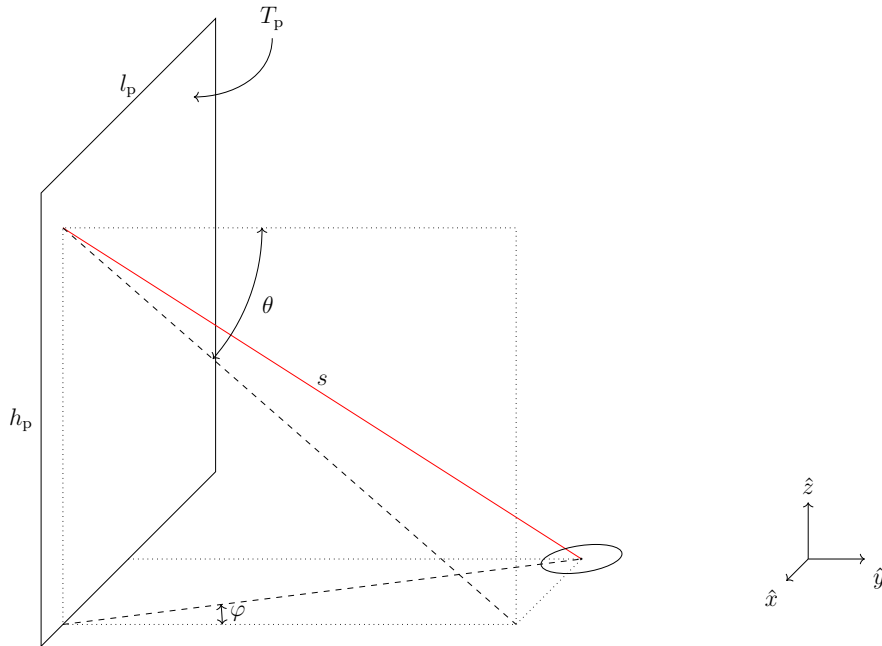


FIGURE 2.2 – Panneau radiant et capteur horizontal.

Dans ce cas la densité de flux reçue par le capteur peut s'exprimer

$$\dot{q}_{p-c}'' = \frac{F_{p-c} S_p P_p}{S_c}. \quad (2.9)$$

En plus des surfaces du panneau et du capteur (S_p et S_c), il est nécessaire de déterminer la puissance émissive du panneau P_p . En considérant le panneau comme un corps gris, celle-ci est fonction de sa température (T_p) et de son émissivité (ϵ_p), comme défini par l'Équation 2.8. Le facteur de forme entre le panneau et le capteur, F_{p-c} , doit aussi être déterminé. Cette grandeur géométrique, qui traduit la part du rayonnement émis par le panneau et impactant le capteur, peut être exprimée selon la relation générale

$$F_{1-2} = \frac{1}{S_1} \int_{S_1} \int_{S_2} \frac{\cos \Theta_1 dS_1 \cos \Theta_2 dS_2}{\pi s^2}, \quad (2.10)$$

tel que décrit sur la Figure 2.3.

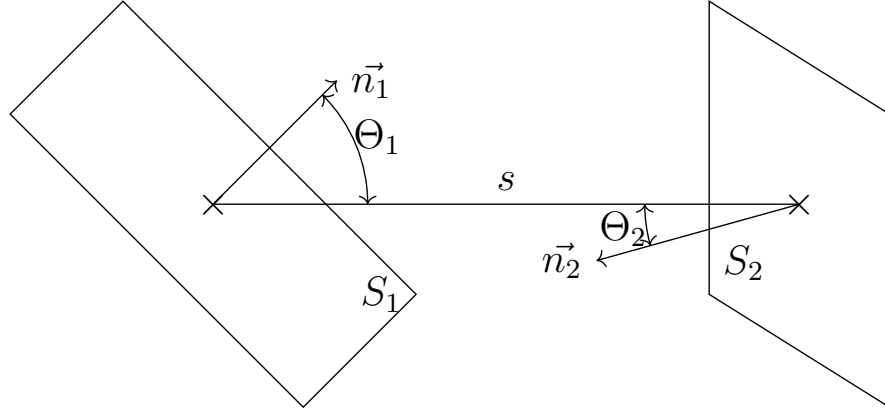


FIGURE 2.3 – Illustration de la relation permettant de calculer le facteur de forme entre les surfaces S_1 et S_2 (voir aussi Équation 2.10).

Pour les géométries simples, telle que celle étudiée ici, des solutions analytiques de l'Équation 2.10 existent [84], voir par exemple <http://www.thermalradiation.net/sectionb/B-4.html> pour la géométrie en Figure 2.2. La relation de réciprocité permet de calculer directement la densité de flux, car

$$F_{p-c} = F_{c-p} \frac{S_c}{S_p}, \quad (2.11)$$

d'où

$$\dot{q}_{p-c}'' = F_{c-p} P_p. \quad (2.12)$$

Les formes comme le panneau radiant présenté plus haut peuvent donc être traitées par des corrélations analytiques. Mais pour des géométries plus complexes il faut recourir à des méthodes numériques, comme par exemple le lancer de rayons (ou méthode de Monte-Carlo, MMC). Elle sera présentée ici afin d'expliquer son fonctionnement à l'aide d'un

exemple simple, et deviendra utile lorsqu'un traitement plus détaillé du rayonnement sera nécessaire (émission volumique p. ex., voir Section 2.1.b.ii).

Deux approches sont possibles lorsqu'il s'agit d'utiliser la MMC : la méthode directe et la méthode réciproque. La première consiste à lancer des rayons et à suivre leur trajet dans l'espace depuis la source. Il s'agit donc de déterminer la part des rayons émis qui va intercepter le capteur et ainsi calculer le facteur de forme F_{p-c} . Les positions de départ et directions des rayons sont tirées aléatoirement, ce qui explique le nom de la méthode faisant référence aux casinos de Monte-Carlo. Cette approche statistique implique que plus le nombre de rayons tirés est grand, plus le résultat est précis. La seconde méthode, dite réciproque, consiste à tirer les rayons depuis le capteur et à déterminer combien vont intercepter la source (p. ex. le panneau radiant). Quelques éléments concernant ces deux approches sont donnés ci-dessous et de plus amples détails peuvent être trouvés en Annexe C et dans [102] par exemple.

Les positions de départ des rayons sont tirées en utilisant des nombres pseudo-aléatoires (R) : pour la MMC directe et l'exemple du panneau en Figure 2.2, ces points notés A sont donnés par

$$x_A = -\frac{l_p}{2} + R_x l_p \quad (2.13)$$

$$y_A = 0 \quad (2.14)$$

$$z_A = R_z h_p. \quad (2.15)$$

Le même type de tirage est utilisé pour les directions des rayons. Un exemple de tirage (1000 rayons) est donné en Figure 2.4.

Si l'on néglige les phénomènes de diffusion, chaque rayon se déplace en ligne droite et il s'agit alors de déterminer, de manière purement géométrique, s'il interceptera le capteur ou non. Ceci revient à déterminer les intersections avec le plan du capteur (en vert sur la Figure 2.5) et avec le capteur lui-même (en rouge). On peut remarquer qu'environ la moitié des rayons n'impacte pas le plan du capteur (voir rayons gris), du fait du tirage aléatoire des directions de départ¹⁷. Le facteur de forme peut alors être obtenu en faisant le rapport entre les rayons ayant intercepté le capteur et le nombre de rayons lancés

$$F_{p-c} = \frac{N_{\text{interceptions}}}{N_{\text{lancers}}}. \quad (2.16)$$

Si la taille du capteur est petite par rapport à celle du panneau, peu de rayons vont intercepter le capteur. La méthode directe devient peu efficace, et il est alors judicieux de recourir à la méthode dite réciproque.

La MMC réciproque consiste à tirer des rayons depuis la surface réceptrice (ici le capteur), afin de déterminer le facteur de forme F_{c-p} . Comme pour la résolution analytique, la relation de réciprocité (Équation 2.11) permet ensuite de retrouver le facteur de forme d'intérêt F_{p-c} .

17. Plus précisément, ces rayons n'impactent pas le plan à l'avant du panneau, et ils ne sont donc pas utiles pour rechercher les intersections avec le capteur. Ils restent néanmoins comptabilisés dans le nombre total de rayons lancés.

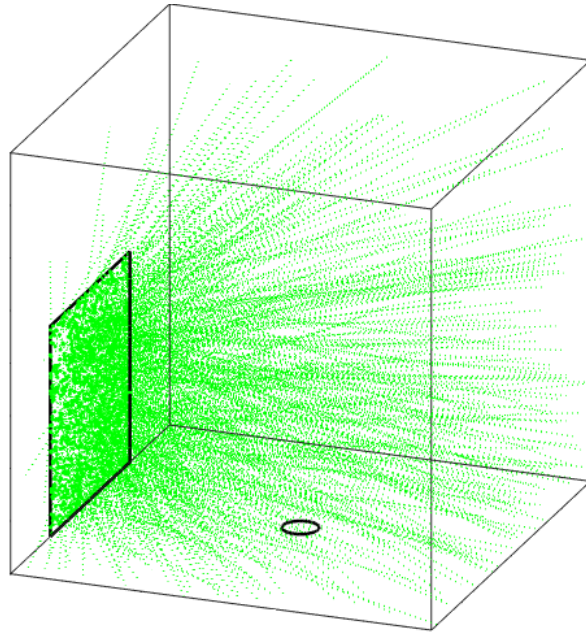


FIGURE 2.4 – Panneau radiant et capteur (noir), avec 1000 positions et directions de départ tirées aléatoirement (vert).

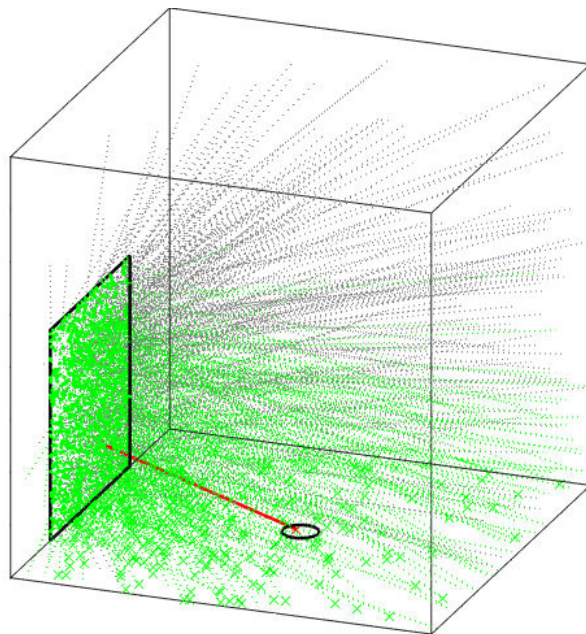


FIGURE 2.5 – Panneau radiant et capteur (noir), avec les positions et les rayons de départ (rayons impactant le sol à l'avant du panneau en vert, ceux impactant le capteur en rouge [2 sur 1000 ici], les autres en gris).

Comme pour la méthode directe, on peut illustrer le tirage d'un jeu de positions et de directions de départ en Figure 2.6 (ici 1000 tirages) ainsi que les points d'impact (voir Figure 2.7), dans le plan du panneau radiant (en vert) et sur le panneau lui-même (en rouge). Ici aussi, environ la moitié des rayons pourrait être négligée car les directions tirées sont orientées à l'opposé du panneau radiant (voir rayons gris). On notera que, pour un même nombre de rayons tirés, le nombre d'intersections est plus important qu'avec la méthode directe (71 contre 2), ce qui illustre l'intérêt de la méthode réciproque (moins de rayons « perdus »).

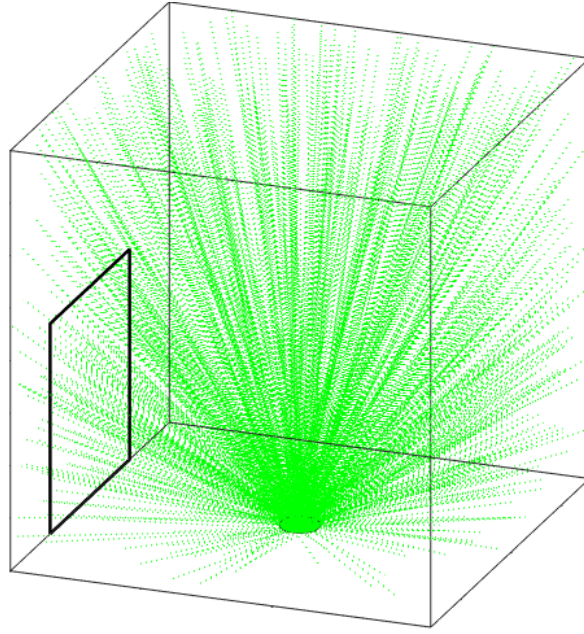


FIGURE 2.6 – Panneau radiant et capteur (noir), avec 1000 positions et directions de départ tirées aléatoirement (vert).

Afin d'illustrer cet avantage, des propriétés arbitraires peuvent être appliquées au panneau radiant, et les densités de flux reçues par le capteur calculées selon l'approche analytique (facteur de forme, solution exacte) et numérique (MMC directe et réciproque). Ces résultats sont donnés en Figure 2.8.

On peut voir que les lancers de rayon (méthodes directe et réciproque) permettent d'obtenir des résultats proches de la solution analytique ($1,8537$; $1,8539$ et $1,8508 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ respectivement). La différence (environ $0,003 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$) réside dans le fait que le capteur n'est pas de taille infinitésimale comme supposé dans la formulation du facteur de forme. Les deux méthodes numériques permettent donc d'obtenir les valeurs attendues, mais, dans le cas présent, la méthode réciproque converge plus vite que la méthode directe (environ 3×10^6 itérations contre 1×10^7 , soit plus de trois fois moins de rayons nécessaires en réciproque dans cet exemple).

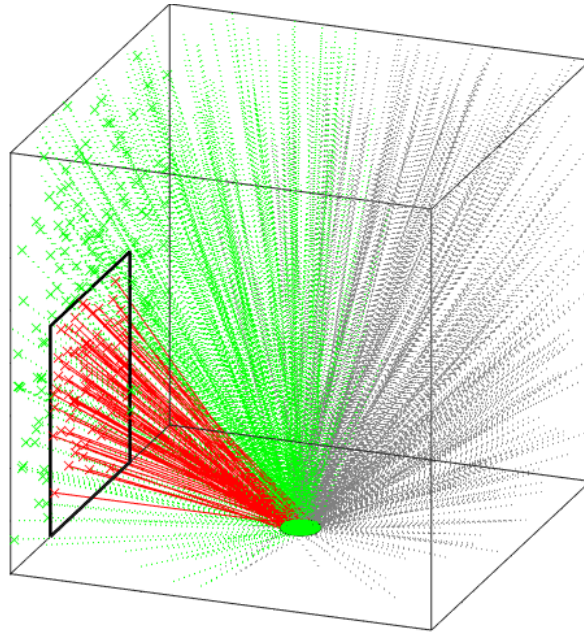


FIGURE 2.7 – Panneau radiant et capteur (noir), avec les positions et les rayons de départ (rayons impactant le plan du panneau en vert, ceux impactant le panneau en rouge [71/1000 ici], les autres en gris).

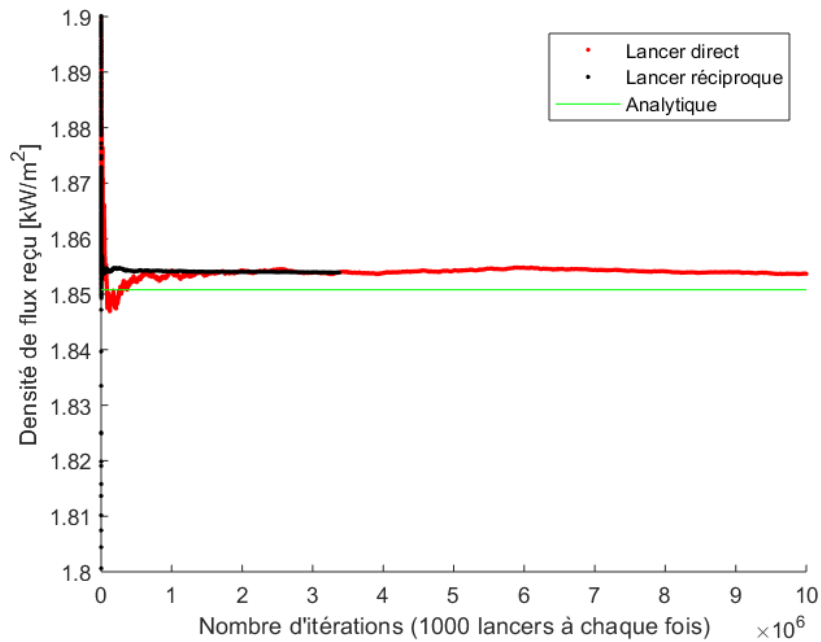


FIGURE 2.8 – Densité de flux calculée numériquement (méthodes directe et réciproque) et analytiquement, en fonction du nombre de rayons lancés.

2.1.b.ii Émission volumique

L'émission des flammes réelles n'est pas surfacique comme supposé dans la section précédente, mais volumique. En considérant une géométrie simplifiée, par exemple un cylindre surmonté d'un cône comme en Figure 2.9, il est encore possible de définir un « facteur de forme » entre un volume V_f et une surface S_c tel que

$$F = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} \int_{S_c} \frac{\cos \Theta}{4\pi s^2} dS dV. \quad (2.17)$$

L'angle Θ et la distance s sont illustrés sur la Figure 2.10. Les calculs de F pour les géométries considérées ici (cylindre et cône) sont donnés en Annexe C.2.

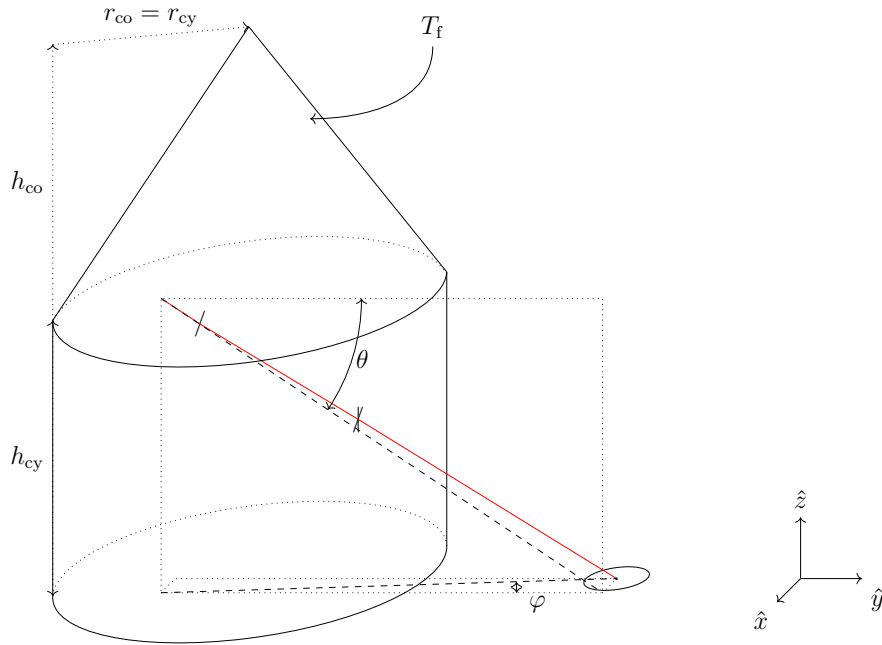


FIGURE 2.9 – Forme de flamme simplifiée et capteur horizontal.

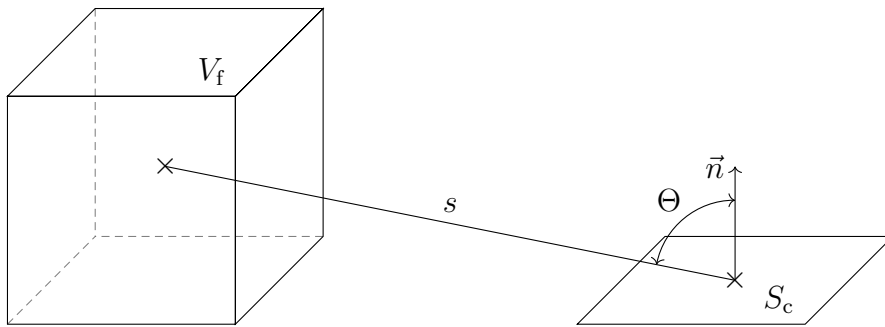


FIGURE 2.10 – Illustration de la relation permettant de calculer le « facteur de forme » entre un volume et une surface (voir aussi Équation 2.17).

Toutefois, le recours à des facteurs de forme implique toujours des hypothèses, par exemple ici que le volume de la flamme ne va pas atténuer le rayonnement émis (flamme

optiquement mince). Afin de considérer un scénario plus réaliste, à savoir un milieu qui émettrait et absorberait, il devient nécessaire de recourir au lancer de rayons.

Si la méthode directe est utilisée, par exemple pour réaliser une cartographie du flux reçu au sol, la démarche est similaire à ce qui était présenté en Section 2.1.b.i pour le panneau radiant. La première étape consiste à tirer aléatoirement les positions et directions de départ des rayons, cette fois dans le volume de la flamme (voir Figure 2.11). Ensuite,

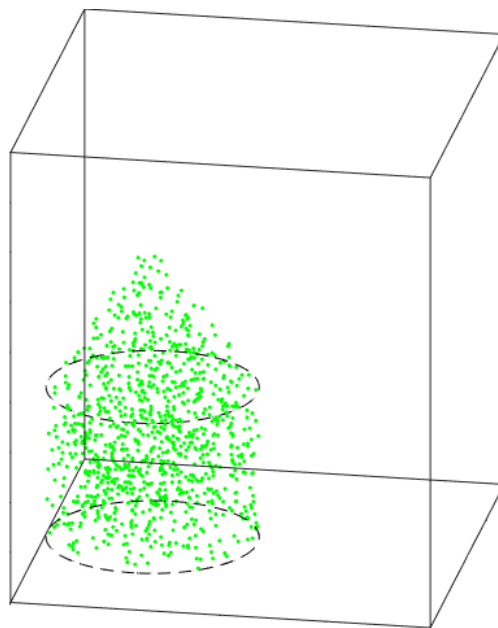


FIGURE 2.11 – Exemple de 1000 positions de départ tirées aléatoirement pour une géométrie cône sur cylindre (base et haut du cylindre en noir).

les intersections des rayons avec l'enveloppe de la flamme et avec le sol sont calculées, afin de déterminer les distances parcourues dans la flamme (e) et les points d'impact au sol respectivement. Les détails de ces étapes sont donnés en Annexe C.3. Les distances e permettent de calculer la puissance transportée par chaque quantum à sa sortie de la flamme, par exemple selon l'Équation 2.6 si la dépendance spectrale est prise en compte, ou alors selon

$$P_{\text{sortie}} = P_{\text{émission}} \exp(-\kappa e) \quad (2.18)$$

si des grandeurs totales sont utilisées. Dans ce cas, la puissance initialement attribuée à chaque quantum, $P_{\text{émission}}$, vaut

$$P_{\text{émission}} = \frac{4 \kappa V \sigma T^4}{N_{\text{quanta}}}, \quad (2.19)$$

avec V le volume d'où sont émis les quanta, T sa température et N_{quanta} le nombre de quanta. À noter que les Équations 2.6 et 2.18 permettent de prendre en compte l'absorption au sein de la flamme, mais pas celle qui pourrait intervenir dans l'atmosphère entre

la flamme et les cibles. Cette dernière est considérée négligeable en première approche, notamment parce qu'elle est concentrée sur des bandes spectrales étroites dues aux CO_2 et H_2O atmosphériques. Ces équations négligent aussi la diffusion dans et hors de la flamme.

Les points d'impact au sol définissent la répartition du flux $\dot{q}$, donnant ainsi accès aux représentations en Figures 2.12 et 2.13. Les densités de flux $\dot{q}''$ sont obtenues en discrétisant la surface réceptrice et en déterminant le flux reçu par chaque élément de surface.

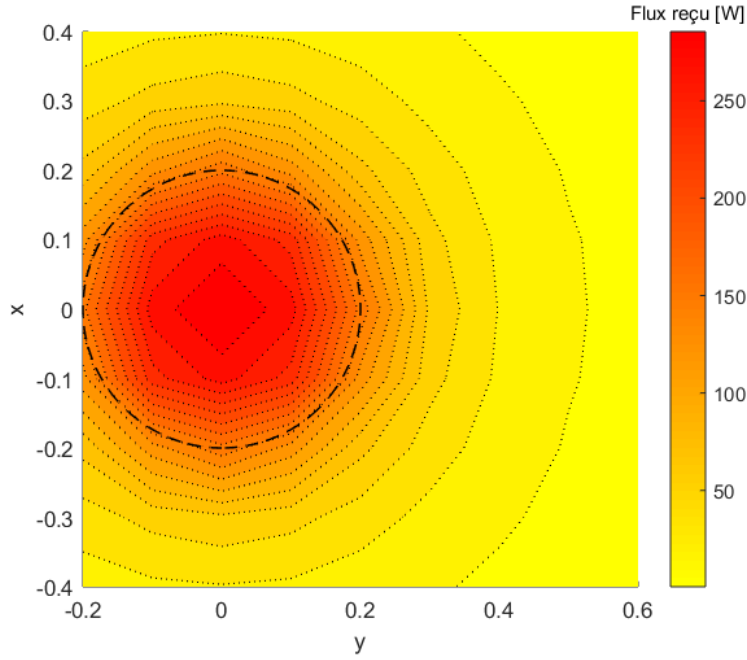


FIGURE 2.12 – Répartition du flux au sol pour une géométrie **cône sur cylindre**, et des propriétés de flamme arbitraires ($r_{cy} = 0,2\text{ m}$, $h_{cy} = 0,3\text{ m}$, $h_{co} = 0,3\text{ m}$, $\kappa = 1$ et $T = 1200\text{ K}$). Isocontours en pointillés, base de la flamme en traitillés.

La méthode réciproque est aussi utilisable, par exemple pour calculer le flux reçu par un capteur. Le principe reste le même que pour le panneau radiant (voir Section 2.1.b.i), en calculant en plus la distance parcourue dans le volume de la flamme (calculs d'intersections similaires à ce qui est présenté en Annexe C.3) pour déterminer l'énergie transportée par chaque quantum (voir Équation 2.18).

2.1.b.iii Prise en compte dans *Fire dynamics simulator*

Dans FDS, le rayonnement peut être traité de différentes manières [103, p. 193]. Les deux premières approches reposent sur la définition d'une fraction radiative (paramètre `RADIATIVE_FRACTION`), qui représente la part de l'énergie libérée par la combustion qui est transmise par transferts radiatifs. Dans le premier cas, dit optiquement mince, cette énergie est transportée jusqu'à rencontrer un obstacle ou les limites du domaine de calcul, sans absorption donc : ce mode offre un grand contrôle sur l'énergie rayonnée et la manière

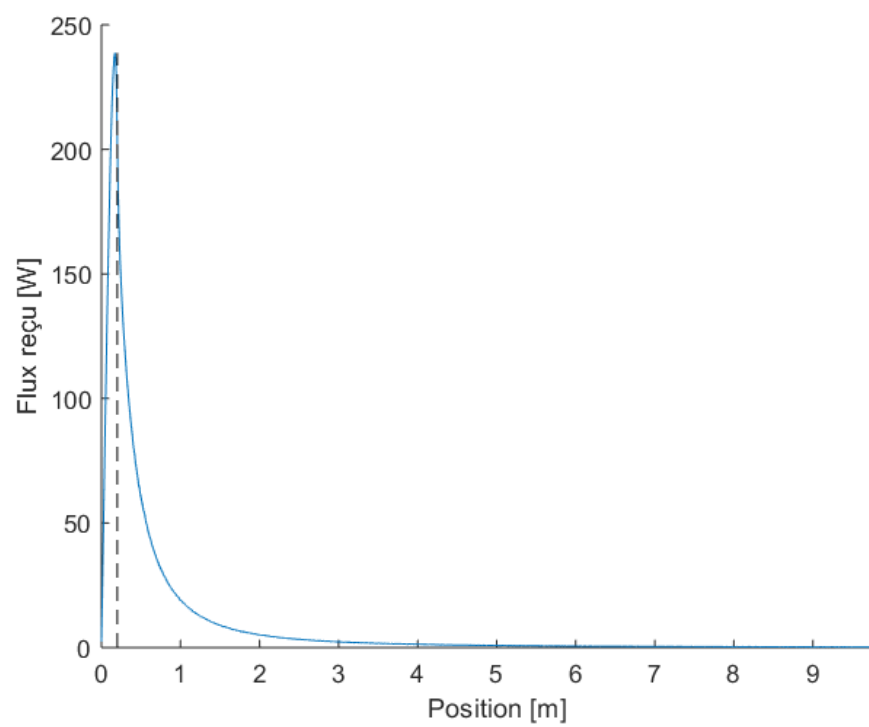


FIGURE 2.13 – Flux reçu au sol en fonction de la distance au centre d’une flamme cône sur cylindre (propriétés de flamme arbitraires, voir Figure 2.12). Rayon de la flamme en traitillés.

dont elle est transmise, mais n'est applicable que pour certains scénarios (p. ex. feux en extérieur [103, p. 194]). Dans le second cas, dit optiquement épais, le milieu peut potentiellement émettre, diffuser mais aussi absorber : les coefficients d'absorption nécessaires sont donc définis [104, p. 131, 105] et utilisés pour prédire l'émission et l'absorption (voir Équation 2.5). Enfin, une troisième approche n'utilise pas le concept de fraction radiative, et consiste à calculer directement l'énergie rayonnée. Elle nécessite une très grande résolution spatiale et n'est donc généralement applicable qu'aux très petits domaines voire aux calculs DNS (*Direct numerical simulation*).

Dans sa configuration par défaut, et celle la plus souvent utilisée, FDS utilise l'approche optiquement épais avec définition d'une fraction radiative, en combinaison avec un « *gray gas model* » qui suppose que la flamme est un corps gris (grandeurs indépendantes de la longueur d'onde). Les coefficients d'absorption sont tabulés en début de simulation : les données nécessaires pour ces calculs sont actuellement disponibles pour douze espèces gazeuses [104, p. 131, 105]. Ils sont ensuite utilisés pour tenir compte de l'absorption mais aussi de l'émission (Équation 2.4). Cette dernière est aussi fonction d'une température, qui est généralement celle de la maille considérée. Si cette dernière fait partie d'une zone réactive, la température est corrigée. En effet, il s'agit de caractériser l'émission de la flamme, mais cette zone réactive est de taille négligeable par rapport à la maille et la température de cette dernière ne représente donc pas celle de la flamme. La correction est faite de telle sorte que la fraction radiative imposée soit respectée. Une définition autant précise que possible de ce paramètre est donc primordiale, mais n'est pas aisée car il dépend du combustible, de la taille du foyer ainsi que d'autres facteurs. Il est possible de programmer des variations de la fraction radiative en cours de simulation [103, p. 196] pour prendre en compte « artificiellement » des changements de conditions, une propagation, etc.

Il est aussi possible de faire une hypothèse moins forte que celle d'un milieu entièrement gris, à savoir considérer des propriétés radiatives constantes sur des bandes spectrales, et non sur le spectre entier comme précédemment. Ce modèle (« *wide band model* » [103, p. 198, 104, p. 61]) n'est pertinent que pour les combustibles dont les propriétés sont suffisamment bien décrites et entraîne de toute façon un coût de calcul supplémentaire non négligeable, sans que la validité des résultats ne soit clairement avérée, il ne sera donc pas détaillé ici.

Quelles que soient les hypothèses faites sur le rayonnement, la résolution numérique se fait de la même manière (méthode des volumes finis) et nécessite deux discrétisations : l'une spatiale, l'autre angulaire [104, p. 65]. La première est identique au maillage « fluide », utilisé pour la résolution des autres équations de transport, tandis que la seconde est donnée par des lois empiriques qui visent à répartir le nombre d'angles solides demandé par l'utilisateur de manière aussi uniforme que possible. Ces angles définissent les directions selon lesquelles sera propagé le rayonnement : une résolution suffisante est donc primordiale.

Une fois les modèles et leurs paramètres définis, il est possible d'obtenir différentes grandeurs [103, p. 293], comme des densités de flux avec les quantités dont les noms se terminent par « **HEAT FLUX** », abrégé **HF** dans les exemples ci-après. Plusieurs options sont

disponibles dans FDS [103, p. 271], notamment en fonction de la cible : **INCIDENT HF** pour la densité de flux radiatif reçue, **RADIATIVE HF** pour prendre en compte la réémission, **NET HF** pour aussi intégrer les échanges convectifs, **GAUGE HF** pour simuler un capteur...

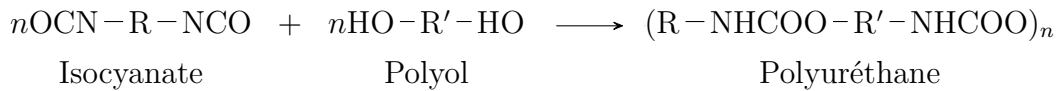
2.2 Décomposition et propagation

2.2.a Éléments théoriques et expérimentaux

Comme pour le rayonnement thermique, il ne s'agit pas ici de rapporter une description complète des phénomènes intervenant dans la décomposition des matériaux¹⁸ : ceci est bien traité dans de nombreuses références et par exemple résumé dans l'un des cours de l'ESIA¹⁹. Seuls quelques détails seront donnés concernant l'un des combustibles principaux de l'étude, à savoir la mousse polyuréthane.

2.2.a.i Formation et décomposition de la mousse polyuréthane

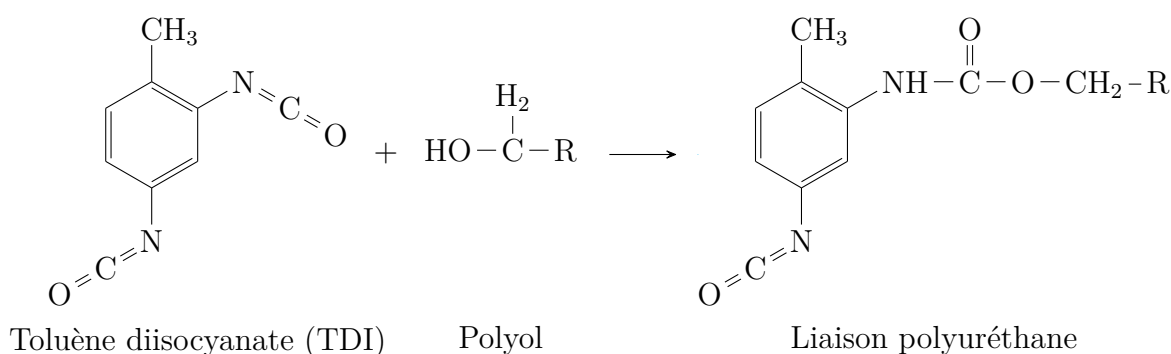
Composition et formation des mousses polyuréthane Les uréthanes ou carbamates sont une famille de composés chimiques dont le groupement caractéristique est $R-NH-COO-R$ [107]. La réaction principale pour produire des liaisons polyuréthanes est une réaction de polymérisation entre les polyisocyanates et les groupes polyhydroxyles, c'est-à-dire



Pour la production des nombreuses mousses polyuréthane, le groupement isocyanate utilisé est le Toluène diisocyanate (TDI). C'est une molécule composée de toluène (hydrocarbure aromatique) et de deux groupements isocyanate [108]. Le groupe polyhydroxyle réagissant avec le TDI est une association de polyol et polyéther (R dans la réaction). La réaction est donc

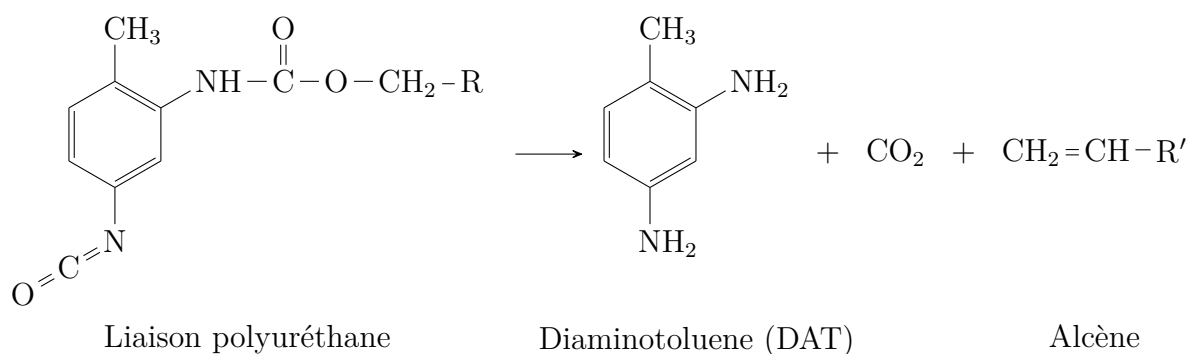
18. À distinguer de la dégradation thermique, qui caractérise plutôt les changements physiques (p. ex. propriétés mécaniques) [106].

19. École des sciences des incendies et applications, supports disponibles à l'adresse <http://gdrfeux.univ-lorraine.fr/ecole2018/>.



Les mousses polyuréthane dites « soufflées à l'eau » sont obtenues en ajoutant de l'eau, qui en réagissant avec l'isocyanate forme du dioxyde de carbone et entraîne le gonflement de la mousse [107, 109].

Décomposition thermique des mousses polyuréthane Ravey et Pearce [109] présentent les schémas de décomposition des mousses polyuréthane lors de la première phase de pyrolyse (température d'environ 360 °C). Pendant la phase de pyrolyse, la mousse peut suivre deux schémas de décomposition. Le premier produit du diisocyanate de toluène (TDI) et du polyol : il s'agit de la réaction inverse de la polymérisation présentée plus tôt. Le second chemin réactionnel produit du Diaminotoluène (DAT) selon



Selon les conditions, l'un des deux schémas réactionnels sera privilégié : le chemin de décomposition produisant du TDI est plus rapide, mais si le TDI est concentré sur la zone de pyrolyse un équilibre chimique se crée, ce qui va favoriser le chemin de décomposition (plus lent et irréversible) produisant du DAT. Une description plus détaillée de la décomposition thermique de la mousse polyuréthane est donnée par Bustamante Valencia [110, p. 41]. Il fournit aussi un résumé de la littérature concernant ce point [110, p. 54].

2.2.a.ii Caractérisations expérimentales de la décomposition

Afin de mieux comprendre et prendre en compte les réactions comme celles présentées ci-dessus, différents essais sont possibles. De manière générale, ce travail se fait à petite échelle afin de contrôler au mieux les conditions expérimentales et n'imputer les effets mesurés qu'aux réactions chimiques.

Les dispositifs expérimentaux les plus utilisés sont notamment décrits en détails chez Bustamante Valencia [110], Guillaume [111] et Thiry [14]. Ceux-ci incluent par exemple l'Analyseur thermogravimétrique (ATG) et la calorimétrie à balayage différentiel (DSC, *Differential scanning calorimetry*), qui reposent sur le chauffage de quelques milligrammes d'échantillon et le suivi de leur perte de masse afin de caractériser les réactions chimiques (températures de début, masse perdue...), mais aussi le cône calorimètre, qui, sur des échantillons plus gros (quelques grammes), permet entre autres de caractériser les transferts thermiques. Plus de détails concernant ce matériel sont donnés ci-après. L'utilisation d'autres techniques d'analyse permettant de caractériser la décomposition thermique, notamment la spectroscopie infrarouge ou la chromatographie pour quantifier les produits formés, sont abordés par Bustamante Valencia [110].

2.2.a.iii Caractérisations expérimentales du comportement au feu

À une échelle supérieure aux dispositifs de caractérisation de la décomposition, mais toujours réduite par rapport à l'échelle réelle, différents outils expérimentaux ont été développés afin de caractériser le comportement au feu d'échantillons de tailles variées. Parmi eux, on trouve par exemple le cône calorimètre [112], le FPA (*Fire propagation apparatus*) [113], le LIFT (*Lateral ignition and flame spread test*) [114], le SBI (*Single burning item*) [115] ou encore le *room corner test* [116]. Ici, l'objectif n'est plus de caractériser les réactions chimiques en phase condensée, mais plutôt les transferts thermiques, la propagation à la surface et dans la profondeur de l'échantillon ainsi que les autres phénomènes macroscopiques (p. ex. déformation, fonte, production de gouttes enflammées...).

Quelques précisions seront données quant au cône calorimètre, car c'est un dispositif très répandu dans la communauté incendie, dont disposent par exemple le LCPP et le LEMTA. De plus, la taille des échantillons en fait un outil parfait pour fournir des données d'entrée pour les modèles de propagation, comme illustré en Section 2.2.b.ii. Développé dans les années 80, il a pour objectif de caractériser le comportement au feu de matériaux à échelle réduite [117-119]. Les échantillons de petite taille, typiquement $10 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$, sont placés horizontalement ou verticalement et exposés à un flux radiatif incident contrôlé grâce à une résistance chauffante conique. Cette forme garantit une répartition du flux aussi homogène que possible, tout en permettant le passage des gaz de combustion pour qu'ils soient ensuite analysés. Le cône calorimètre permet de mesurer la perte de masse, le débit calorifique, l'opacité de fumées et éventuellement leur composition s'il est couplé à d'autres matériels (p. ex. spectromètre IR chez Bustamante Valencia [110]). De ces grandeurs peuvent être déduits le temps d'allumage, la durée de combustion, l'enthalpie efficace de combustion, etc. Ces caractéristiques en font un outil de choix pour des essais normés (p. ex. ISO 5660 [112]) ou à vocation de recherche.

2.2.b Modèles disponibles

Les connaissances théoriques et les données acquises grâce aux dispositifs expérimentaux présentés ci-dessus sont souvent utilisées pour construire des modèles, qui permettent en-

suite d'apporter des réponses dans des situations où le recours à la théorie ou à l'expérience est difficile voire impossible (p. ex. scénario complexe, couplage entre phénomènes, essais trop coûteux). Il est donc intéressant de donner quelques éléments concernant les différents modèles existants pour décrire la décomposition de matériaux ainsi que la propagation du feu : c'est ce qui est présenté dans les sections suivantes.

2.2.b.i Modèles de décomposition

La prise en compte de la décomposition thermique se fait de plus en plus à l'aide de modèles de pyrolyse. Ceux-ci visent à décrire les réactions qui surviennent dans la phase condensée afin de prédire l'émission de gaz combustibles, qui pourront ensuite s'enflammer et participer à la combustion. Un exemple d'application est donné par le travail de Bustamante Valencia [110], qui a abordé la décomposition thermique de la mousse polyuréthane par une approche multi-échelles, en partant de l'échelle matière (ATG) pour développer un modèle de pyrolyse.

Afin de décrire la décomposition d'un matériau, il faut établir un mécanisme réactionnel, ce qui peut être fait de manière plus ou moins simplifiée, voir par exemple [110, p. 130] pour la mousse polyuréthane ou [111, p. 10] pour le bois et la mousse polyuréthane. Il faut ensuite décrire la cinétique de chaque réaction, c'est-à-dire la variation de masse m , avec une expression de la forme

$$\frac{dm}{dt} = f(m) k(T), \quad (2.20)$$

où f une fonction de conversion et k une constante de réaction [14, p. 9]. Il s'agit donc de déterminer f et k : plusieurs formes ont été proposées suivant les modes de décomposition (voir p. ex. [106, p. 204, 14, p. 10]). Dans le domaine des incendies, Thiry [14, p. 9-10] indique que ce sont généralement les mêmes formes qui sont utilisées : les lois « ordre réactionnel »

$$f(m^*) = (1 - m^*)^n, \quad (2.21)$$

avec m^* une masse adimensionnée, et les lois d'Arrhénius

$$k(T) = A \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right), \quad (2.22)$$

où A est le coefficient pré-exponentiel, E l'énergie d'activation et k_B la constante de Boltzmann. Pour schématiser, il s'agit alors de trouver les paramètres (p. ex. l'exposant n) qui décrivent le mieux les résultats expérimentaux, par exemple des courbes de perte de masse obtenues à l'ATG : différentes approches pour répondre à cette question sont résumées dans [106, p. 205].

Il apparaît donc que grâce à la finesse de leurs descriptions, les modèles de pyrolyse sont certainement ceux qui offrent le meilleur potentiel en termes d'applicabilité : si tous les phénomènes importants sont compris et pris en compte, une montée en échelle depuis les réactions de décomposition jusqu'au comportement au feu à échelle réelle est

théoriquement possible, pour n'importe quelle configuration. Toutefois à l'heure actuelle plusieurs limites subsistent encore : schémas de réaction à déterminer, impliquant potentiellement de nombreux paramètres dont il faut définir les valeurs, avec les difficultés associées (sensibilité au protocole, effets de compensation, évolution au cours de la décomposition...) [111, 120], ou encore complexité de résolution, avec des temps de calcul plus importants que d'autres approches sans pour autant toujours fournir des résultats convaincants. Bustamante Valencia avait par exemple conclu que les résultats de simulations FDS utilisant un modèle de pyrolyse n'étaient pas satisfaisants, et ce dès l'échelle du cône calorimètre [110]. Ces différents points font qu'il a été estimé que les modèles de pyrolyse ne sont pas encore mûrs pour les applications en investigation post-incendie.

2.2.b.ii Modèles de propagation

Les modèles détaillés présentés dans la section précédente sont donc prometteurs mais encore limités en termes d'applicabilité. Il peut alors être intéressant de recourir à d'autres approches, plus simples et robustes, comme celles visant à décrire le développement du feu à l'échelle réelle à partir de données de comportement au feu, typiquement obtenues au cône calorimètre. Cette démarche sera illustrée pour le cas de la mousse polyuréthane, ou plus généralement du mobilier rembourré, car c'est le combustible réel retenu pour l'étude (voir Section 1.1).

Comme catégorisé par Vermina Lundström et al. [121], les modèles les plus basiques sont en fait des corrélations empiriques²⁰. On trouve par exemple le modèle NIST/CBHF (*National institute of standards and technology* et *California bureau of home furnishings*), présenté dans [122, p. 51-52], qui vise à prédire si un feu de meuble rembourré se propagera et quel sera son HRR à échelle réelle, en se basant uniquement sur le HRR moyen sur 180 s mesuré au cône calorimètre à $35 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. Suivant les valeurs de cette donnée, le feu sera considéré *self-propagating* ou non, et le HRR pourra être calculé en appliquant différents coefficients empiriques.

Une autre approche, proposée par Ames [123], consiste à représenter la combustion de meubles rembourrés par une courbe triangulaire. La valeur du pic de HRR est, ici aussi, une fonction du HRR mesuré au cône calorimètre (essai à $25 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, moyenne sur 180 s). Différents paramètres sont à choisir suivant la masse ou la forme du meuble par exemple. La durée de combustion (base du triangle) est donnée par une seconde corrélation.

La croissance du HRR à grande échelle, $\dot{Q}_{\text{GE}}$, est aussi souvent modélisée par une expression de la forme

$$\dot{Q}_{\text{GE}} = \alpha(t - t_0)^2, \quad (2.23)$$

avec des valeurs pour α telles que définies dans le Tableau 2.1 [101]. Suivant les auteurs, les lits et matelas sont traités avec différents coefficients : α moyen ou rapide [101, 122, p. 159-162], voire les quatre valeurs proposées dans le Tableau 2.1, suivant la taille des

20. Le terme de modèle sera par la suite utilisé pour désigner aussi bien des (ensembles de) corrélations empiriques, surtout déduites de résultats expérimentaux, que des modèles physiques, principalement construits sur des principes théoriques et ensuite comparés à l'expérience.

échantillons [124, p. 74-77]. Ces variations illustrent une première limite des corrélations empiriques, dont le domaine d'applicabilité peut s'avérer très limité : les valeurs des paramètres disponibles dans la littérature ne sont valables que pour des scénarios très proches de ceux qui ont permis l'établissement des corrélations.

TABLEAU 2.1 – Valeur de α (Équation 2.23) pour différentes vitesses de croissance [101].

Croissance	α [kW · s ⁻²]
Lente	0,00293
Moyenne	0,01172
Rapide	0,0469
Très rapide	0,1876

D'autres corrélations sont disponibles, par exemple en décrivant l'aire en feu avec des fonctions exponentielles [125, p. 17, 120, 126] de la forme

$$A(t) = C_1 \exp(C_2 t), \quad (2.24)$$

avec C_1 et C_2 des constantes. Bien que les évaluations faites dans le cadre de ce travail de thèse montrent que ce genre de relation permet de bien ajuster des résultats expérimentaux à grande échelle, la détermination des paramètres *a priori* est quasiment impossible, et les valeurs de la littérature ne permettent pas d'obtenir des résultats satisfaisants.

Face à ces limites, d'autres types de modèles ont été proposés. C'est par exemple le cas des modèles dits thermiques [121]. Ceux-ci visent à prédire le HRR à échelle réelle en se basant seulement sur un bilan thermique. Ici aussi, les données à petite échelle sont généralement mesurées au cône calorimètre. Le programme européen CBUF (*Combustion behaviour of upholstered furniture*, [127]), qui visait à caractériser la combustion de meubles rembourrés, a par exemple abouti à un modèle de ce type, appelé *Model III*. Il est basé sur un produit de convolution entre le HRR surfacique mesuré au cône calorimètre à 35 kW · m⁻² ($\dot{Q}_{PE}''$) et l'évolution de l'aire en feu ($\dot{A}$), c'est-à-dire

$$\dot{Q}_{GE}(t) = \int_0^t \dot{Q}_{PE}''(t - \tau) \dot{A}(\tau) d\tau. \quad (2.25)$$

L'aire en feu A est prédite grâce à des corrélations prenant en compte les transferts thermiques, principalement le préchauffage du combustible par le rayonnement de la flamme. L'émission se fait depuis sa surface, considérée comme un corps gris (relation similaire à l'Équation 2.12) et de forme cylindrique : sa hauteur est calculée selon la formule d'Heskestad [76] et les facteurs de forme avec les différentes cibles d'après [128]. Étant donné que les échantillons testés au cône calorimètre sont généralement plus fins que les combustibles réels, une correction peut être appliquée : elle vise essentiellement à garantir une conservation de la masse.

Sur la base des travaux du CBUF, un modèle thermique a aussi été développé au LCPP par Sayada et al. [129]. Il repose également sur le produit de convolution en Équation 2.25,

mais décrit l'évolution de l'aire en feu $\dot{A}$ de manière différente. Ici, la flamme est considérée comme conique et sa hauteur est prédite avec la relation de Thomas [75]. Le flux thermique provenant de la flamme et reçu par le combustible vierge, c'est-à-dire à l'extérieur de la flamme, est calculé par la méthode du « point source » [100] qui donne

$$\dot{q}_{\text{rad}}'' = PF \text{ avec } P = 58 (10^{-0,00823D}). \quad (2.26)$$

Le facteur de forme F est obtenu en fonction de la géométrie de la flamme et de la position du récepteur [100]. La montée en température du combustible est prise en compte en ne considérant qu'un chauffage par rayonnement et un refroidissement par conduction [130, 131, p. 75]). La différence d'épaisseur entre petite et grande échelle est aussi prise en compte, avec une version légèrement différente de ce qui avait été proposé pour le *Model III* du CBUF.

D'autres modèles [132-134], qui prennent aussi en compte les transferts thermiques voire d'autres phénomènes tels que la régression en trois dimensions de l'échantillon ou la production de gouttes enflammées, existent mais n'ont pas été étudiés en détails ou évalués, principalement par manque de données.

De manière globale, cet aperçu des approches existantes pour prédire le comportement au feu de matériaux à l'échelle réelle à partir de données obtenues à petite échelle montre que les corrélations empiriques (modèles NIST/CBHF ou triangulaire, relations en αt^2 ou exponentielles) sont difficilement utilisables pour la prédiction, car leurs (nombreux) paramètres sont rarement applicables au scénario étudié. Il serait possible de recalculer ces valeurs, mais cette démarche « au cas par cas » n'est pas satisfaisante car elle nécessite de nombreux essais, et à toutes les échelles. D'autre part, les modèles qui tendent vers une description complète de la dégradation/décomposition (p. ex. régression du matériau) peuvent se montrer trop compliqués à mettre en œuvre, notamment en raison de certains paramètres difficiles à déterminer. L'approche thermique en revanche, illustrée ici par le *Model III* du CBUF [127] et le modèle de Sayada [129], semble un bon compromis entre la robustesse offerte par les modèles/corrélations simples, faisant intervenir peu de paramètres, et la flexibilité offerte par une description plus fine de la physique. Différentes évaluations (p. ex. [127, 129]) ont d'ailleurs montré que les prédictions sont acceptables et méritent d'être améliorées.

2.2.b.iii Prise en compte dans *Fire dynamics simulator*

Le terme source est une grandeur essentielle en simulation incendie car il définit la quantité de gaz combustibles injectée dans le domaine : l'ensemble des modèles utilisera cette donnée pour la suite des calculs, du transport des espèces, aux transferts d'énergie, en passant par les réactions de combustion par exemple. FDS ne fait pas exception, et il est donc nécessaire de définir une vitesse de perte de masse (MLR, *Mass loss rate*). Pour cela, plusieurs méthodes sont disponibles. Ici, seules les approches simplifiées, dites « *simple pyrolysis models* » [103, p. 94], seront présentées. Malgré leur nom anglophone, ces méthodes ne visent pas à modéliser la pyrolyse à proprement parler, les réactions

chimiques n'étant pas prises en compte : d'autres modèles pouvant le faire sont proposés (« *complex pyrolysis models* » [103, p. 97]) mais ne seront pas abordés ici.

Les différentes approches simplifiées reposent toutes sur la définition d'un MLRPUA ou d'un HRRPUA, c'est-à-dire un débit massique ou calorifique surfacique (*Mass loss* ou *Heat release rate per unit area*). Il s'agit ensuite de définir l'aire en feu, afin de déterminer la quantité de gaz combustible libéré dans le domaine de calcul (MLR).

Par défaut, l'ensemble de la zone définie comme combustible pyrolyse dès le début de la simulation. Il est possible de faire varier le HRRPUA ou le MLRPUA au cours du temps, par un système appelé **RAMP** [103, p. 155] : les surfaces définies de la sorte se comportent alors comme des brûleurs à gaz dont on contrôlerait le débit.

Il est aussi possible de définir une température d'inflammation pour le combustible, appelée **IGNITION_TEMPERATURE** [103, p. 96] : tant que la température de surface calculée en fonction de la sollicitation et des propriétés thermiques du matériau ne dépasse pas cette limite, l'élément de combustible ne se décompose pas. Une fois « enflammé », il dégage le gaz combustible ou l'énergie défini par le MLRPUA ou le HRRPUA, en tenant compte de la **RAMP** éventuellement associée.

Une autre option consiste à définir une vitesse de propagation radiale [103, p. 95] : ceci représente par exemple la croissance du feu sur un combustible plan, comme un matelas. Le paramètre associé, **SPREAD_RATE**, permet de calculer à chaque pas de temps l'aire en feu (zone en feu supposée circulaire) et ainsi la quantité de gaz combustible/d'énergie dégagée.

Quelle que soit l'approche simplifiée retenue, en sachant qu'elles peuvent être combinées, le terme source (MLR ou HRR) sera toujours « prescrit », car il ne dépend pas de la sollicitation thermique ou des conditions aérauliques par exemple. Ainsi, dans le cas d'une température d'inflammation, celle-ci ne servira qu'à contrôler le moment où la décomposition commence : une fois qu'il a atteint **T_IGNITION**, le matériau dégagera le MLR/HRR tel que défini dans le fichier d'entrée. Ceci est encore plus clair lorsque la seule variation possible est temporelle (**RAMP**) ou spatiale (**SPREAD_RATE**) : la décomposition est définie au préalable par l'utilisateur et ne sera jamais influencée par les conditions de la simulation. Bien que cette limite soit très simplificatrice, surtout en se rappelant à quel point l'incendie fait intervenir des phénomènes différents et couplés entre eux, les « *simple pyrolysis models* » offrent l'avantage de ne nécessiter que très peu de données d'entrée, et peuvent tout de même fournir des résultats exploitables. Pour ces raisons, ils sont souvent préférés aux « *complex pyrolysis models* » qui visent à décrire les réactions en phase condensée en fonction des sollicitations thermiques par exemple.

Approche retenue

1 Objectifs

Au regard du besoin exprimé en début de manuscrit et des connaissances disponibles les objectifs du travail présenté ici peuvent être définis comme suit :

- Prédire le terme source pour la simulation numérique des incendies à partir de données expérimentales obtenues à petite échelle, au cône calorimètre.
- Utiliser une approche thermique, c'est-à-dire prédire le terme source sur la base des transferts thermiques.
- Implémenter ce travail dans *Fire dynamics simulator* et évaluer la capacité du code modifié à modéliser des foyers de taille réelle.

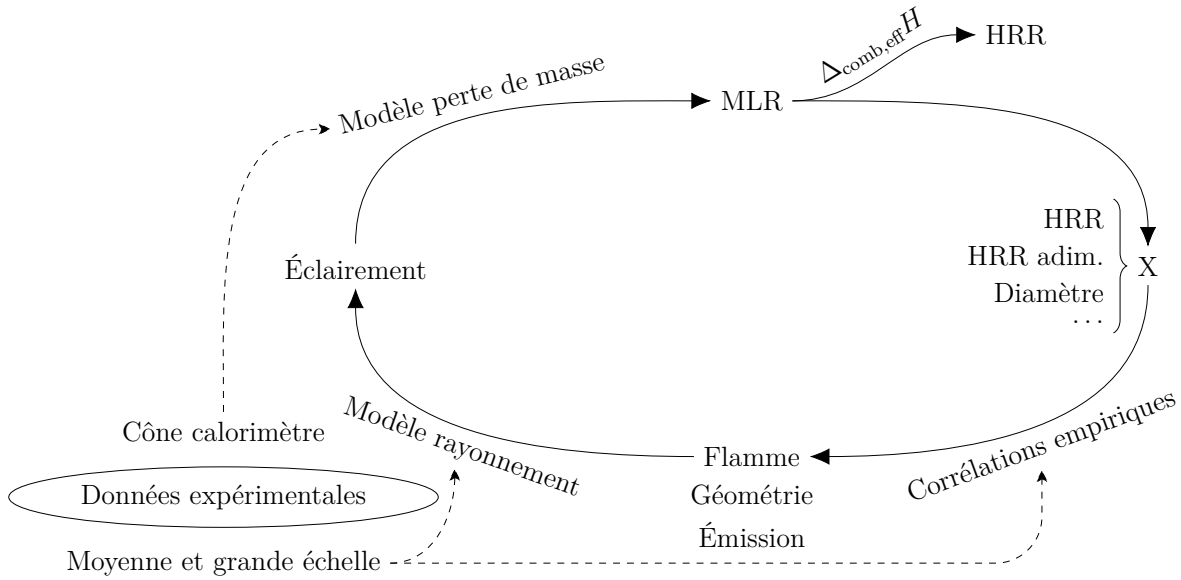
La démarche mise en place pour atteindre ces objectifs est détaillée ci-dessous.

2 Méthodologie

Afin de présenter l'approche retenue il est intéressant de se rappeler la Figure 1.2 qui présentait une vue des principaux phénomènes impliqués dans un incendie de compartiment. Malgré son apparente simplicité, elle demeure très complexe et plusieurs simplifications ont donc été faites pour le travail présenté ci-après.

La première consiste à considérer un foyer libre, c'est-à-dire sans compartiment. Il n'y aura donc pas de contribution des parois d'un local aux échanges thermiques, l'apport en oxygène ne sera jamais limité et l'atmosphère jamais viciée par des fumées qui n'auraient pas pu s'échapper.

La deuxième simplification est de décrire la décomposition par le biais d'une approche thermique, donc sans modéliser les réactions en phase condensée. La production de gaz de pyrolyse sera uniquement pilotée par un bilan thermique, et ceux-ci seront injectés directement depuis la surface du combustible, en ignorant ainsi les transferts de masse en phase condensée. Concernant les transferts thermiques, l'étude sera focalisée sur le rayonnement car il devient rapidement prédominant à échelle réelle [19, 21, 22]. Les autres modes de transfert seront négligés ou traités à l'aide de modèles existants. Cette hypothèse forte est jugée acceptable ici car les foyers prévus sont tous de dimension relativement importante



Approche choisie, articulation des différents travaux.

et orientés horizontalement, mais elle devra être réévaluée si d'autres configurations sont étudiées (p. ex. propagation verticale pour laquelle la convection joue certainement un rôle non négligeable).

Enfin, le transport des gaz de pyrolyse ainsi que les réactions de combustion ne seront pas étudiés, et des outils existants seront utilisés pour les prendre en compte.

Cette approche peut être résumée par le schéma ci-contre. Le point de départ, en haut, est un MLR suffisant pour entraîner une propagation et une croissance du foyer. Cette hypothèse plutôt abstraite signifie simplement que la phase d'allumage ne sera pas étudiée : on se place ici aux premiers instants de la propagation, lorsque le feu a éclos. L'objectif, à partir de cette donnée, est de définir des grandeurs, notées X, qui puissent être corrélées aux propriétés de la flamme. Une fois la géométrie et l'émission de la flamme prédites, il s'agit de les utiliser pour calculer la densité de flux reçue par le combustible, c'est-à-dire l'éclairement. La dernière étape consiste à utiliser cette grandeur pour prédire le nouveau MLR. On reconnaît ainsi l'approche thermique choisie : les transferts thermiques sont caractérisés, ici en se focalisant exclusivement sur le rayonnement, et la décomposition en est déduite, sous forme d'une vitesse de perte de masse.

Il a été choisi d'utiliser le MLR comme donnée d'entrée et de sortie de la boucle présentée sur le schéma car il a été jugé que cette grandeur est influencée par moins de paramètres que le HRR. En effet, ce dernier dépend par exemple fortement de la concentration en oxygène, tandis que la perte de masse est principalement régie par la sollicitation thermique : il semble donc plus pertinent de prédire le MLR avec l'approche thermique retenue ici. Comme indiqué sur le schéma, le HRR pourra facilement être obtenu à partir du MLR, dans un cas idéal (ventilation suffisante) simplement en multipliant par l'enthalpie de combustion efficace $\Delta_{\text{comb,eff}}H$.

L'approche présentée ci-dessus repose donc sur deux parties : une caractérisation des propriétés de flamme afin de décrire les transferts radiatifs, et l'établissement d'une relation entre éclaircissement et MLR. La notion de changement d'échelle est centrale. En effet, l'objectif final est de modéliser le terme source sans recourir à des essais en grandeur réelle. Il est donc nécessaire d'étudier les changements qui interviennent entre les petits et les grands foyers, afin de déterminer si ce changement d'échelle est possible, et le cas échéant de quelle manière.

Plus concrètement, et pour faire référence au plan du présent manuscrit, le travail peut être divisé en deux parties, chacune incluant une acquisition de connaissances relative à la montée en échelle et une mise en application dans FDS :

1. La première concerne le rayonnement : il s'agit d'étudier et de décrire les flammes pour différentes tailles de foyer, mais aussi d'évaluer FDS dans sa prédiction des flux radiatifs. Ce travail sera mené sur différents combustibles, la métrologie mise en place permettant d'acquérir des connaissances aussi bien sur des combustibles solides que liquides, à différentes échelles. Les combustibles sélectionnés pour l'étude sont des liquides (kérosène, gazole et heptane) et des solides (bois et mousse polyuréthane), afin de récolter un maximum de données sur des foyers et des flammes ayant des caractéristiques différentes (p. ex. quantité de suies).
2. La seconde concerne la décomposition de la mousse polyuréthane : l'objectif est d'étudier la perte de masse en fonction de l'éclaircissement à petite échelle, de caractériser la propagation pour des échantillons de taille plus importante et de mettre en applications ces connaissances dans FDS. Cette partie se limite à la mousse polyuréthane car la propagation à la surface des bacs de liquides inflammables est quasi-instantanée et celle au sein des bûchers dépasse le cadre de cette étude, notamment parce que leur géométrie est beaucoup plus compliquée que celle des blocs de mousse.

3 Limites

La démarche présentée ci-dessus fait nécessairement appel à des simplifications et le travail qui en découle comporte donc un certain nombre de limites, dont quelques-unes sont mises en évidence ici.

Concernant la prise en compte des transferts thermiques, la principale limite est que la convection et la conduction seront négligées. De plus, la seule source de chaleur sera la flamme, l'éventuelle influence de l'environnement (p. ex. parois, plafond de fumée) n'étant pas prise en compte. À ceci s'ajoutent les approximations faites dans la modélisation du rayonnement qui seront détaillées par la suite : géométrie de flamme simplifiée, milieu homogène et isotherme...

Concernant la deuxième partie du travail, il est rappelé qu'aucune description fine de la décomposition ne sera faite. Ceci implique que des phases telles que l'allumage ne pourront être décrites, que l'influence d'une viciation du milieu (p. ex. diminution de

la concentration en oxygène) ne pourra être prise en compte, mais aussi que seuls les HRR/MLR pourront être obtenus, sans information sur la composition des gaz de pyrolyse ou des espèces produites par la combustion. De plus, l'étude concernant la décomposition sera cantonnée à un combustible (la mousse polyuréthane) sous une forme donnée (plaques parallélépipédiques), et les résultats ne seront donc pas directement utilisables pour des foyers de nature différente.

Deuxième partie

Campagnes expérimentales

Chapitre 3

Vue d'ensemble

Sommaire

3.1	Combustibles	40
3.1.a	Blocs de mousse polyuréthane	40
3.1.b	Feux de bac	41
3.1.c	Bûchers de bois	43
3.2	Sites d'essais	44
3.2.a	Échelle réelle	46
3.2.b	Cône calorimètre	46

L'expérimentation joue un rôle central en sciences car elle fait office de référence. L'étude des incendies ne fait pas exception, et l'acquisition de connaissances concernant le rayonnement de flammes et le comportement au feu, ainsi que leur évolution avec la taille du foyer, passent donc par des essais.

Ici, différentes campagnes expérimentales ont permis de caractériser plusieurs combustibles à de nombreuses échelles : le schéma en Figure 3.1 liste les combustibles, les tailles de foyer ainsi que les sites d'essais. Des détails concernant les campagnes expérimentales (foyers et locaux) sont donnés dans les sections suivantes, suivis de descriptions de la métrologie utilisée. Les résultats expérimentaux seront présentés dans la suite du manuscrit, dans les sections pertinentes. À noter que seule une partie des essais sera exploitée ci-après (kérosène et mousse polyuréthane) : l'ensemble des informations concernant les combustibles, sites expérimentaux et métrologie est toutefois fourni afin de fournir un aperçu de toutes les données disponibles.

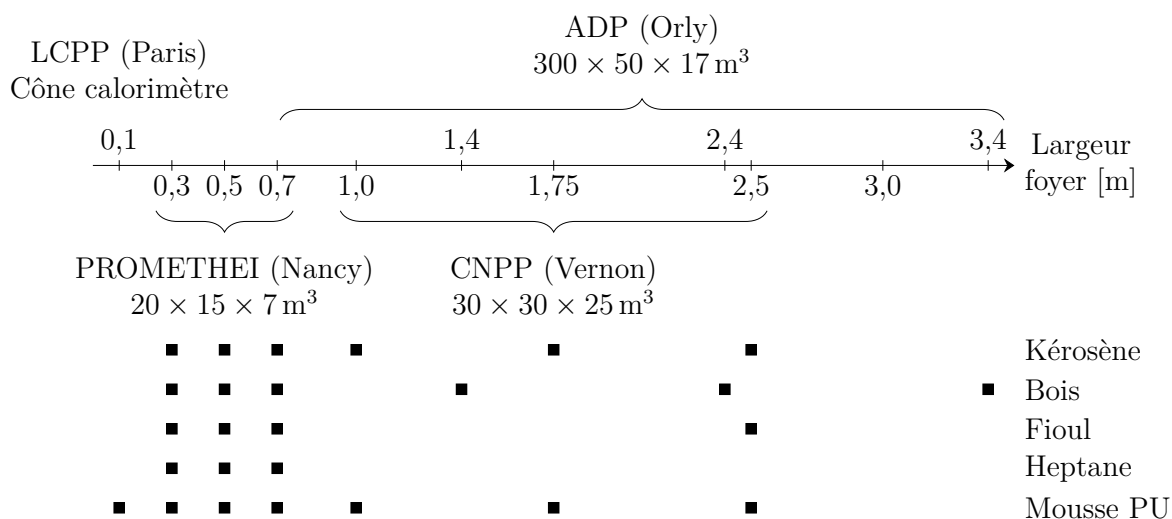


FIGURE 3.1 – Vue d'ensemble des essais réalisés. Les dimensions des locaux sont indiquées sous leurs noms.

3.1 Combustibles

Plusieurs combustibles ont été choisis, afin de fournir des données aussi exhaustives que possible. De plus, les différents liquides retenus (kérosène, gazole²¹ et heptane) offraient l'avantage de présenter une phase stationnaire, ce qui facilite les mesures et leur exploitation. Les bûchers de bois sont aussi souvent utilisés pour leur combustion contrôlée, tout en étant un premier exemple de combustible solide. Enfin, pour la mousse polyuréthane les brûlages comportent une phase transitoire importante (propagation) qui peut s'avérer intéressante à caractériser. De plus, elle est le combustible « réel » choisi pour l'application finale, en raison de son implication fréquente dans les incendies domestiques (voir Section 1.1).

3.1.a Blocs de mousse polyuréthane

La mousse polyuréthane (PU) étudiée était une mousse soufflée à l'eau, composée à deux tiers de TDI (toluène diisocyanate) et un tiers de polyol, avec une masse volumique de $(28,0 \pm 1,0) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (données fournisseur). Elle ne contient pas de retardateur de flamme. Différentes dimensions ont été choisies, comme indiqué dans le Tableau 3.1. À noter que les plus grands échantillons (6 m^2) dépassaient les capacités de production du fournisseur, et étaient donc composés de deux parties ($250 \times 210 \times 20 \text{ cm}^3$ et $250 \times 40 \times 20 \text{ cm}^3$), qui ont été juxtaposées pour les essais. Il a été choisi de ne pas les (faire) coller, en jugeant que les maintenir l'une contre l'autre à l'aide du support d'essai serait plus représentatif d'un bloc continu que la présence de colle.

21. Certains essais ont été réalisés avec du gazole et d'autres avec du fioul : ces deux termes seront utilisés de manière interchangeable.

TABLEAU 3.1 – Dimensions des blocs de mousse polyuréthane utilisés.

Surface [cm ²]	Hauteur [cm]
250 × 250	20
175 × 175	
100 × 100	
70 × 70	
50 × 50	
30 × 30	
100 × 100	10
100 × 100	5
10 × 10	5

Ces formes (pavés droits) ont été choisies car elles rappellent le cas réel des matelas, qui est bien plus simple à étudier que d'autres meubles rembourrés avec des géométries plus complexes (accoudoirs, dossiers...). Les blocs de 20 cm d'épaisseur ont été choisis pour étudier l'influence de la surface du foyer, tandis que ceux de 10 et 5 cm étaient destinés à fournir des données sur le rôle de l'épaisseur. Une fois les essais principaux réalisés, les blocs restants ont été utilisés pour des essais où la combustion était interrompue à différents instants. L'utilisation d'extincteurs CO₂ a permis de figer les échantillons au cours de la propagation, pour ensuite comparer les résultats aux mesures temporelles (voir Section 4.3). Les blocs décrits ici, de 30 × 30 cm² et plus, n'ont pas pu être conditionnés avant les essais. L'allumage de ces échantillons était réalisé avec un morceau d'allume-feu (cubes de 5 à 10 mm de côté), placé au centre de la face supérieure.

Les essais au cône calorimètre ont été menés sur des échantillons de 10 × 10 × 5 cm³ selon les tolérances de la norme ISO-5660 [135] (Figure 3.2). Un vieillissement de la mousse sur les faces exposées à l'atmosphère a pu être observé mais n'a pas été pris en compte dans l'analyse des résultats. Afin de minimiser une éventuelle influence, l'ensemble des essais au cône calorimètre a été fait de la même manière, à savoir en exposant la face vieillie. Ces échantillons étaient conditionnés à (23 ± 2) °C et (50 ± 5) % d'humidité [135].

3.1.b Feux de bac

Les feux de liquides ont été réalisés dans des bacs carrés en acier, dont les dimensions sont données dans le Tableau 3.2.

Tous les bacs, à l'exception de celui de 30 cm, ont été renforcés pour limiter les déformations au cours des brûlages. Une estimation de la hauteur libre, c'est-à-dire la distance entre la surface du combustible et le haut du bac, est aussi donnée dans le Tableau 3.2. Cette valeur correspond au début des essais car la hauteur du liquide ne pouvait être



FIGURE 3.2 – Échantillon de mousse pour le cône calorimètre ($10 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$).

TABLEAU 3.2 – Caractéristiques des bacs utilisés pour les feux de liquides.
La hauteur libre (estimée) est celle du début d'essai.

Identifiant	Dimensions [cm^3]	Épaisseur [mm]	Hauteur libre [cm]
LCPP	$250 \times 250 \times 20$	4	≈ 5
	$175 \times 175 \times 20$		
	$100 \times 100 \times 20$		
	$70 \times 70 \times 20$		
LEMTA	$70 \times 70 \times 5$	2	$\approx 4,5$
	$50 \times 50 \times 5$		
	$30 \times 30 \times 5$		

maintenue constante pendant les brûlages. Ceux-ci duraient jusqu'à épuisement du combustible. Pour certains essais, ce dernier reposait sur deux à trois fois plus d'eau (en volume) afin de réguler la combustion (voir Tableau 3.3 et discussion en Annexe B).

TABLEAU 3.3 – Essais avec/sans eau suivant les tailles de foyer
(pas d'essai heptane avec les bacs LCPP).

Identifiant bac	Kérosène	Gazole	Heptane
LCPP	avec	avec	nc
LEMTA	avec/sans	avec/sans	avec/sans

Pour la suite, les essais dits « suivant le protocole initial » sont ceux avec eau pour les bacs LCPP et sans pour les bacs LEMTA (à l'exception de l'heptane). En revanche, les essais qui seront sélectionnés pour diverses comparaisons (p. ex. un par taille de foyer) sont tous réalisés avec de l'eau. L'allumage des bacs se faisait à l'aide d'une ou deux torches, avec parfois l'ajout d'une faible quantité d'éthanol à la surface du combustible (pour les plus grands bacs et les essais gazole réalisés en période froide). L'influence de ce combustible supplémentaire sur les mesures est considérée négligeable, vue la quantité utilisée et le fait que la plupart des résultats est exploitée sur la phase stationnaire alors que l'éthanol a déjà été consommé.

3.1.c Bûchers de bois

Les principales caractéristiques des foyers de bois sont listées dans le Tableau 3.4.

TABLEAU 3.4 – Caractéristiques des bûchers de bois.

Surface au sol [cm ²]	Hauteur [cm]	Masse [kg]
360 × 320	150	2700
240 × 240	170	1500
	70	380
160 × 120	150	500
	70	140
70 × 70		10
50 × 50	20	5
30 × 30		2

Les bûchers étaient constitués de palettes de stockage et transport pour les grandes échelles, la plupart du temps des palette Europe (120 × 80 cm², environ 25 kg de pin/peu-

plier, voir Figure 3.3), et d'assemblages de baguettes de pin pour les plus petites échelles (voir Figure 3.4).



FIGURE 3.3 – Allumage d'un bûcher de $360 \times 320 \text{ m}^2$ à ADP (photo CTICM).

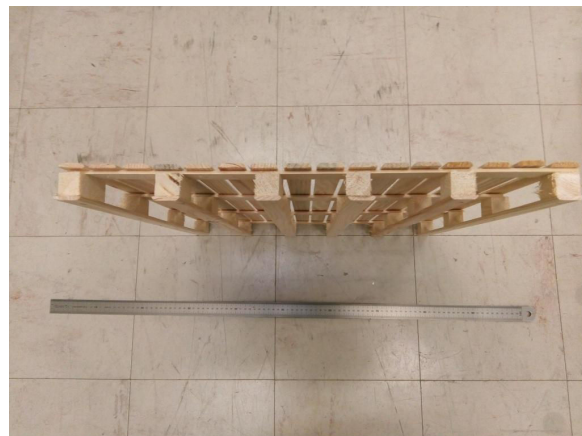
Les essais de plus de 70 cm de large étaient allumés à l'aide de bacs d'éthanol, répartis sous les piles de palettes, afin de garantir un brûlage homogène. Pour les petites échelles, de la frisure de bois imbibée d'une petite quantité d'éthanol était positionnée à la base du bûcher et enflammée (voir Figure 3.4c). Le bois n'a pas pu être conditionné avant les brûlages.

3.2 Sites d'essais

Étant donné que l'un des objectifs de ce travail est de caractériser les changements qui peuvent intervenir lors de la montée en échelle, il était nécessaire d'étudier les combustibles pour plusieurs tailles de foyer. C'est pourquoi différents sites d'essais ont été utilisés, et plus particulièrement deux pour la grande échelle, deux pour l'échelle intermédiaire et enfin un pour les essais à petite échelle : ces équipements sont présentés succinctement ci-dessous.



(a) Palette de 50 cm de côté.



(b) Palette de 50 cm de côté.



(c) Allumage d'un bûcher de 30 cm de côté.

FIGURE 3.4 – Exemples de palettes pour les petites échelles (essais PROMETHEI).

3.2.a Échelle réelle

3.2.a.i Site ADP

Le premier site d'essais est un ancien hangar aéroportuaire gracieusement mis à disposition par Groupe ADP (Aéroport de Paris) à Orly. Le volume principal, utilisé pour les feux de kérosène et de gazole de 70 cm de côté et plus, ainsi que les bûchers de bois de 120 cm de côté et plus, mesure environ $300 \times 50 \times 17 \text{ m}^3$ (longueur $\times$ largeur $\times$ hauteur, voir Figure 3.5). Ces dimensions permettent de considérer tous les foyers comme bien ventilés, tout en étant protégés des éléments.

3.2.a.ii Site CNPP

Le second site d'essais grande échelle était le hall n° 3 du Centre national de prévention et de protection (CNPP, Vernon), gracieusement mis à disposition pour les brûlages. Ce local d'une surface au sol de 900 m^2 et d'une hauteur de 25 m comprend une zone feu centrale de $8 \times 8 \text{ m}^2$ en briques réfractaires (voir Figure 3.6). De part et d'autre, un plafond mobile (surface totale de 280 m^2) était positionné à 12 m du sol.

3.2.a.iii Site PROMETHEI

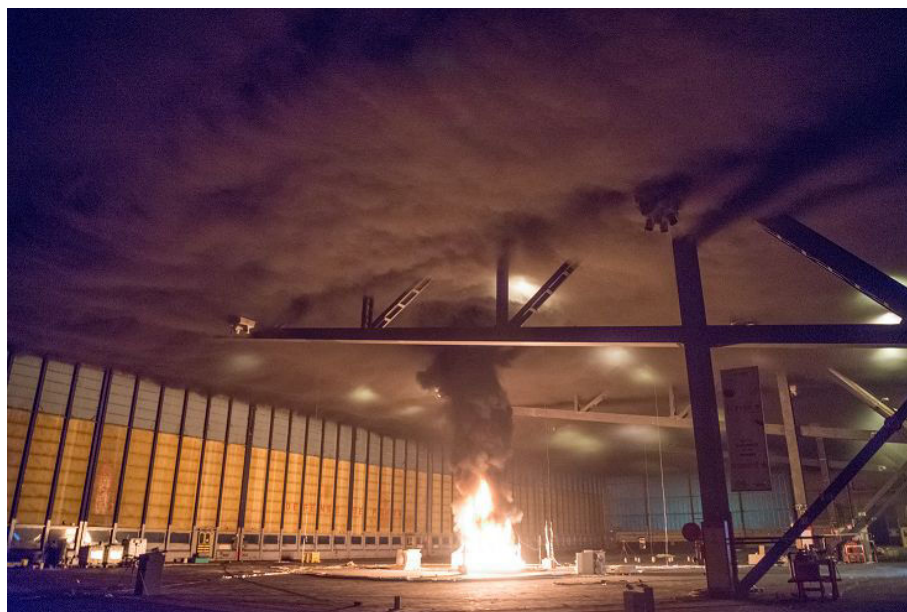
Les essais à moyenne échelle ont été conduits sur la plateforme expérimentale PROMETHEI (Plateforme de recherche opérationnelle en métrologie thermique dédiée aux essais incendies), une installation du LEMTA située à la Bouzule, près de Nancy. Ce hangar d'environ $20 \times 15 \times 7 \text{ m}^3$, déjà utilisé pour réaliser des feux de végétation [136], à cette fois été utilisé pour les foyers de nombreux combustibles (voir Figure 3.7), de largeur 70 ; 50 et 30 cm.

3.2.a.iv Site fort de la Briche

Des essais complémentaires (p. ex. feux de bacs, voir Annexe B) ont été réalisés dans la structure expérimentale du LCPP au Fort de la Briche (site de la Brigade de sapeurs-pompiers de Paris ou BSPP). Il est constitué de plusieurs conteneurs de transport agencés sur deux niveaux (voir Figure 3.8) permettant la réalisation d'essais à échelle réelle, qu'il s'agisse de brûlages simples comme ici (bac ou bloc de mousse seul) ou de reconstitutions complètes de feux d'appartement par exemple. Cette installation est, entre autres, équipée d'une hotte calorimétrique (pièce en haut de la rampe sur la Figure 3.8).

3.2.b Cône calorimètre

Comme décrit en Section 2.2.a.iii, le cône calorimètre est un outil souvent utilisé pour caractériser le comportement au feu d'échantillons à échelle réduite. Ici, il a été retenu pour



(a) Bac de kérosène de 6 m².



(b) Bûcher bois de 2,4 m de côté.

FIGURE 3.5 – Aperçus d'essais à ADP. Une partie de la métrologie est visible sur la Figure 3.5b : arbres de thermocouples (chaînes verticales), fluxmètres (mâts verticaux à droite), réception du système d'opacimétrie (structure en béton cellulaire devant le foyer).



FIGURE 3.6 – Aperçu d'un essai mousse polyuréthane de 6 m² sur le site du CNPP.



FIGURE 3.7 – Aperçu d'un essai kérosène de 0,5 m² à la Bouzule (PROMETHEI).



FIGURE 3.8 – Structure d'essais au fort de la Briche (LCPP/BSPP).

les essais à petite échelle pour la sollicitation radiative maîtrisée qu'il offre, étant donnée l'importance de ce mode de transfert lors des incendies (voir Section 1.2.a), mais aussi pour sa popularité, car elle signifie que les mesures effectuées lors de ce travail pourront être plus facilement reproduites, et les modèles développés plus facilement utilisables et améliorables par la communauté. L'appareil utilisé ici est celui du LCPP, de marque Fire Testing Technology (voir Figure 3.9).



FIGURE 3.9 – Cône calorimètre du LCPP.

Des essais préliminaires ont permis de définir le porte-échantillon optimal pour la campagne expérimentale à proprement parler. Cette pré-étude, réalisée dans le cadre du stage d'Adrien Leroy comme la plupart des travaux au cône calorimètre [137], est décrite ci-après. Les essais exploités par la suite ont quant à eux été réalisés en exposant les échantillons à des flux entre 10 à $80 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$.

3.2.b.i Choix du porte-échantillon

Trois portes-échantillon ont été évalués (voir Figure 3.10) :

- Configuration A – La face inférieure de l'échantillon est emballée dans du papier aluminium. Les faces latérales de l'échantillon sont libres, excepté le dernier centi-

mètre qui est recouvert par l'emballage de la face inférieure. Cette configuration a été choisie pour comparer les résultats à ceux de Robson et al. [124].

- Configuration B – L'échantillon est emballé dans du papier aluminium et placé dans un porte-échantillon en acier. Seule la face supérieure (88 cm^2) est exposée. Cette configuration est l'une de celles prescrites dans la norme ISO 5660 [112].
- Configuration C – Les faces inférieure et latérales de l'échantillon sont emballées dans du papier aluminium. Seule la face supérieure est exposée (100 cm^2). Cette configuration est issue de travaux antérieurs réalisés au LCPP, ainsi que de la littérature [138].



FIGURE 3.10 – Configurations A, B et C (de gauche à droite).

Les résultats obtenus pour un éclaircissement de $35\text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ sont présentés en Figure 3.11. Il est clair que le choix du porte-échantillon a un réel impact sur le débit calorifique. Dans le cas de la configuration A, un premier pic est observé pour les trois répétitions, jusqu'à $400\text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. Ceci est probablement dû à un apport d'oxygène sur les faces latérales de l'échantillon, qui sont libres dans cette configuration. Ce pic est suivi d'une nette décroissance, puis une nouvelle augmentation vers un maximum compris entre 580 et $650\text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. Sur cette partie de la courbe, les trois essais présentent des maxima différents. La configuration C ne présente pas de premier pic. La courbe croît jusqu'à $300\text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, puis jusqu'à un maximum de $500\text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. Les deux essais dans cette configuration sont répétables. Enfin, la configuration B ne présente pas de maximum de débit calorifique très marqué, mais un HRR plus étalé dans le temps.

Vus ces résultats, c'est la configuration C qui a été retenue. En effet, elle est plus représentative de la réalité que la configuration A car elle empêche toute combustion sur les côtés de l'échantillon. La différence avec la configuration B se trouve principalement dans les transferts thermiques, qui n'ont pas été caractérisés finement dans la présente étude : l'objectif est de figer un protocole optimal (représentatif mais simple à mettre en œuvre) pour acquérir des données à petite échelle, puis de procéder au changement d'échelle pour ces données expérimentales (et leurs éventuels biais). La configuration C a donc été privilégiée car moins contraignante que la configuration B.

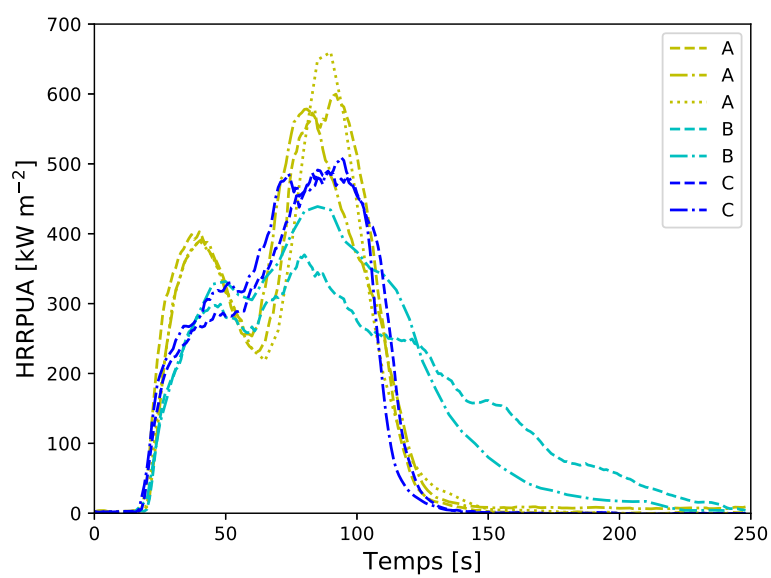


FIGURE 3.11 – Comparaison des trois configurations pour un éclairement reçu de $35 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$.

Chapitre 4

Métrologie

Sommaire

4.1	Mesures classiques	53
4.1.a	Pesée	53
4.1.b	Fluxmétrie	54
4.2	Mesures relatives à la flamme	55
4.2.a	Imagerie visible	55
4.2.b	Opacimétrie et spectrométrie	58
4.3	Mesures de la propagation	62
4.3.a	Thermométrie	62
4.3.b	Imagerie visible	63
4.3.c	Photogrammétrie	66

Les sections suivantes visent à présenter les instruments de mesure utilisés ainsi que la façon dont les données ont été traitées : ceci permettra de ne présenter et discuter que les résultats dans le reste du manuscrit. La métrologie du cône calorimètre ne sera pas abordée car seules les mesures, relativement simples, de perte de masse seront exploitées.

4.1 Mesures classiques

4.1.a Pesée

4.1.a.i Matériel

La perte de masse a été enregistrée pour tous les essais, à l'exception des bûchers de plus de 70 cm de côté et des feux de bacs de 250 cm de large (pour des raisons techniques). Cinq balances ont été utilisées, suivant les dimensions/la masse du foyer, le site d'essai et la disponibilité du matériel. Leurs caractéristiques sont données dans le Tableau 4.1.

TABLEAU 4.1 – Principales caractéristiques des balances utilisées.

Marque	Modèle	Plateau [mm ²]	Charge max. [kg]	Précision [g]
Wimesure	CS2	3000 × 2600	1000	300
Brecknell	WB-521	4000 × 1200	2500	200
Dini Argeo	FLA600	1000 × 1000	600	200
Mettler Toledo	MCC 150S	800 × 600	150	10 à 50
Ohaus	D60BL	550 × 420	60	10

4.1.a.ii Exploitation

Les données de perte de masse ont été utilisées pour déterminer la vitesse de perte de masse, en filtrant les résultats expérimentaux (filtre gaussien sur 10 à 20 s) puis en les dérivant point par point.

4.1.b Fluxmétrie

4.1.b.i Matériel

Deux jeux de fluxmètres radiatifs ont été utilisés : avec refroidissement à ADP et sans à PROMETHEI et au CNPP (voir Tableau 4.2). Ils étaient calibrés à l'aide d'un panneau radiant.

TABLEAU 4.2 – Principales caractéristiques des fluxmètres utilisés.

Marque	Refroidissement	Zone sensible	Sensibilité [$\mu\text{V} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$]
	Eau	30 × 30 mm ²	11,0 à 12,9
Captec	Air	100 × 100 mm ²	95,6 à 99,5
	Aucun	∅ 34 mm	4,07 à 4,34

Les fluxmètres étaient disposés horizontalement ou verticalement, à différentes distances du foyer, comme schématisé sur la Figure 4.1.

4.1.b.ii Exploitation

La tension mesurée U peut être convertie en flux thermique incident $\dot{q}_{\text{inc}}''$ en utilisant la sensibilité du capteur S et éventuellement le flux ré-émis $\dot{q}_{\text{émis}}''$, selon

$$\dot{q}_{\text{inc}}'' = \frac{U}{S} + \dot{q}_{\text{émis}}''. \quad (4.1)$$

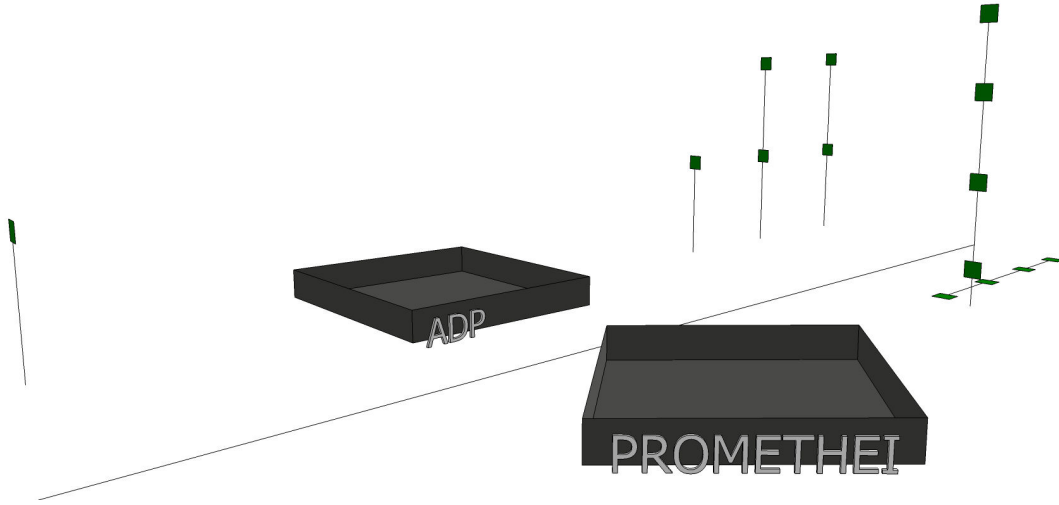


FIGURE 4.1 – Schéma de la disposition des fluxmètres verticaux et horizontaux à PROMETHEI (premier plan) et ADP (arrière plan). Échelles non respectées.

Le flux thermique émis est considéré négligeable pour les fluxmètres refroidis, et vaut $\dot{q}''_{\text{émis}} = \sigma T^4$ pour les fluxmètres non refroidis, avec T leur température, mesurée en face arrière à l'aide d'un thermocouple de type K et σ la constante de Stefan-Boltzmann.

4.2 Mesures relatives à la flamme

4.2.a Imagerie visible

4.2.a.i Matériel

L'ensemble des essais a été enregistré en utilisant des caméras visibles, afin de les documenter, d'étudier la propagation des fumées (ADP) ou celle du feu à la surface du combustible (CNPP), ainsi que pour déterminer la géométrie de la flamme (ADP, CNPP et PROMETHEI). Concernant ce dernier point, la hauteur de flamme et sa largeur à différentes altitudes ont été extraites au cours du temps par traitement d'images : les étapes sont décrites ci-après. Les caractéristiques du matériel utilisé sont listées dans le Tableau 4.3. Les caméras CamIP et CamGP ont été utilisées à ADP et les CamBou à PROMETHEI. Au CNPP, l'ensemble de ces matériels a été utilisé. Le traitement d'images présenté par la suite a été fait sur les images des caméras CamBou ou CamIP à défaut.

TABLEAU 4.3 – Principales caractéristiques des caméras et objectifs utilisés.
 Rés. max. pour résolution maximale et FPS pour nombre d’images par seconde (*frames per second*). Si une seule valeur de FPS est donnée, elle correspond à la résolution maximale.

Identifiant	Marque	Modèle	Rés. max. [px ²]	FPS [fps]	Focale [mm]
CamIP	Hikvision	DS-2CD4032 FHWD-A	2048×1536	30	2,8 à 8
					2,7 à 12
					2,8 à 12
CamGP	GoPro	Hero 5 Black	3840×2160	20 à 25	nc
CamBou	Lumenera	Le165MP	1376×1032	15	3
					6
					12

4.2.a.ii Exploitation

Afin d’extraire des propriétés comme la hauteur ou la forme de flamme, les images visibles ont été post-traitées numériquement, en les seuillant pour différencier la flamme des autres éléments, puis en extrayant et corrigeant son contour pour faire les calculs souhaités, comme illustré en Figure 4.2 pour un essai ADP (70 cm, images du haut) et un essai PROMETHEI (30 cm, images du bas).

Le seuillage consistait à traiter les images brutes (Figures 4.2a et 4.2d) pour obtenir des images binaires (Figures 4.2b et 4.2e), où les pixels blancs représentent la flamme et les noirs le reste. Pour les images des caméras CamIP, la première étape était une conversion en nuances de gris (256 niveaux) à l’aide de la fonction `rgb2gray` (Matlab²²), puis une sélection des pixels représentant la flamme, en supposant qu’il s’agit des plus intenses (grandes valeurs de niveau de gris), c’est-à-dire

si intensité $\geq$ (max(intensités) - seuil) **alors** pixel = 1 **sinon** pixel = 0

avec un seuil fixé entre 5 et 20 suivant la luminosité de l’essai. Le traitement était plus simple pour les images des caméras CamBou, étant donné qu’elles étaient déjà en niveaux de gris et que les réglages (p. ex. très faible ouverture) permettaient déjà de ne capter que la flamme (seul élément assez lumineux pour être enregistré) : les pixels étaient donc juste convertis en valeurs binaires à l’aide de la fonction `imbinarize` (Matlab).

Les images binaires étaient ensuite analysées pour détecter la frontière entre pixels blancs et noirs, qui représente le contour de flamme, en utilisant une fonction comme `bwboundaries` (Matlab). Si plusieurs contours étaient détectés, seul celui présentant la plus grande surface était conservé (voir Figures 4.2c et 4.2f). Les coordonnées des points du contour étaient ensuite converties en unités « réelles » (p. ex. mètres) et corrigées pour

22. Paramètres par défaut (Matlab R2018a). Ceci est aussi valable pour les fonctions citées par la suite, sauf mention contraire.

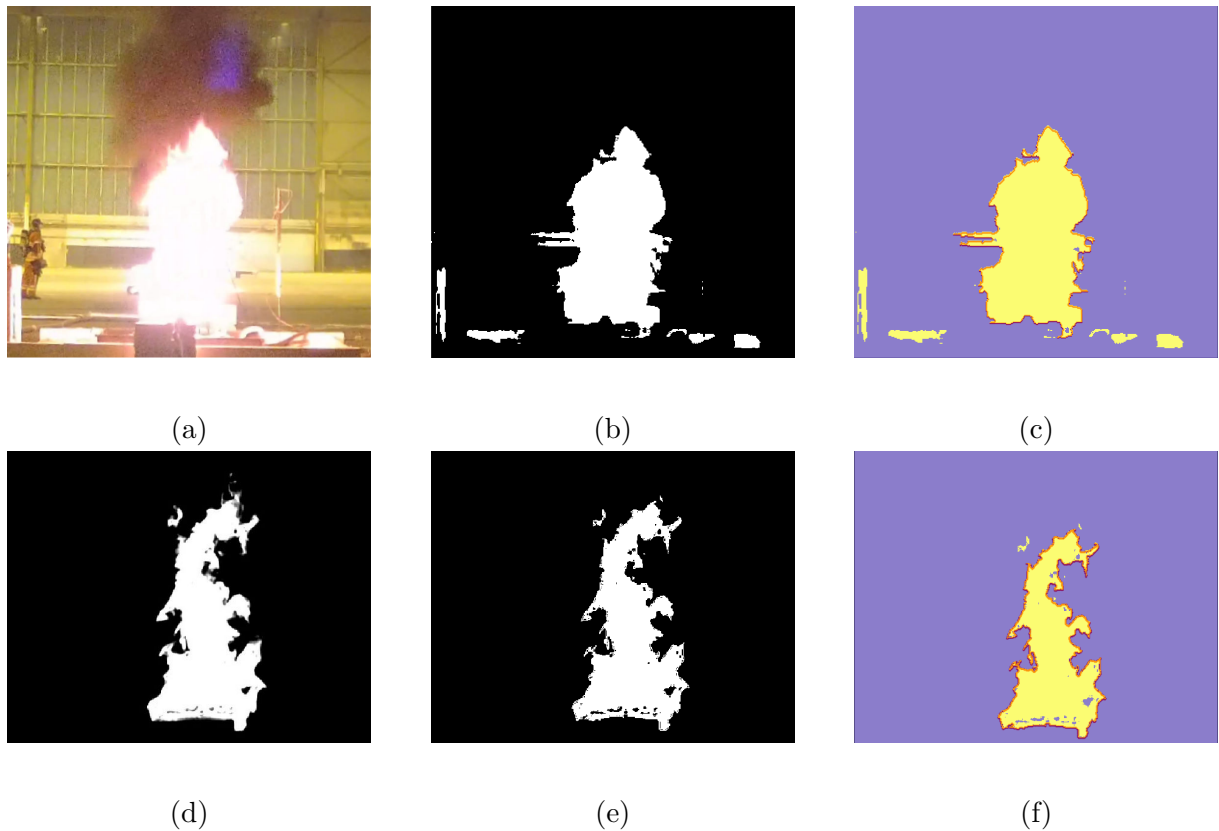


FIGURE 4.2 – Exemples d’images instantanées prises lors d’essais kérosène à ADP (70 cm, rangée du haut) et PROMETHEI (30 cm, rangée du bas). De gauche à droite : les images brutes, les images seuillées, les contours de flamme. Les Figures d et e sont quasiment identiques en raison des réglages des caméras utilisées à PROMETHEI.

prendre en compte les déformations induites par la position de la caméra et les caractéristiques de l'objectif, en utilisant un algorithme de transformation linéaire directe (DLT, voir [136, 139] pour plus de détails). L'étape de calibration, réalisée en début de traitement et nécessaire pour ensuite convertir et corriger les images, était faite en utilisant quatre points de référence, typiquement aux coins d'une mire parallèle au plan du capteur de la caméra et placée au milieu du foyer. Les dimensions de cette dernière étaient choisies en fonction des tailles de flamme attendue : de l'ordre de $1 \times 1 \text{ m}^2$ à PROMETHEI et $4 \times 4 \text{ m}^2$ au CNPP. À ADP, aucune mire n'a été utilisée, et la DLT n'a donc pas pu être appliquée : la seule correction consistait à convertir les coordonnées en mètres, en se basant sur deux points de référence (éléments de la scène, bords du foyer p. ex.).

Une fois les coordonnées des points du contour corrigées, elles pouvaient être utilisées pour déterminer la hauteur de flamme, ainsi que sa largeur à différentes altitudes. La hauteur a été définie comme la plus grande différence d'ordonnées entre deux points de même abscisse. De manière similaire, les largeurs étaient définies comme la différence d'abscisses entre deux points de même ordonnée, pour toutes les altitudes/ordonnées souhaitées. Étant donné que les contours étaient issus du traitement d'images, il était peu probable que deux points aient exactement la même abscisse, la même ordonnée ou encore une ordonnée correspondant aux altitudes désirées : une tolérance était donc introduite. Par exemple pour la hauteur de flamme, il a été considéré que deux points A et B avaient la même abscisse x si $|x_A - x_B| \leq (0.01 [\max(x) - \min(x)])$. Les profils de flamme, utilisés plus tard pour déterminer les formes de flamme (Section 5.1.b), sont composés des largeurs médianes calculées tous les 1 cm ou 10 cm suivant la taille de flamme attendue.

4.2.b Opacimétrie et spectrométrie

L'objectif des mesures présentées dans cette section est de fournir des données pour un modèle décrivant l'émission de la flamme, et plus particulièrement des suies²³, comme celle d'un milieu homogène et isotherme équivalent (voir Section 2.1.a.i). Pour rappel, dans ce cas particulier la luminance spectrale s'exprime

$$L_\sigma = (1 - \exp[-\kappa_\sigma^a e]) L_\sigma^{\text{CN}}(T). \quad (\text{c.f. 2.6})$$

Il faut alors déterminer deux inconnues, à savoir le coefficient d'absorption κ_σ^a et la température T : c'est le rôle des deux mesures distinctes (opacimétrie et spectrométrie) présentées ci-dessous. Certains passages sont tirés de [67, 140], et plus de précisions sont disponibles dans ces références. Ces mesures étant moins courantes que les précédentes, elles sont décrites plus en détails.

23. Pour rappel, le rayonnement est le mode de transfert prédominant pour les feux à moyenne et grande échelle (voir Section 1.2.a et [20-22]), et les suies sont les principaux émetteurs pour ces flammes (voir Section 2.1.a.ii).

4.2.b.i Matériel

Opacimétrie Les mesures d'opacimétrie consistent à déterminer la transmission de différents lasers monochromatiques à travers la flamme, tel que schématisé sur la Figure 4.3. Ce dispositif vise à répondre à plusieurs objectifs et contraintes. D'une part, il doit permettre de mesurer la transmission à différentes longueurs d'onde à travers des flammes de petite, moyenne et grande taille. D'autre part, il doit collecter la lumière transmise, car elle est déviée lors de son passage dans la flamme, et la séparer du rayonnement propre de la flamme. Pour répondre à ces besoins, différents éléments ont été mis en œuvre. L'émission est assurée par des diodes lasers, qui offrent un large choix de longueurs d'onde tout en étant peu encombrantes. Afin de séparer les rayonnements lasers de celui de la flamme, les signaux sont modulés à l'aide d'un hacheur optique, puis démodulés grâce à un amplificateur à détection synchrone (voir illustration en Figure 4.3). Pour collecter les faisceaux laser malgré leur déviation lors du passage dans la flamme, un miroir parabolique hors axe (20 cm de diamètre, à droite sur la Figure 4.3) est utilisé. Une fois collectées dans une sphère intégrante, les différentes longueurs d'onde sont séparées à l'aide de filtres passe-bande avant détection. Pour chaque longueur d'onde, la transmission peut être calculée en divisant l'intensité mesurée en cours d'essai par celle initiale, mesurée avant l'essai.

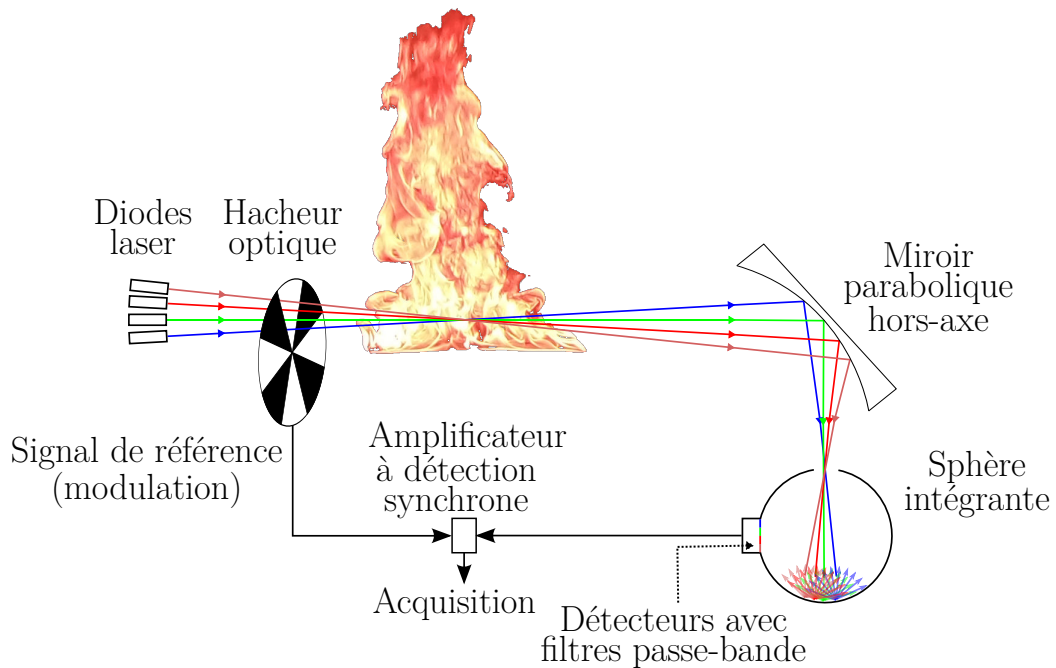


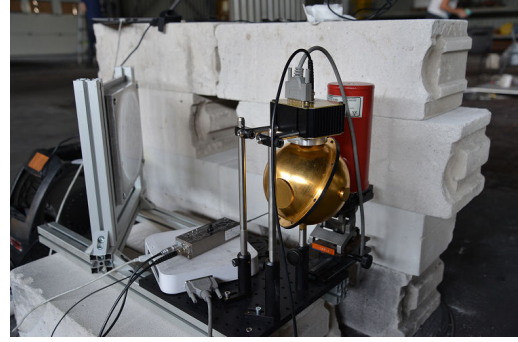
FIGURE 4.3 – Éléments du montage opacimétrique.

Deux dispositifs ont été développés suivant les principes décrits ci-dessus, en utilisant quatre longueurs d'onde simultanément : 410 ; 520 ; 785 et 1650 nm pour le premier et 785 ; 1650 ; 2300 et 3800 nm pour le second. Ces valeurs ont notamment été choisies car elles sont situées en dehors des bandes d'absorption des gaz de combustion, c'est-à-dire H_2O

et CO₂, afin de ne caractériser que les suies. Les mesures étaient faites environ 10 cm au-dessus des foyers de taille intermédiaire, à savoir 30 ; 50 et 70 cm de large, et environ 20 cm au-dessus des foyers plus grands. Un aperçu d'un dispositif d'opacimétrie est présenté en Figure 4.4.



(a) Sources laser (le vert est visible sur une lame du hacheur).



(b) Miroir parabolique hors axe, sphère intégrante et détecteurs.

FIGURE 4.4 – Dispositif d'opacimétrie : (a) émission, (b) détection.

Spectrométrie infrarouge Un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (modèle Matrix par Bruker) a été utilisé pour caractériser l'émission des flammes entre 800 et 6000 cm⁻¹ (c.-à-d. 1,67 à 12,5 μm). Les mesures étaient effectuées aux mêmes hauteurs que l'opacimétrie (c.-à-d. 10 ou 20 cm au-dessus des foyers), afin que les données puissent être utilisées ensemble.

4.2.b.ii Exploitation

Dans un premier temps, le principe de l'exploitation des mesures est donné. Dans le paragraphe suivant, une approche plus détaillée, tirée de [140], est décrite.

Principe général Les mesures d'opacimétrie permettent d'obtenir des valeurs de transmittance $\mathcal{T}(\lambda_i, t)$ à travers la flamme à plusieurs longueurs d'onde λ_i . Celles-ci peuvent être traduites en épaisseurs optiques τ selon

$$\tau(\lambda_i) = -\ln(\mathcal{T}(\lambda_i)), \quad (4.2)$$

qui sont directement liées aux coefficients d'extinction β par l'épaisseur physique e du milieu traversé (ici la flamme), à savoir

$$\beta(\lambda_i) = \frac{\tau(\lambda_i)}{e}. \quad (4.3)$$

Les mesures aux différentes longueurs d'onde λ_i permettent alors de déterminer les valeurs des paramètres C_1 et C_2 d'un modèle de la littérature [68], propre aux suies, et de la forme

$$\beta(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^{C_2}}. \quad (4.4)$$

Pour le domaine infrarouge considéré ici, la diffusion par les suies peut être négligée [140]. Le coefficient d'absorption κ_σ^a est alors égal au coefficient d'extinction $\beta(\lambda)$ décrit ci-dessus, avec les coefficients C déterminés par opacimétrie. Les mesures de spectrométrie, qui fournissent des valeurs de luminance L_λ , peuvent alors être utilisées pour déterminer l'inconnue restante dans l'Équation 2.6, à savoir la température T . En effet, il est maintenant possible d'ajuster les valeurs expérimentales de luminance avec une équation de la forme

$$L_\lambda = \left(1 - \exp \left[-\frac{C_1}{\lambda^{C_2}} e \right] \right) L_\lambda^{\text{CN}}(T) \quad (4.5)$$

et ainsi de déterminer T .

Approche retenue Une approche équivalente, plus détaillée, peut aussi être utilisée [140]. Pour plus de cohérence, les grandeurs seront exprimées en fonction du nombre d'onde $\sigma = 1/\lambda$, qui est l'unité « naturelle » pour utiliser les données de spectroscopie. La dépendance spectrale du coefficient d'extinction β , donnée en Équation 4.4, peut être reformulée en faisant apparaître β_0 , un coefficient d'extinction à un nombre d'onde de référence σ_0 , en obtenant ainsi une forme adimensionnelle, et α , un exposant dépendant du combustible qui rappelle d'autres relations de la littérature [68]. Toujours en négligeant la diffusion par les suies [140], on a alors

$$\kappa^a(\sigma) = \beta(\sigma) = \beta_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^\alpha. \quad (4.6)$$

En combinant les Équations 2.6 and 4.6, on obtient

$$L_\sigma = \left(1 - \exp \left[-\beta_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^\alpha e \right] \right) L_\sigma^{\text{CN}}(T). \quad (4.7)$$

Ce modèle fait intervenir trois paramètres : β_0 , α et T . Pour en déterminer les valeurs, plusieurs approches sont possibles [140] :

1. Fixer β_0 et α grâce aux mesures d'opacimétrie, c'est-à-dire ajuster les coefficients d'extinction expérimentaux $\beta(\lambda_i)$ (Équations 4.2 et 4.3) avec l'Équation 4.6, puis ajuster les mesures de spectrométrie (Équation 4.7) pour obtenir la température. Il y a un paramètre libre, à savoir T .
2. Déterminer β_0 et α comme précédemment mais ne fixer que α par la suite, et faire l'ajustement des luminances expérimentales (Équation 4.7) pour déterminer T et (recalculer) β_0 . Ces deux paramètres sont donc considérés libres pour cette approche.
3. Laisser tous les paramètres (β_0 , α et T) libres et ajuster les résultats de spectrométrie directement avec l'Équation 4.7 et ses trois inconnues. Cette approche, théoriquement possible, est moins satisfaisante car elle souffre du couplage entre β_0 et α (infinité de couples de solutions).

Une fois les paramètres β_0 , α et T déterminés pour un combustible, il est possible d'utiliser l'Équation 4.7 pour prédire la luminance en fonction de l'épaisseur de la flamme e .

4.3 Mesures de la propagation

Plusieurs techniques ont été mises en œuvre pour caractériser la propagation du feu sur les blocs de mousse polyuréthane. Ceci inclut des mesures à la surface du combustible, par traitement vidéo (Section 4.3.b) ou photo (Section 4.3.c), mais aussi à l'intérieur du solide pour les blocs de grande dimension, comme décrit dans la section suivante.

4.3.a Thermométrie

4.3.a.i Matériel

Le suivi de la propagation *dans* les blocs de mousse a été fait en positionnant des thermocouples de type K à différentes positions. Les thermocouples étaient maintenus en place par le support sur lequel reposait la mousse, qui ont tous deux été pré-perçés pour faciliter l'insertion des thermocouples avant chaque essai et s'assurer que leur position soit correcte (voir p. ex. Figure 4.5).

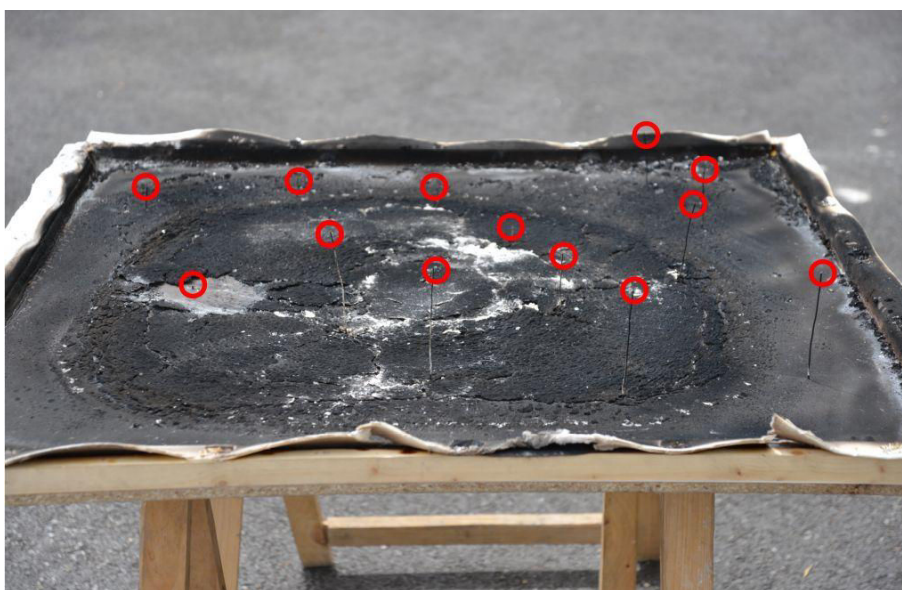


FIGURE 4.5 – Exemple du support pour les blocs de 1,00 m après un essai.
Les thermocouples visibles sont mis en évidence par des cercles rouges.

Pour chaque taille d'échantillon, 17 thermocouples sont positionnés à différentes distances du point d'allumage et à différentes profondeurs, comme indiqué sur les Figures 4.6 pour les blocs d'épaisseur 20 cm. Les thermocouples sont désignés par une lettre (profondeur) et un chiffre (distance du centre). Pour les blocs de 20 cm d'épaisseur, A correspondait à 5 cm sous la surface, B à 10 cm, C à 15 cm et D à 20 cm (face arrière), tandis que 0 désignait le thermocouple au centre du bloc, et 1 à 4 les rayons suivants en allant vers les bords du bloc. Par exemple sur la Figure 4.6a, le thermocouple A1 est celui aux coordonnées $(-0,15;$

0,1 ; -0,05) m, et le D4 aux coordonnées (-0,4 ; 0,3 ; -0,2) m. D'autres profondeurs étaient utilisées pour les blocs de 5 et 10 cm d'épaisseur mais ne seront pas détaillées ici.

4.3.a.ii Exploitation

Afin de suivre la propagation par mesure de température, il a été considéré que l'arrivée de la flamme était marquée par une augmentation de plus de $10^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$. Une fois les temps remplissant cette condition déterminés, une interpolation entre les thermocouples a été faite. Vue la faible résolution spatiale, imposée par des contraintes expérimentales, les résultats obtenus aux points de mesure ont été considérés valables aux quatre coins des blocs, ce qui revient à supposer que la propagation était symétrique. Cette hypothèse est illustrée en Figure 4.7 pour les thermocouples D dans un bloc de 1,00 m. Par exemple pour le premier rayon (cercle en traitillés), les mesures n'ont été faites que pour le point en marqueur plein ([0,1 ; 0,15 ; -0,2] m) mais sont considérées valables pour les trois autres positions ([0,15 ; -0,1 ; -0,2] m, [-0,1 ; -0,15 ; -0,2] m et [-0,15 ; 0,1 ; -0,2] m). La même approche a été utilisée pour les autres rayons, aussi représentés sur la Figure 4.7, ainsi que pour les autres profondeurs : à chaque fois, quatre mesures ont été utilisées pour déduire le temps d'arrivée de la flamme à 16 positions. Ces données ont ensuite été utilisées pour faire une interpolation et déduire l'évolution de la propagation au cours de l'essai (position du front de décomposition au cours du temps), comme présenté en Section 7.2.b.i et en Annexe D.

4.3.b Imagerie visible

4.3.b.i Matériel

Les caractéristiques des caméras sont les mêmes que pour l'étude de la forme de flamme, et sont listées dans le Tableau 4.3. Les caméras étaient simplement positionnées en hauteur et orientées de manière à pouvoir suivre la propagation à la surface des blocs de mousse, avec un angle de vue tel que schématisé à gauche en Figure 4.8.

4.3.b.ii Exploitation

Le traitement des images a été fait selon les principes décrits en Section 4.2.a.ii, avec toutefois quelques particularités. Ainsi, la calibration était faite en utilisant les quatre coins supérieurs des blocs de mousse comme référence, étant donné que le phénomène étudié (la propagation) se déroulait dans ce plan. L'origine du repère était placée au centre des blocs. Seule la moitié inférieure des contours était conservée ($y < 0$) car l'autre partie était essentiellement constituée de la flamme, qui n'est pas l'objet d'étude ici. Les points retenus étaient ensuite ajustés par une ellipse, à l'aide de la fonction `fit_ellipse`

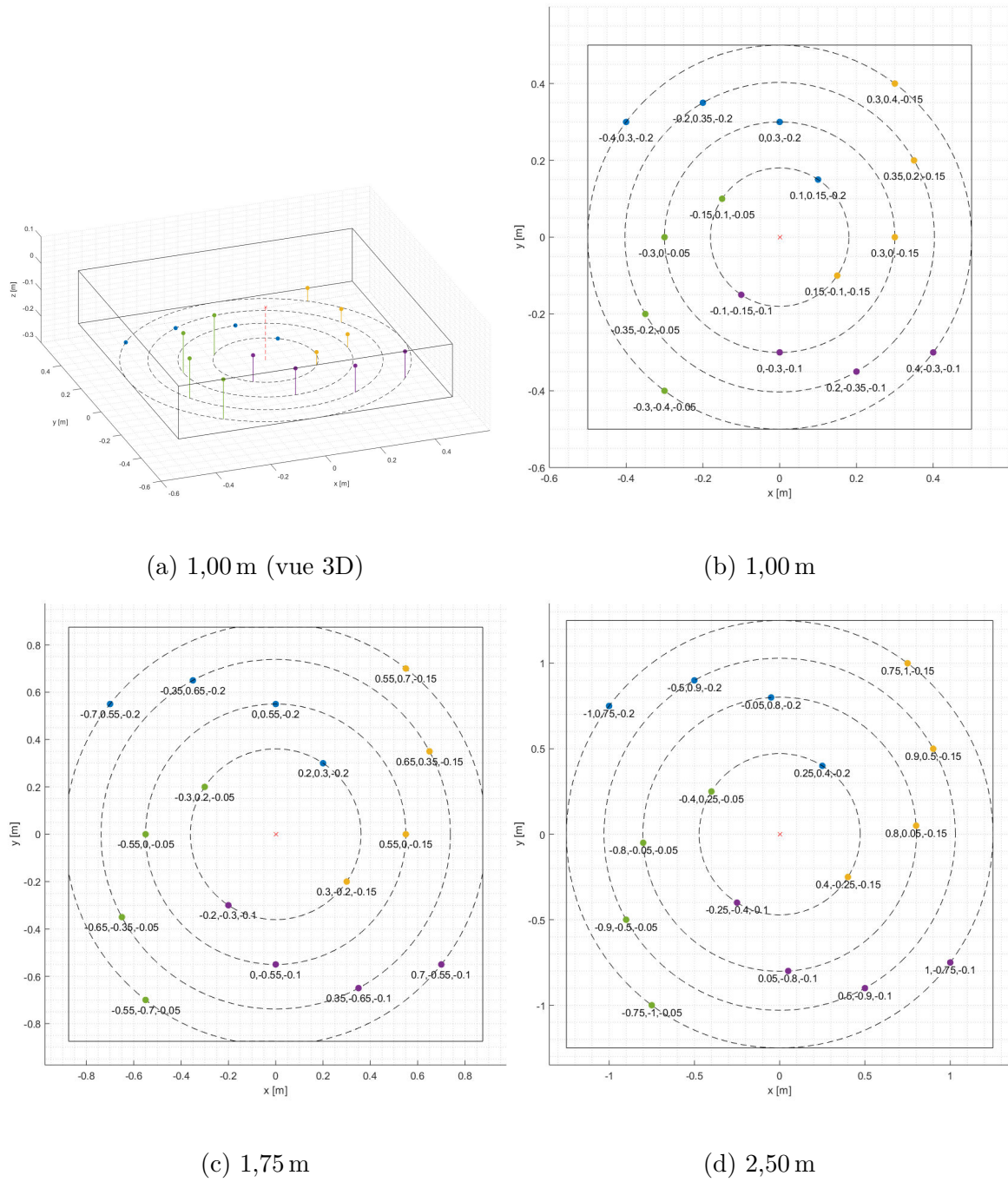


FIGURE 4.6 – Position des thermocouples pour les blocs de mousse polyuréthane de 20 cm d'épaisseur (trois largeurs différentes). La croix rouge représente la position d'allumage (centre des blocs) et les cercles concentriques en traitillés les quatre distances auxquelles étaient positionnés les thermocouples. Les côtés des blocs sont donnés en traits pleins et les coordonnées en mètres.

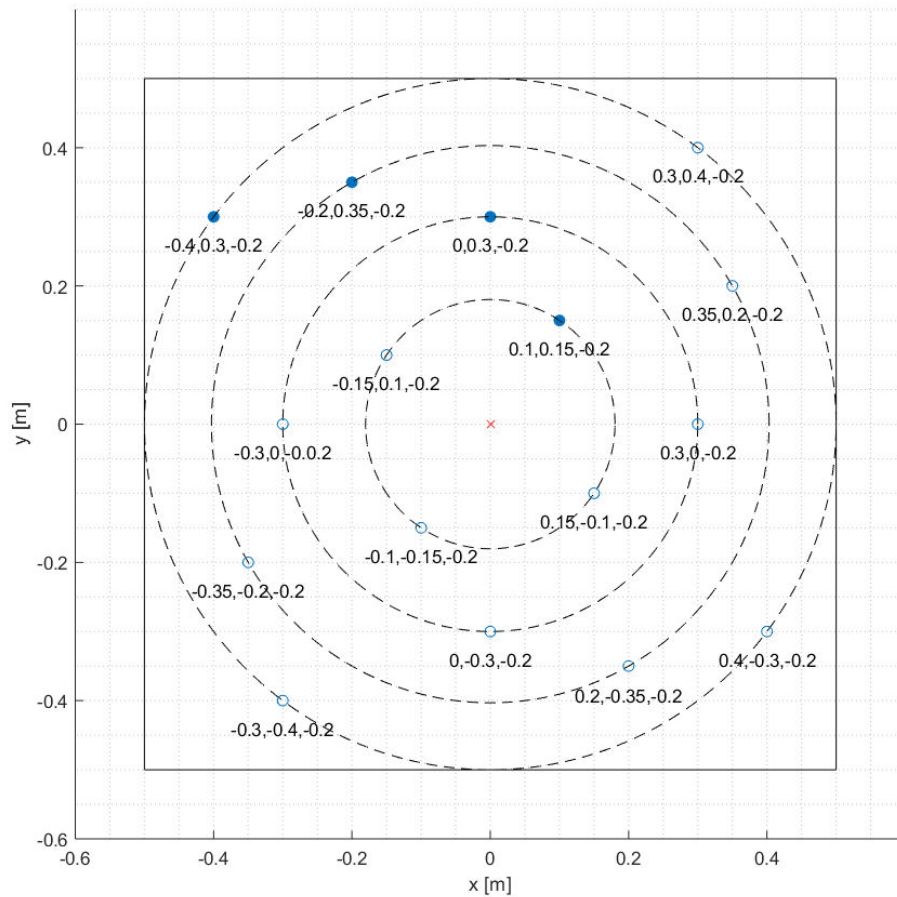


FIGURE 4.7 – Illustration de l’hypothèse de propagation symétrique utilisée pour exploiter les mesures de température. Exemple des thermocouples D (face arrière) pour un bloc de 1,00 m de côté (coordonnées en mètres). Les marqueurs pleins représentent les positions auxquelles étaient faites les mesures, ceux vides les positions auxquelles les résultats ont été supposés égaux aux mesures (à profondeur égale).

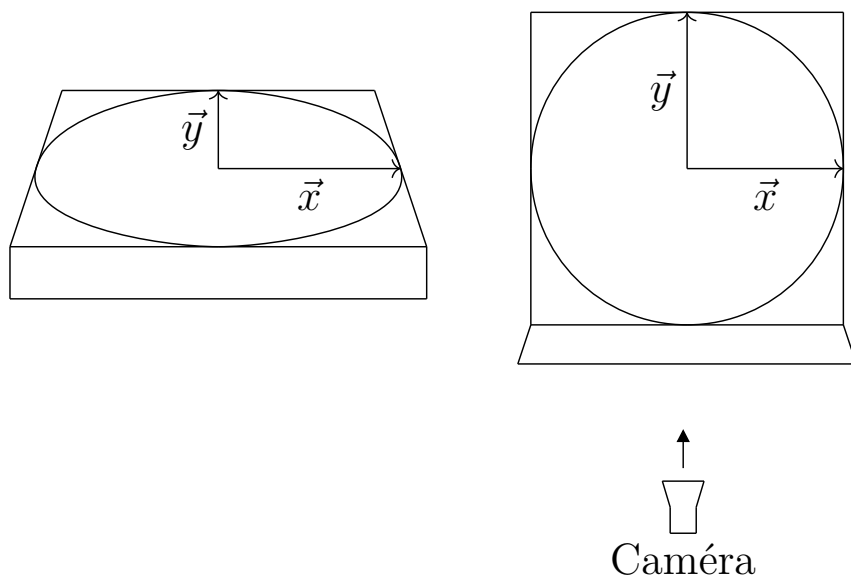


FIGURE 4.8 – Schémas de la propagation à la surface d'un bloc, avec les axes appelés x et y (par rapport à la caméra exploitée). Vue schématique depuis une caméra (à gauche) et image après correction grâce à la DLT [136, 139] (à droite).

²⁴ qui permet de déterminer les valeurs de cinq paramètres : les coordonnées du centre, les grand et petit rayons ainsi que l'inclinaison de l'ellipse. Cette approche a été retenue pour ne pas faire d'hypothèse trop forte quant à la forme de la propagation ou à sa symétrie. Cela permet par exemple de ne pas imposer le centre de la zone en feu ou que celle-ci soit circulaire. Ce sont les rayons de l'ellipse qui seront exploités par la suite (Section 7.2.a.i), en considérant qu'ils représentent la forme et la taille de la zone en feu.

4.3.c Photogrammétrie

4.3.c.i Matériel

Comme mentionné lors de la présentation des combustibles (Section 3.1), certains essais sur des blocs de mousse polyuréthane ont été interrompus à l'aide d'extincteurs CO_2 afin de figer la propagation à différents instants, c'est-à-dire lorsque la flamme atteignait les diamètres suivants : 10 ; 15 ; 20 ; 30 ; 40 ; 50 ; 60 ; 75 et 100 cm. Deux essais ont été réalisés pour 60 cm, et un brûlage a aussi été fait en laissant la flamme descendre sur les bords du bloc, sans aller jusqu'au percement.

La technique retenue pour caractériser la dégradation du bloc (« cuvette ») est la photogrammétrie, car elle a montré de bons résultats dans d'autres situations comparables [141] : elle permet une mesure relativement rapide, précise et bien résolue de l'ensemble des échantillons. Le traitement consiste à exploiter la parallaxe qui existe entre plusieurs cli-

²⁴. Disponible sur le *File Exchange* (https://fr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3215-fit_ellipse).

chés de la même scène, pris sous différents angles, comme illustré dans la section suivante. L'appareil photo utilisé était un Nikon D600 (24,3 Mpx), avec un objectif Nikon AF-S NIKKOR 24–85 mm f/3,5–4,5G ED VR. Les photos étaient prises en tournant autour de l'échantillon, toujours aux mêmes distance, hauteur et inclinaison. Un cliché était pris tous les 10° (voir Figure 4.9).



FIGURE 4.9 – Exemples de photos brutes pour le bloc éteint à un diamètre de 20 cm (1 photo sur 6 représentée).

Afin de valider cette approche photogrammétrique, un bras de mesure ROMER Absolute a aussi été utilisé sur certains échantillons, afin de fournir des points de comparaison.

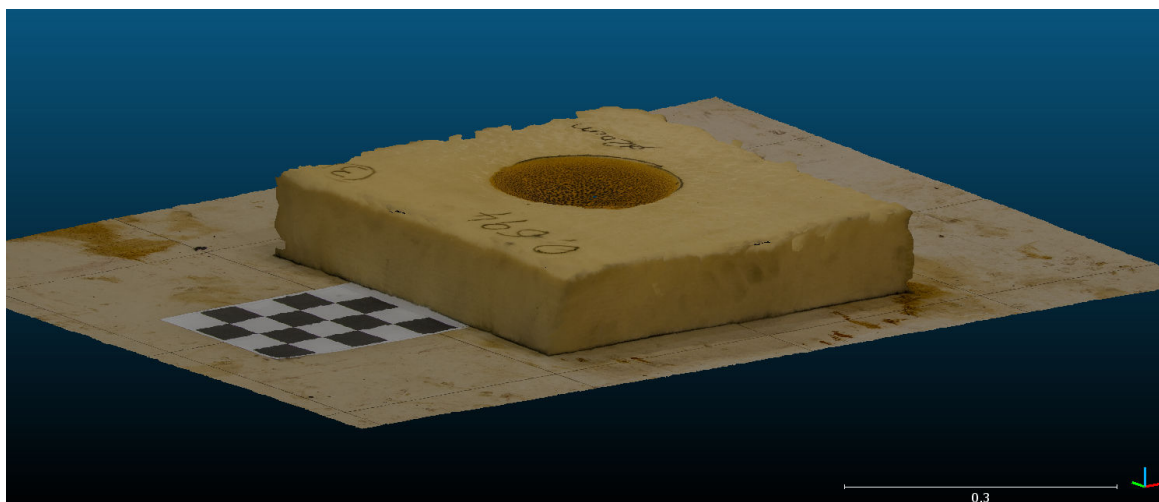
4.3.c.ii Exploitation

Le post-traitement des images a été fait à l'aide du logiciel de reconstruction 3D MeshRoom²⁵. En résumant, le traitement automatique²⁶ consistait à repérer la position de la caméra par rapport à la scène pour chaque cliché, à l'aide de points de comparaison, puis à établir une carte de profondeur (*depth map*) qui permet de reconstruire la scène en trois dimensions. Ceci produit un nuage de points texturé qui peut ensuite être exploité, par exemple ici avec CloudCompare²⁷ puis Matlab. Le premier a été utilisé pour mettre le nuage à l'échelle et le nettoyer des points n'appartenant pas aux échantillons (voir Figure 4.10), tandis que le second a servi à extraire les différentes mesures et représentations présentées par la suite, en travaillant sur un nuage de points comme ceux présentés en Figure 4.10c.

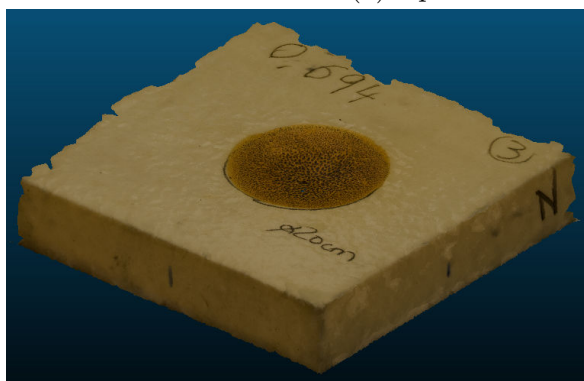
25. <https://alicevision.github.io/#meshroom>

26. Les valeurs par défaut de la version 2018.1.0 ont été utilisées.

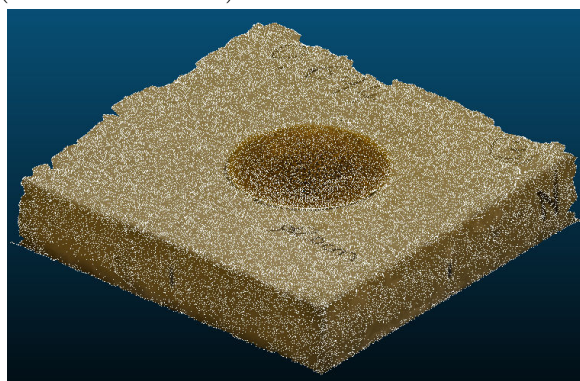
27. <http://www.cloudcompare.org/>



(a) Après calibration (échelle en mètres).



(b) Après nettoyage.



(c) Après nettoyage, points du nuage mis en évidence.

FIGURE 4.10 – Vues, dans CloudCompare, d'un nuage de points texturé (bloc avec un diamètre dégradé de 20 cm).

Résumé

Plusieurs combustibles ont été étudiés dans le cadre de ces travaux, à commencer par des foyers « académiques ». En effet ils sont souvent rencontrés dans la littérature, ce qui fournit des points de comparaison pour différents résultats, mais ils sont aussi relativement faciles à caractériser, notamment grâce à la phase stationnaire que présente leur combustion. Ceux-ci incluaient des feux de bac, principalement de kérosène, mais aussi de gazole/fioul et d'heptane, ainsi que des bûchers de bois. Ils seront principalement destinés à développer et valider les mesures et modèles, par exemple pour prédire le rayonnement. En plus de ces foyers, un combustible plus « réaliste », ou du moins plus représentatif d'un scénario d'incendie domestique, a été choisi. Il s'agissait de la mousse polyuréthane, car elle est souvent impliquée dans les sinistres avec un bilan humain et que l'étude de son comportement au feu présente donc aussi un intérêt pratique. Étant conditionnée sous forme de blocs uniformes, elle reste relativement simple à caractériser par rapport à d'autres combustibles que l'on peut trouver dans l'habitat.

Les travaux présentés ici étant centrés sur la montée en échelle, il était important de caractériser les combustibles précités pour une large gamme de tailles de foyers. C'est pourquoi plusieurs sites expérimentaux ont été utilisés. Les plus petits essais ont été réalisés avec le cône calorimètre du LCPP (échantillons de $0,10 \times 0,10 \times 0,05 \text{ m}^3$). Les brûlages à échelle intermédiaire ont principalement été conduits à la Bouzule (PROMETHEI, LEMTA), avec des foyers de 30 à 70 cm de côté. L'installation du fort de la Briche (LCPP/BSPP) a aussi été utilisée pour des brûlages complémentaires à ces échelles. Enfin, les plus grands foyers (jusqu'à plus de 9 m^2 d'emprise au sol) ont été faits dans un hangar aéroportuaire (groupe ADP) et le hall n° 3 du CNPP.

L'ensemble de ces essais a été instrumenté afin de caractériser différents phénomènes. En plus des mesures classiques comme le suivi de la perte de masse ou des flux thermiques, des instruments moins conventionnels ont aussi été déployés, comme un spectromètre infrarouge et un dispositif d'opacimétrie multispectrale. De l'imagerie visible a aussi été utilisée pour déterminer la forme de flamme. Enfin, pour le cas particulier de la mousse polyuréthane, une métrologie dédiée au suivi de la propagation a été ajoutée. Celle-ci incluait de l'imagerie visible, avec un traitement d'images similaire à celui utilisé pour extraire la forme de flamme, mais aussi des thermocouples qui fournissaient des informations sur la propagation en profondeur. Des photos ont aussi été exploitées pour certains essais, afin de reconstruire la géométrie des échantillons à différents stades de la combustion (photogrammétrie). Plusieurs caractéristiques de la flamme ont ainsi pu être extraites en

fonction de la taille du foyer et du combustible, et la propagation du feu sur les blocs de mousse polyuréthane étudiée de plusieurs points de vue. Les résultats expérimentaux sont présentés dans les parties suivantes, en commençant par ceux relatifs au rayonnement.

Troisième partie

Rayonnement de la flamme

Chapitre 5

Données expérimentales sur le rayonnement

Sommaire

5.1	Géométrie de flamme	74
5.1.a	Hauteur de flamme	74
5.1.b	Forme de flamme simplifiée	81
5.2	Propriétés radiatives	92
5.2.a	Coefficient d'absorption	92
5.2.b	Température de flamme équivalente	96
5.3	Densités de flux thermiques	100

Les sections suivantes visent à étudier le rayonnement des flammes d'incendie d'un point de vue expérimental et numérique. En premier lieu, les données utiles à la modélisation, à savoir la géométrie et les propriétés radiatives de la flamme, seront calculées à partir d'images visibles et de mesures d'opacimétrie/spectrométrie respectivement, puis analysées. Les flux thermiques expérimentaux, qui serviront à évaluer les modèles de rayonnement, seront aussi présentés. La description et la mise en œuvre des modèles seront faites dans un second temps.

Les résultats seront illustrés pour le kérosène et la mousse polyuréthane. Le premier a été retenu car il a été étudié pour toutes les tailles de foyer et que sa combustion est mieux contrôlée que les combustibles solides. Le polyuréthane est présenté car c'est le combustible retenu pour l'application finale. Pour certaines analyses, un seul essai par taille sera considéré : le choix est basé sur le protocole, pour qu'il varie le moins possible d'une taille de foyer à l'autre (voir aussi Annexe B), et sur les résultats, pour qu'ils soient représentatifs de toutes les répétitions. Ici, seules des données sur la phase stationnaire des essais seront extraites et discutées : une description temporelle de ces grandeurs pourra être faite à l'avenir, les données expérimentales étant déjà disponibles.

5.1 Géométrie de flamme

5.1.a Hauteur de flamme

La hauteur de flamme est sûrement la grandeur la plus simple et la plus souvent rencontrée quand il s'agit de géométrie de flamme [56, 75-77, 142, 143]. Cette partie vise à présenter les résultats obtenus par traitement d'images pour le kérosène et la mousse polyuréthane. Pour les feux de bac, des comparaisons seront aussi faites avec les résultats de perte de masse et les données de la littérature.

5.1.a.i Résultats

L'exploitation des images visibles décrite en Section 4.2.b.ii permet d'obtenir l'évolution de la hauteur de flamme au cours des essais, comme illustré en Figure 5.1 pour les bacs de kérosène de 1 m de côté.

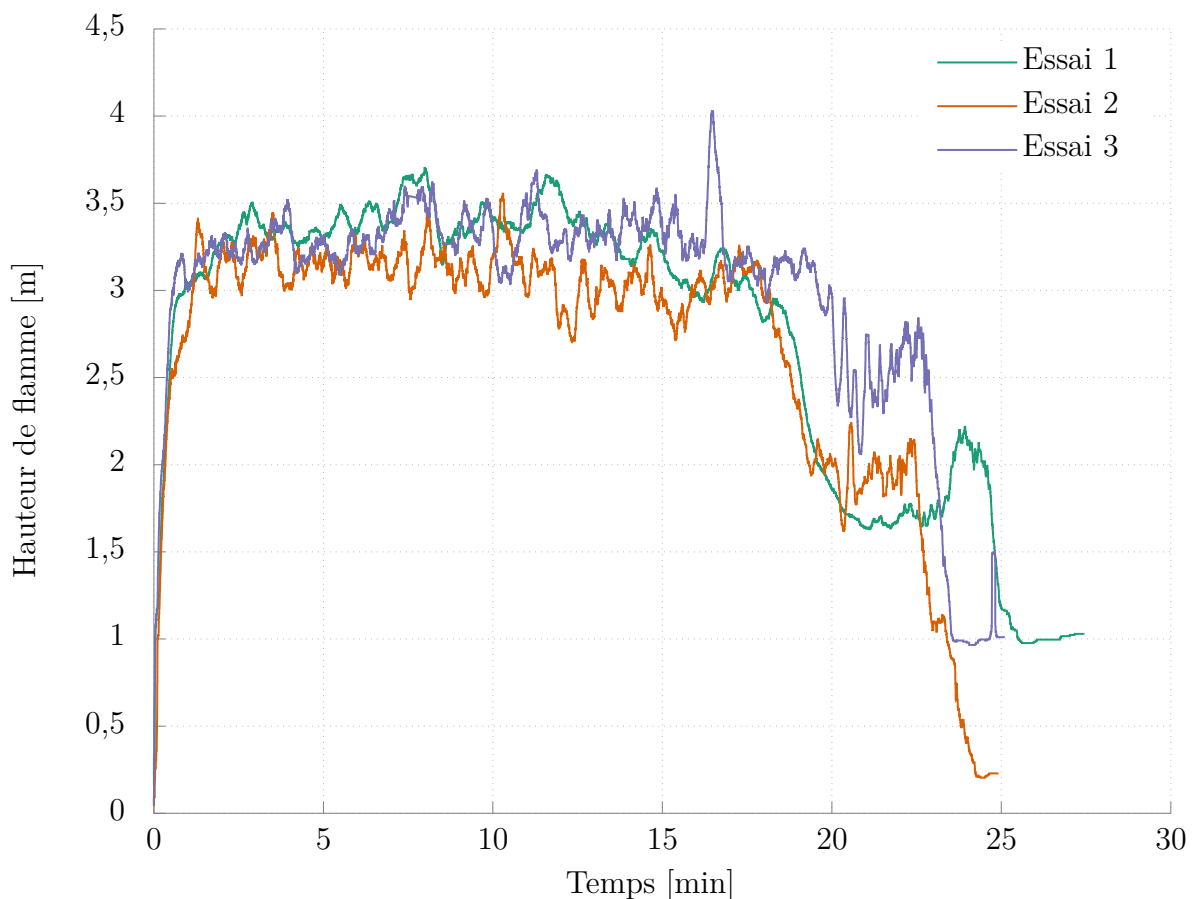


FIGURE 5.1 – Hauteur de flamme pour les bacs de kérosène de 1 m de côté.

Les résultats présentés en Figure 5.1 et dans la suite du manuscrit sont issus d'un seul

angle de vue, c'est-à-dire qu'une seule caméra est exploitée. En effet, les comparaisons des résultats obtenus par une caméra filmant le foyer selon un autre angle ne montrent pas de différence notable (voir p. ex. Figure 5.2). Aussi, seul un résultat de hauteur de flamme sera reporté pour chaque essai.

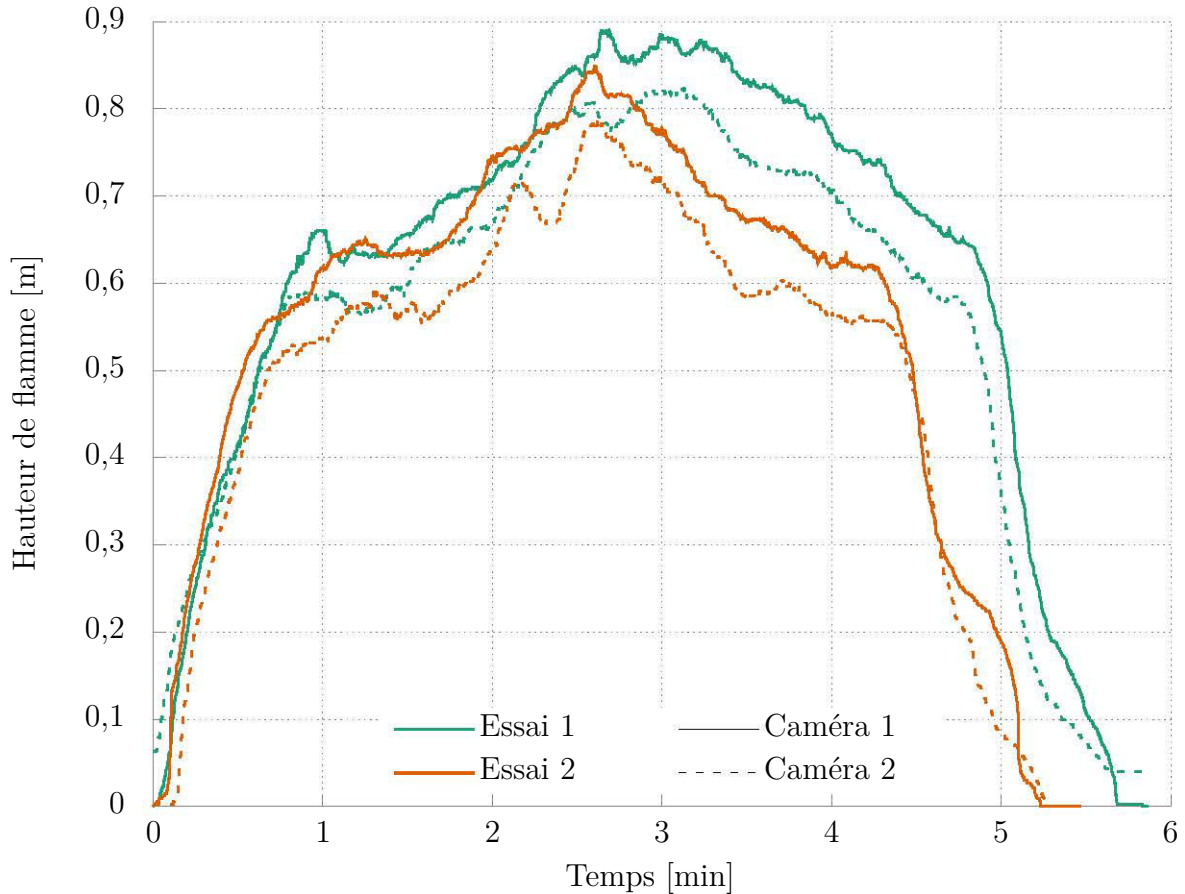


FIGURE 5.2 – Hauteur de flamme selon deux caméras perpendiculaires pour deux essais de kérosène de 0,3 m de côté.

Une fois l'évolution de la hauteur de flamme déterminée pour chaque essai, la valeur médiane sur la phase stationnaire a été extraite. Ici, la phase stationnaire a été déterminée qualitativement, en synchronisant *a posteriori* tous les résultats (perte de masse, hauteur et largeur de flamme, flux thermiques) et en sélectionnant la plage de temps présentant des valeurs quasi-constantes. Une définition alternative et peut-être plus précise pourra être adoptée dans le futur, par exemple en définissant la phase stationnaire comme celle où « la vitesse de perte de masse est la plus constante », et en utilisant cet intervalle de temps pour les autres mesures. Une valeur médiane a été choisie car elle correspond à une probabilité de présence (ou une intermittence) de 50 %, qui est un critère communément admis pour définir la hauteur de flamme [144]. De plus, elle permet d'être moins sensible aux valeurs aberrantes que le traitement d'images pourrait produire, par exemple suite à des difficultés de seuillage sur quelques images.

Les valeurs médianes pour l'ensemble des essais kérosène exploités sont présentées en Figure 5.3 en fonction du diamètre équivalent du bac ($D = \sqrt{4A/\pi}$, avec A l'aire du bac [19]). La tendance observée pour les résultats de chaque site est tracée pour faciliter la visualisation (même équation, seuls les coefficients changent d'une courbe à l'autre).

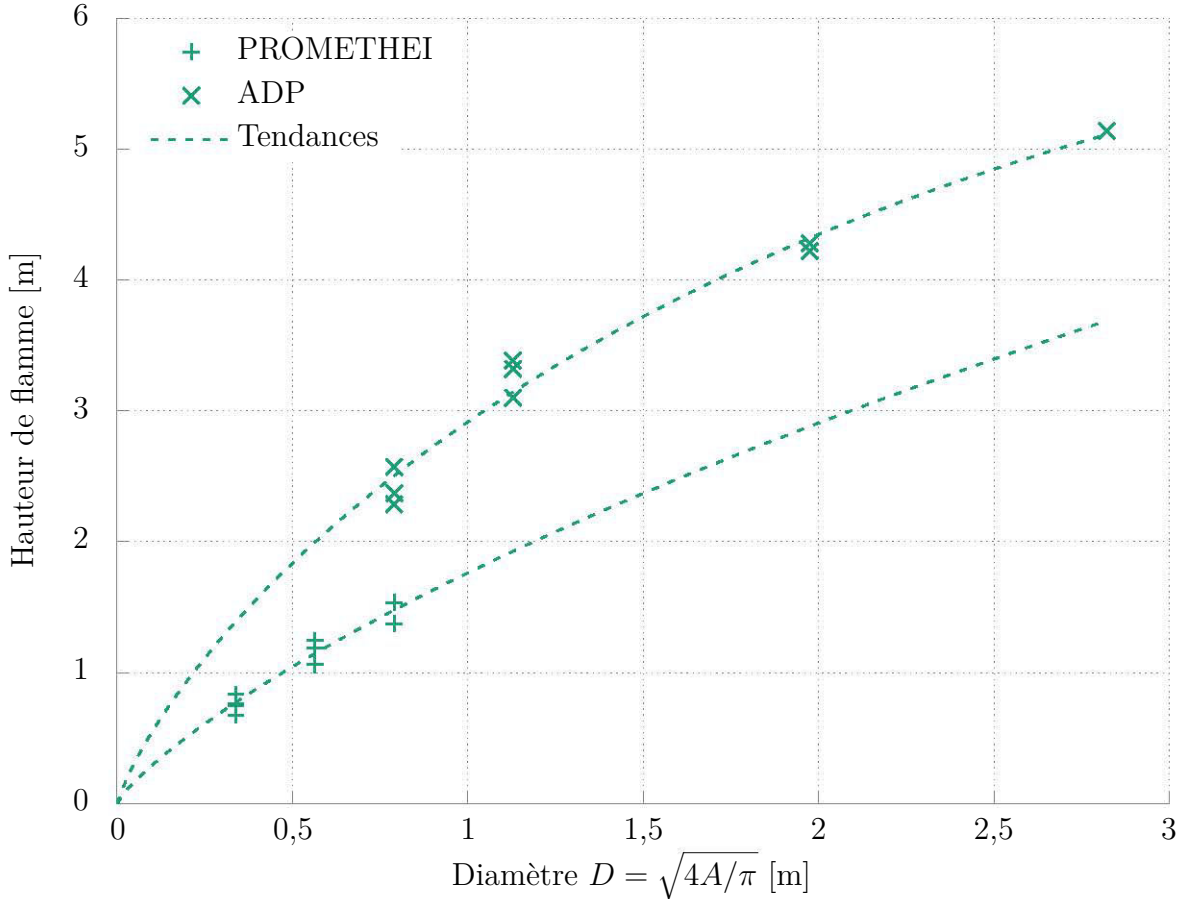


FIGURE 5.3 – Hauteur de flamme en fonction du diamètre du foyer pour le kérosène (essais selon le protocole défini pour chaque site).

D'une manière générale, on peut déjà noter que les résultats pour une taille de foyer et un site donnés sont relativement répétables. La seconde observation, mise en évidence par les courbes, est qu'il existe une différence significative entre les résultats obtenus à PROMETHEI et ADP. Ceci est particulièrement clair pour le diamètre de bac réalisé sur les deux sites expérimentaux (correspondant à 70 cm de côté). Ces différences sont discutées dans la section suivante.

5.1.a.ii Discussion

Afin de déterminer l'origine de la différence entre les résultats à PROMETHEI et ADP, il est intéressant de comparer les tendances observées expérimentalement aux corrélations

de la littérature (voir Section 2.1.a.iii), comme présenté en Figure 5.4.

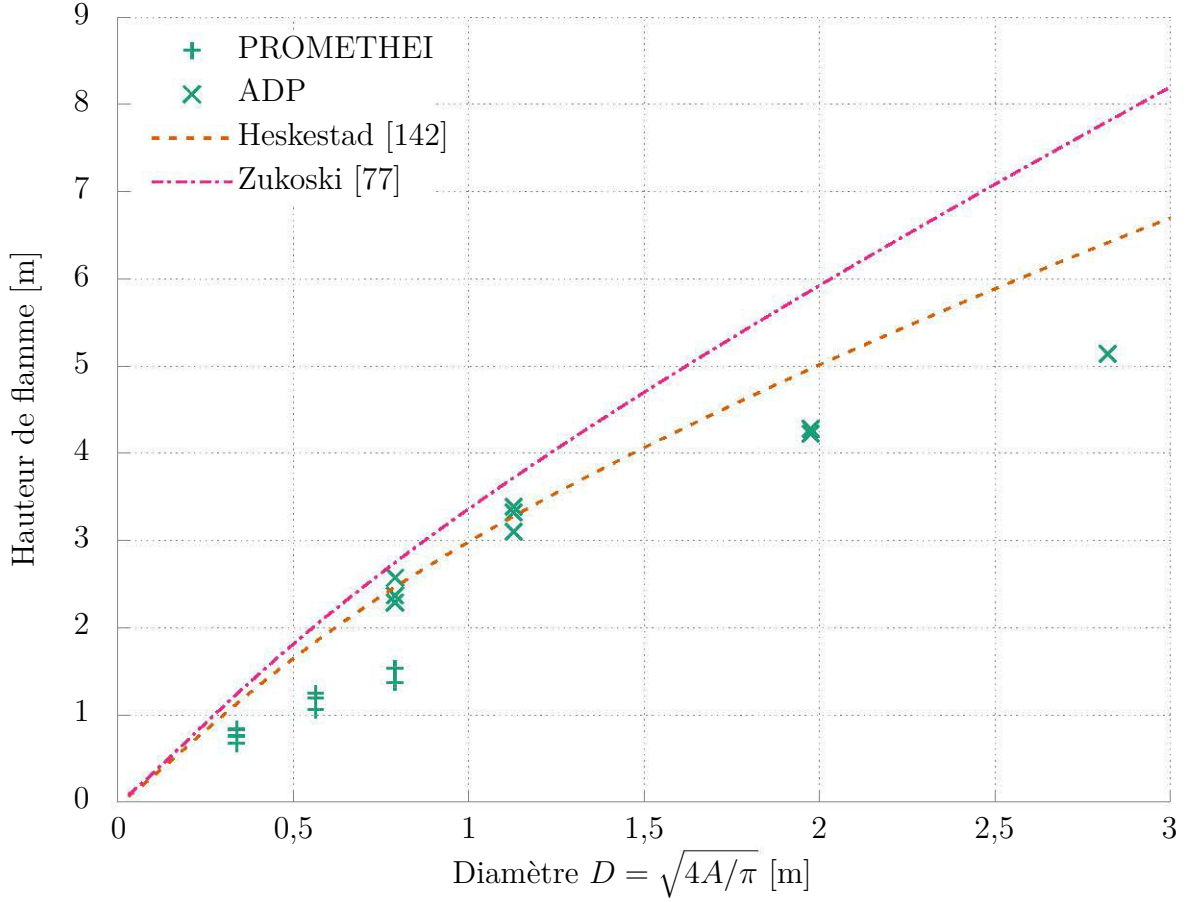


FIGURE 5.4 – Corrélations entre la hauteur de flamme et diamètre du foyer pour le kérosène.

À l'exception des grands foyers, pour lesquels la fumée du panache pourrait masquer le haut de la flamme et entraîner une sous-estimation de la hauteur, on peut voir que les données obtenues à ADP sont en meilleur accord avec les corrélations de la littérature que celles des essais PROMETHEI. On peut alors s'interroger sur la validité des résultats de hauteur de flamme obtenus à PROMETHEI qui, bien que répétables, ne sont pas en accord avec les données ADP ou de la littérature.

Un premier élément de réponse peut être apporté par les résultats de vitesse de perte de masse par unité de surface $\dot{m}''$ (ou MLRPUA, pour *Mass loss rate per unit area*), présentés en Figure 5.5.

En effet, une tendance propre à chaque campagne expérimentale est également observée. Ici aussi, les valeurs pour les essais ADP sont plus proches de celles de la littérature que les résultats à PROMETHEI, et sont en très bon accord avec la corrélation utilisée généralement [19]. La répétabilité des résultats et les mêmes constats sur deux mesures indépendantes (hauteur de flamme et masse) suggèrent que la métrologie et l'exploita-

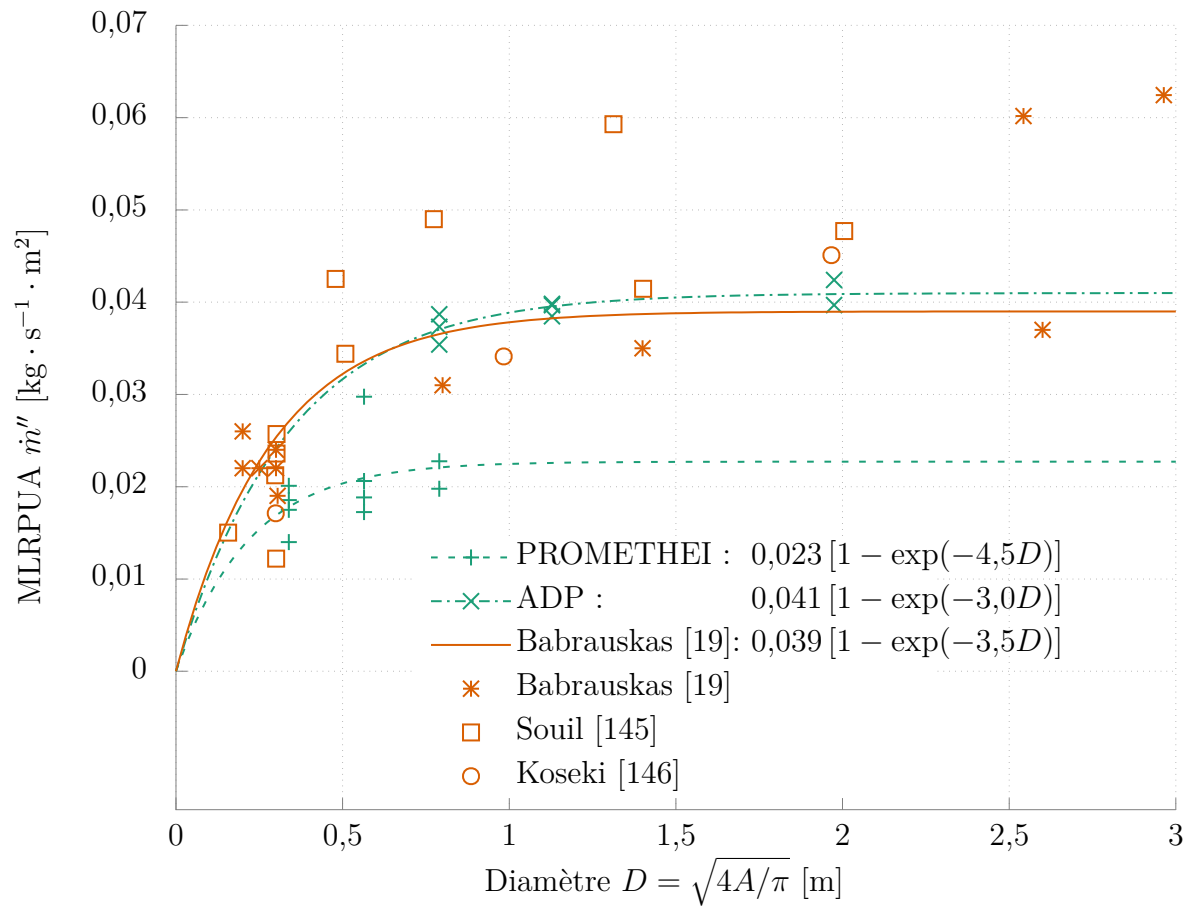


FIGURE 5.5 – Vitesse de perte de masse surfacique en fonction du diamètre du foyer pour le kérosène (essais selon le protocole défini pour chaque site).

tion ont été mis en œuvre correctement, et que ces différences s'expliquent alors par des conditions particulières lors des essais PROMETHEI. Ces dernières causeraient une vitesse de perte de masse plus faible, qui engendrerait une flamme moins haute. Ceci semble confirmé par la Figure 5.6, qui, en exprimant la hauteur de flamme en fonction du MLR, montre que la relation entre ces deux grandeurs est globalement la même pour tous les essais. Pour une taille de foyer donnée, les différences de hauteur de flamme seraient donc dues à des différences de vitesse de perte de masse.

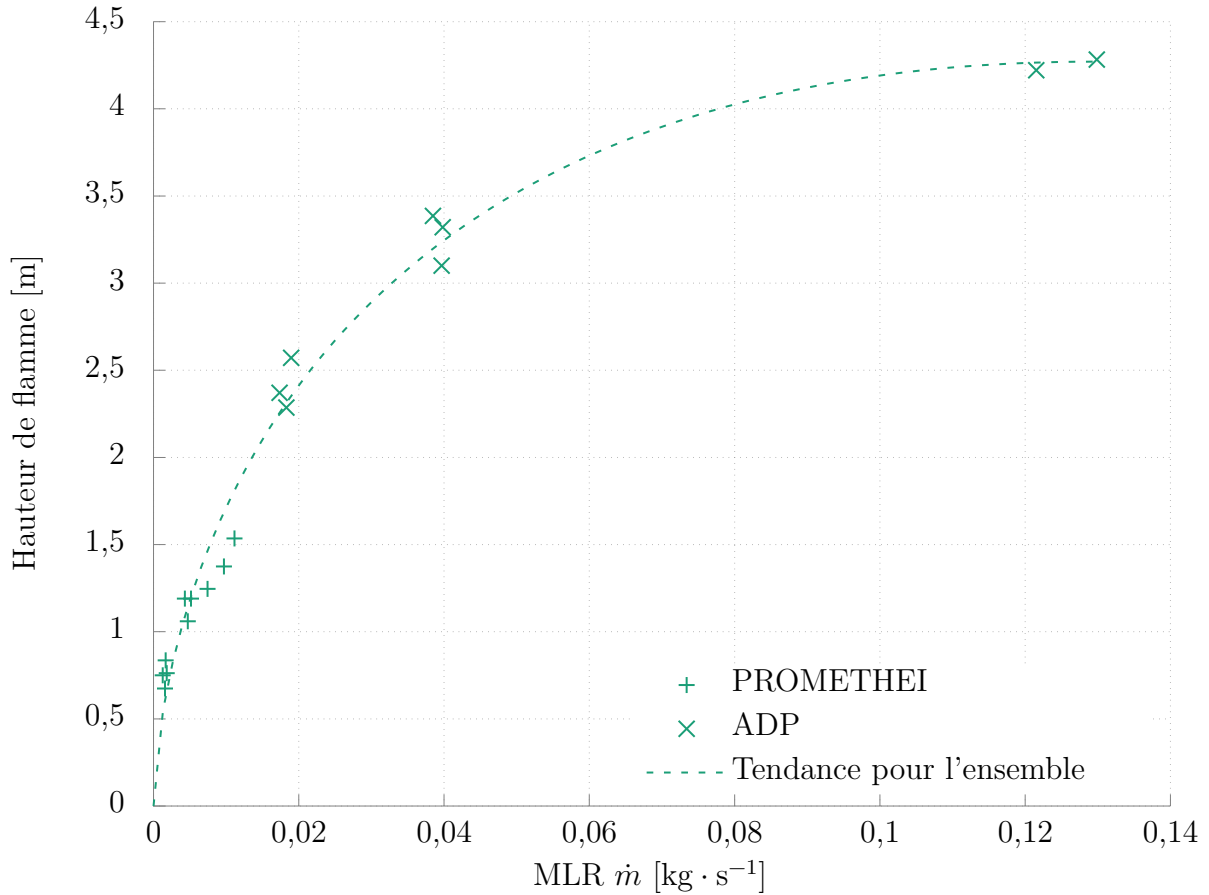


FIGURE 5.6 – Hauteur de flamme en fonction de la vitesse de perte de masse pour le kérosène (essais selon le protocole défini pour chaque site).

Après plusieurs essais complémentaires, il apparaît que le protocole mis en œuvre à PROMETHEI ne permet pas d'atteindre la phase stationnaire. Des détails concernant ces essais sont donnés en Annexe B. Ceci implique que les résultats ne peuvent pas être directement comparés d'une taille de foyer à l'autre (p. ex. Figure 5.3). En revanche, et comme illustré en Figure 5.6, une comparaison en fonction de la vitesse de perte de masse reste possible. De plus, ces différences ne posent pas de problème pour caractériser le rayonnement de la flamme. En effet, l'ensemble des résultats reste parfaitement comparable pour un essai donné, puisque soumis aux mêmes conditions expérimentales, et il permet bien de déterminer les propriétés radiatives de la flamme, comme présenté en

Section 5.2.

Avant de décrire d'autres propriétés des flammes, il est intéressant d'illustrer les résultats de hauteur de flamme pour la mousse polyuréthane. Ici encore, la démarche présentée en Section 4.2.b.ii est utilisée pour obtenir l'évolution de la hauteur de flamme au cours de chaque essai, comme illustré en Figure 5.7.

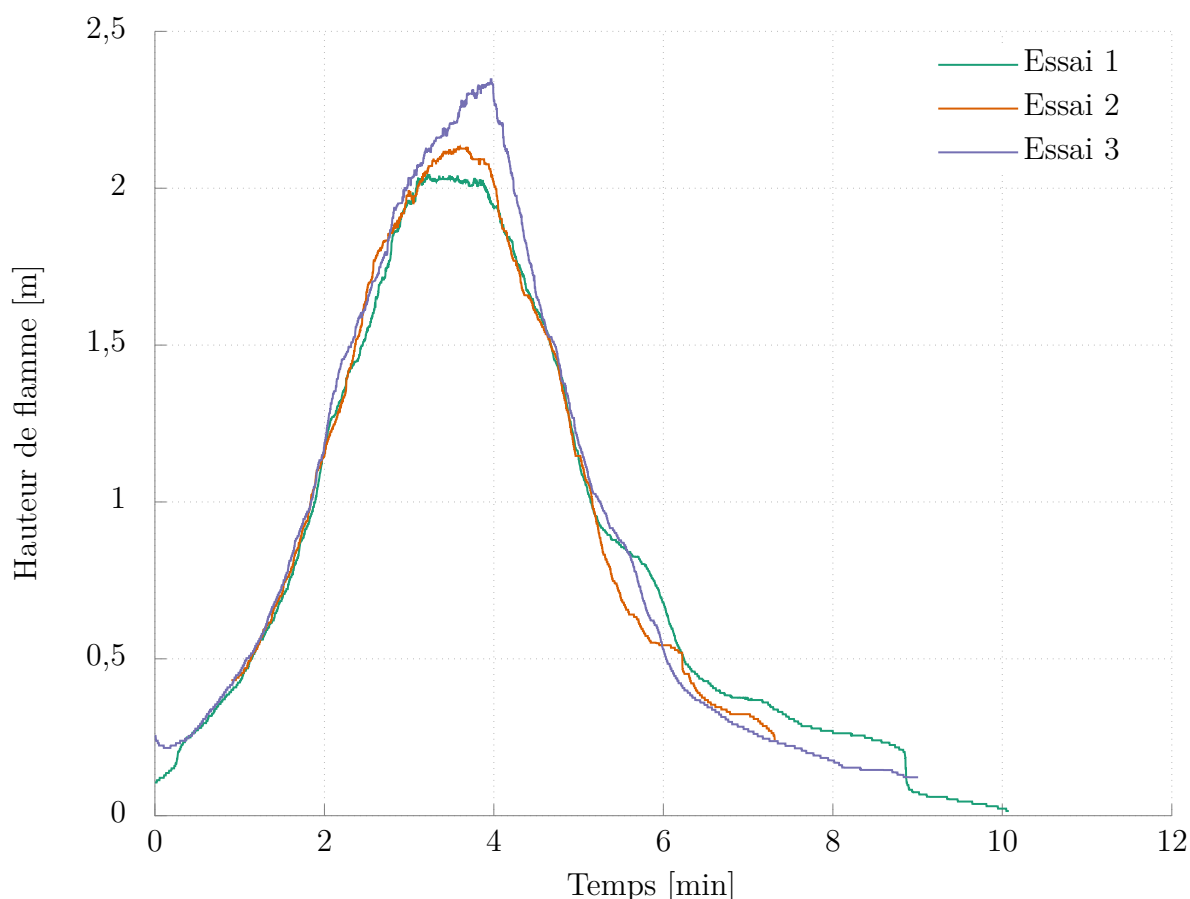


FIGURE 5.7 – Hauteur de flamme pour les blocs de mousse polyuréthane de 1 m de côté.

On peut remarquer qu'il n'y a pas de phase stationnaire à proprement parler pour la mousse PU, ou du moins concernant la hauteur de flamme. Pour ce combustible, les médianes ont été calculées sur la partie centrale de l'essai, autour du maximum. Les valeurs médianes de hauteur de flamme sont données en Figure 5.8 pour les différentes tailles de bloc de mousse. Les seules données trouvées dans la littérature [126] sont en accord avec les résultats pour les blocs de 30 cm, et ne couvrent pas les autres tailles de foyer. À noter que pour certains essais le haut des flammes sortaient du cadre de la caméra habituellement exploitée : une autre caméra a donc été utilisée, suivant le même méthode de post-traitement. Malheureusement, pour les plus grands blocs de mousse (6 m^2), aucune caméra n'a permis de capter correctement le haut de la flamme, et sa hauteur est donc peut-être sous-estimée pour certaines répétitions, comme indiqué sur les figures suivantes

(voir flèches ↑).

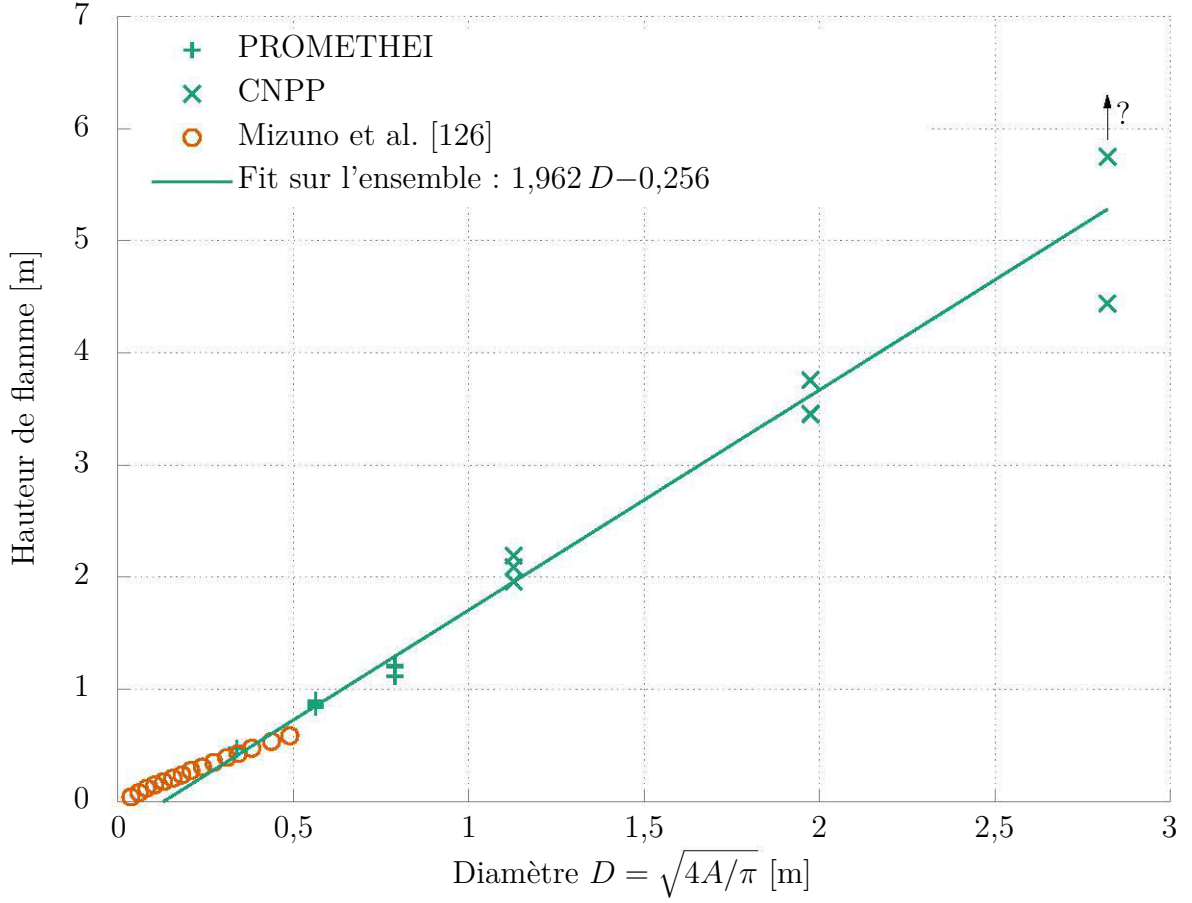


FIGURE 5.8 – Hauteur de flamme en fonction du diamètre des blocs pour la mousse polyuréthane. Les hauteurs pour le plus grand diamètre sont sûrement sous-estimées (flammes en dehors du cadre de la caméra).

Les résultats pour la mousse polyuréthane diffèrent de ceux présentés plus tôt pour le kérosène (Figure 5.3). En effet, on ne constate pas de discontinuité entre les essais à petite (PROMETHEI) et grande (CNPP) échelle. La tendance observée semble être une augmentation linéaire de la hauteur de flamme avec le diamètre du foyer (voir tendance sur la Figure 5.8). Pour rappel, la hauteur de flamme n'est pas celle d'une phase stationnaire comme pour les feux de bacs, mais plutôt celle mesurée autour du maximum, lorsque le bloc est entièrement enflammé, au plus fort de l'essai.

5.1.b Forme de flamme simplifiée

Pour modéliser le rayonnement de la flamme, il est nécessaire de décrire sa géométrie. Une approche simple consiste à considérer une forme conique ou cylindrique, dont la hauteur est celle déterminée à la section précédente, et le diamètre celui du foyer. Il est

aussi possible de se baser sur les contours de flamme déterminés par traitement d'images (voir Section 4.2.a.ii) afin de déterminer la forme simple qui les décrit le mieux. C'est ce travail qui est décrit ici.

5.1.b.i Résultats

Quatre formes ont été choisies, en s'inspirant de celles couramment utilisées [50, 79-83] : un cylindre, un cône, un cylindre surmonté d'un cône et un cône tronqué surmonté d'un cylindre (voir Figure 5.9). Une plus grande précision aurait été possible (p. ex. utilisation d'images provenant de plusieurs angles de vue, prise en compte des volutes dues à la turbulence...), mais le gain en termes de modélisation n'a pas été jugé suffisant pour justifier la complexité métrologique qui aurait été induite. De plus, les travaux présentés ici sont souvent basés sur des grandeurs moyennes, et la forme de flamme s'approche alors des formes géométriques décrites ci-après.

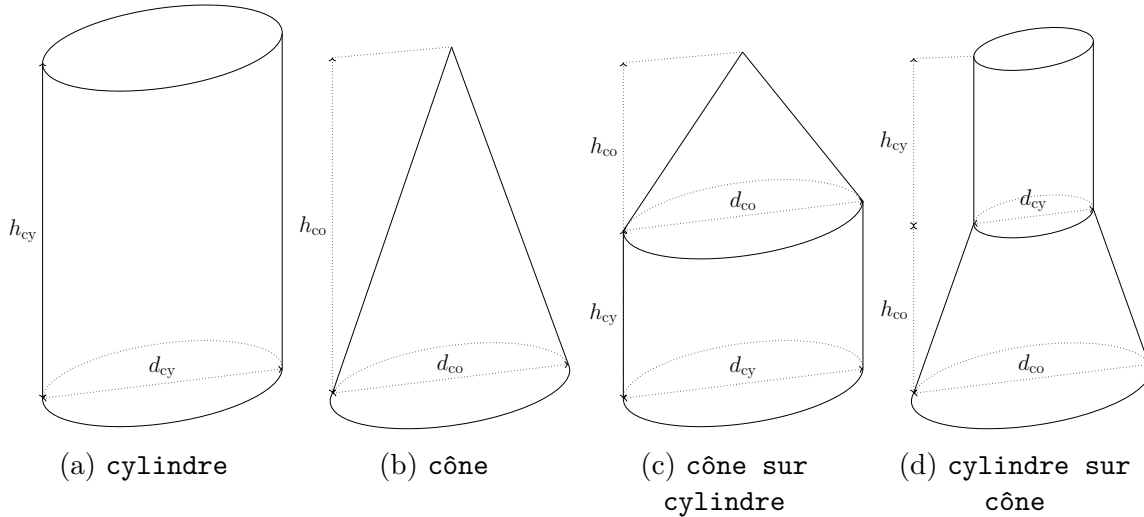


FIGURE 5.9 – Ensemble des formes de flamme simplifiées évaluées dans le cadre de ce travail, avec leurs paramètres.

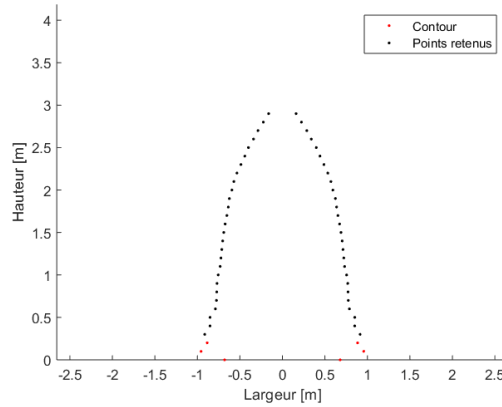
Afin de choisir la géométrie la plus appropriée, le profil de flamme expérimental a été ajusté avec chacune des quatre formes par la méthode des moindres carrés, c'est-à-dire en cherchant les valeurs des paramètres pour chaque forme (voir Figure 5.9) qui permettent de minimiser

$$\sum_{i=1}^N (x_{\text{fit},i} - x_{\text{exp},i})^2. \quad (5.1)$$

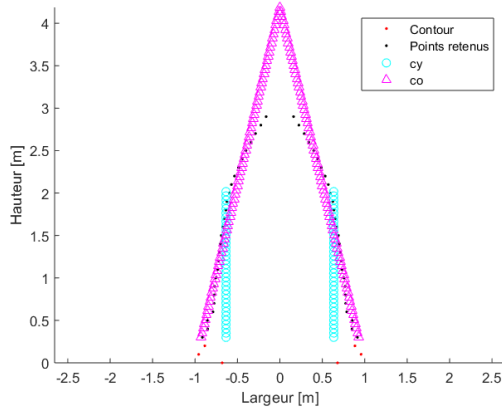
Ici, x_i est la largeur de flamme à la i -ème altitude, et N est le nombre d'altitudes auxquelles ont été évaluées les largeurs. Le profil de flamme expérimental correspond donc aux points $x_{\text{exp},i}$, tandis que la forme simplifiée est décrite par les points $x_{\text{fit},i}$. La recherche du minimum a été faite à l'aide de la fonction Matlab `fminsearch`.

Les résultats sont illustrés en Figure 5.10 pour un bac de kérosène de 1 m^2 . À noter que, bien que les ajustements soient faits sur le profil de flamme, les figures feront apparaître

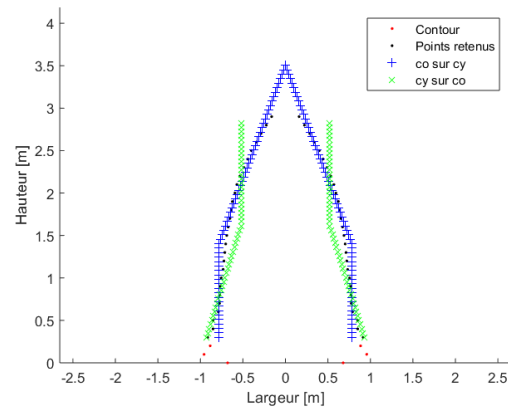
un contour de flamme, jugé plus parlant pour traiter de géométrie de flamme. Ce contour est obtenu en prenant le profil (ou les ajustements) et son symétrique par rapport à l'axe de la flamme. Tout comme pour la hauteur de flamme, seules les images provenant d'une caméra sont exploitées ici pour extraire le profil. Les données obtenues à l'aide des caméras supplémentaires pourront être utilisées ultérieurement, par exemple pour évaluer l'hypothèse (faite ici) que la flamme est axisymétrique.



(a) Contour de flamme
(profil et son symétrique)



(b) cylindre et
cône



(c) cône sur cylindre et cylindre sur
cône

FIGURE 5.10 – Exemple de contour de flamme (kérosène 1 m^2) et de l'ajustement des formes simples.

Comme illustré sur la Figure 5.10a (points rouges), la base du contour n'est pas prise en compte dans l'ajustement des géométries simplifiées, car elle est parasitée par la présence du bac pour les feux de liquide (p. ex. kérosène) ou le combustible solide lui-même (p. ex. mousse polyuréthane). Ainsi, les points en-dessous de 10 % de la hauteur du contour ont été écartés pour les feux de bac. Pour les solides, le seuil a été fixé à 20 % car la propagation

de la flamme sur le combustible est de plus en plus visible sur le contour au fur et à mesure que l'essai avance.

Les ajustements (Figures 5.10b et 5.10c) ont été évalués à l'aide de (la racine carrée de) l'écart quadratique moyen, ou RMSE (*Root mean square error*), défini comme

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{\text{fit},i} - x_{\text{exp},i})^2}{N}}. \quad (5.2)$$

Les valeurs de cet indicateur sont données pour chaque forme en Figure 5.11 pour le kérosène (un essai représentatif par taille de bac).

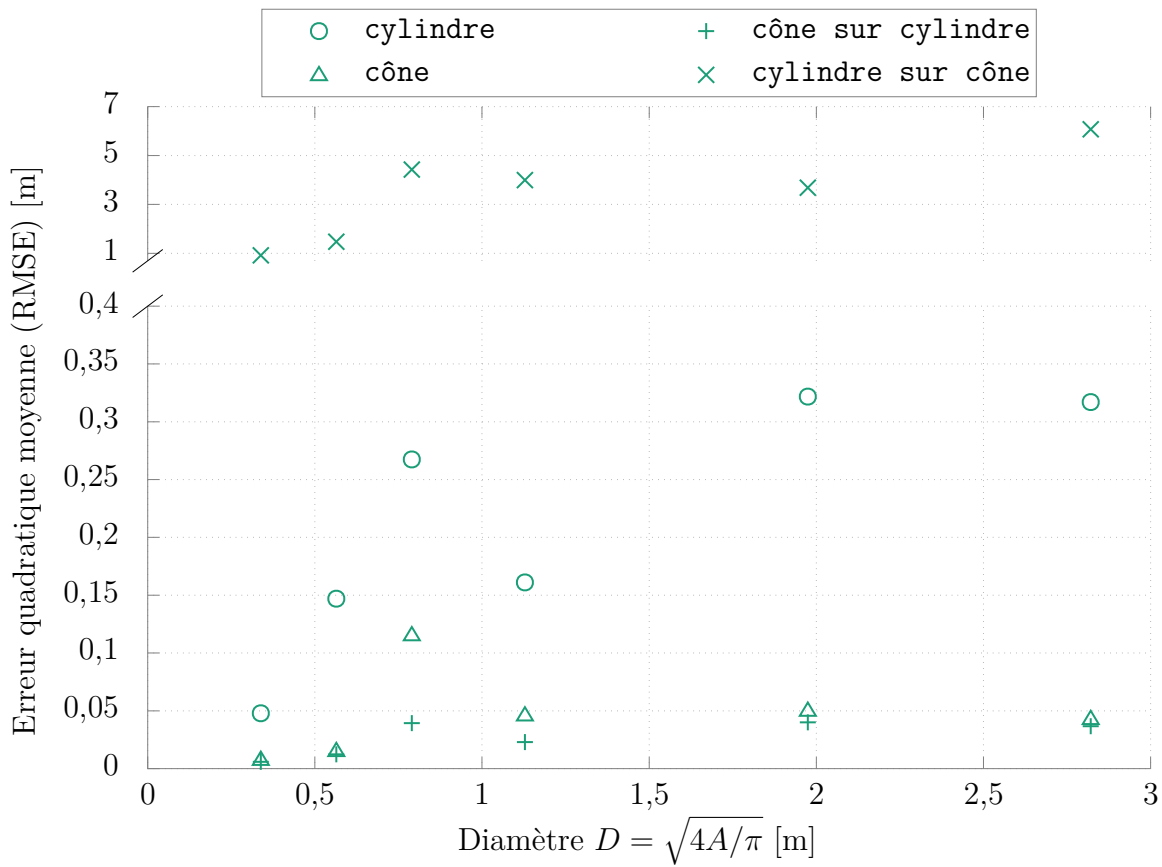


FIGURE 5.11 – Erreur quadratique moyenne de chaque forme simplifiée en fonction du diamètre du foyer pour le kérosène (sélection d'essais). Les deux parties de l'axe des ordonnées ne sont pas à la même échelle afin de mieux visualiser tous les points.

On peut remarquer que la forme **cylindre sur cône** est celle qui représente le moins bien le profil de flamme expérimental, et ce quelle que soit la taille du bac. Le **cylindre** semble bien décrire les petites flammes (30 cm de large), mais l'ajustement est moins bon pour les grands diamètres. Le **cône** et le **cône sur cylindre** présentent les meilleurs

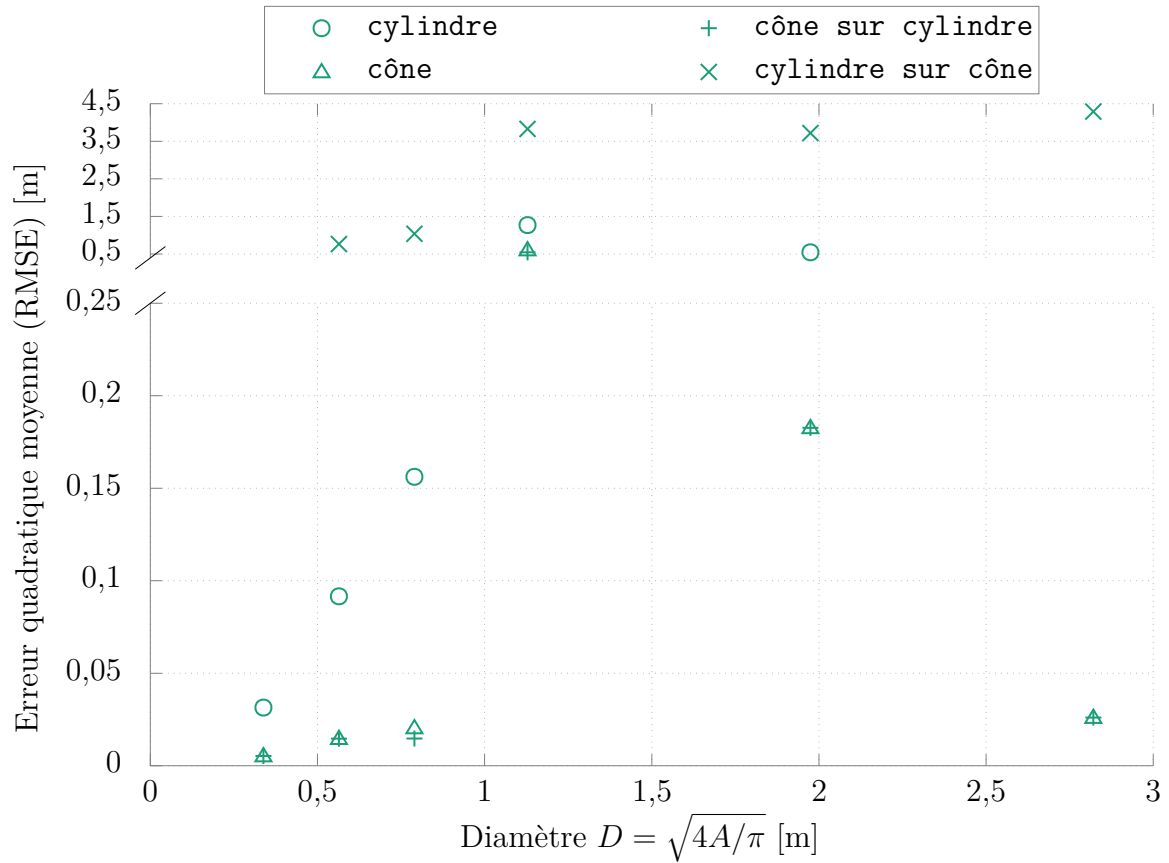


FIGURE 5.12 – Erreur quadratique moyenne de chaque forme simplifiée en fonction du diamètre des blocs pour la mousse polyuréthane (sélection d’essais). Les deux parties de l’axe des ordonnées ne sont pas à la même échelle afin de mieux visualiser tous les points.

scores, qui sont, de manière générale, comparables. Ces tendances sont aussi observées pour la mousse polyuréthane, comme présenté en Figure 5.12.

Ici aussi, les formes **cylindre sur cône** et **cylindre** présentent les RMSE les plus élevées, quel que soit le diamètre, et les formes **cône** ou un **cône sur cylindre** ont les meilleurs scores.

5.1.b.ii Discussion

Sélection des formes L'analyse des Figures 5.11 ou 5.12 pour déterminer la forme simple la plus proche du profil de flamme expérimental fait ressortir deux possibilités pour les essais analysés, à savoir le **cône** et le **cône sur cylindre**. La proximité des scores pour ces géométries pourrait être due à une partie cylindrique négligeable pour les formes **cône sur cylindre**, c'est-à-dire une petite hauteur h_{cy} , ce qui reviendrait à comparer deux formes quasi-coniques de hauteur h_{co} . Pour vérifier ceci, ces différentes hauteurs sont tracées pour le kérosène et la mousse polyuréthane sur les Figures 5.13 et 5.14 respectivement, et ce pour chaque taille de foyer.

Pour le kérosène (Figure 5.13), toutes les formes **cône sur cylindre** présentent en fait une partie cylindrique non négligeable, et la proximité des scores des formes **cône** et **cône sur cylindre** (Figure 5.11) s'expliquerait donc simplement par le fait que les profils de flamme expérimentaux peuvent être ajustés avec l'une ou l'autre de ces formes. On remarquera cependant que le **cône sur cylindre** donne des hauteurs totales qui sont plus proches de la hauteur de flamme calculée précédemment (Section 5.1.a.i), prise ici comme référence. C'est donc cette géométrie qui sera retenue pour le kérosène, car elle permet une description plus précise de la flamme sans être beaucoup plus compliquée à utiliser qu'un cône simple.

Pour la mousse polyuréthane en revanche (Figure 5.14), le **cône sur cylindre** se rapproche davantage d'un **cône**, avec une hauteur de la partie cylindrique h_{cy} plus souvent négligeable (blocs de côté 30 ; 50 et 250 cm). De plus, la hauteur totale de la forme simplifiée **cône sur cylindre** n'est pas systématiquement meilleure que celle du **cône** comme c'était le cas pour le kérosène. Un **cône** suffit donc pour décrire correctement la géométrie des flammes de mousse polyuréthane présentées ici.

Ce dernier résultat va à l'encontre de ce qui était attendu, car, lors des essais sur les blocs de mousse, les flammes semblaient correspondre à la géométrie **cylindre sur cône** comme on peut distinguer par exemple sur le premier et troisième cliché de la Figure 5.15. La forme **cylindre sur cône** avait d'ailleurs été proposée à partir de ces observations. Toutefois, comme montré par les valeurs de RMSE (Figure 5.12) et l'analyse des formes **cône** et **cône sur cylindre** (Figure 5.14), la meilleure forme simplifiée est finalement un cône. Cette différence avec les observations s'explique probablement par le fait que l'impression lors des essais a pu être faussée par la zone du bloc en feu (« cuvette »), qui peut paraître conique mais ne fait pas partie de la flamme, et/ou par la pulsation de la flamme. Ces deux phénomènes ont été éliminés lors du traitement d'images, en coupant le bas des profils de flamme et en considérant des valeurs médianes pour ajuster les formes

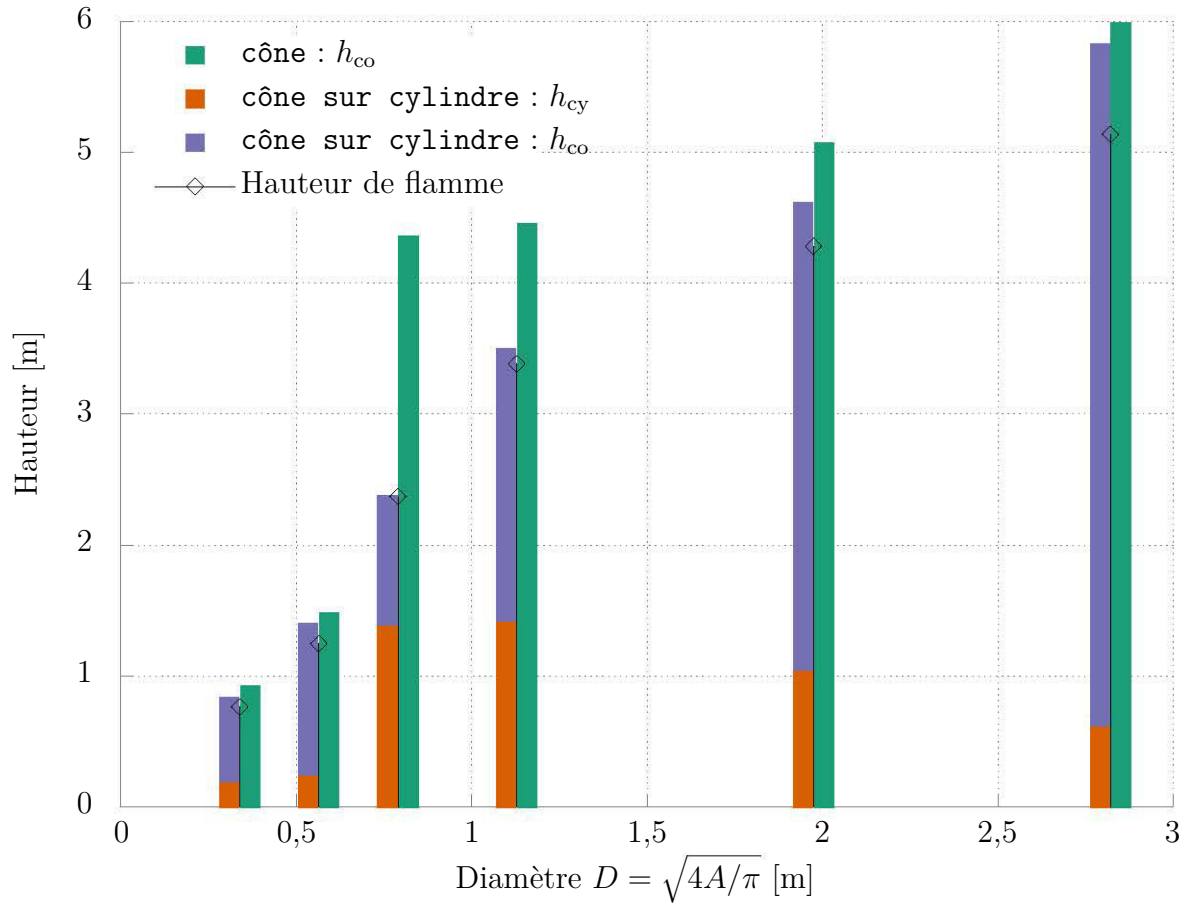


FIGURE 5.13 – Hauteurs des formes de flamme simplifiées **cône** et **cône sur cylindre** en fonction du diamètre du foyer pour le kérosène. La hauteur de flamme calculée en Section 5.1.a.i est rappelée pour comparaison.

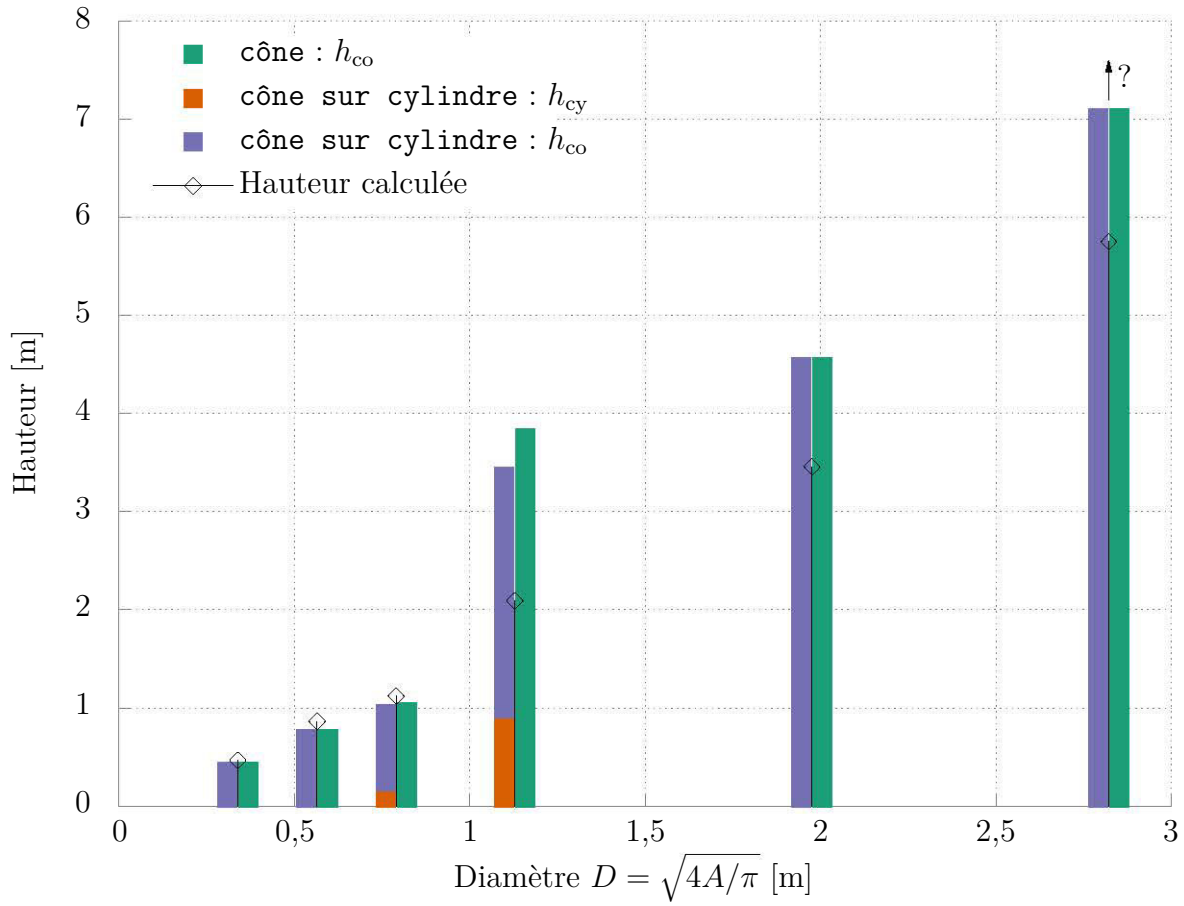


FIGURE 5.14 – Hauteurs des formes de flamme simplifiées cône et cône sur cylindre en fonction du diamètre des blocs pour la mousse polyuréthane. La hauteur de flamme déterminée en Section 5.1.a.i est rappelée pour comparaison. Les hauteurs pour le plus grand diamètre sont probablement sous-estimées (flammes en dehors du cadre de la caméra).



FIGURE 5.15 – Aperçu d’un essai mousse polyuréthane de 3 m² sur le site du CNPP.

simplifiées, ce qui pourrait expliquer les différences entre observations expérimentales et résultats du post-traitement.

Évolution des formes avec la taille du foyer Maintenant que les formes décrivant le mieux les flammes de kérosène et de mousse polyuréthane ont été déterminées, il serait intéressant de décrire l’évolution de celles-ci avec la taille du foyer, dans une optique de montée en échelle. Les valeurs des paramètres de ces formes sont données en Figures 5.16 et 5.17.

Pour le kérosène (Figure 5.16), on constate que le diamètre de la forme simplifiée d_{cy} est proche de celui du bac, tout en étant presque toujours supérieur. Concernant les hauteurs, celle du cône h_{co} augmente avec la taille du foyer, tout comme la hauteur totale (voir Figure 5.14). Aucune tendance claire n’est visible pour la hauteur du cylindre h_{cy} . L’essai exploité pour les bacs de 70 cm de côté ($D \approx 79$ cm) semble présenter une flamme particulière, qui s’éloigne plus que les autres de la forme conique : la part du cylindre dans la géométrie **cône sur cylindre** est plus importante (Figure 5.17) et un cône simple la reproduit moins bien (voir RMSE en Figure 5.12 et hauteur prédite en Figure 5.14).

Concernant la mousse polyuréthane (Figure 5.17), on constate que le diamètre et la hauteur du cône augmentent bien avec la taille du foyer. Le diamètre de la flamme est très proche de celui du bloc de mousse pour les essais jusqu’à 1 m². Cette observation n’est pas aussi triviale que pour le kérosène, car ici il y a propagation à la surface du combustible solide, et l’axe des abscisses ne représente donc pas forcément la taille du feu au moment où la mesure est faite, mais plutôt la taille maximale du foyer. Néanmoins, la phase sur laquelle ont été extraits les résultats expérimentaux correspond au maximum de MLR, qui intervient lorsqu’une grande part du bloc de mousse est enflammée, et donc le diamètre en feu est proche du diamètre du bloc.

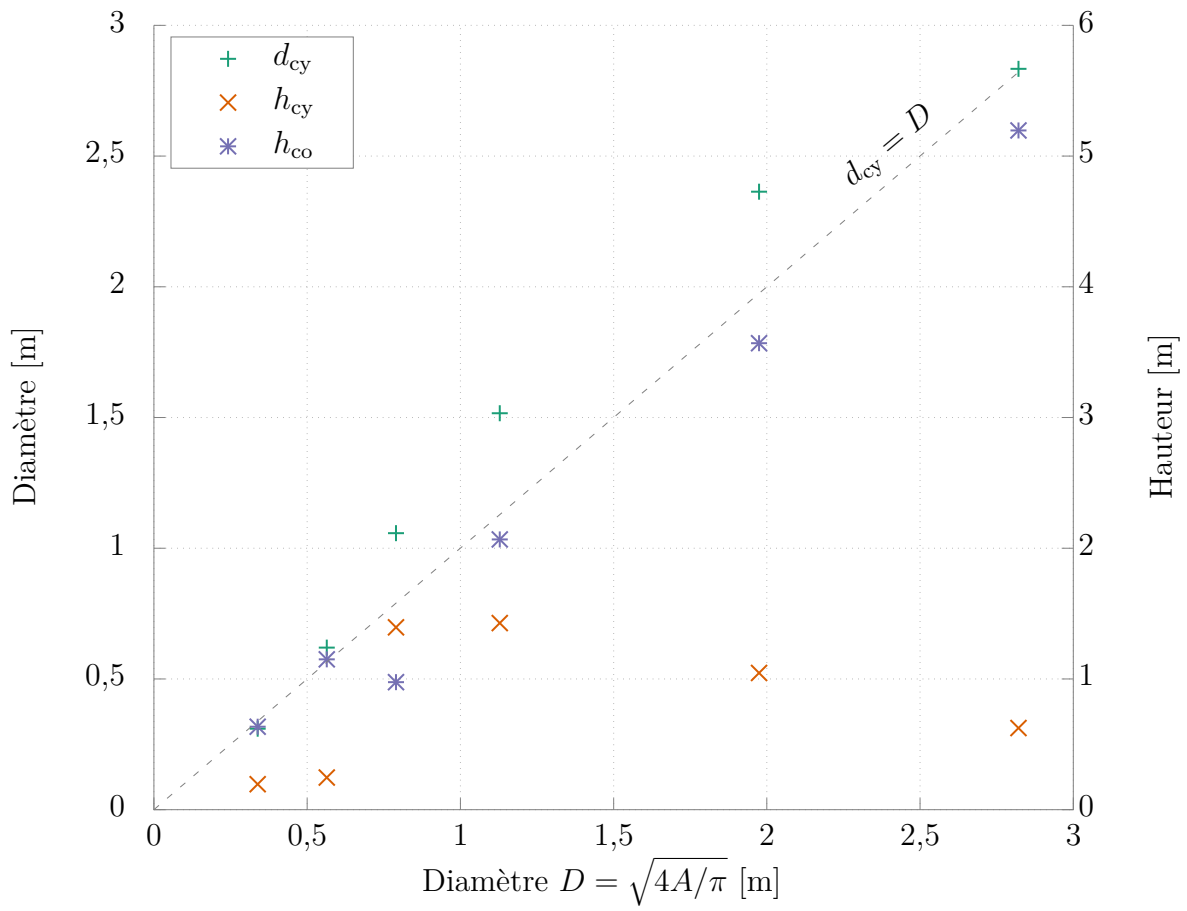


FIGURE 5.16 – Valeurs des paramètres de la forme cône sur cylindre pour les foyers de kérosène.

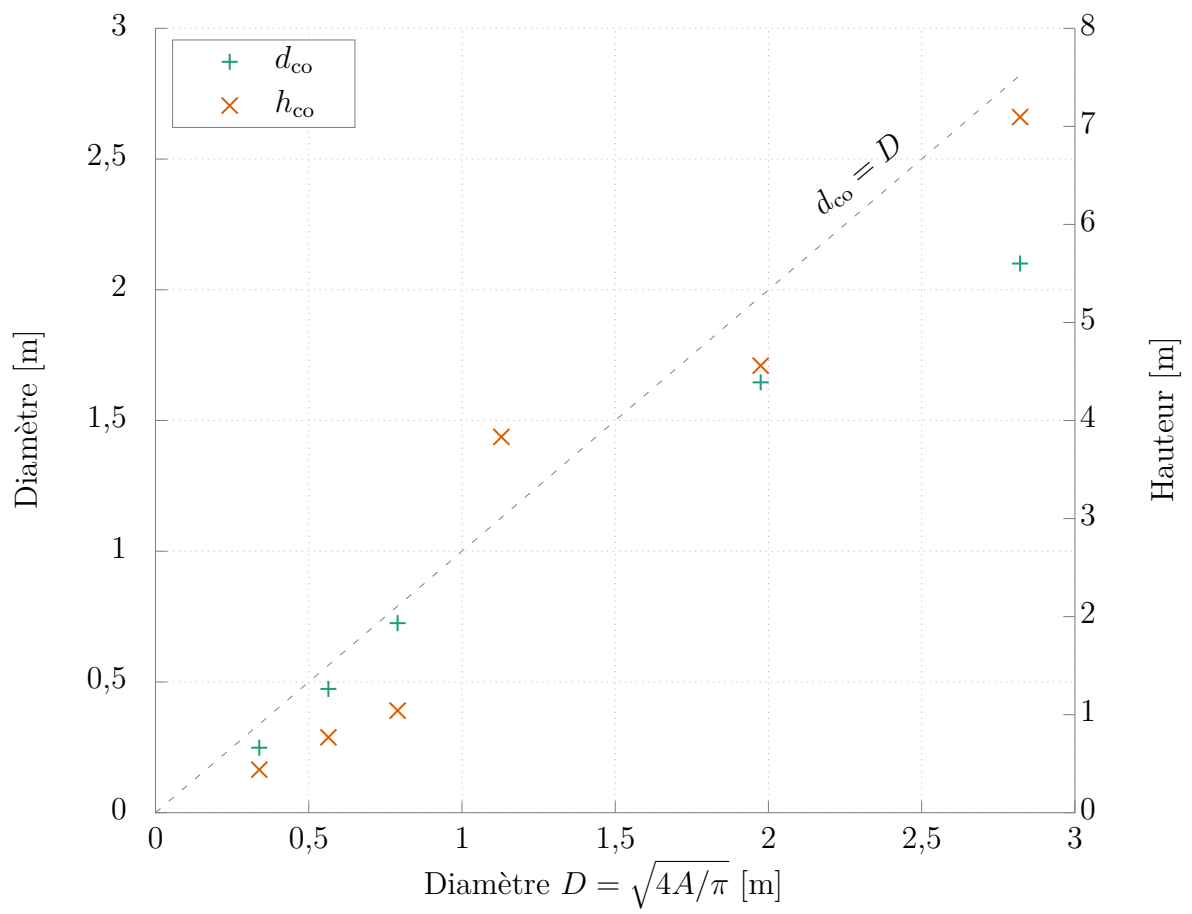


FIGURE 5.17 – Valeurs des paramètres de la forme cône pour les foyers de mousse polyuréthane.

5.2 Propriétés radiatives

Maintenant que la géométrie de la flamme a été décrite, il est nécessaire de caractériser son émission. Comme décrit en Section 4.2.b.ii (les équations seront rappelées pour plus de clarté), les mesures d’opacimétrie et de spectrométrie ont été utilisées pour déterminer les caractéristiques d’un milieu homogène isotherme non diffusant qui émettrait comme les suies de la flamme étudiée. En résumé, ceci revient à déterminer le coefficient d’absorption et la température de ce milieu équivalent, comme décrit ci-après pour le kérosène. Ces passages sont adaptés de [67, 140]. Le même travail a été mené pour la mousse polyuréthane et sera exploité en Section 6.1.a lorsque ces données expérimentales seront utilisées pour prédire les densités de flux reçues à différentes positions.

5.2.a Coefficient d’absorption

5.2.a.i Transmittance

Un exemple de transmittances $\mathcal{T}(\lambda_i, t)$, mesurées grâce au dispositif d’opacimétrie, est donné en Figure 5.18 pour un foyer de kérosène de 70 cm de côté.

La présence de la flamme est clairement marquée par la diminution des valeurs, en particulier pour les courtes longueurs d’onde. Ces mesures présentent la phase stationnaire qui peut être observée pour le MLR de la plupart des essais, avec des niveaux quasi-constants. Les différences d’atténuation d’une longueur d’onde à l’autre sont aussi bien visibles, signes d’une transmission non grise.

5.2.a.ii Épaisseur optique

Les épaisseurs optiques τ sont obtenues directement via

$$\tau(\lambda_i) = -\ln(\mathcal{T}(\lambda_i)). \quad (\text{c.f. 4.2})$$

Un exemple de résultat est fourni en Figure 5.19 pour différentes tailles de foyer kérosène.

Les axes log-log de la Figure 5.19 font apparaître des représentations linéaires de $\tau(\lambda)$, ce qui est en accord avec les lois de puissance de la forme λ^α présentées en Section 4.2.b.ii.

5.2.a.iii Coefficients d’extinction et d’absorption

Chaque valeur d’épaisseur optique τ permet à son tour de calculer un coefficient d’extinction β , selon

$$\beta(\sigma_i) = \frac{\tau(\sigma_i)}{e}. \quad (\text{c.f. 4.3})$$

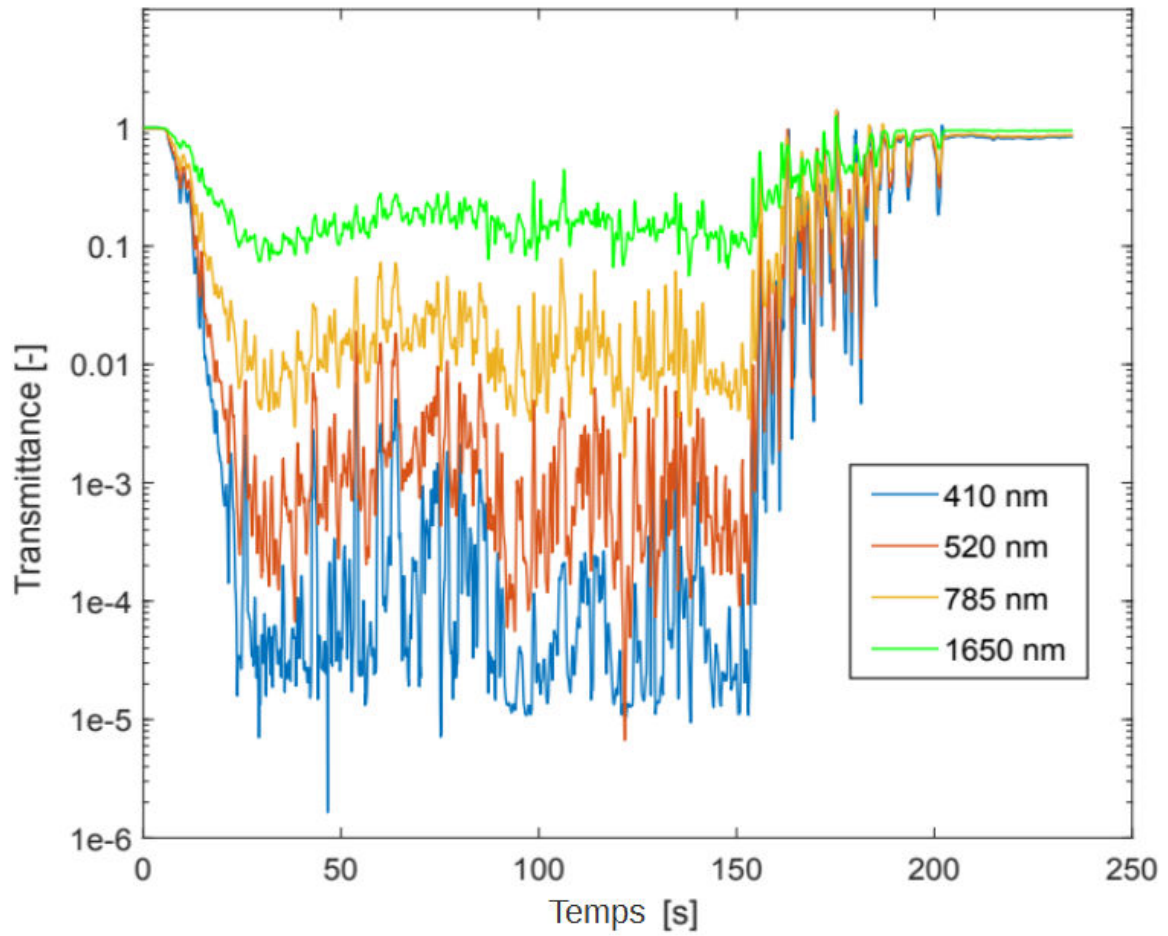


FIGURE 5.18 – Transmittances (échelle log) pour un foyer de kérosène de 70 cm de côté (quatre longueurs d’onde visible–proche infrarouge).

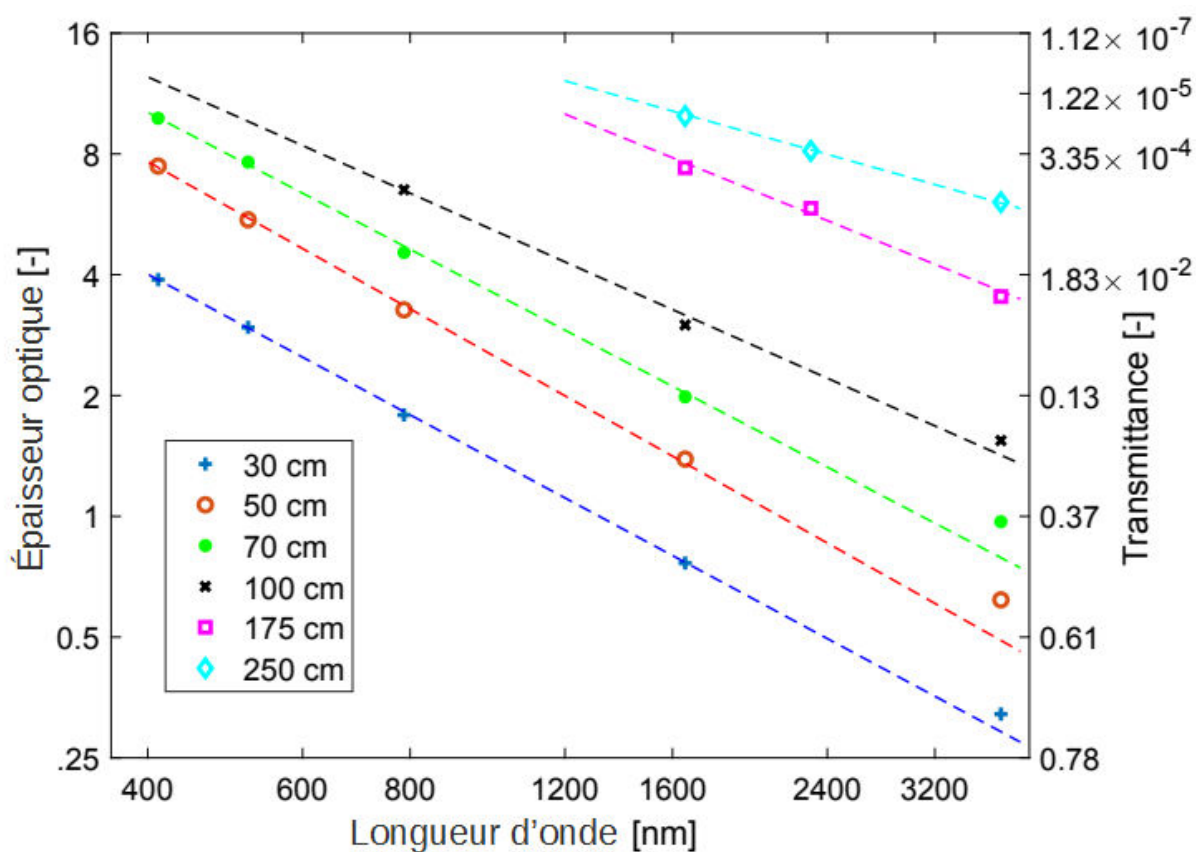


FIGURE 5.19 – Épaisseurs optiques moyennes en fonction de la longueur d'onde pour les foyers de kérosène (voir largeurs des bacs en légende). Échelle log-log en base 2.

Ici, l'épaisseur physique du milieu e a été considérée égale à la largeur du bac ℓ car les mesures étaient faites à la base des flammes. À l'avenir, cette largeur pourra par exemple être déduite du traitement d'images (Section 4.2.a.ii). La dépendance spectrale du coefficient d'extinction $\beta(\sigma)$, et donc du coefficient d'absorption $\kappa^a(\sigma)$ (diffusion négligée) peut maintenant être obtenue, avec

$$\kappa^a(\sigma) = \beta(\sigma) = \beta_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^\alpha. \quad (\text{c.f. 4.6})$$

Pour le kérosène, le nombre d'onde de référence σ_0 a été fixé à 4000 cm^{-1} (c.-à-d. $\lambda_0 = 2,5 \mu\text{m}$, le milieu de la gamme spectrale étudiée). Les valeurs obtenues ainsi pour β_0 et α sont données en Figure 5.20 (moyennes temporelles et déviations standards associées).

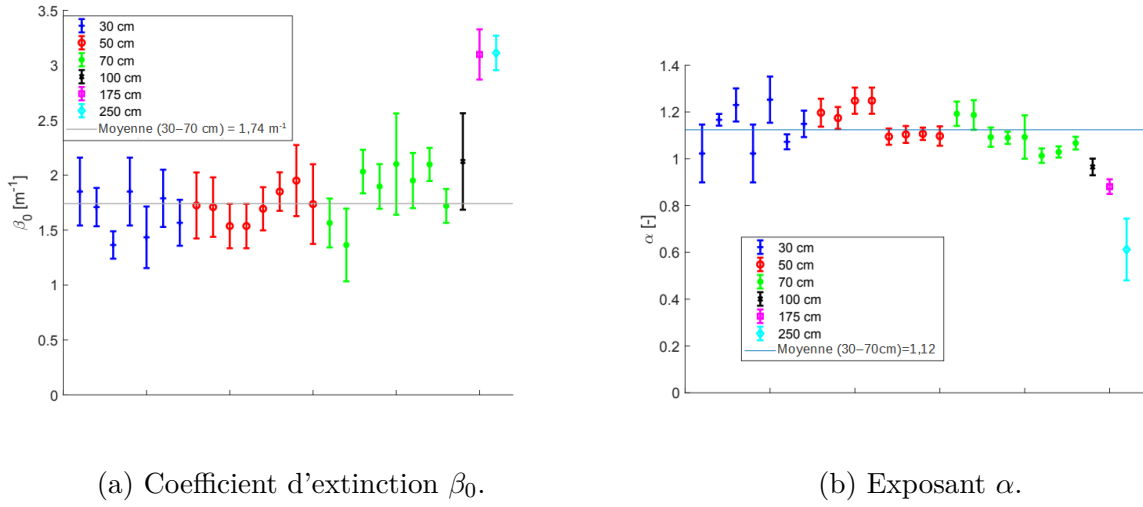


FIGURE 5.20 – Paramètres de l'Équation 4.6 pour les foyers de kérosène.

Pour l'exemple du kérosène présenté ici, le coefficient d'extinction varie peu pour les foyers de 70 cm de large et moins, avec $\beta_0 \approx 1,74 \text{ m}^{-1}$, et de façon modérée pour les flammes plus larges. Quant à l'exposant α , il est quasi-constant pour les foyers de 70 cm de large et moins, pour ensuite diminuer au fur et à mesure que la largeur de flamme augmente. Comme précisé dans [140], les valeurs de α pour les grands foyers sont soumises à caution car ces flammes se rapprochent de corps noirs, c'est-à-dire qu'elles atténuent une grande partie du rayonnement des lasers tout en émettant énormément dans l'infrarouge, et la métrologie mise en place (détecteurs, modulation) atteint alors ses limites. Il faut aussi rappeler que la diffusion et la contribution des gaz (émission/absorption) ont été négligées : ces hypothèses peuvent aussi expliquer certains écarts dans les résultats. De manière générale, le fait de traiter le rayonnement de la flamme comme celui d'un milieu (homogène, isotherme) équivalent semble permettre d'obtenir des paramètres, β_0 et α , qui dépendent peu de l'épaisseur de flamme. Ceci est un avantage par rapport aux approches « flamme solide/corps gris », pour lesquelles l'émissivité de la flamme est fortement liée à son épaisseur (voir p. ex. [Fig. 11 dans 44]). Avec la formulation présentée ici les valeurs déterminées pour une taille de foyer sont donc plus facilement transposables à d'autres échelles.

5.2.b Température de flamme équivalente

Une fois le coefficient d'absorption déterminé, il reste à calculer la température du milieu équivalent. Pour cela, les luminances expérimentales L_σ sont ajustées avec

$$L_\sigma = \left(1 - \exp \left[-\beta_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^\alpha e \right] \right) L_\sigma^{\text{CN}}(T). \quad (\text{c.f. 4.7})$$

Comme listé en Section 4.2.b.ii, il y aurait trois approches possibles, suivant le nombre de paramètres que l'on fixe. La troisième, qui consiste à laisser β_0 , α et T libres, est écartée car elle fournit des résultats non physiques en raison du couplage entre β_0 et α . Il reste deux possibilités qui se distinguent par le fait que β_0 soit fixé ou non. Ici c'est la seconde option qui sera présentée, c'est-à-dire celle consistant à laisser β_0 et T libres²⁸. En effet, elle semble permettre de mieux estimer β_0 [140].

Un exemple de 40 spectres d'émission est illustré en Figure 5.21 pour un foyer de kérosène de 50 cm de large (un spectre toutes les 2,5 s). Les variations apparemment aléatoires d'un spectre à l'autre s'expliquent par les effets de la turbulence ou les pulsations de la flamme. L'étude ne visait pas à caractériser ces phénomènes, et dans l'exploitation ci-dessous seules des valeurs moyennes seront considérées. De manière générale, on peut voir sur tous les spectres la contribution de CO_2 (autour de 2350 cm^{-1}) et H_2O (autour de 1600 ; 3660 et 3760 cm^{-1}), en tant que produits de combustion (émission) et constituants de l'atmosphère (absorption).

Deux approches sont envisageables pour ajuster l'Équation 4.7 : l'appliquer spectre par spectre ou bien sur un spectre moyen. Ces deux possibilités ne sont pas strictement équivalentes car la loi de Planck (Équation 2.2), décrivant l'émission du corps noir $L_\sigma^{\text{CN}}(T)$, n'est pas linéaire. Toutefois, il a été montré que les résultats sont proches [140], et c'est donc l'analyse sur des spectres moyens qui sera présentée ici, car plus simple.

Pour résumer, l'analyse ci-dessous est faite sur des spectres moyennés sur la phase stationnaire, et en ayant fixé α à partir des mesures d'opacimétrie. Une valeur $\alpha = 1,07$ est retenue pour le kérosène : elle diffère de ce qui peut être lu sur la Figure 5.20b car sur cette dernière α était déterminé sur toute la gamme spectrale utilisée en opacimétrie (410 à 3800 nm), tandis que la valeur 1,07 a été calculée seulement sur les longueurs d'onde infrarouges car utilisée conjointement aux mesures de spectrométrie, faites de 2000 à $12\,500 \text{ nm}$.

En suivant cette procédure, les spectres moyens pour chaque taille de foyer peuvent être ajustés (p. ex. avec la fonction Matlab `nlinfit`). Comme l'étude se focalise sur le rayonnement des suies, les ajustements ont été faits sur des fenêtres spectrales en dehors des bandes d'émission des gaz de combustion et d'absorption des gaz atmosphériques. Les gammes choisies ici sont 2430 à 2700 cm^{-1} , 4185 à 4340 cm^{-1} et 4650 à 5030 cm^{-1} . Des

²⁸. Pour les bacs de 175 et 250 cm de large, β_0 a été fixé à la valeur déterminée par opacimétrie (première option listée en Section 4.2.b.ii) car ces flammes émettent comme des corps noirs, c'est-à-dire indépendamment du coefficient d'extinction, et celui-ci ne peut donc plus être déterminé à partir des mesures de spectrométrie [140].

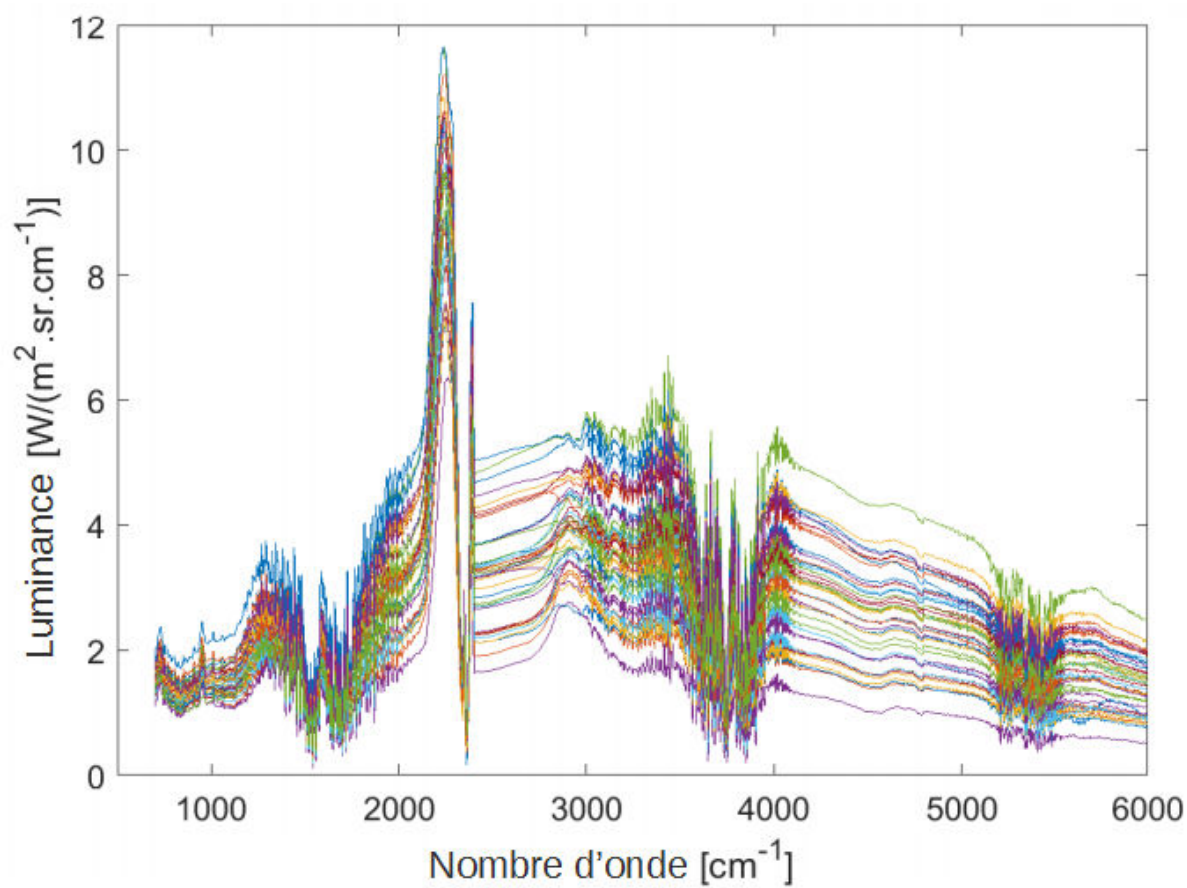


FIGURE 5.21 – Exemple de spectres « instantanés » pour un foyer de kérosène de 50 cm de large.

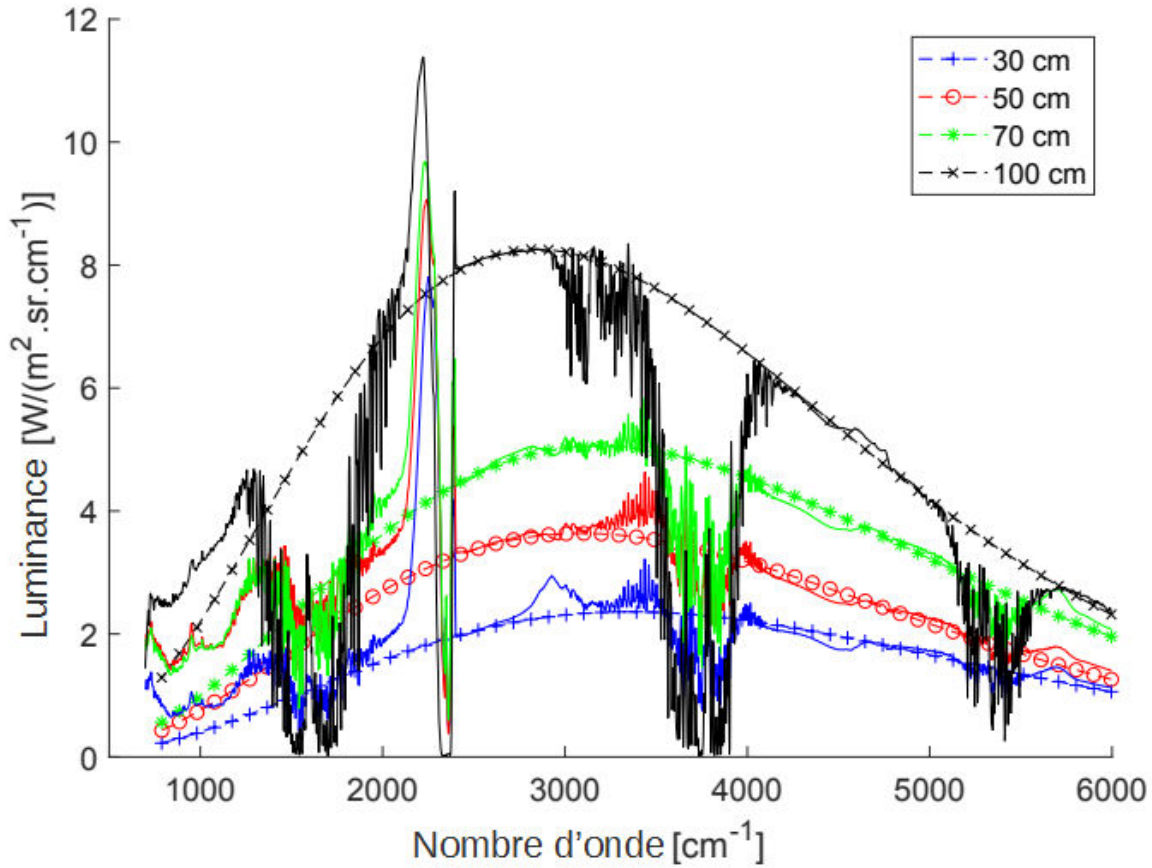
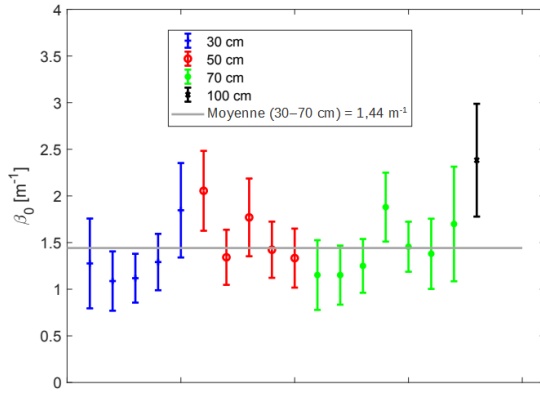
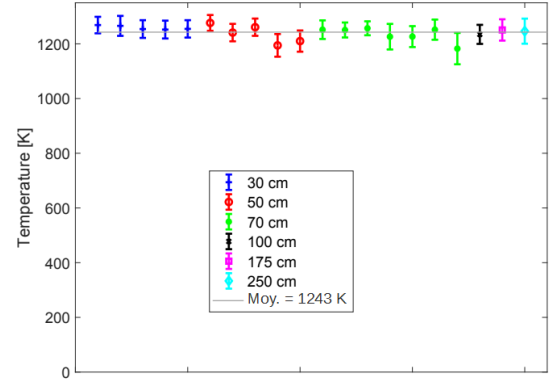


FIGURE 5.22 – Spectres d’émission moyens pour des feux de kérosène jusqu’à 100 cm de large (lignes continues) et résultats de l’ajustement de l’Équation 4.7 en ne fixant que α (traitillés et symboles).

exemples de résultats sont présentés en Figure 5.22 pour les bacs de kérosène de 30 à 100 cm.

Le modèle en Équation 4.7 permet de bien reproduire les données expérimentales en dehors des bandes d’émission et d’absorption des gaz. Les différences s’accroissent en dessous de 2500 cm^{-1} (c.-à-d. au-dessus de $4 \mu\text{m}$). Ceci met peut-être en évidence une limite de la loi décrivant la dépendance spectrale du coefficient d’extinction (Équation 4.4). En effet, aucune donnée expérimentale n’est disponible pour confirmer sa validité aux grandes longueurs d’onde. Néanmoins, cette loi constitue une approximation raisonnable et présente l’avantage de décrire la dépendance spectrale de manière analytique.

Toujours concernant les courbes résultant du modèle, on peut remarquer que leur allure semble proche de celle de courbes de corps noirs. Toutefois, seule l’émission des flammes les plus larges (ici pour le kérosène lorsque $\ell \geq 175 \text{ cm}$) peut effectivement être décrite par la loi de Planck. Les autres ne peuvent pas l’être, y compris en utilisant une émissivité (constante). En effet, un corps gris donné pourrait décrire les spectres expérimentaux aux

(a) Coefficient d'extinction β_0 .(b) Température T . La valeur moyenne (ligne horizontale) est basée sur les résultats pour les foyers de 70 cm et moins.FIGURE 5.23 – Paramètres de l'Équation 4.7 pour les foyers de kérosène ($\alpha = 1,07$).

courtes longueurs d'onde mais pas aux grandes, tandis qu'un autre présenterait le problème inverse. Pour le kérosène, aucun corps gris ne peut ajuster les spectres des flammes de faible et moyenne largeur, et donc prédire précisément la répartition de l'énergie sur toute la gamme spectrale.

Les ajustements présentés en Figure 5.22 permettent d'obtenir les valeurs pour les paramètres laissés libres, à savoir le coefficient d'extinction β_0 et la température équivalente du milieu T . Ces grandeurs sont présentées en Figure 5.23 pour le kérosène.

On peut observer que les coefficients d'extinction varient peu pour les épaisseurs de flamme inférieures ou égales à 70 cm ($\beta_0 \approx 1,44 \text{ m}^{-1}$), et augmente légèrement pour la flamme de 100 cm, probablement en raison d'une plus grande quantité de suies. Concernant les températures identifiées, elles ne semblent pas dépendre de la largeur de la flamme (valeur moyenne de 1243 K) et sont très proches (écart type autour de 30 K).

Pour conclure, le modèle proposé, qui considère la flamme comme étant un milieu homogène isotherme équivalent, décrit la luminance spectrale comme une fonction de trois paramètres, α , β_0 et T (voir Section 4.2.b.ii et Équation 4.7). Leurs valeurs ont été déterminées en utilisant les mesures d'opacimétrie et de spectrométrie, comme illustré ici pour le kérosène (Figures 5.20b et 5.23). Ce travail, aussi effectué pour la mousse polyuréthane, permet maintenant de prédire la luminance pour n'importe quelle taille de foyer, en fonction de la longueur d'onde. Cette donnée vient compléter la description de la géométrie de flamme (Section 5.1.b) pour alimenter les modèles de rayonnement et prédire les densités de flux thermiques reçues par le combustible ou d'autres cibles.

5.3 Densités de flux thermiques

Pour terminer cette partie sur les résultats expérimentaux, les mesures de densités de flux thermiques seront présentées. Elles ne sont malheureusement pas accompagnées des incertitudes qui leur sont associées car ces dernières n'ont pu être déterminées. Les mesures seront néanmoins utiles pour évaluer les prédictions des modèles de rayonnement détaillés par la suite.

Les mesures à l'aide des fluxmètres décrits en Section 4.1.b ont permis d'obtenir l'évolution des densités de flux au cours du temps, comme présenté en Figure 5.24 pour des foyers de kérosène et de mousse polyuréthane.

On peut remarquer sur la Figure 5.24a (kérosène, 1 m) que la phase stationnaire est bien visible, avec des densités de flux quasi-constantes pour tous les fluxmètres. L'augmentation en fin d'essai est due à l'emballement de la réaction, lorsqu'il ne reste qu'une fine couche de combustible qui en plus reposait sur de l'eau pour ces essais (protocole ADP) : du kérosène enflammé est projeté et forme des flammes plus grandes que lors du reste de l'essai, ce qui explique les mesures présentées en Figure 5.24a. Cette augmentation peut aussi être observée sur d'autres résultats (p. ex. perte de masse, non présentée ici).

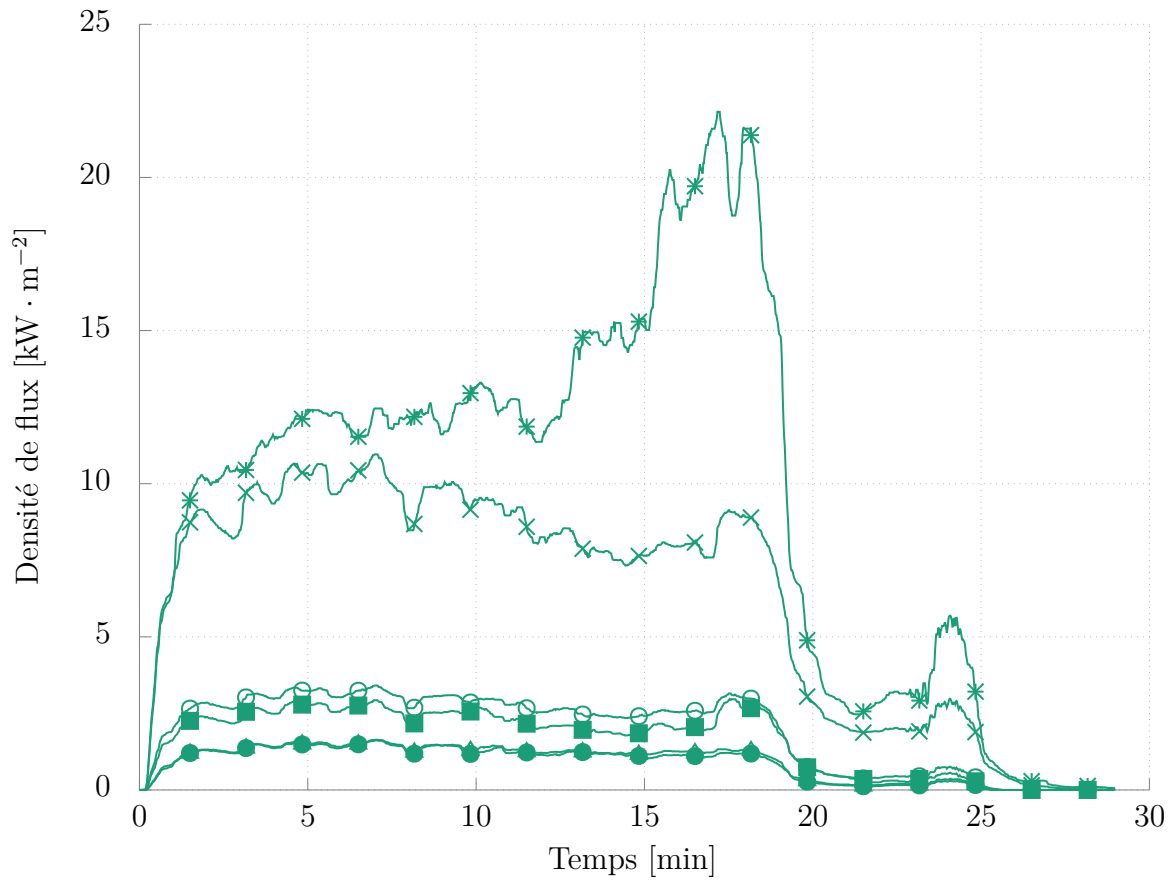
Une phase stationnaire est aussi observée pour les blocs de mousse polyuréthane jusqu'à environ 70 cm de côté, comme présenté en Figure 5.24b, avec des densités de flux quasi-constantes en milieu d'essai. Pour les blocs plus grands, ce plateau disparaît, et les résultats ont plutôt une forme « triangulaire » comme reporté dans la littérature [123] (allure observée sur le MLR ou la hauteur de flamme, non présentés ici). Un exemple de ce genre de résultat est donné en Figure 5.24c pour un bloc de 175 cm. Cette différence entre petits et grands blocs est probablement due au mécanisme de propagation et à l'épaisseur des échantillons.

Comme pour les autres grandeurs (hauteur de flamme, vitesse de perte de masse...), les valeurs médianes ont été extraites sur la phase stationnaire ou autour du maximum pour les essais ne présentant pas de plateau net. Ces résultats, en fonction de la distance (à hauteur fixée) ou de la hauteur (à distance fixée), sont présentés ci-dessous en Figures 5.25 et 5.26 pour le kérosène et en Figure 5.27 pour la mousse polyuréthane (un symbole/une couleur par répétition). De manière générale la répétabilité est bonne, et des explications concernant les quelques différences seront données au cas par cas.

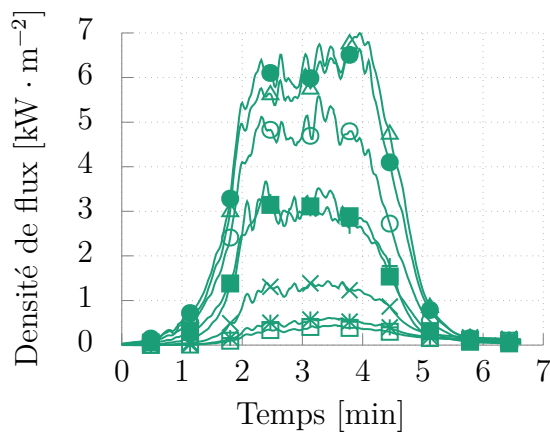
La Figure 5.25 présente les évolutions de la densité de flux avec la hauteur pour les foyers kérosène de 30 ; 50 et 70 cm (PROMETHEI). Elle montre une répartition typique des densités de flux sur la hauteur, même si les niveaux sont un peu inférieurs par rapport à [145]. Des profils classiques sont aussi observés pour les densités de flux en fonction de la distance (non présentées ici).

La Figure 5.26 présente l'évolution de la densité de flux en fonction de la distance pour les foyers 70 cm de large et plus (ADP, capteurs orientés verticalement).

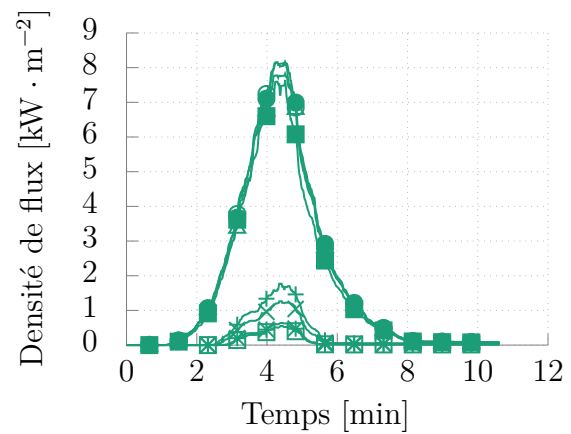
Les différences observées pour les distances entre 1 et 2 m sont probablement dues à une asymétrie de la flamme causée par des courants d'air, qui rapprochaient/éloignaient la



(a) Kérosène, 1 m.



(b) Mousse polyuréthane, 70 cm.



(c) Mousse polyuréthane, 175 cm.

FIGURE 5.24 – Densités de flux pour des foyers de kérosène (haut, 1 m de côté) et de mousse polyuréthane (bas, 70 et 175 cm de côté). Un symbole par fluxmètre, donnés à titre indicatif.

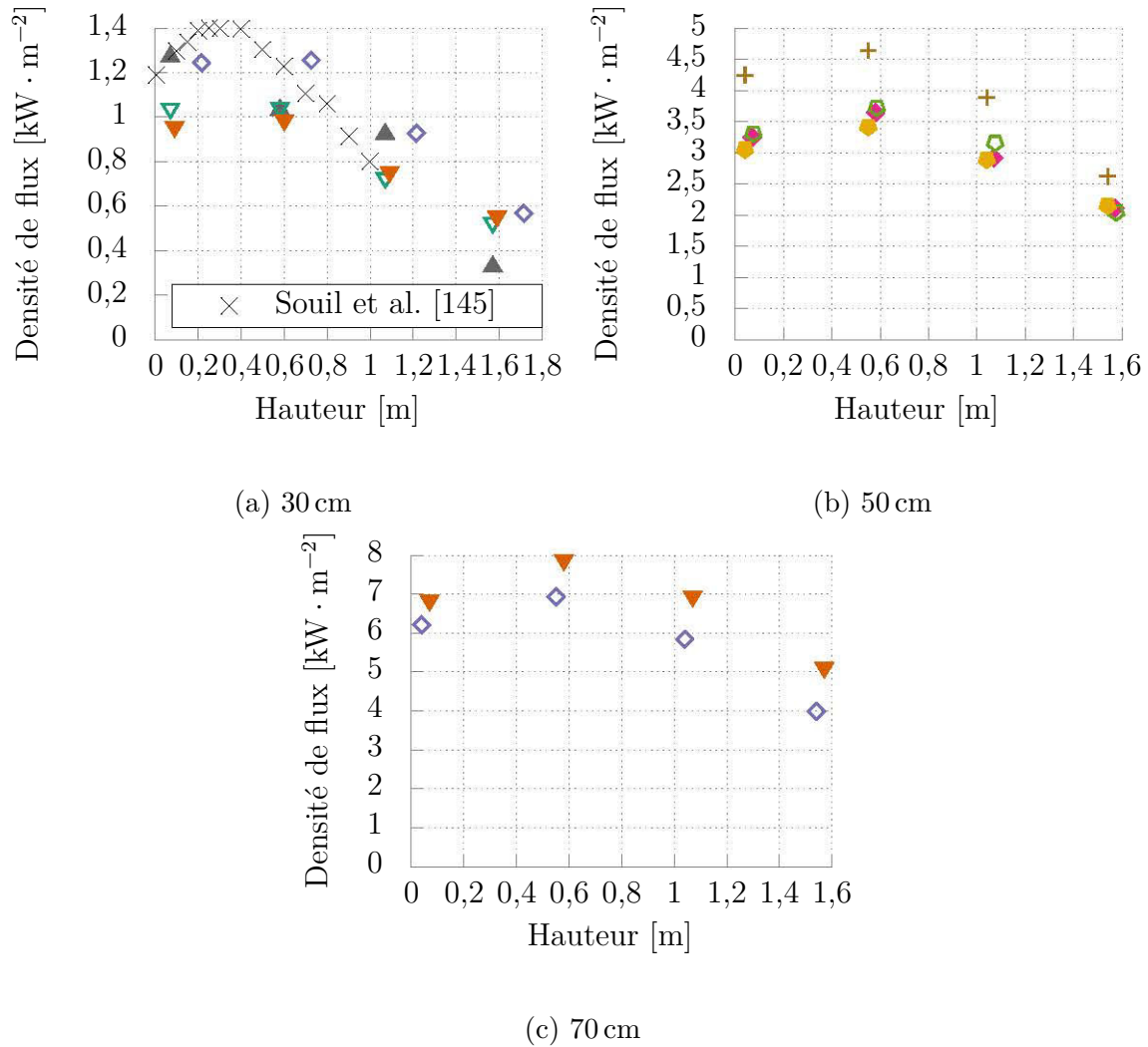


FIGURE 5.25 – Évolution de la densité de flux en fonction de la hauteur pour des foyers de kérosène. Capteurs orientés verticalement, distance par rapport au bord du bac : $(1,2 \pm 0,2)$ m. Un marqueur/une couleur par répétition, croix noires pour les données de la littérature.

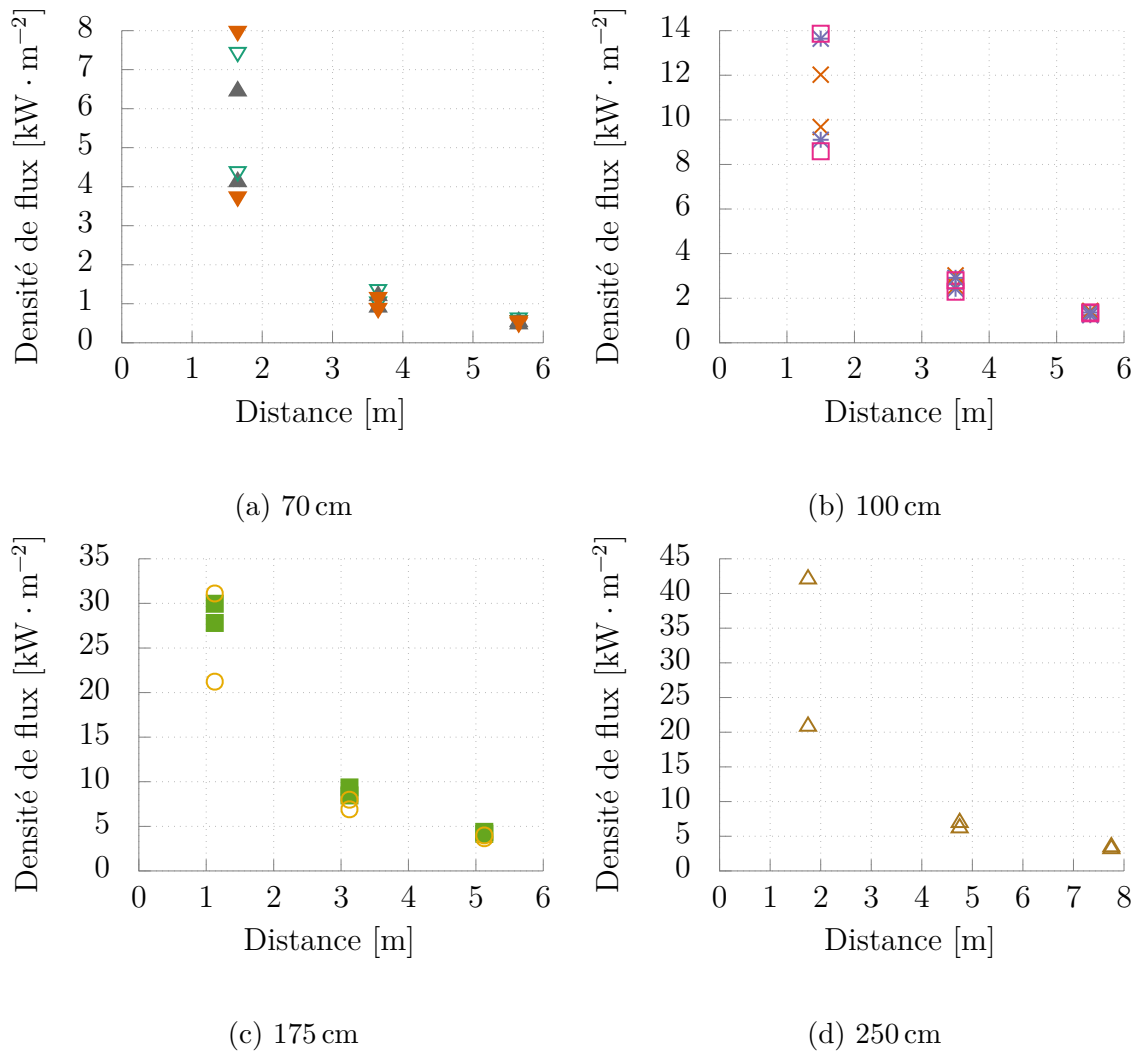


FIGURE 5.26 – Évolution de la densité de flux en fonction de la distance par rapport au bord du foyer pour des bacs de kérosène (repérés par leur largeur). Capteurs orientés verticalement et situés à deux hauteurs (1 et 2 m par rapport au bord du bac). Un marqueur/une couleur par répétition.

flamme de certains capteurs. Concernant les mesures à des distances de 3 m et plus, les densités de flux mesurées à des hauteurs de 1 ou 2 m sont très proches, et c'est pourquoi elles sont présentées ensemble sur la Figure 5.26.

La Figure 5.27 présente l'évolution de la densité de flux avec la hauteur pour les foyers de mousse polyuréthane. Ici aussi la répétabilité est bonne, et la répartition des flux est celle rencontrée habituellement. Ces tendances sont aussi valables pour l'évolution des densités de flux en fonction de la distance (non présentée ici).

Contrairement aux propriétés de flamme, il ne sera pas possible de décrire l'évolution des densités de flux en fonction de la taille du foyer. Cette comparaison ne peut se faire que pour des mesures réalisées aux mêmes positions. Malheureusement, aucun capteur ne remplit cette condition, comme présenté en Figure 5.28 pour le kérosène. En effet, les fluxmètres étaient déplacés en fonction de la puissance de feu attendue afin d'avoir un signal correct sans risquer de les dégrader. De plus, les résultats étaient parfois exploités par d'autres partenaires et les protocoles devaient donc prendre leurs besoins en compte (p. ex. [147]). L'utilisation des résultats reste quand même possible pour évaluer les modèles de rayonnement, comme présenté en Section 6.1.a.

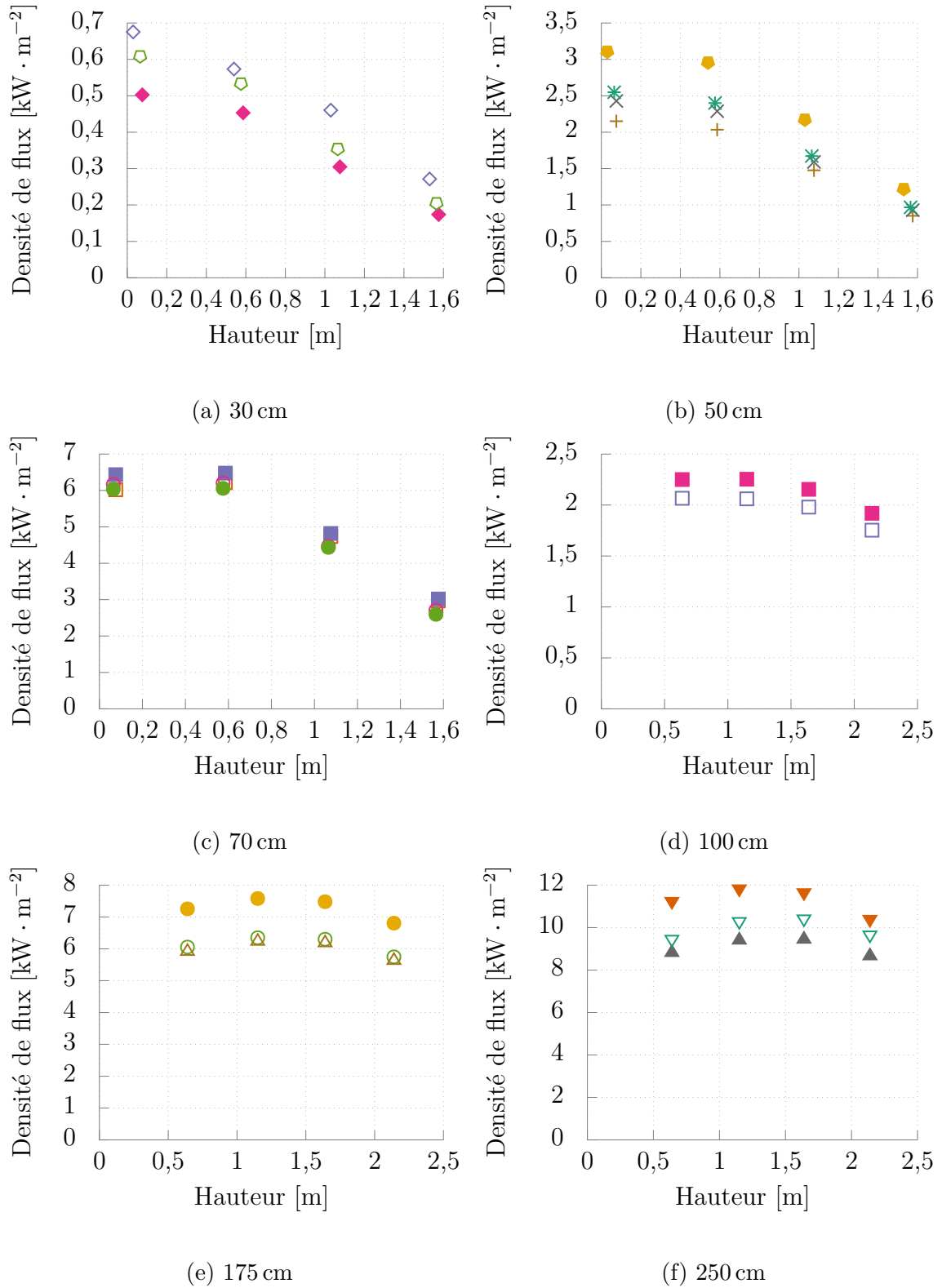


FIGURE 5.27 – Évolution de la densité de flux en fonction de la hauteur pour les foyers de mousse polyuréthane. Capteurs orientés verticalement, distance par rapport au bord du bloc : $(1,2 \pm 0,2)$ m pour les bacs de 30 à 70 cm et $(2,5 \pm 0,5)$ m pour les bacs de 100 à 250 cm. Un marqueur/une couleur par répétition.

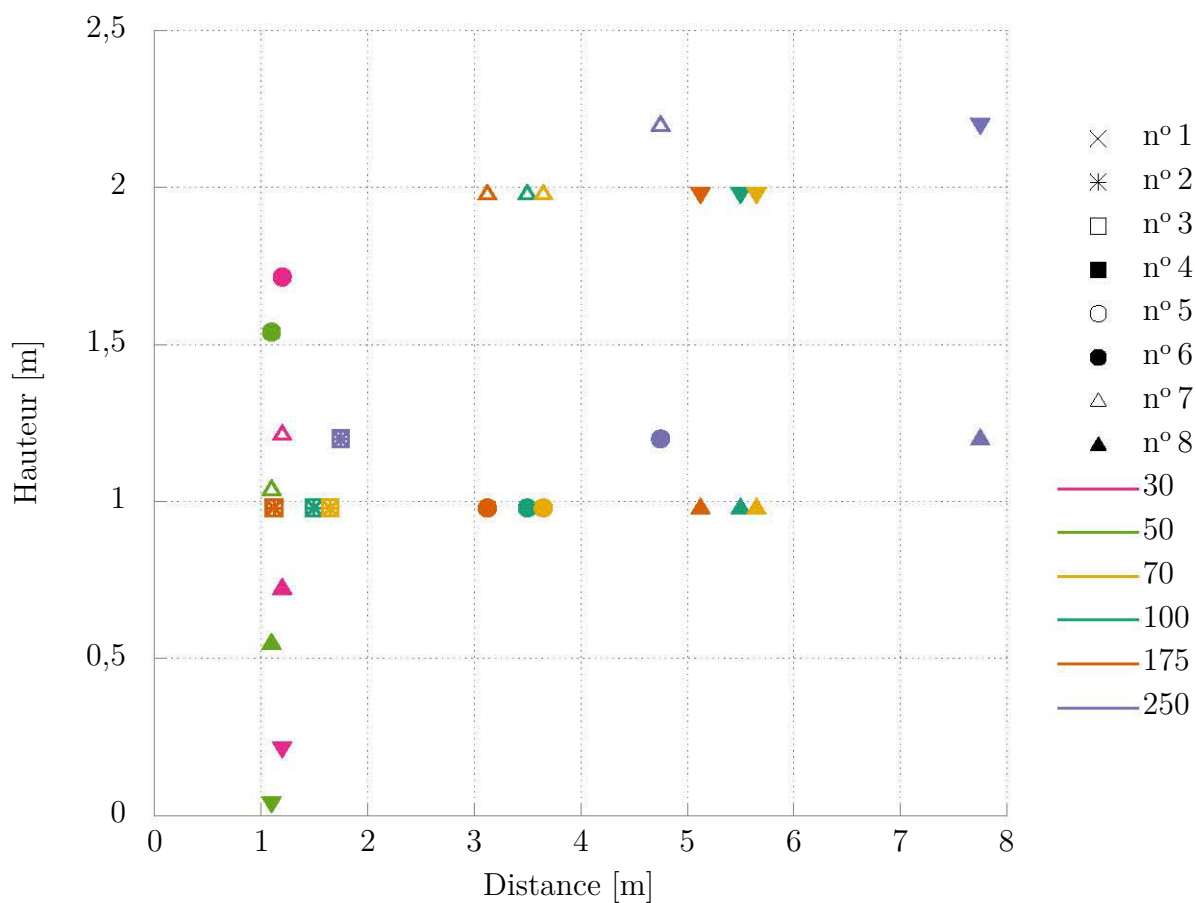


FIGURE 5.28 – Positions des fluxmètres orientés verticalement pour les feux de kérosène. Un essai par taille, repéré par sa largeur en centimètres (voir couleurs). La hauteur et la distance sont données par rapport au bord du bac.

Chapitre 6

Modélisation du rayonnement

Sommaire

6.1	Modèle académique	107
6.1.a	Éléments utilisés pour le lancer de rayons	107
6.1.b	Comparaison du lancer de rayons à l'expérience	108
6.2	Évaluation de Fire dynamics simulator	112
6.2.a	Étude de convergence pour FDS	112
6.2.b	Comparaison de FDS à l'expérience et au lancer de rayons	115

Les connaissances acquises expérimentalement dans les sections précédentes peuvent être complétées en utilisant des outils numériques. Ces derniers peuvent par exemple servir à valider que les phénomènes mis en jeu sont bien compris, en modélisant les essais réalisés et en comparant les résultats à ceux expérimentaux : c'est principalement l'objectif du modèle « académique » présentés ci-après. D'autre part, la prise en compte du rayonnement est cruciale dans la simulation incendie, d'autant plus si une approche thermique est choisie (terme source influencé par la sollicitation thermique) : c'est pourquoi un outil de simulation complet, FDS, sera évalué sur sa prise en compte des transferts radiatifs (voir Section 6.2).

6.1 Modèle académique

6.1.a Éléments utilisés pour le lancer de rayons

La modélisation du rayonnement peut se faire de manière plus ou moins complète/complexe (voir Section 2.1.b), en association avec d'autres modèles (p. ex. dans un code de mécanique des fluides) ou indépendamment. Ici, les données expérimentales de forme et de propriétés radiatives de flamme ont été utilisées pour modéliser le rayonnement des foyers expérimentaux par lancer de rayons (voir Section 2.1.b.ii). Par exemple pour le kérosène :

- La géométrie de la flamme a été représentée à l'aide d'une forme simplifiée **cône sur cylindre**, dont les paramètres sont donnés en Figure 5.16.
- L'émission de la flamme a été décrite comme celle d'un milieu homogène isotherme équivalent (voir Équation 4.7), en ayant déterminé les valeurs des trois paramètres (α , β_0 et T) comme résumé en Section 5.2.b.
- Les calculs de densité de flux ont été faits à l'aide d'un code de lancer de rayons, en considérant une émission volumique et en utilisant la méthode réciproque, comme décrit en Section 2.1.b.ii.
- Les résultats ont été comparés aux densités de flux mesurées lors des essais, présentées en Section 5.3.

Les comparaisons entre les résultats numériques et expérimentaux sont présentées en section suivante, pour le kérosène donc mais aussi pour la mousse polyuréthane.

6.1.b Comparaison du lancer de rayons à l'expérience

Les Figures 6.1 et 6.2 présentent les comparaisons entre résultats numériques, calculés par lancer de rayons, et les valeurs mesurées lors des essais. Pour les bacs de 30 et 50 cm par exemple, la Figure 6.1 donne l'évolution de la densité de flux en fonction de la distance (à hauteur fixée) ou de la hauteur (à distance fixée).

Les résultats expérimentaux sont bien reproduits pour les bacs de 50 cm, que ce soit verticalement (Figure 6.1c) ou horizontalement (Figure 6.1d). L'accord est moins bon pour les bacs de 30 cm, pour lesquels le modèle sous-estime les densités de flux. Les tendances (allures des courbes) sont proches mais les niveaux mesurés lors des essais sont systématiquement plus élevés. Ceci pourrait être dû à une sous-estimation de l'émission de la flamme, par exemple parce que la contribution des gaz n'a pas été prise en compte alors qu'elle peut être non négligeable pour ces petites flammes.

La Figure 6.2 présente l'évolution de la densité de flux en fonction de la distance (à deux hauteurs) pour les deux bacs les plus grands, à savoir 175 et 250 cm. Les résultats pour les bacs de 70 à 100 cm, qui présentent des tendances similaires, sont donnés avec les comparaisons aux prédictions FDS en Figure 6.9.

Pour ces grandes tailles de foyer (70 à 250 cm), le modèle sur-estime les densités de flux dans la plupart des cas. Ceci pourrait être une nouvelle fois dû au fait que la contribution des gaz a été négligée, ici plus particulièrement l'absorption atmosphérique entre la flamme et les points de mesures. L'accord entre numérique et expérimental s'améliore sensiblement lorsque la distance augmente (voir p. ex. en Figure 6.10d). Ceci n'est pas surprenant, car en champ lointain la sensibilité aux paramètres influençant le rayonnement (forme et émission de la flamme) devient moins grande. Ainsi, une description fine de la forme de flamme est moins importante : c'est ce qui avait aussi été observé sur les résultats expérimentaux, en Figure 5.26, où les mesures étaient presque identiques à deux hauteurs différentes. De même, la sensibilité à la modélisation de l'émission de la flamme est moins grande pour les foyers de largeur importante, pour lesquels l'émission se rapproche de celle d'un corps noir.

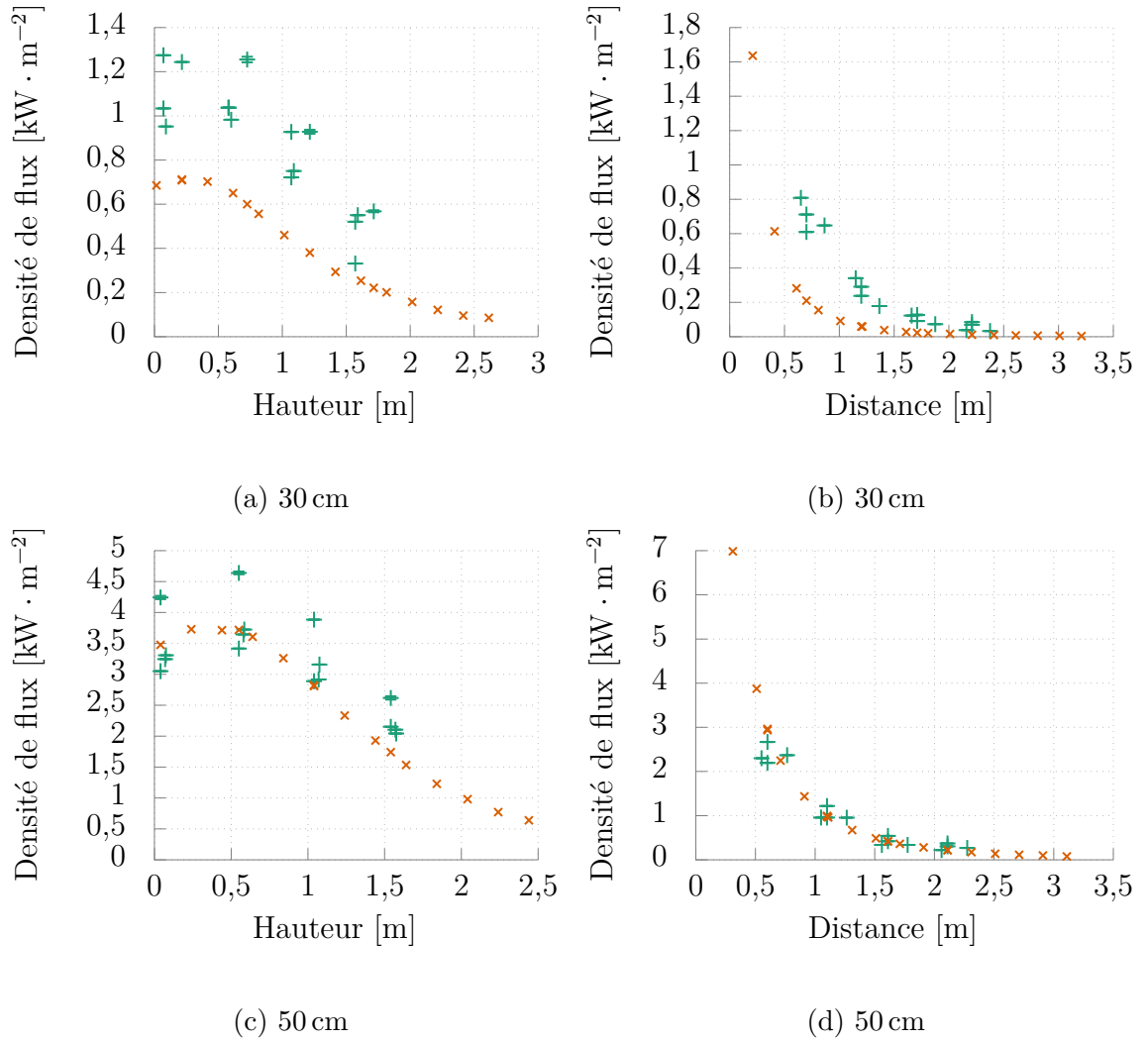


FIGURE 6.1 – Comparaison des densités de flux mesurées (+) et calculées (x) pour des foyers kérosène de 30 et 50 cm. Les figures de gauche représentent les évolutions à distance fixée ($(1,2 \pm 0,2)$ m), capteurs orientés verticalement, et les figures de droite les évolutions à hauteur fixée ($(0,0 \pm 0,2)$ m), capteurs orientés horizontalement.

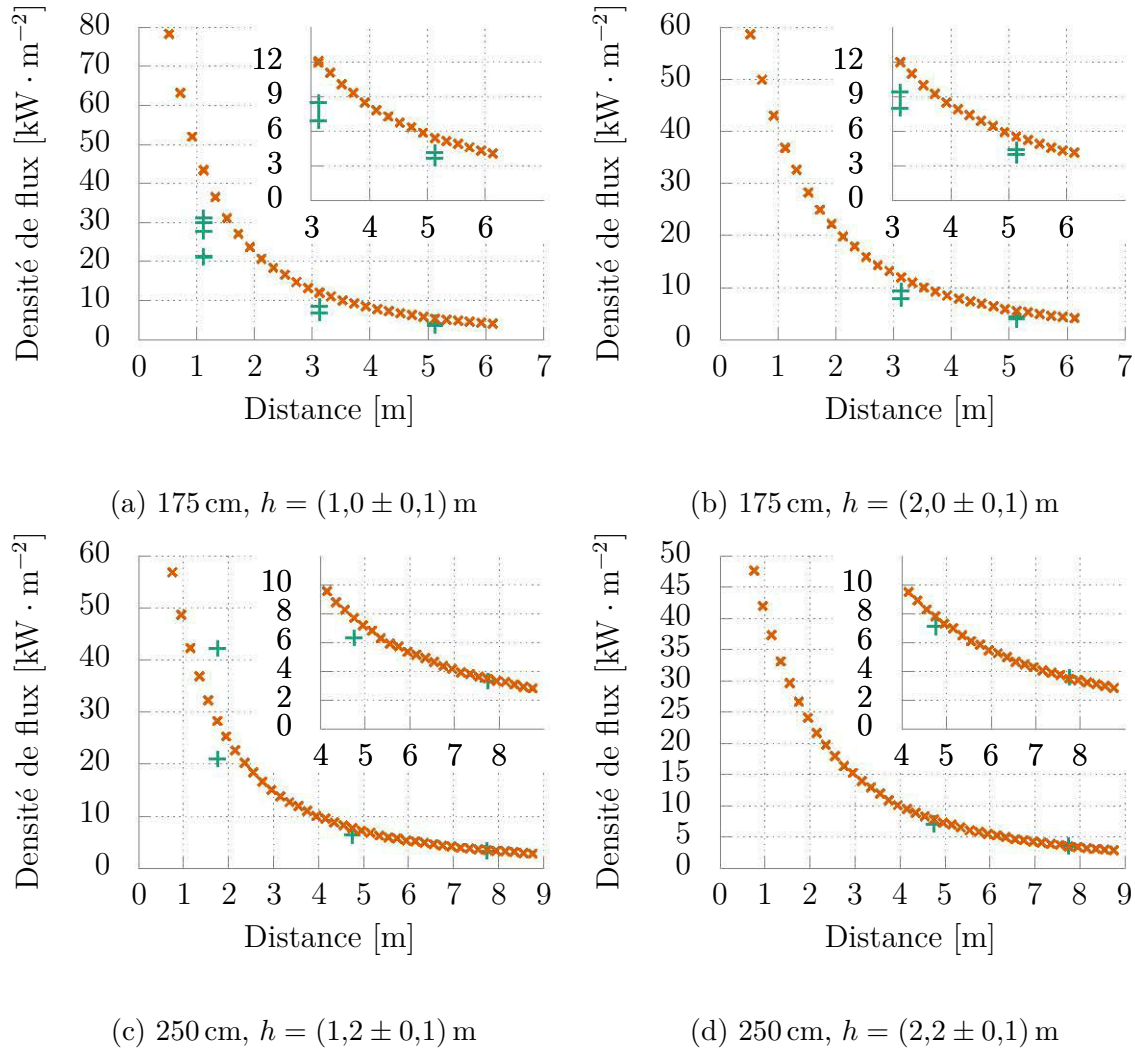


FIGURE 6.2 – Comparaison des densités de flux mesurées (+) et calculées (x) pour des foyers kérosène de 175 et 250 cm. Les figures de gauche et de droite représentent les évolutions en fonction de la distance par rapport au bord du foyer à deux hauteurs. Tous les capteurs étaient orientés verticalement.

Le même travail de modélisation a été mené avec les données expérimentales récoltées pour la mousse polyuréthane. Des résultats préliminaires sont présentés en Figure 6.3 pour les blocs de 175 et 250 cm, avec l'évolution de la densité de flux en fonction de la distance (à hauteur fixée) ou de la hauteur (à distance fixée). Comme pour le kérosène, les tendances sont bien reproduites par le modèle et la plupart des valeurs prédites pour ces échantillons sont même relativement proches des mesures expérimentales. Les résultats pour les autres blocs, difficilement interprétables pour les petites tailles et perfectibles pour celles intermédiaires, sont présentés plus tard avec les comparaisons aux prédictions FDS, en Figures 6.11 et 6.12.

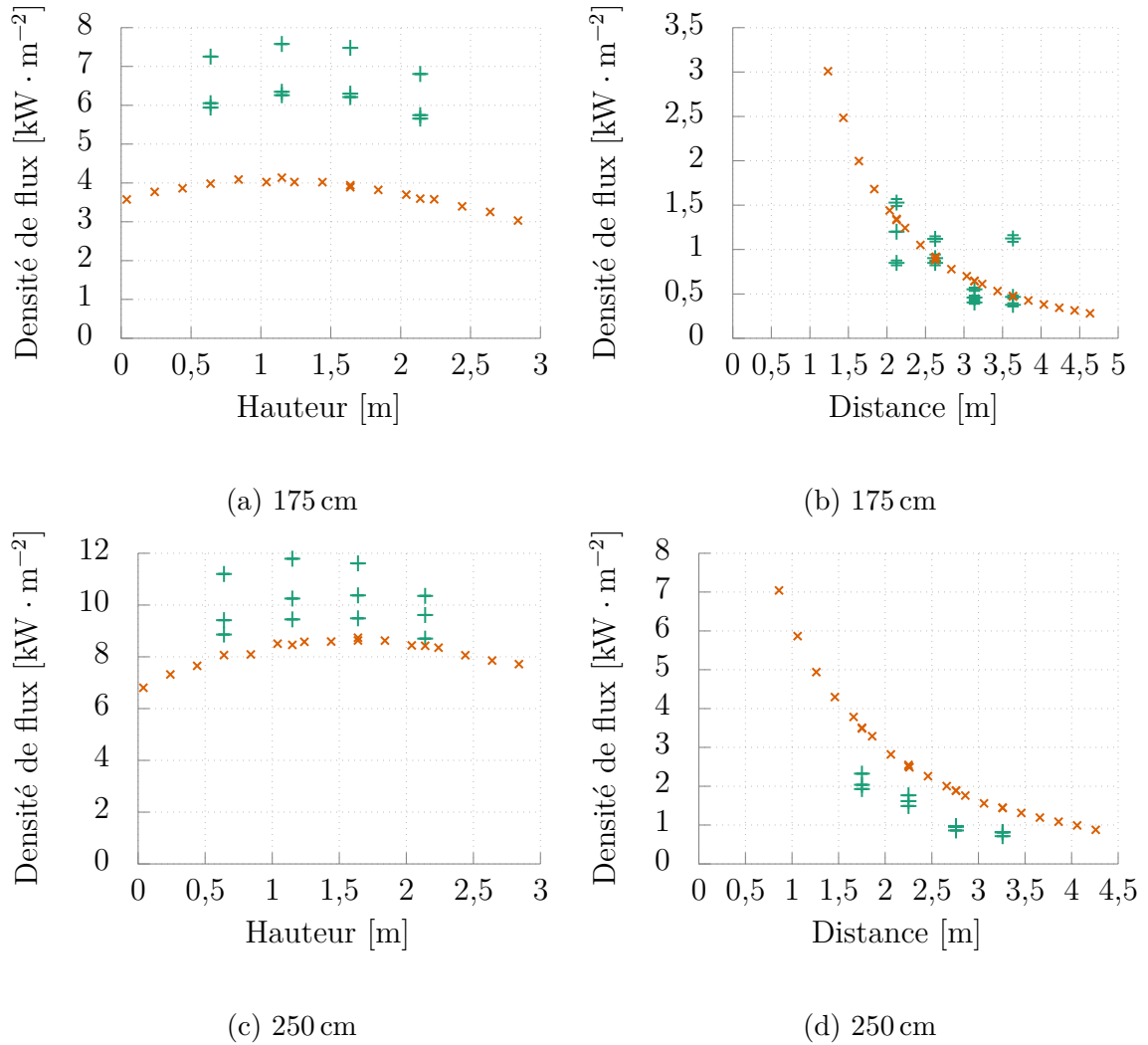


FIGURE 6.3 – Comparaison des densités de flux mesurées (+) et calculées (x) pour des foyers de mousse polyuréthane de 175 et 250 cm. Les figures de gauche représentent les évolutions à distance fixée ((2,4 ± 0,3) m), capteurs orientés verticalement, et les figures de droite les évolutions à hauteur fixée ((0,0 ± 0,1) m), capteurs orientés horizontalement.

6.2 Évaluation de Fire dynamics simulator

Nous avons vu qu'un modèle de type lancer de rayons (méthode de Monte Carlo) offre une bonne description du rayonnement des flammes, mais il ne permet que la caractérisation de ce dernier. L'objectif final étant de fournir un outil de simulation complet, c'est-à-dire incluant le transport de fumées, de chaleur et d'espèces gazeuses par exemple, il est intéressant de se baser sur un code existant qui permet déjà la simulation de la plupart de ces phénomènes. Vu qu'il est largement utilisé dans la communauté incendie, en ingénierie comme en recherche, le code FDS est un candidat de choix, et l'objectif de cette section est donc d'évaluer si cet outil permet, en l'état (version 6_6_0), de décrire convenablement le rayonnement de la flamme. Avant toute chose, une analyse de sensibilité sera conduite afin de fixer différents paramètres.

Ceci passe par une analyse de sensibilité afin de choisir les différents paramètres influents.

6.2.a Étude de convergence pour FDS

Plusieurs paramètres contrôlent les modèles de rayonnement dans FDS (voir aussi Section 2.1.b.iii). Deux d'entre eux seront analysés ici, à savoir le nombre d'angles solides (`NUMBER_RADIATION_ANGLES` dans le fichier d'entrée) et la taille de maille (combinaison de `XB` et `IJK`). En plus de comparer les simulations entre elles pour différentes valeurs de ces paramètres (étude de convergence), il sera intéressant de les confronter à des résultats expérimentaux faisant office de référence. Ici, c'est un foyer d'heptane qui a été choisi, réalisé à PROMETHEI dans un bac de $50 \times 50 \times 5 \text{ cm}^3$, situé à 83 cm du sol. Le combustible (950 g) reposait sur une couche d'eau (3000 g) pour réguler la combustion : c'est la phase stationnaire de l'essai qui sera exploitée ici.

L'ensemble de simulations a été mené en utilisant un maillage occupant un domaine de $5 \times 5 \times 7 \text{ m}^3$, ouvert sur tous les côtés sauf au sol. Le combustible a été défini comme suit [18]

```
&REAC    FUEL = 'N-HEPTANE', C = 7., H = 16.,
          CO_YIELD = 0.01, SOOT_YIELD = 0.037,
          HEAT_OF_COMBUSTION = 41200, RADIATIVE_FRACTION = 0.33 /
```

avec un `MLRPUA` = 0.0249 tel que mesuré expérimentalement sur la phase stationnaire. Sauf mention contraire, tous les autres paramètres étaient fixés à leur valeur par défaut. Les simulations étaient conduites sur 20 s, et l'analyse des résultats faite en prenant les moyennes sur les 10 dernières secondes, considérées équivalentes à la phase stationnaire expérimentale.

6.2.a.i Discrétisation spatiale

Le premier paramètre étudié est la taille de maille. La convergence en maillage est une étape essentielle en CFD car elle sert à vérifier que la discrétisation spatiale est suffisante

pour reproduire les phénomènes d'intérêt. Ici, il s'agit de s'assurer que FDS décrit bien la géométrie de la flamme, puisque c'est un paramètre important qui contrôle la direction dans laquelle le rayonnement sera émis.

Cinq tailles de maille cubique δx ont été utilisées : 10 ; 5 ; 2,5 et 2 cm. En les rapportant à la taille caractéristique du foyer [103, p. 44]

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}, \quad (6.1)$$

où $\dot{Q}$ est le débit calorifique, ρ_∞ , c_p et T_∞ les masse volumique, capacité calorifique et température du milieu ambiant et g l'accélération de la pesanteur, cela représente des tailles de maille adimensionnées $R^* = \delta x / D^*$ entre 0,180 et 0,036, ce qui est similaire à d'autres étude de sensibilité pour des scénarios proches [148, 149]. Les simulations ont été comparées sur la base de plusieurs grandeurs, mesurées selon l'axe vertical central du foyer. Certaines d'entre elles sont illustrées ici, comme par exemple la quantité de chaleur libérée par unité de volume (HRRPUV, *Heat release rate per unit volume*) en Figure 6.4 ou la température en Figure 6.5.

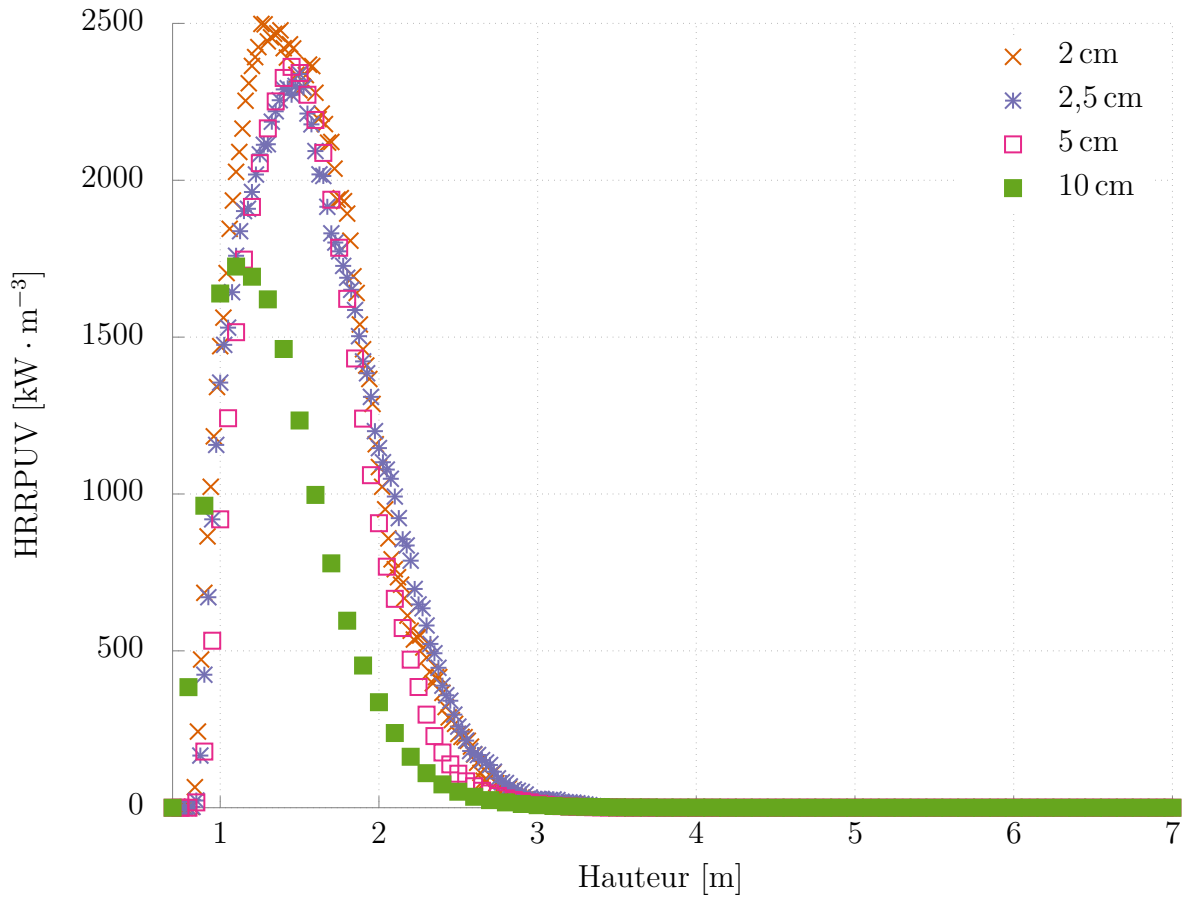


FIGURE 6.4 – HRRPUV le long de l'axe du foyer pour différentes tailles de maille.

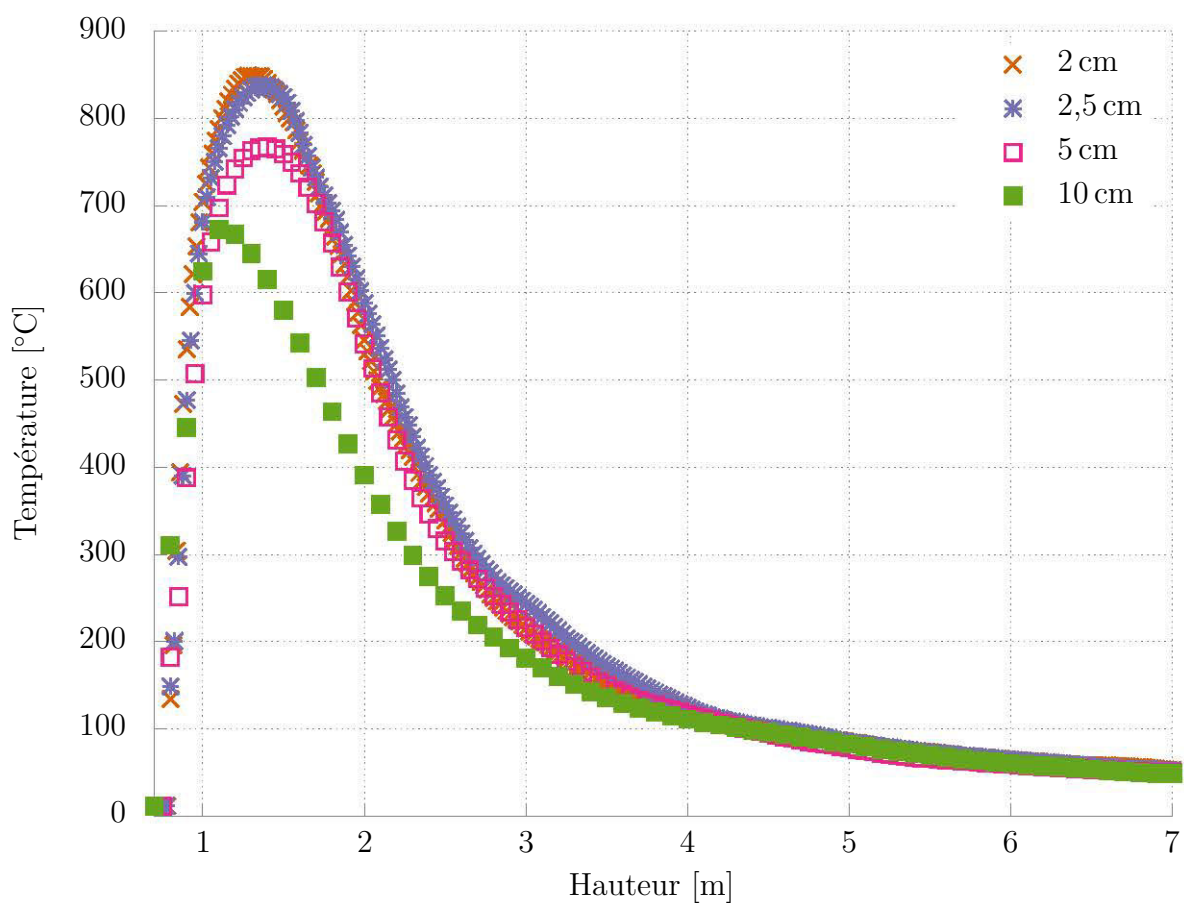


FIGURE 6.5 – Température le long de l'axe du foyer pour différentes tailles de maille.

Au vu de ces résultats, il est estimé que pour ce scénario et plus particulièrement ce foyer, une taille de maille de 2 cm permet une résolution acceptable de la flamme et du panache. En plus d'avoir une influence sur la résolution de la flamme, la taille de maille doit être prise en compte conjointement à la discrétisation angulaire, notamment afin d'éviter les effets de rayon. Ce point est abordé dans la section suivante. À noter que pour certains scénarios, nécessitant par exemple un très grand domaine de calcul, des tailles de maille supérieures peuvent être utilisées parce qu'il est moins important de décrire finement les phénomènes mais aussi pour des raisons techniques (puissance de calcul). Pour ces simulations, la taille de maille sera déterminée en conservant un rapport similaire au R^* défini plus haut, à savoir la taille de maille optimale (2 cm) divisée par une longueur caractéristique (la largeur du foyer).

6.2.a.ii Discrétisation angulaire

Le nombre d'angles solides contrôle pour beaucoup la répartition du flux radiatif émis par la flamme : s'il est trop petit, des directions vont être arbitrairement privilégiées, conduisant ainsi « artificiellement » à un rayonnement inhomogène. C'est donc un paramètre crucial, plus important par exemple que la résolution temporelle [103, p. 196]. Afin d'évaluer la qualité des résultats, les densités de flux vont être comparées entre simulations (convergence) mais aussi vis-à-vis de l'expérience. Différents nombres d'angles solides ont été utilisés : 100 ; 200 et 300, voire 700 et 900 pour certaines tailles de maille. Les résultats pour des mailles de 2 cm sont présentés en Figures 6.6 et 6.7. Les données d'un essai réalisé à la Bouzule (PROMETHEI) sont aussi fournies à titre indicatif, mais l'étude de convergence se fait bien uniquement en comparant les résultats numériques entre eux pour différentes valeurs du paramètre étudié (ici le nombre d'angles solides).

D'après ces résultats, il semble que 500 angles solides permettent d'atteindre la convergence, et qu'il y peu d'intérêt à augmenter au-delà. Cette tendance est aussi observée pour des mailles de 5 cm (non présentées ici). Pour les simulations avec des tailles de maille supérieures, il faudrait refaire des études de convergence dédiées afin de s'assurer que la résolution angulaire ne soit pas trop élevée par rapport à la résolution spatiale, ces deux paramètres étant intimement liés. Toutefois, il a été observé que pour des mailles de 2 et 5 cm les résultats ne se dégradent pas jusqu'à au moins 900 angles solides (voir p. ex. Figures 6.6 et 6.7), ce qui suggère qu'une valeur de 500 angles solides est raisonnable même pour des tailles de maille supérieures : c'est donc cette dernière qui a été utilisée pour l'ensemble des scénarios étudiés ici. Elle avait d'ailleurs été retenue dans les études citées plus tôt [148, 149].

6.2.b Comparaison de FDS à l'expérience et au lancer de rayons

6.2.b.i Essais kérosène

Les essais de kérosène (bacs de 0,3 à 2,5 m de large) ont été simulés en utilisant les paramètres dans le Tableau 6.1 et les discrétisations angulaire et spatiale définies en

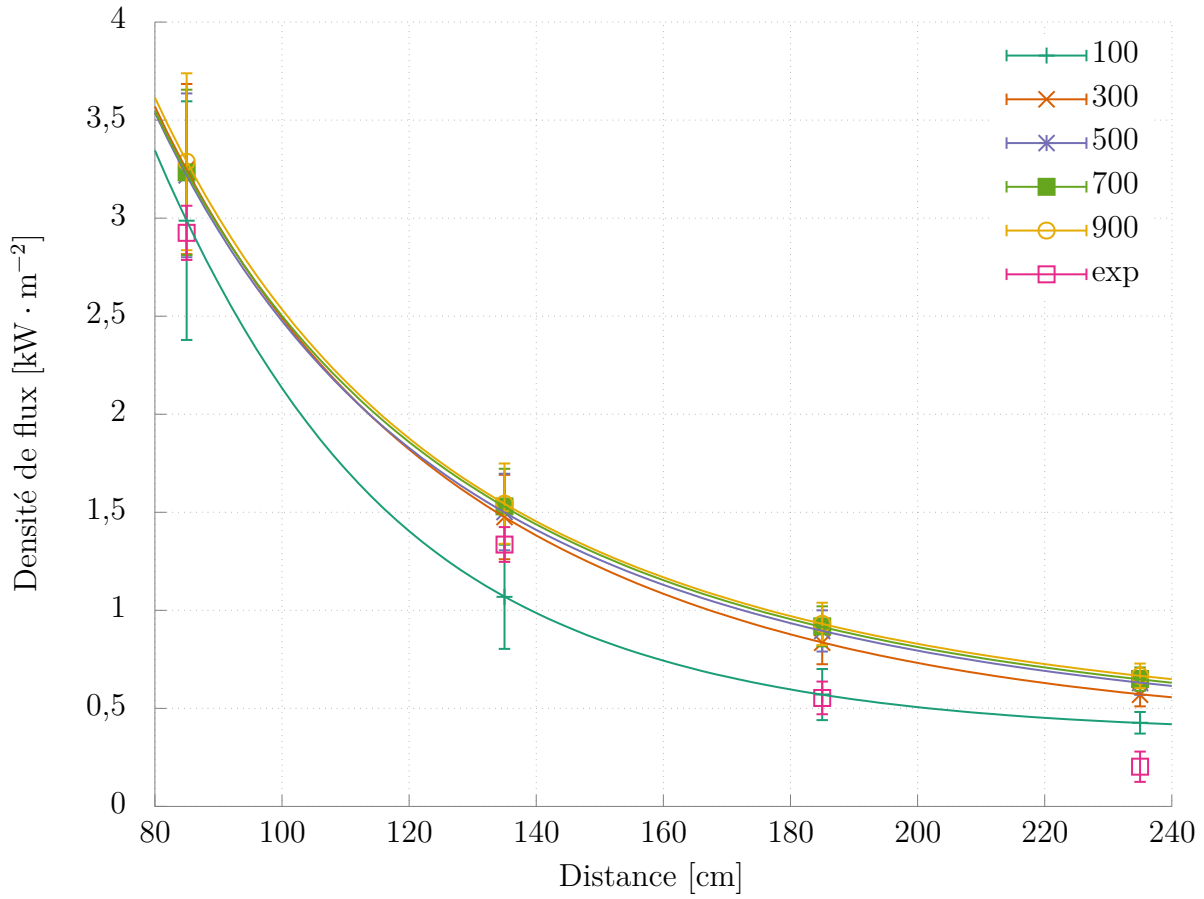


FIGURE 6.6 – Densité de flux reçue horizontalement pour différents nombres d'angles solides (mailles de 2 cm). Valeurs moyennes sur dix secondes pour les simulations et la phase stationnaire pour l'essai, les barres représentent les écarts-type.

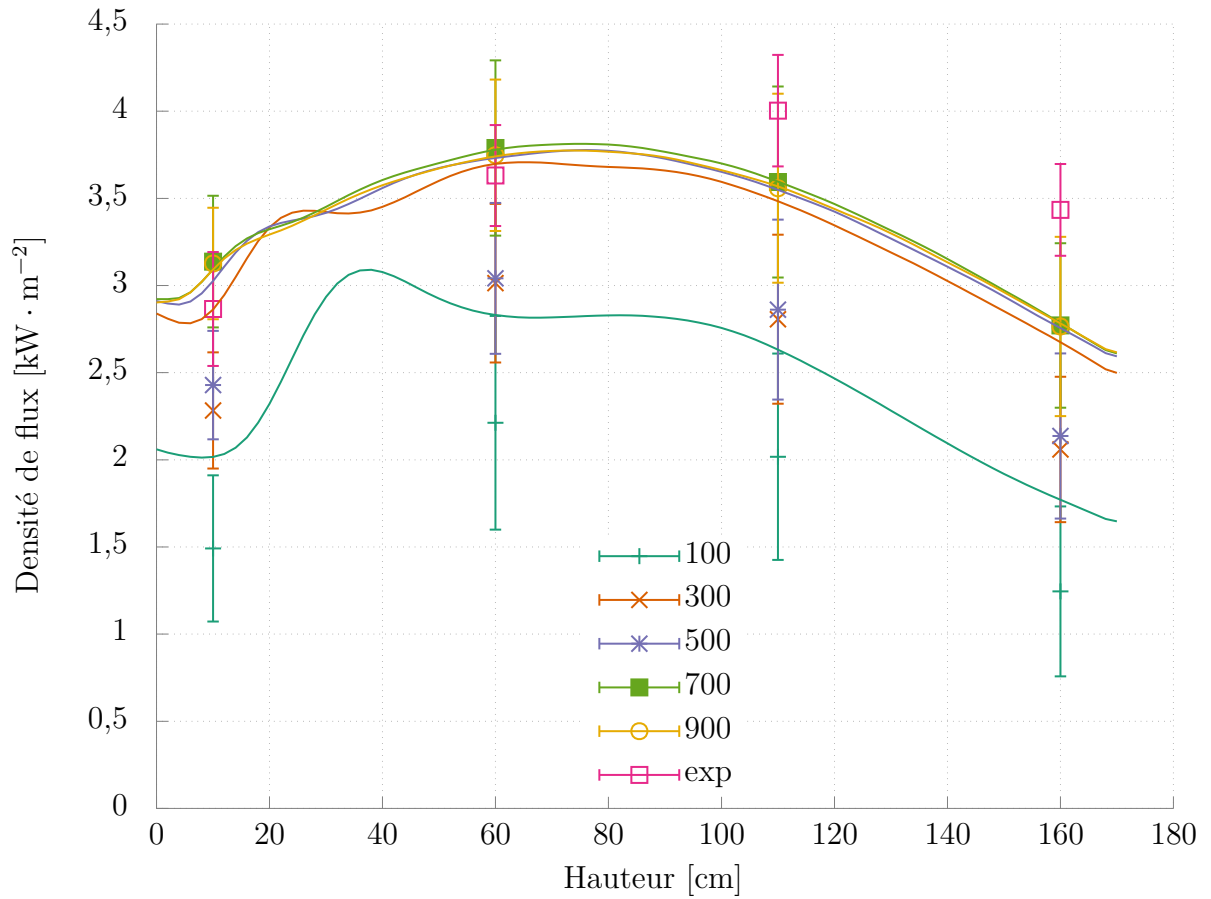


FIGURE 6.7 – Densité de flux reçue verticalement pour différents nombres d'angles solides (mailles de 2 cm). Valeurs moyennes sur dix secondes pour les simulations et la phase stationnaire pour l'essai, les barres représentent les écarts-type.

Section 6.2.a (p. ex. `NUMBER_RADIATION_ANGLES` = 500). Le terme source était défini en se basant sur le MLR mesuré pendant la phase stationnaire des essais, afin de déterminer si FDS est en mesure de modéliser correctement les transferts radiatifs à partir de cette donnée. Les simulations étaient conduites sur 20 s et les flux radiatifs incidents calculés avec la grandeur `INCIDENT HEAT FLUX` [103, p. 271], en moyennant les résultats entre 10 et 20 s. Ces derniers ont ensuite été comparés aux mesures faites lors des essais (Section 5.3) ainsi qu’aux prédictions du modèle par lancer de rayons (Section 6.1.a), comme présenté en Figures 6.8, 6.9 et 6.10.

TABLEAU 6.1 – Valeurs de certains paramètres utilisés pour les simulations de feux de kérosène avec FDS.

Paramètre	Valeur	Unité	Source
FORMULA	'C14H30'	–	[18, p. 559]
HEAT_OF_COMBUSTION	43200.	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	[18, p. 3466]
CO_YIELD	0.012	–	
SOOT_YIELD	0.042	–	
RADIATIVE_FRACTION	0.4	–	

Globalement, et comme pour le lancer de rayons, les prédictions FDS décrivent bien les tendances observées expérimentalement. Pour les plus petits foyers (Figure 6.8), les résultats FDS sont plus élevés mais néanmoins proches des mesures. Les distributions verticales (Figures 6.8a et 6.8c) semblent présenter des effets de rayons au niveau de la surface du foyer (hauteurs inférieures à 0,5 m) : une discrétisation angulaire plus fine pourrait résoudre ce problème, mais au prix de calculs plus longs.

Pour les bacs les plus grands (Figure 6.10), les prédictions sont encore meilleures qu’avec le modèle par lancers de rayons. Comme dit précédemment, les prédictions sont plus « simples » en champ lointain car moins sensibles aux propriétés de flamme (géométrie, émission), mais ces résultats restent néanmoins remarquables.

6.2.b.ii Essais mousse polyuréthane

Comme pour le kérosène, l’ensemble des essais sur mousse polyuréthane a été simulé avec FDS, en utilisant cette fois les paramètres dans le Tableau 6.2. Les résultats sont présentés en Figures 6.11, 6.12 et 6.13.

Ici aussi les tendances générales sont reproduites, bien que pour les flux faibles (Figures 6.11b ou 6.12d) les différences entre numérique et expérimental semblent importantes. Ces écarts sont toutefois à relativiser car à des niveaux de flux *a priori* négligeables lorsqu’il s’agit de propagation. De bons résultats sont observés pour les grands foyers (Figure 6.13c et 6.13d), qui étaient déjà bien reproduits par le lancer de rayons. Les prédictions de FDS sont encore meilleures pour certaines distributions à échelle intermédiaire (Figures 6.12a et 6.12c), pour lesquelles le code décrit parfaitement les mesures

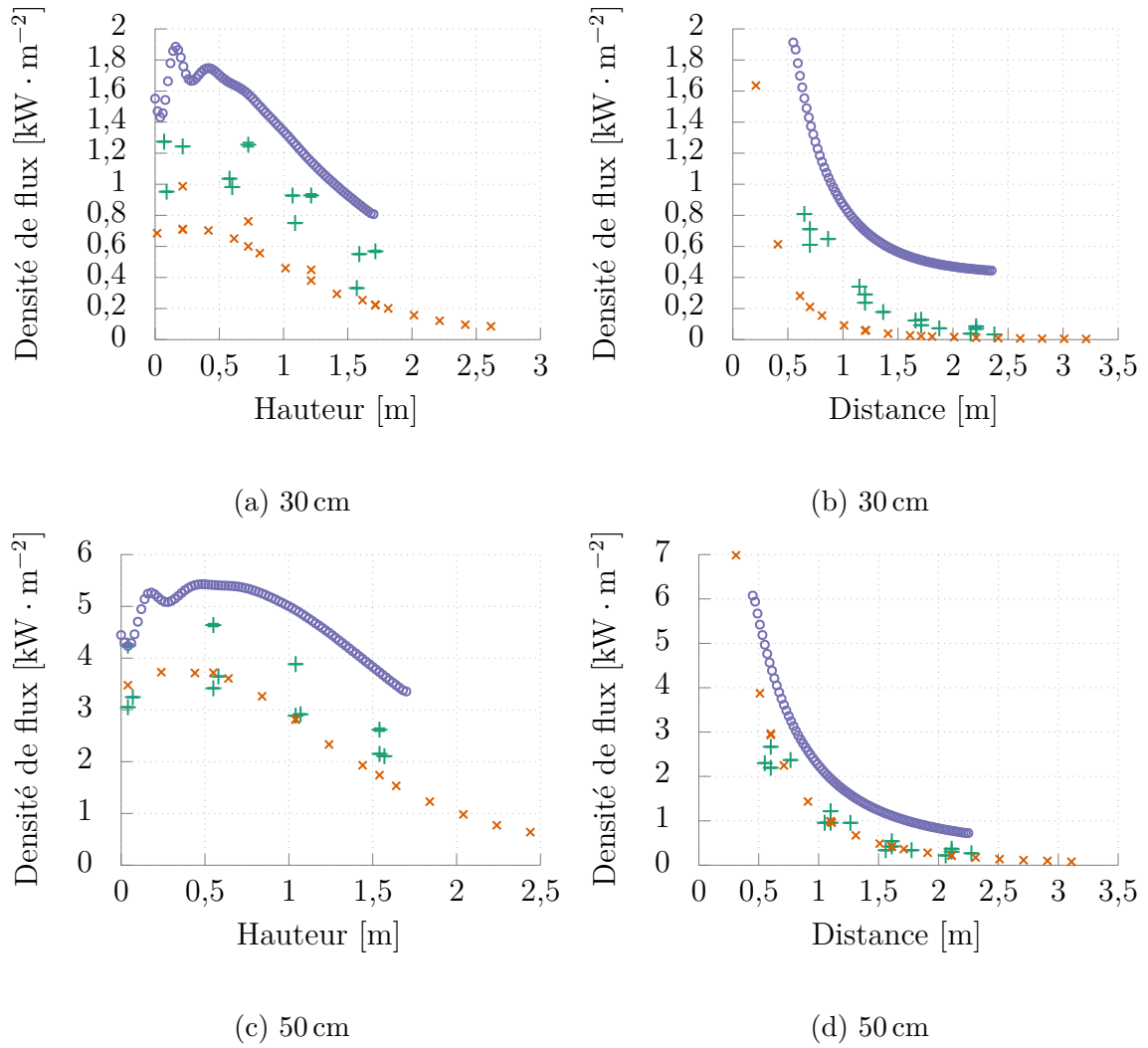


FIGURE 6.8 – Comparaison des densités de flux mesurées (+) et calculées, par lancer de rayons (x) et FDS (o), pour des foyers kérosène de 30 et 50 cm. Les figures de gauche représentent les évolutions à distance fixée ($(1,2 \pm 0,2)$ m), capteurs orientés verticalement, et les figures de droite les évolutions à hauteur fixée ($(0,0 \pm 0,2)$ m), capteurs orientés horizontalement.

TABLEAU 6.2 – Valeurs de certains paramètres utilisés pour les simulations de feux de mousse polyuréthane avec FDS.

Paramètre	Valeur	Unité	Source
FORMULA	'C6.3H7.1N102.1'	—	[18, p. 3447]
HEAT_OF_COMBUSTION	28000.	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Fournisseur
CO_YIELD	0.02775	—	[18, p. 3468] valeurs moyennes
SOOT_YIELD	0.1875	—	
RADIATIVE_FRACTION	0.52	—	

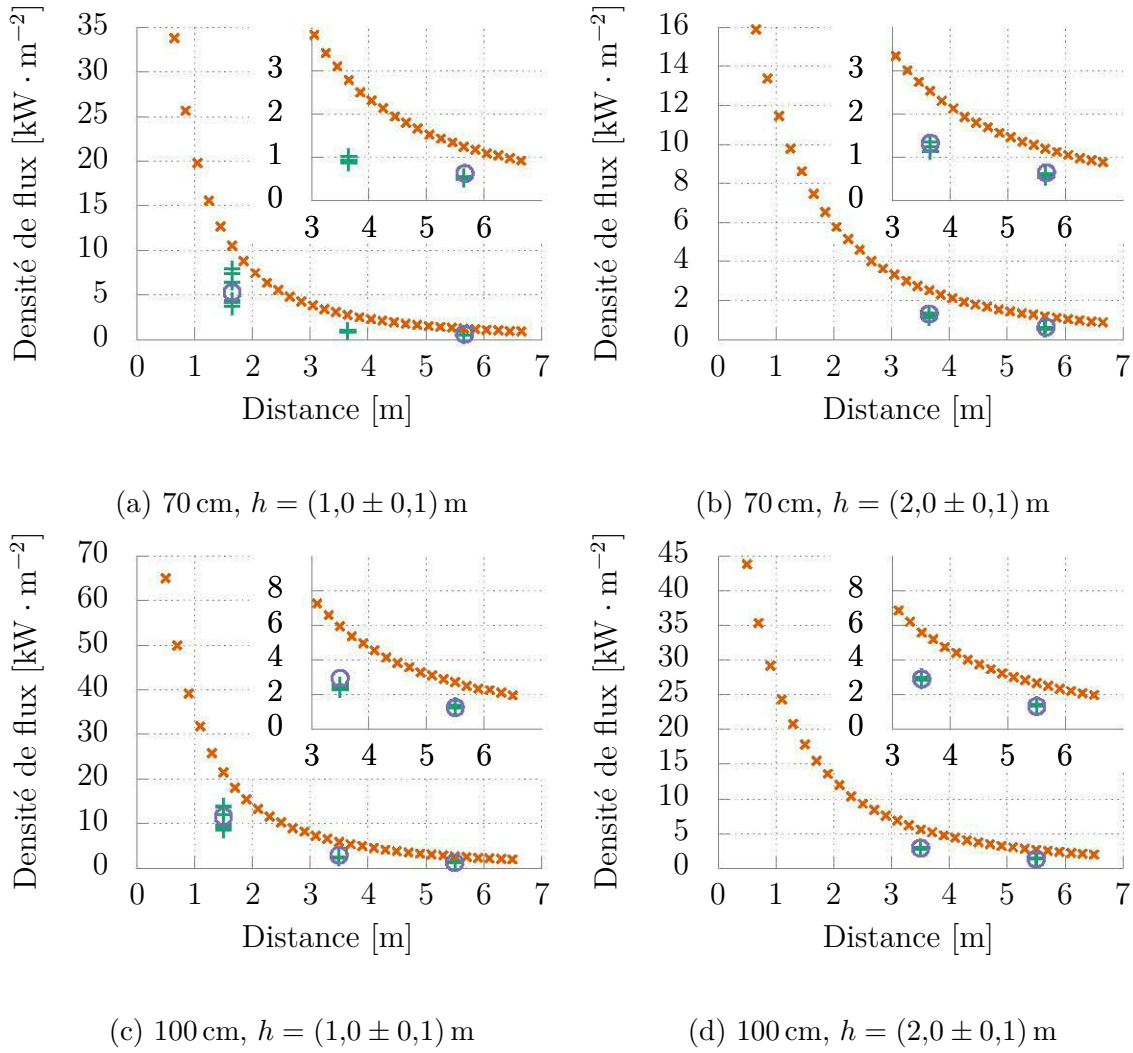


FIGURE 6.9 – Comparaison des densités de flux mesurées (+) et calculées, par lancer de rayons (×) et FDS (○), pour des foyers kérosène de 70 et 100 cm. Les figures de gauche et de droite représentent les évolutions en fonction de la distance par rapport au bord du foyer à deux hauteurs. Tous les capteurs étaient orientés verticalement.

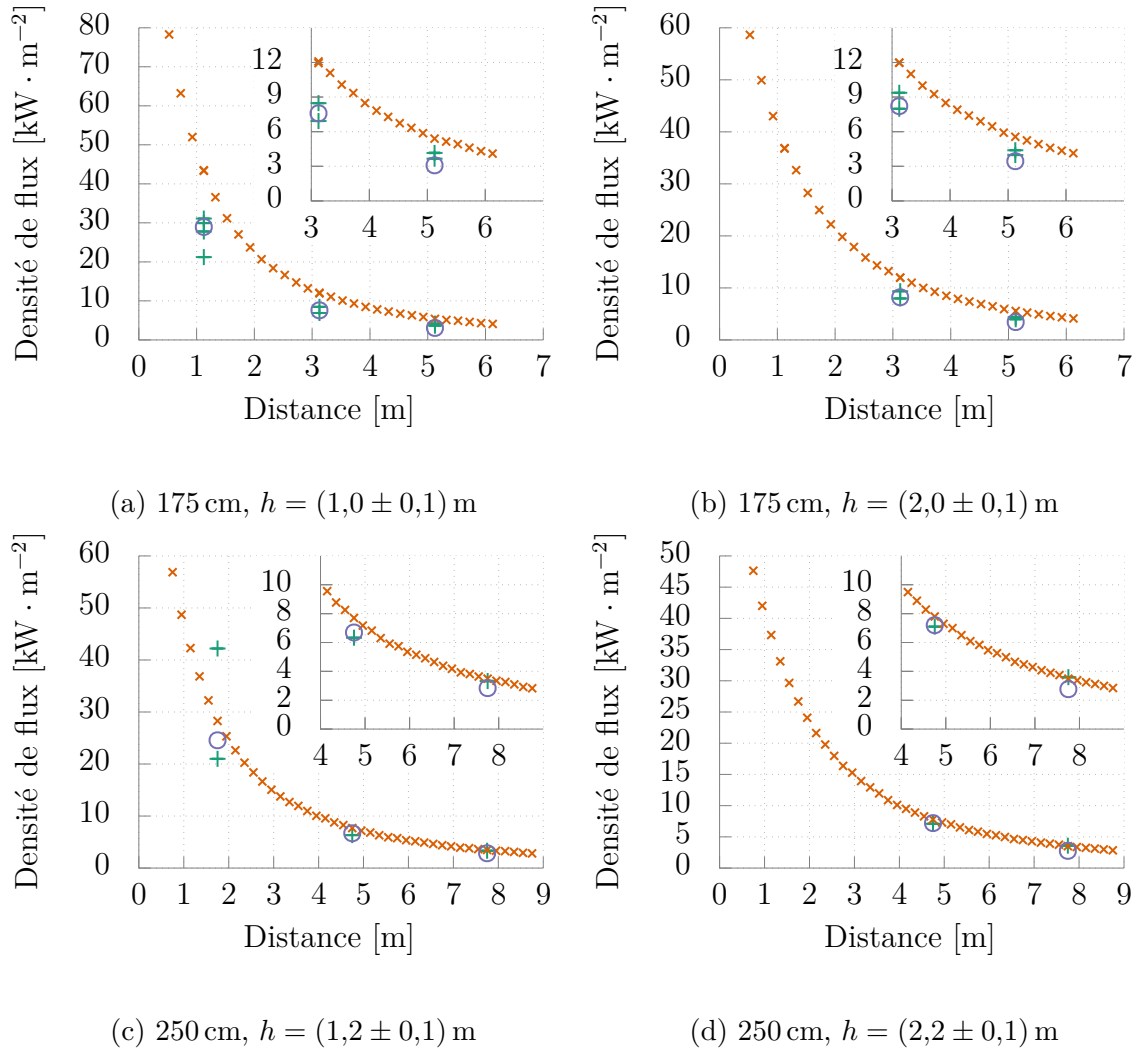


FIGURE 6.10 – Comparaison des densités de flux mesurées (+) et calculées, par lancer de rayons (x) et FDS (o), pour des foyers kérosène de 175 et 250 cm. Les figures de gauche et de droite représentent les évolutions en fonction de la distance par rapport au bord du foyer à deux hauteurs. Tous les capteurs étaient orientés verticalement.

expérimentales, là où le lancer de rayons donnait des résultats médiocres. Pour rappel, ces derniers sont des résultats préliminaires, et le modèle simplifié de rayonnement est certainement perfectible, par exemple en tenant compte des variations temporelles des propriétés de flamme (voir perspectives en Section 9.2).

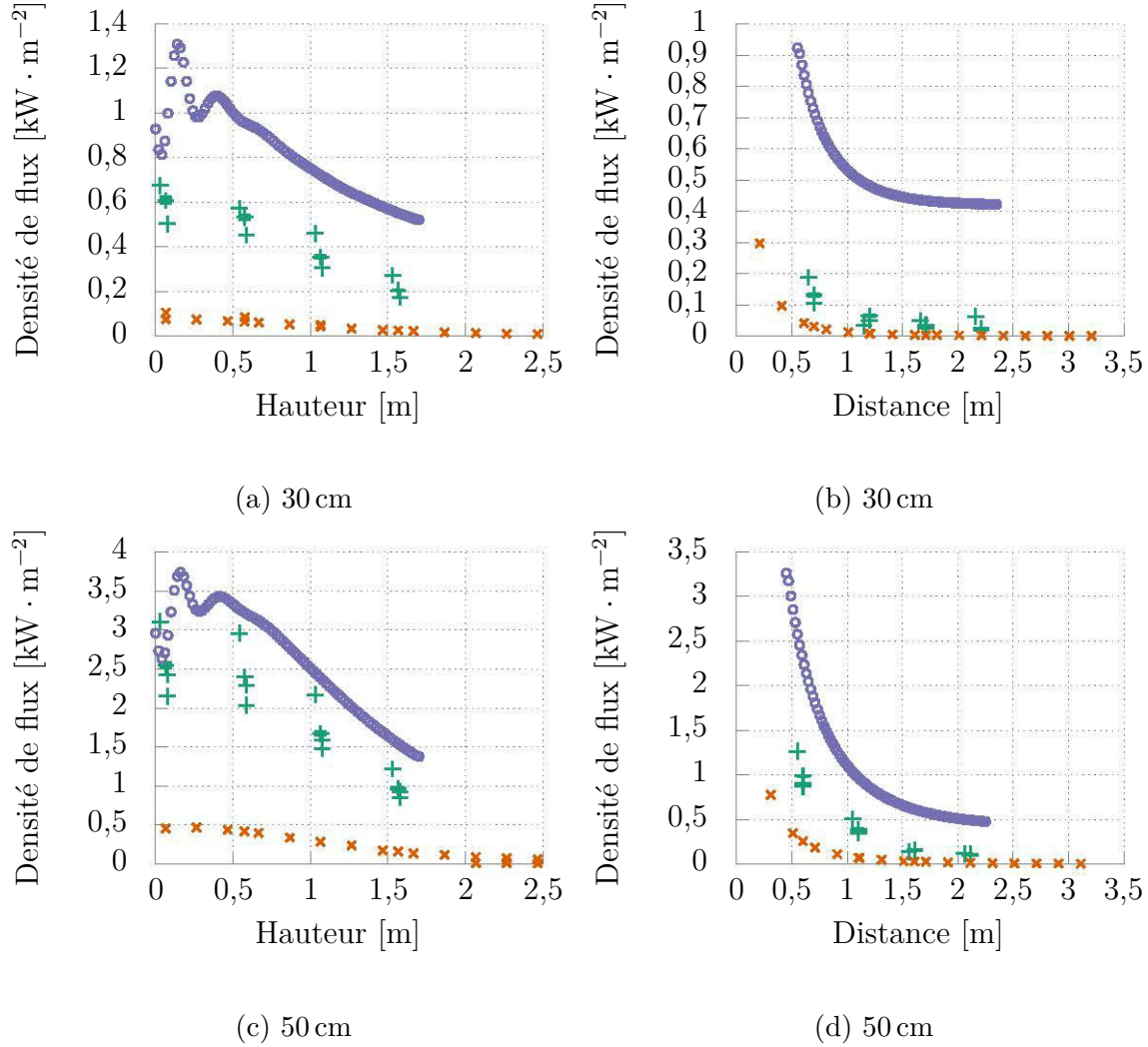


FIGURE 6.11 – Comparaison des densités de flux mesurées (+) et calculées, par lancer de rayons (×) et FDS (o), pour des foyers de mousse polyuréthane de 30 et 50 cm. Les figures de gauche représentent les évolutions à distance fixée ((1,1 ± 0,1) m), capteurs orientés verticalement, et les figures de droite les évolutions à hauteur fixée ((0,0 ± 0,1) m), capteurs orientés horizontalement.

6.2.b.iii Résumé

Pour conclure cette évaluation de la modélisation du rayonnement avec FDS, les différentes simulations montrent que les densités de flux calculées à différentes positions sont en bon accord avec l'expérience. Ceci est valable pour des flammes de kérosène et de

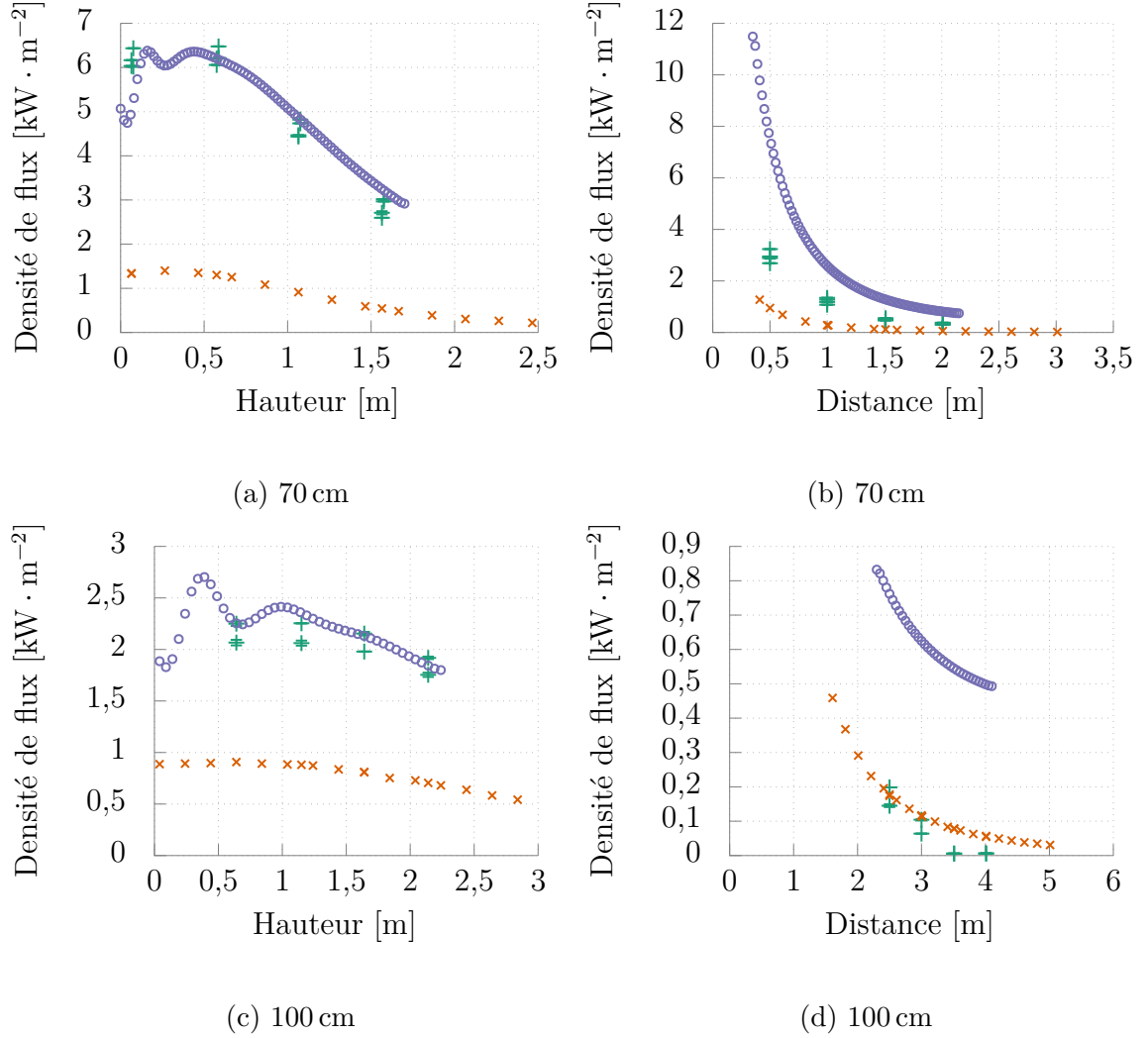
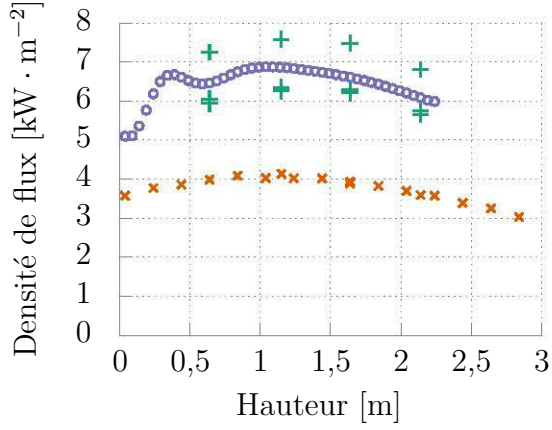
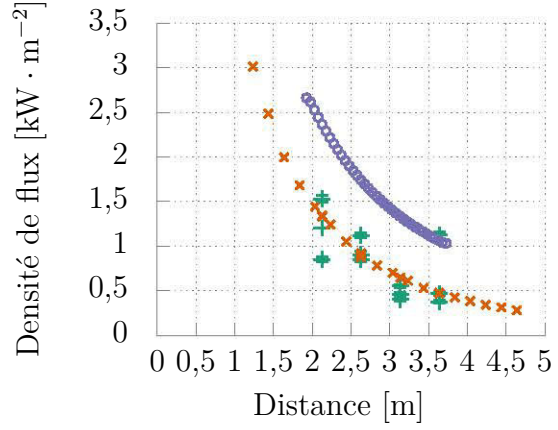


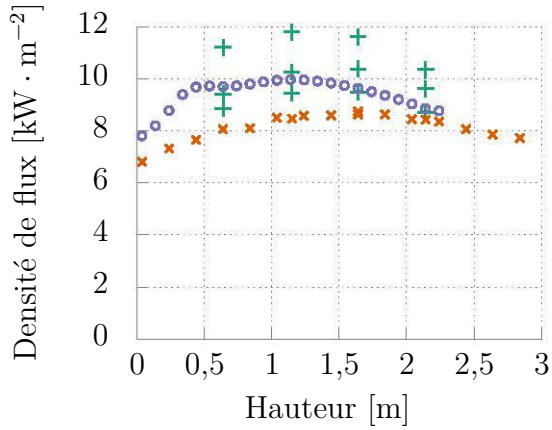
FIGURE 6.12 – Comparaison des densités de flux mesurées (+) et calculées, par lancer de rayons (×) et FDS (○), pour des foyers de mousse polyuréthane de 70 et 100 cm. Les figures de gauche représentent les évolutions à distance fixée ((1,0 ± 0,1) m ou (3,0 ± 0,1) m), capteurs orientés verticalement, et les figures de droite les évolutions à hauteur fixée ((0,0 ± 0,1) m), capteurs orientés horizontalement.



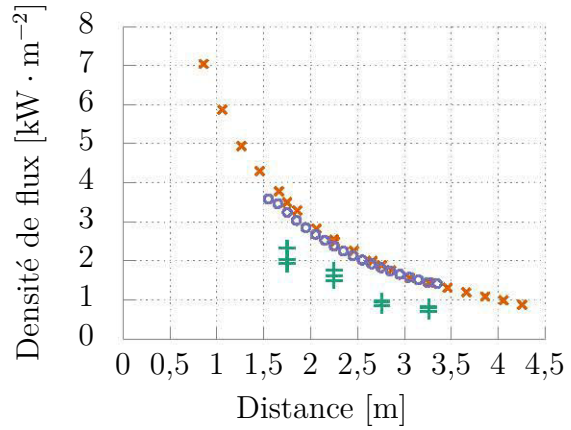
(a) 175 cm



(b) 175 cm



(c) 250 cm



(d) 250 cm

FIGURE 6.13 – Comparaison des densités de flux mesurées (+) et calculées, par lancer de rayons (x) et FDS (o), pour des foyers de mousse polyuréthane de 175 et 250 cm. Les figures de gauche représentent les évolutions à distance fixée ($(2,4 \pm 0,3)$ m), capteurs orientés verticalement, et les figures de droite les évolutions à hauteur fixée ($((0,0 \pm 0,1)$ m), capteurs orientés horizontalement.

mousse polyuréthane, ce qui signifie qu'en utilisant des données de la littérature et en imposant un terme source connu, FDS semble fournir une bonne estimation des transferts radiatifs. De plus, les résultats sont corrects pour une large gamme de tailles de foyer (0,3 à 2,5 m de côté), ce qui suggère que les flux prédits seront corrects tout au long d'une éventuelle propagation. C'est pourquoi FDS sera utilisé, en l'état pour ce qui est de la prise en compte du rayonnement, dans la suite des travaux.

Résumé

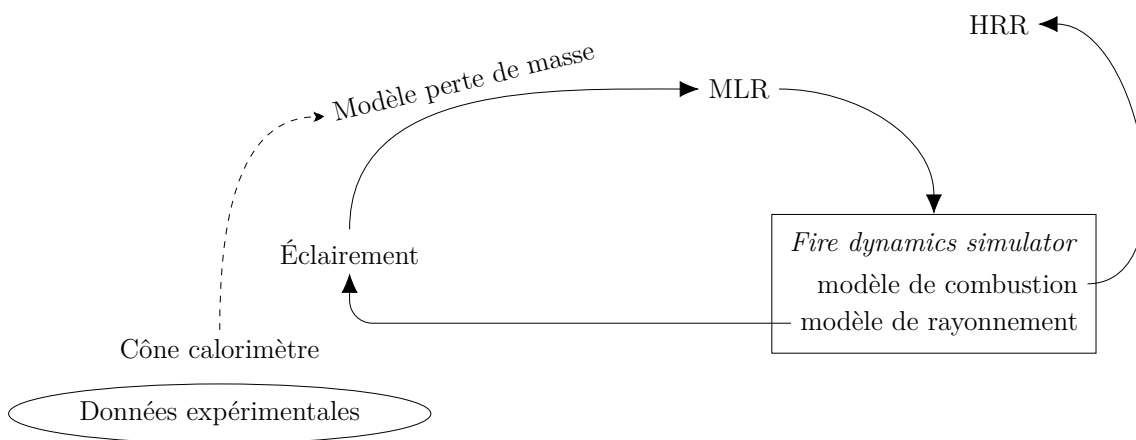
Étant donné son rôle prédominant dans l'entretien de la combustion et la propagation des incendies, le rayonnement des flammes a été caractérisé. L'ensemble du travail présenté ici fait d'ailleurs l'hypothèse qu'une bonne description du rayonnement thermique est suffisante, en première approche, pour déduire la décomposition du combustible (voir partie suivante).

Plusieurs caractéristiques des flammes, relatives à leur géométrie et à leur émission, ont été extraites pour les différents combustibles et sur toute la gamme de tailles de foyers. Le traitement d'images visibles a montré que les flammes de kérosène et de mousse polyuréthane peuvent être bien représentées par des formes simples comme un cylindre surmonté d'un cône et même un cône seul. L'émission des flammes, et plus particulièrement des suies qu'elles contiennent, a aussi été caractérisée, à l'aide de mesures spectrales d'opacimétrie et de spectrométrie, et modélisée comme celle d'un milieu homogène isotherme équivalent. Ses trois paramètres, notés β_0 , α et T , semblent n'être que faiblement dépendants de la taille du foyer, en tout cas pour le kérosène. Ceci signifie qu'il est envisageable de les déterminer lors d'essais de taille « raisonnable » (moins d'un mètre de large p. ex.) afin de prédire le rayonnement des flammes sur une gamme de tailles relativement importante (de 0,3 à 2,5 m de côté ici). Cette montée en échelle risque toutefois d'atteindre ses limites si les foyers utilisés pour obtenir les valeurs des paramètres sont trop petits (*a priori* moins de 0,30 m de côté), car les propriétés de ces flammes sont probablement trop différentes (optiquement minces, contribution négligeable des suies...). De leur côté, les meilleures formes simplifiées décrivant les flammes de kérosène et de mousse polyuréthane ne changent pas avec la taille du foyer, et il semble envisageable d'établir des relations de montée en échelle pour leurs paramètres (hauteurs et diamètre).

Les résultats expérimentaux ont été utilisés dans un modèle simplifié utilisant du lancer de rayons (méthode de Monte-Carlo réciproque) pour calculer les densités de flux radiatif reçues en différentes positions : les prédictions sont en bon accord avec les mesures effectuées lors des essais, surtout en considérant certaines hypothèses fortes qui ont été faites (flamme homogène, axisymétrique...). En plus de fournir des éléments sur des grandeurs rarement mesurées (coefficients d'absorption résolus spectralement, température équivalente déterminée par une mesure indépendante), le travail de « déconstruction expérimentale » – le rayonnement est caractérisé par la géométrie de la flamme d'une part et ses propriétés émissives d'autre part – et de « reconstruction numérique » – les résultats expérimentaux sont recombinaés dans un modèle – montre donc que les principaux

phénomènes contrôlant le rayonnement ont été identifiés, caractérisés et reproduits.

Même si le modèle simple utilisant la méthode de Monte-Carlo donne de bons résultats et a permis de mieux comprendre le rayonnement des flammes, il est plus simple d'utiliser un outil de simulation complet pour l'application finale du travail présenté ici. Ceci permet d'intégrer simplement le rayonnement aux autres modèles (p. ex. de combustion) nécessaires à la prédiction des grandeurs d'intérêt. C'est pourquoi FDS a été évalué sur sa capacité à prédire les flux incidents à différentes positions. Étant donné que les résultats de simulation sont proches de ceux observés expérimentalement, il a été décidé d'utiliser le code en l'état pour prédire l'éclairement reçu par le combustible. La description de l'approche choisie (initialement présentée ici) s'en trouve donc simplifiée comme illustré ci-dessous.



Mise à jour de l'approche choisie, initialement présentée ici.

Pour la suite, le rayonnement sera donc pris en compte par FDS en fonction du terme source : il s'agit maintenant d'adapter ce dernier en fonction de la sollicitation radiative, c'est-à-dire l'éclairement prédit par FDS. Ce travail fait l'objet de la partie suivante.

Quatrième partie

Propagation pour la mousse polyuréthane

Chapitre 7

Données expérimentales sur le comportement au feu de la mousse polyuréthane

Sommaire

7.1	Perte de masse au cône calorimètre	132
7.1.a	Résultats expérimentaux	132
7.1.b	Choix des fonctions	134
7.1.c	Corrélations avec l'éclairement	135
7.1.d	Prédictions	137
7.1.e	Discussion	140
7.2	Propagation à échelle réelle	141
7.2.a	Propagation en surface	141
7.2.b	Propagation en profondeur	146
7.2.c	Perte de masse	151
7.2.d	Comparaison des résultats	151

Étant donné qu'il joue un rôle central dans l'entretien de la combustion et la propagation, du moins pour les configurations étudiées ici, il a été choisi d'étudier l'impact du rayonnement sur le comportement au feu de la mousse polyuréthane, en réalisant des essais au cône calorimètre comme présenté dans la section suivante. Ensuite, une caractérisation de la propagation sur ce combustible sera menée. Les foyers de kérosène ne présentant pas de propagation à proprement parler, ils ne seront pas étudiés ici : ils étaient principalement destinés aux mesures et analyses faites sur la phase stationnaire, présentées dans la partie précédente.

7.1 Perte de masse au cône calorimètre

Les résultats présentés ci-après ont pour beaucoup été obtenus lors du travail de stage d'Adrien Leroy [137, 150]. L'objectif était de caractériser la mousse polyuréthane au cône calorimètre pour ensuite en modéliser le comportement en se basant uniquement sur un bilan thermique, sans s'intéresser aux réactions en phase condensée.

Seules les données de perte de masse seront exploitées ici, car cette grandeur a été jugée plus simple à prédire que le débit calorifique par exemple. En effet, ce dernier est influencé par de nombreux paramètres, comme la concentration en oxygène dans le milieu, tandis qu'il semble raisonnable de considérer que la perte de masse est principalement influencée par les transferts thermiques. Elle a donc plus de chances d'être bien reproduite par un modèle uniquement basé sur un bilan thermique comme décrit ci-après.

L'objectif des sections suivantes est de présenter les données expérimentales de MLR ainsi que leur utilisation pour développer et évaluer une corrélation prédisant la vitesse de perte de masse au cône calorimètre à différents éclaircements.

7.1.a Résultats expérimentaux

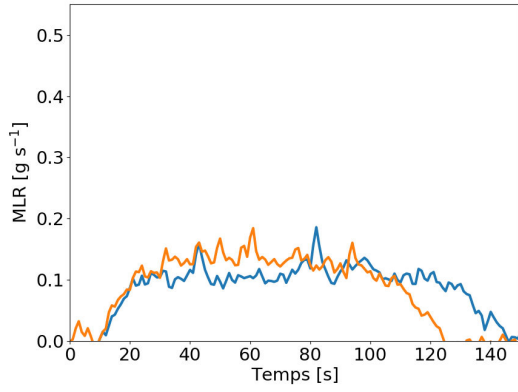
Avant de présenter les résultats, il est intéressant de remarquer que la mousse utilisée n'a jamais produit une quantité significative de liquide pendant sa combustion, y compris lors de brûlages supplémentaires en configuration verticale, et se comportait donc différemment de ce qui est généralement décrit dans la littérature (p. ex. [6, 151]). L'influence de cette différence sur les résultats et l'exploitation qui suivent n'a pas pu être déterminée.

Les vitesses de perte de masse mesurées au cône calorimètre pour des éclaircements de 20 à $70 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ sont présentées en Figure 7.1.

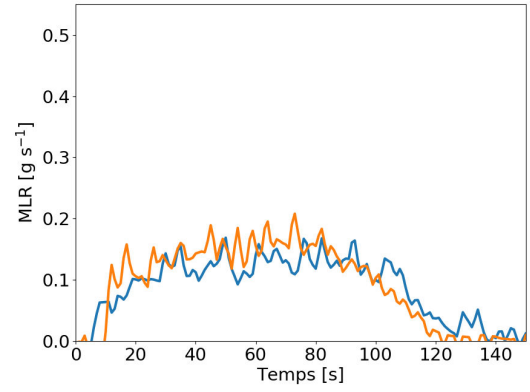
Ces figures montrent la bonne répétabilité des essais. Pour les éclaircements inférieurs à $45 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, le MLR est quasi-constant au cours du temps. En revanche, pour des densités de flux plus importantes, un comportement en deux phases est observé. D'abord, le MLR croît jusqu'à une valeur plateau (notée par la suite MLR_{first}), puis il augmente à nouveau vers sa valeur maximale (MLR_{max}), avant de décroître jusqu'à extinction. Cette allure, qui concorde avec la littérature [124, 152], est schématisée sur la Figure 7.2.

Lors de la première partie, illustrée en rouge et généralement attribuée à la dépolymérisation de la mousse et consommation du TDI [108, 109], environ un tiers de la masse de l'échantillon est consommée, ce qui correspond à la proportion de TDI dans la mousse : son temps de fin est appelé $t_{1/3}$. Les autres paramètres reportés sur la figure correspondent aux fonctions choisies et sont présentés ci-après.

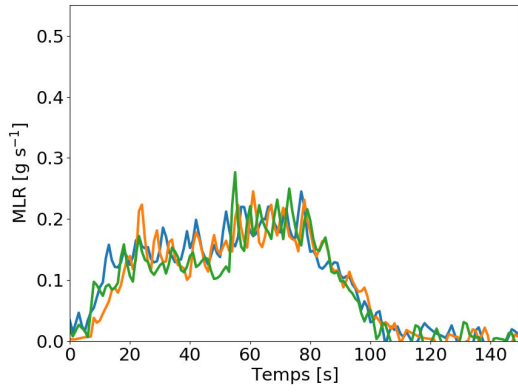
Afin de pouvoir évaluer les prédictions de la corrélation finale, les résultats expérimentaux à 20 ; 50 et $70 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ ne seront pas utilisés lors de la construction de celle-ci.



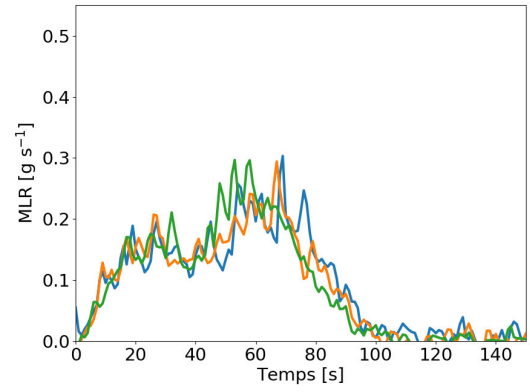
(a) $20 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$



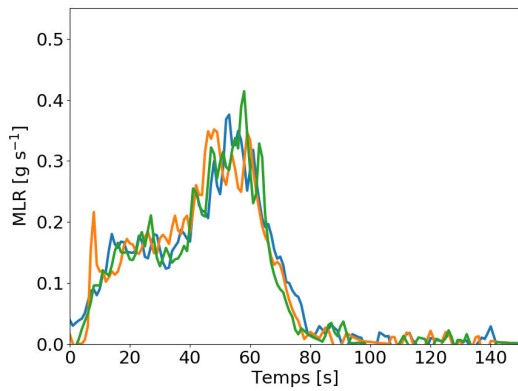
(b) $25 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$



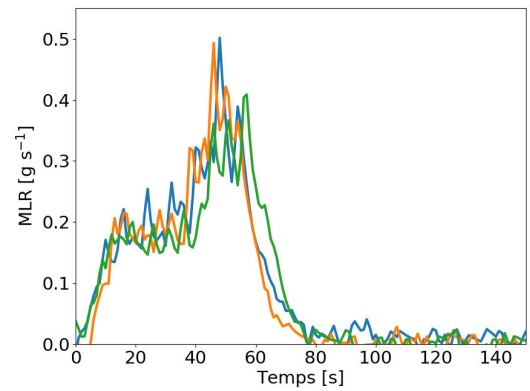
(c) $45 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$



(d) $50 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$



(e) $60 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$



(f) $70 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$

FIGURE 7.1 – Vitesses de perte de masse (MLR) expérimentales au cône calorimètre à différents éclaircements.

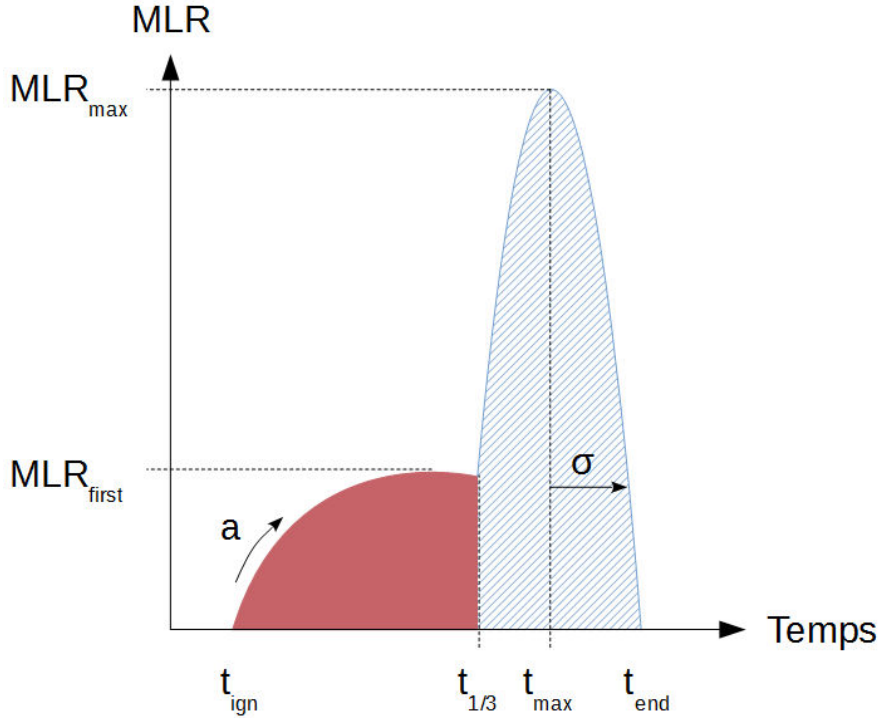


FIGURE 7.2 – Schéma des MLR observés au cône calorimètre pour des éclaircements de $45 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ et plus, avec le nom des paramètres utilisés par la suite.

7.1.b Choix des fonctions

Le comportement en deux étapes des courbes de MLR (Figures 7.1 et 7.2) suggère l'utilisation de deux fonctions pour en décrire l'évolution temporelle, l'objectif étant qu'elles décrivent convenablement la vitesse de perte de masse tout en restant « simples » (nombre limité de paramètres p. ex.).

La fonction choisie pour la première phase (remplissage rouge sur la Figure 7.2) est une tangente hyperbolique, telle que

$$MLR(t) = MLR_{\text{first}} \tanh(at), \quad (7.1)$$

avec MLR_{first} l'asymptote de la tangente hyperbolique, c'est-à-dire le MLR de la phase stationnaire, et a (en $[\text{s}^{-1}]$) décrivant la vitesse de croissance vers cette asymptote : plus a est élevé, plus la croissance vers MLR_{first} est rapide.

La seconde partie (hachures bleues sur la Figure 7.2) a été approchée par une gaussienne, c'est-à-dire

$$MLR(t) = MLR_{\text{max}} \exp\left(-\frac{(t - t_{\text{max}})^2}{2\sigma^2}\right), \quad (7.2)$$

où MLR_{max} est le maximum de MLR, t_{max} le temps auquel il est atteint (valeur centrale de la gaussienne) et σ l'écart-type (largeur de la courbe).

7.1.c Corrélations avec l'éclairement

Maintenant que deux fonctions ont été choisies pour décrire l'évolution temporelle du MLR, il faut établir des corrélations pour décrire la dépendance à l'éclairement, que l'on peut observer d'un graphe à l'autre en Figure 7.1. Pour cela, chaque paramètre de ces équations est corrélé à la densité de flux imposée à l'échantillon lors des essais. Idéalement, ils auraient dû être corrélés au flux net, qui représente la chaleur réellement disponible pour la décomposition du combustible. Toutefois, il n'était pas possible de déterminer cette grandeur lors des essais, et son calcul reste délicat dans les codes de simulation. Le flux radiatif incident $\dot{q}''$ a donc été utilisé pour construire le modèle, en supposant que le rayonnement est le principal moteur de la décomposition et que les pertes par convection et conduction sont négligeables. À noter que les éclairements considérés ici pour établir les corrélations sont ceux mesurés avant l'essai, à l'aide du fluxmètre du cône calorimètre [112] : ils ne tiennent par exemple pas compte de l'éclairement provenant de la flamme²⁹, des pertes thermiques par conduction ou des échanges convectifs. Un bilan thermique plus complet serait nécessaire pour déterminer à quel flux thermique les échantillons sont réellement soumis.

Comme mentionné précédemment, seuls les résultats expérimentaux à 25, 45 et 60 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ (moyenne des différentes répétitions pour chaque éclairement) ont été utilisés pour construire les corrélations. Les temps d'inflammation t_{ign} et d'extinction t_{end} étaient déterminés par l'opérateur lors des essais, et $t_{1/3}$ a été défini comme le temps t_i qui minimise

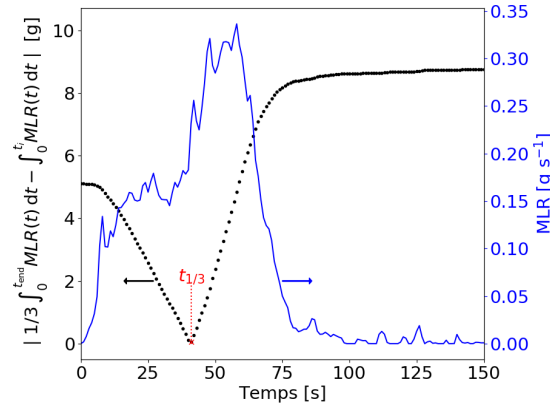
$$\left| \frac{1}{3} \int_0^{t_{\text{end}}} MLR(t) dt - \int_0^{t_i} MLR(t) dt \right|. \quad (7.3)$$

Cette procédure, effectuée avec la fonction `numpy.trapz` (méthode des trapèzes sous Python), est illustrée en Figure 7.3a pour $60 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. Les ajustements des deux parties avec les fonctions choisies précédemment (Équations 7.1 et 7.2), réalisés à l'aide de la fonction `scipy.optimize.curve_fit` (Python), sont aussi reportés en Figures 7.3b et 7.3c respectivement.

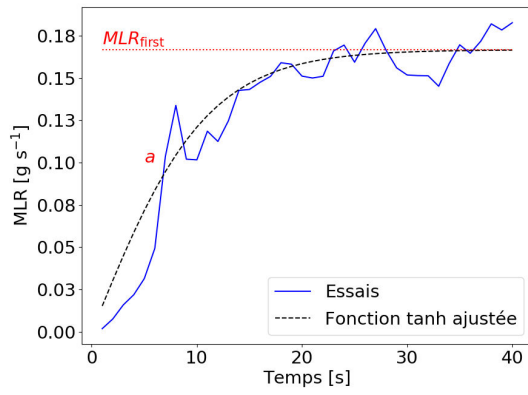
Les valeurs obtenues pour chaque paramètre peuvent ensuite être reliées à l'éclairement, comme illustré en Figure 7.4 pour MLR_{first} (corrélation linéaire) et pour MLR_{max} (corrélation exponentielle).

Les corrélations obtenues sont données dans le Tableau 7.1 à titre d'exemple. La valeur des paramètres, tout comme la forme des corrélations ou même des fonctions choisies précédemment (Équations 7.1 et 7.2) ne doivent pas être considérées comme des propriétés intrinsèques de ce combustible ou de sa décomposition, et pourraient par exemple changer si d'autres résultats étaient considérés (autres répétitions, éclairements différents...). L'objectif est ici de présenter une démarche, à savoir la description du MLR au niveau temporel puis en fonction de l'éclairement à l'aide de relations basiques. Malgré sa simplicité, cette approche peut produire de bons résultats, comme illustré dans la section

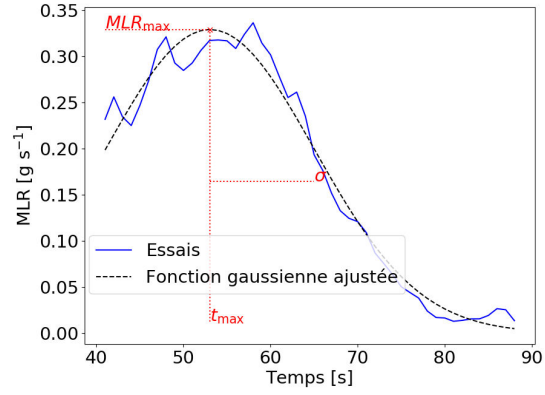
29. Une correction sera faite concernant ce point lors de la mise en application du modèle (Section 8.2.b) : une contribution estimée d'après la littérature sera appliquée, à savoir entre 10 et $40 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ (voir p. ex. [153, p. 145, 154]).



(a) Détermination de $t_{1/3}$ avec l'Équation 7.3.



(b) Première phase ajustée avec l'Équation 7.1.



(c) Seconde phase ajustée avec l'Équation 7.2.

FIGURE 7.3 – Détermination des paramètres à partir du MLR expérimental (moyenne des résultats à $60 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$).

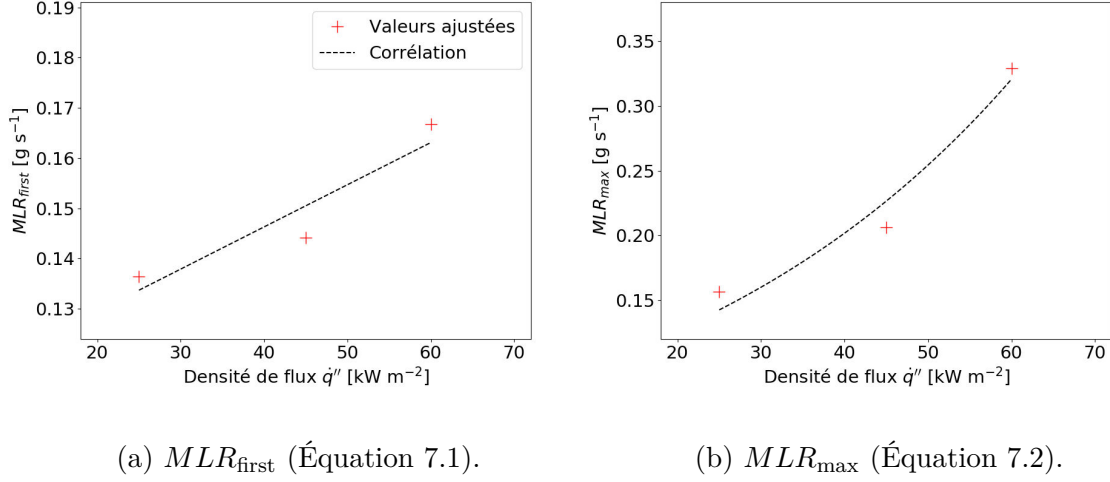


FIGURE 7.4 – Exemples de valeurs pour des paramètres des Équations 7.1 et 7.2 en fonction de l'éclairement (croix rouges), ainsi que les corrélations retenues (traitillés noirs).

suivante. Elle pourrait être adaptée à d'autres matériaux présentant le même comportement ou non. Une méthode basée sur la même philosophie (pas de modélisation des réactions en phase condensée) a par exemple été utilisée avec succès pour des matériaux formant du *char* [155].

Parmi tous les paramètres, seul σ pourra être ré-ajusté par la suite, pour assurer la continuité entre les deux parties de la corrélation complète, définie comme

$$MLR(t, \dot{q}'') = \begin{cases} MLR_{\text{first}}(\dot{q}'') \tanh(a(\dot{q}'') t), & t_{\text{ign}}(\dot{q}'') \leq t < t_{1/3}(\dot{q}'') \\ MLR_{\text{max}}(\dot{q}'') \exp\left(-\frac{(t - t_{\text{max}}(\dot{q}''))^2}{2 \sigma(\dot{q}'')^2}\right), & t_{1/3}(\dot{q}'') \leq t \leq t_{\text{end}}(\dot{q}'') \end{cases} \quad (7.4)$$

Ainsi, la valeur de σ pourra être augmentée jusqu'à satisfaire

$$MLR_{\text{first}}(\dot{q}'') \tanh(a(\dot{q}'') t_{1/3}(\dot{q}'')) = MLR_{\text{max}}(\dot{q}'') \exp\left(-\frac{(t_{1/3}(\dot{q}'') - t_{\text{max}}(\dot{q}''))^2}{2 \sigma(\dot{q}'')^2}\right). \quad (7.5)$$

La valeur finale de σ est donnée en Figure 7.5 : elle est proche de la corrélation initiale pour les éclairements les plus élevés, et s'en éloigne au fur et à mesure que l'éclairement diminue. Ceci constitue une information importante quant à l'applicabilité de la corrélation complète (Équation 7.4), comme expliqué ci-après.

7.1.d Prédiction

Les prédictions de l'Équation 7.4 ont été comparées aux résultats expérimentaux pour 20 ; 50 et 70 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$, comme présenté en Figure 7.6. Pour rappel, ces éclairements n'ont pas été utilisés dans l'établissement des corrélations.

TABLEAU 7.1 – Corrélations entre les paramètres des Équations 7.1 et 7.2 et l'éclairement.

Nom	Unité	Valeurs du paramètre	Corrélation ($\dot{q}''$ en $[\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}]$)
t_{ign}	s	Renseignées par l'opérateur lors des essais	$1/t_{\text{ign}} = 0,0159 \dot{q}'' - 0,252$
t_{end}	s		$t_{\text{end}} = -1,89 \dot{q}'' + 188$
$t_{1/3}$	s	Minimisation de l'Équation 7.3	$t_{1/3} = -0,362 \dot{q}'' + 63,0$
a	s^{-1}	Ajustement du MLR avec l'Équation 7.1 ($t_{\text{ign}} \leq t < t_{1/3}$)	$a = 2,81 \dot{q}'' + 49,4$
MLR_{first}	$\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$		$MLR_{\text{first}} = 0,000814 \dot{q}'' + 0,114$
MLR_{max}	$\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	Ajustement du MLR avec l'Équation 7.2 ($t_{1/3} \leq t \leq t_{\text{end}}$)	$MLR_{\text{max}} = 0,0812 \exp(0,0228 \dot{q}'')$
t_{max}	s		$t_{\text{max}} = -0,586 \dot{q}'' + 90,1$
σ	s		$\sigma = -0,425 \dot{q}'' + 38,3$

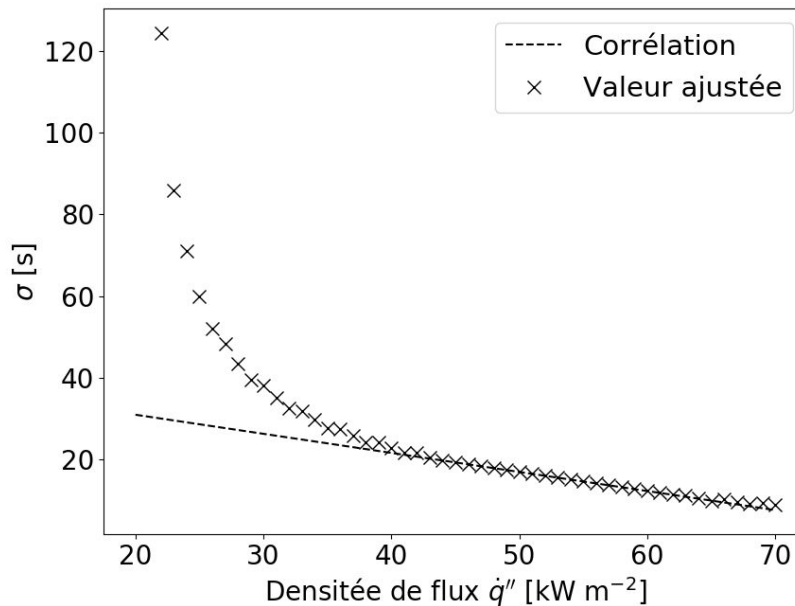


FIGURE 7.5 – Valeurs finales pour σ (croix noires), et corrélation initiale (traitillés noirs).

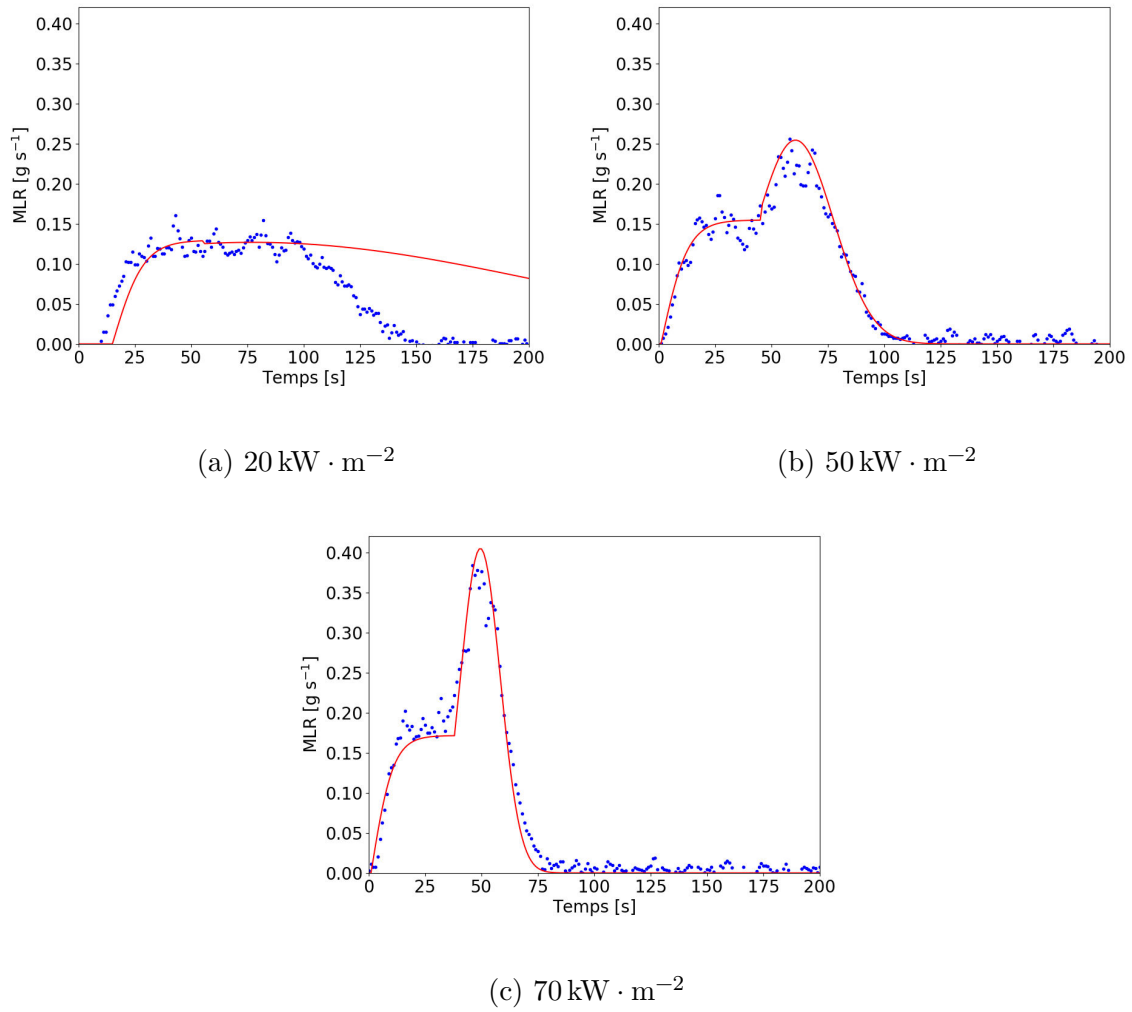


FIGURE 7.6 – Comparaison des MLR expérimentaux (moyennes des répétitions, points bleus) et prédits (traits rouges) pour différents éclaircements.

La prédiction à $20 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ n'est pas satisfaisante, car la décroissance n'est pas correctement reproduite et le temps d'inflammation est surestimé. En revanche pour 50 et $70 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ (mais aussi 45 et $60 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, non présentés ici), les prédictions sont en bon accord avec les expériences malgré la simplicité des fonctions et le nombre limité d'essais utilisés pour déterminer la valeur de leurs paramètres. La mauvaise prédiction à bas flux est discutée dans la section suivante.

7.1.e Discussion

Il était prévisible que la corrélation ne puisse pas reproduire les résultats expérimentaux à $20 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. En effet, le comportement en deux phases, sur lequel a été basée la construction de l'Équation 7.4, n'a pas été observé pour les éclaircissements de 20 et $25 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, potentiellement parce que les pertes thermiques sont plus importantes que ces niveaux de sollicitation. Si les données expérimentales n'avaient pas été disponibles, par exemple en ne disposant que d'essais au cône calorimètre à $45 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ ou plus, cette limite aurait tout de même pu être détectée, en analysant les valeurs finales du paramètre σ (Figure 7.5). Ainsi, une augmentation nette de ce paramètre est le signe que la forme choisie pour la corrélation n'est plus acceptable, et risque de produire des résultats non-physiques. Ceci est confirmé par l'allure du MLR prédit (Figure 7.6a) mais aussi par les valeurs de masse brûlée (intégrales des MLR) prédites par le modèle, qui augmentent avec σ (voir Figure 7.7), et dépassent finalement la masse des échantillons (représentée ici par le rectangle bleu, c.-à-d. $(14 \pm 1) \text{ g}$).

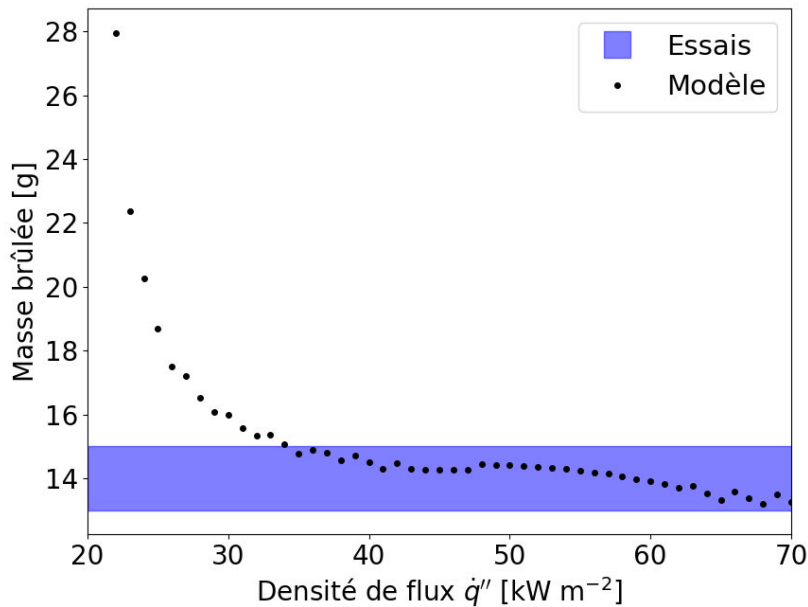


FIGURE 7.7 – Masse brûlée (intégrale du MLR), pour les essais (aire bleue) et le modèle (points noirs).

Il semble raisonnable de dire que la corrélation développée ici (Équation 7.4) est applicable à partir de $40 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, et jusqu'à au moins $70 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. En dessous de cet intervalle, le comportement en deux phases n'est plus observé et la seconde fonction (gaussienne) produit donc des résultats non-physiques. Au-dessus de cet intervalle, il est probable que les prédictions se dégradent peu à peu, avec une potentielle sous-estimation de la masse brûlée, comme semblent le suggérer les Figures 7.7 (voir valeur à $70 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$) et 7.6c (t_{end} légèrement sous-estimé et/ou gaussienne trop étroite). Le domaine d'applicabilité de la corrélation reste tout de même raisonnable, et pourrait sûrement être étendu en choisissant d'autres fonctions et/ou corrélations.

Il faut souligner que la corrélation établie ici n'est valable que pour prédire le MLR d'échantillons de mousse polyuréthane de 5 cm d'épaisseur, au cône calorimètre et avec le porte-échantillon choisi en Section 3.2.b.i. Des pistes pour prendre en compte un éventuel changement d'épaisseur entre la petite et la grande échelle, similaires à ce qui avait été proposé pour le *Model III* du CBUF [127] et le modèle de Sayada [129], sont présentées en Section 8.2.d.

7.2 Propagation à échelle réelle

En plus de caractériser la mousse polyuréthane par sa perte de masse, il a été choisi d'étudier la propagation à échelle réelle, notamment afin d'évaluer si une caractérisation à petite échelle serait suffisante pour décrire un foyer de grandes dimensions, ou si des phénomènes particuliers étaient importants à prendre en compte (p. ex. creusement de la mousse ou production de gouttes enflammées). Des essais ont donc été réalisés sur des échantillons de 30 à 250 cm de côté (surface carré, épaisseur de 20 cm, voir présentation des combustibles en Section 3.1.a), sur les sites de la Bouzule (PROMETHEI) et du CNPP, en effectuant différentes mesures (vidéos visibles, températures. . .) décrites en Section 4.3. Les résultats sont présentés dans les sections suivantes.

7.2.a Propagation en surface

7.2.a.i Résultats du traitement vidéo

Le traitement d'images présenté en Section 4.3.b.ii a permis d'analyser la propagation du feu en surface des blocs de mousse polyuréthane. Une fois extraits, les fronts de flamme ont été ajustés par des ellipses et les rayons de la zone en feu déterminés au cours du temps : des exemples de ces résultats sont donnés en Figure 7.8 pour des essais à PROMETHEI et au CNPP (blocs de 30 et 175 cm de côté).

Les valeurs données en Figure 7.8 illustrent la bonne répétabilité des essais. Les écarts un peu plus importants pour les blocs de 175 cm pourraient être dus à un angle de vue différent pour les caméras utilisées au CNPP pour les échantillons de grandes dimensions. En effet, la puissance des foyers ne permettaient pas d'installer les caméras aussi près et

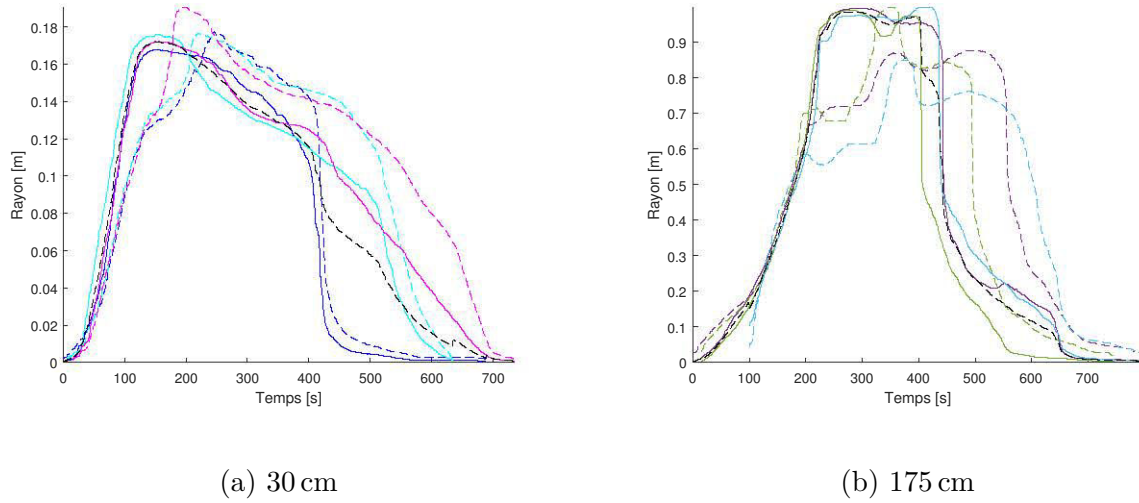


FIGURE 7.8 – Rayons de la zone en feu calculés par traitement d’images pour les essais sur des blocs de 30 et 175 cm de côté. Rayons selon la direction x en traits pleins et y en traitillés (y étant l’axe de la caméra, voir Figure 4.8), une couleur par répétition.

en surplomb qu’à PROMETHEI, et l’angle de vue pour les essais à grande échelle était donc plus « rasant », rendant les images sensiblement plus difficiles à traiter. L’accord entre les répétitions reste bon pour toutes les tailles de bloc, et en particulier pour les rayons selon la direction x (traits pleins), c’est-à-dire la largeur du bloc perpendiculaire à l’axe de la caméra (voir schéma en Figure 4.8). Les valeurs selon y sont aussi proches, en particulier pour la phase de croissance qui est particulièrement importante pour décrire la dynamique du feu. De plus, seule cette partie de la propagation peut réellement être caractérisée avec le traitement utilisé ici, car il n’a de sens que lorsque la zone en feu se limite à la surface des blocs. Une fois que la flamme a atteint les bords de l’échantillon les résultats ne sont plus exploitables. C’est probablement ce qui explique la dispersion des valeurs selon y en milieu et fin d’essai. En effet l’orientation des caméras fait qu’un bord des blocs est visible dans la direction y (voir schéma en Figure 4.8) : les mesures suivant cet axe sont donc probablement perturbées lorsque la flamme descend sur les bords, une fois que toute la face supérieure est enflammée. Le traitement des vidéos ne permet pas, en l’état, d’analyser la propagation du feu sur les bords des blocs. À l’heure actuelle ce phénomène ne pourra pas non plus être caractérisé par les autres moyens de mesure, et ne sera pas pris en compte dans les simulations. Étant données ces limites, les représentations suivantes seront focalisées sur la phase de croissance (propagation en surface des blocs).

Vus les résultats en Figure 7.8 et les explications précédentes, il semble raisonnable de considérer que la propagation était circulaire, ou du moins que les rayons suivant x et y sont comparables. Pour la suite, seuls les rayons selon x seront donc utilisés, en considérant une moyenne pour chaque taille de bloc. Ces grandeurs sont présentées en Figure 7.9 et sont analysées plus en détails dans la section suivante. Il est d’ores et déjà possible de constater que la phase de croissance présente des similarités quelle que soit la taille du bloc. Ceci suggérerait qu’il n’y a pas d’effet de bords, car les courbes suivent la même

tendance jusqu'à atteindre le côté des blocs (voir droites en traitillés). Cette observation serait compatible avec un pilotage de la propagation par le rayonnement thermique, ou du moins le fait qu'il soit prédominant par rapport à la conduction par exemple. Les valeurs maximales des rayons sont quant à elles souvent supérieures aux demi-largeurs reportées sur la figure. Ceci aurait pu être dû à un défaut de seuillage et/ou de calibration, mais différentes vérifications semblent écarter ces hypothèses. Ces valeurs seraient plutôt dues à un changement de la forme du contour extrait par traitement d'images. En effet, lorsque toute la partie supérieure des blocs est enflammée, le contour correspond aux bords d'un carré et non plus à un arc de cercle : l'ajustement de cette forme donne une ellipse qui surestime la largeur de la zone en feu. Comme indiqué précédemment, le traitement présenté ici n'est valable que pour la phase de croissance.

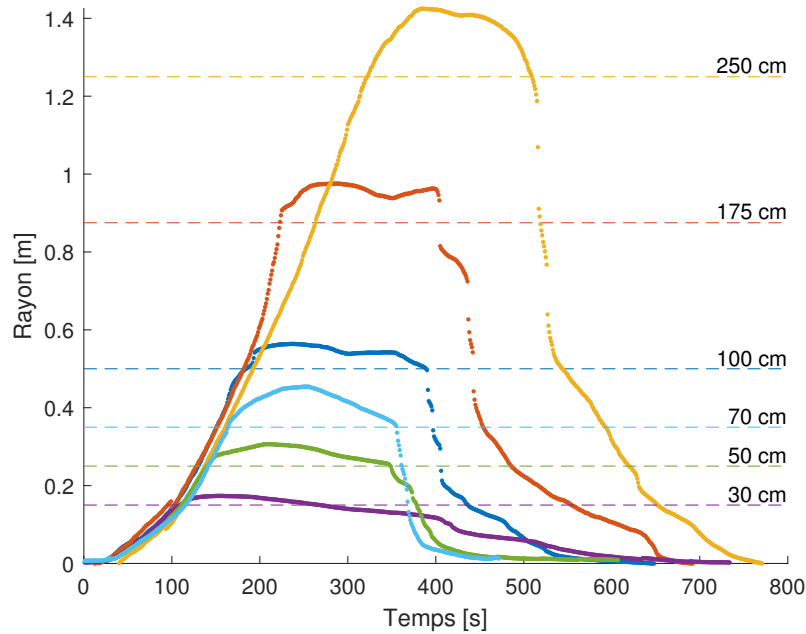


FIGURE 7.9 – Évolutions moyennes du rayon de la zone en feu pour chaque taille de bloc (indiquées sur le graphe). Les demi-largeurs sont représentées en traitillés.

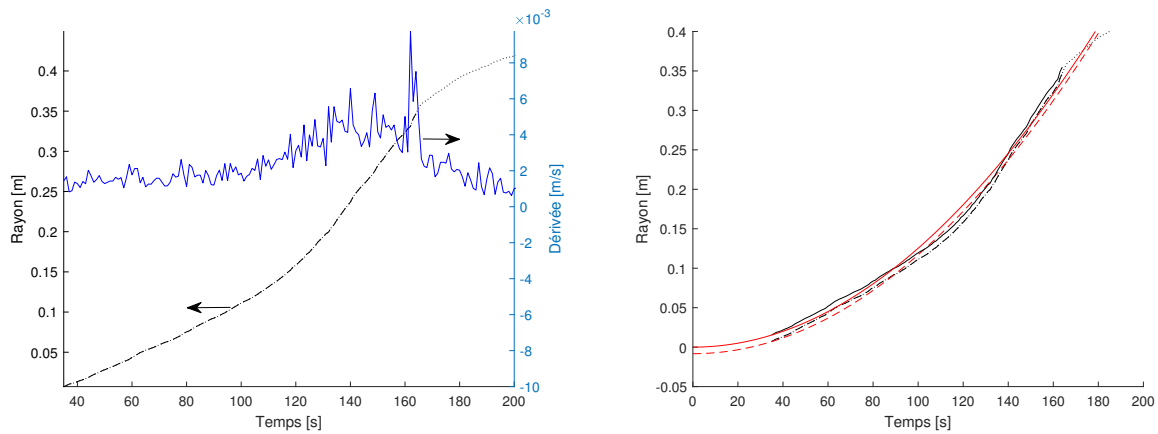
7.2.a.ii Discussion

Les phases de croissance des courbes présentées en Figure 7.9 (rayons moyens de la zone en feu) ont été approchées avec un modèle de la forme

$$r(t) = \alpha t^2, \quad (7.6)$$

souvent rencontré dans la littérature pour décrire la montée en puissance d'un feu (voir Équation 2.23 en Section 2.2.b.ii). Pour cela, les données ont été retenues sur la phase de croissance, en considérant qu'elle durait tant que la propagation s'accélérait, c'est-à-dire jusqu'à atteindre le maximum de la dérivée comme illustré en Figure 7.10a. Ces points

ont été ajustés une première fois en autorisant un décalage temporel ($r(t) = \alpha t^2 + C$), dû par exemple à une latence dans l'ignition qui pourrait varier suivant l'essai (taille de l'allume-feu, conditions ambiantes...). Cette étape est visible en Figure 7.10b, avec les données et l'ajustement en traitillés noirs et rouges respectivement. La constante C a ensuite permis de recaler les données pour que $r(t = 0) = 0$ (trait plein noir sur la Figure 7.10b), et ces nouveaux points ont été ajustés à l'aide de l'Équation 7.6 (trait plein rouge). De manière générale, la correction était minime pour toutes les tailles de bloc, ce qui illustre une bonne répétabilité et un comportement similaire des différents blocs y compris dans les premiers instants après l'allumage.



(a) Sélection des données pour l'ajustement. Données en pointillés, sélection en traitillés et dérivée en trait plein.

(b) Ajustement initial (traitillés rouges), correction (trait plein noir) et nouvel ajustement (trait plein rouge).

FIGURE 7.10 – Étapes de l'ajustement des mesures de rayon avec l'Équation 7.6. Exemple pour les blocs de 70 cm de côté (moyenne sur trois essais).

L'application de cette procédure à l'ensemble des données permet d'obtenir les résultats en Figure 7.11, qui illustrent que la forme en αt^2 décrit bien la croissance du rayon de la zone en feu à la surface des blocs de mousse polyuréthane. Ceci est confirmé par un indicateur comme le RMSE (voir Section 5.1.b.i et Équation 5.2), donné dans le Tableau 7.2 aux côtés des valeurs de α .

Des données sont aussi disponibles dans la littérature, comme par exemple le travail de Mizuno et al. [126]. Leurs mesures de rayons de la zone en feu sont comparées aux résultats du traitement vidéo en Figure 7.12. Les croissances reportées dans l'étude sont similaires à celles observées ici pour les blocs de dimension proche (50 et 100 cm de côté, voir traits pleins), bien que plus rapides chez Mizuno et al. Cette différence ne peut être expliquée avec certitude, mais pourrait être due à une composition chimique et/ou une structure différente de la mousse polyuréthane. Les auteurs mentionnent cette même raison pour expliquer certains de leurs résultats [126, p. 36]. À titre indicatif, Mizuno et al. avaient fourni des corrélations de forme exponentielle (Équation 2.24) pour décrire l'évolution du rayon de la zone en feu (voir [126, p. 36]).

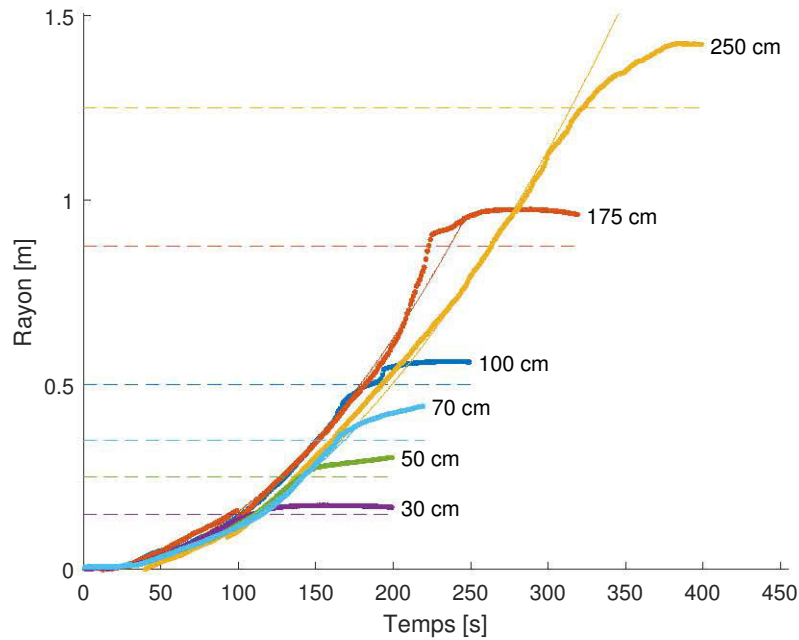


FIGURE 7.11 – Rayons de la zone en feu (points) et ajustements avec l'Équation 7.6 (traits pleins). Les données ajustées sont les valeurs moyennes pour chaque taille de bloc (indiquées sur le graphe). Les demi-largeurs sont représentées en traitillés.

TABLEAU 7.2 – Valeurs des paramètres pour les Équations 7.6 et 2.24 décrivant les rayons et aires de la zone en feu à la surface des blocs de mousse polyuréthane et erreur quadratique moyenne (RMSE).

Largeur [cm]	Éq. 7.6		Éq. 2.24		
	α [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]	RMSE [m]	C_1 [m^2]	C_2 [s^{-1}]	RMSE [m^2]
30	$1,45 \times 10^{-5}$	$1,55 \times 10^{-3}$	$1,68 \times 10^{-4}$	$6,33 \times 10^{-2}$	$8,15 \times 10^{-4}$
50	$1,26 \times 10^{-5}$	$3,15 \times 10^{-3}$	$8,77 \times 10^{-4}$	$3,84 \times 10^{-2}$	$4,63 \times 10^{-3}$
70	$1,24 \times 10^{-5}$	$7,60 \times 10^{-3}$	$1,13 \times 10^{-3}$	$3,57 \times 10^{-2}$	$5,67 \times 10^{-3}$
100	$1,51 \times 10^{-5}$	$6,93 \times 10^{-3}$	$2,91 \times 10^{-3}$	$3,24 \times 10^{-2}$	$9,95 \times 10^{-3}$
175	$1,57 \times 10^{-5}$	$1,79 \times 10^{-2}$	$7,31 \times 10^{-3}$	$2,58 \times 10^{-2}$	$3,49 \times 10^{-2}$
250	$1,26 \times 10^{-5}$	$2,00 \times 10^{-2}$	$4,61 \times 10^{-2}$	$1,50 \times 10^{-2}$	$1,39 \times 10^{-1}$

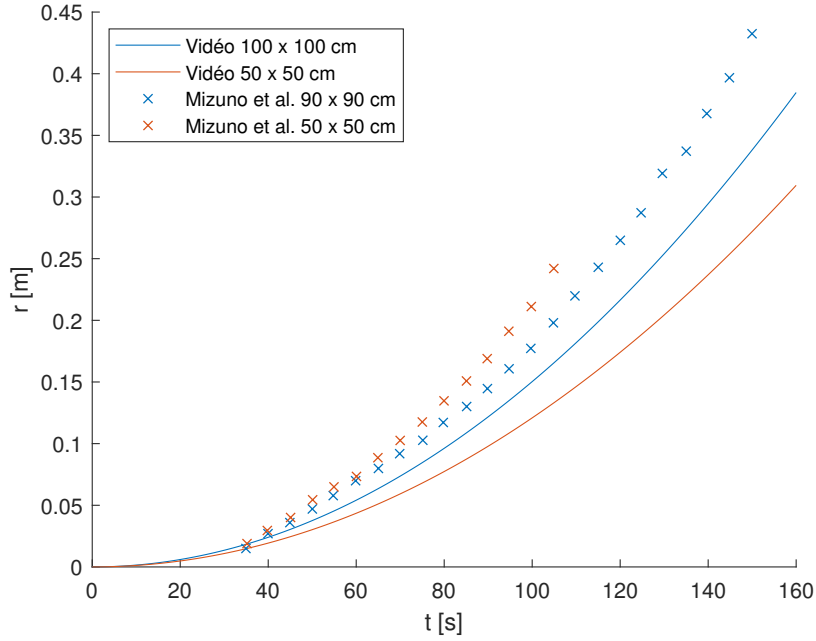


FIGURE 7.12 – Rayons de la zone en feu sur des blocs de mousse polyuréthane, obtenus dans le cadre de ce travail par traitement vidéo (traits pleins, données recalées) et par Mizuno et al. [126, p. 35] (croix).

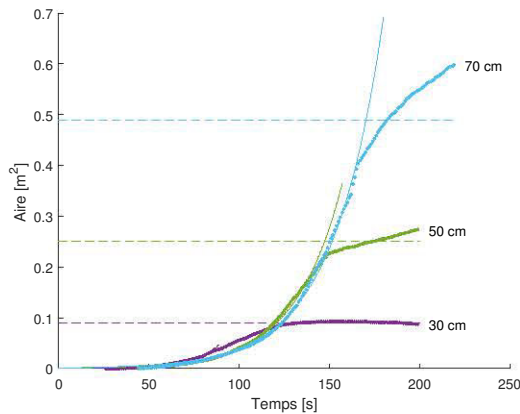
Une autre description de la zone en feu consiste à étudier l'évolution de son aire. Ceci peut être fait en considérant la propagation comme circulaire ($A(t) = \pi r(t)^2$), ce qui semble raisonnable vus les résultats en Figure 7.8. La phase de croissance des aires en feu, sélectionnée selon la procédure illustrée en Figure 7.10a, a été ajustée avec une autre corrélation (aussi présentée en Section 2.2.b.ii), à savoir

$$A(t) = C_1 \exp(C_2 t). \quad (\text{c.f. 2.24})$$

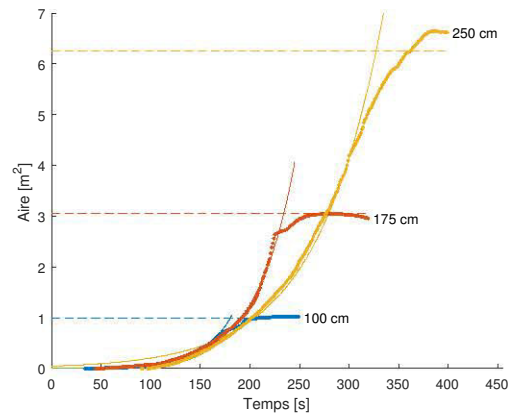
Les résultats sont présentés graphiquement en Figure 7.13 ainsi que dans le Tableau 7.2. À noter que le choix des expressions pour ajuster les résultats (Équation 7.6 pour les rayons et Équation 2.24 pour les aires) a été fait en retenant celle présentant le meilleur accord, qualitativement (graphiques) et quantitativement (RMSE p. ex.). Ceci illustre que ces formes permettent de bien décrire les tendances observées expérimentalement, mais la valeur de leurs paramètres reste difficile à déterminer *a priori*.

7.2.b Propagation en profondeur

Le traitement d'images présenté en section précédente offre une description de la propagation en surface des blocs. Deux autres moyens de mesures, à savoir des thermocouples et des photos visibles, ont quant à eux été utilisés pour caractériser la propagation en profondeur, au sein des échantillons (voir descriptions en Sections 4.3.a et 4.3.c). Les résultats sont exposés et comparés ci-après.



(a) PROMETHEI



(b) CNPP

FIGURE 7.13 – Aires de la zone en feu (points) et ajustements avec l'Équation 2.24 (traits pleins). Les données ajustées sont les valeurs moyennes pour chaque taille de bloc (indiquées sur le graphe). Les demi-largeurs sont représentées en traitillés.

7.2.b.i Résultats de l'exploitation des températures

Les 17 thermocouples placés dans chaque bloc de mousse polyuréthane étaient destinés à suivre la propagation à l'intérieur des échantillons, tel que décrit en Section 4.3.a.ii. Pour rappel, chaque mesure de température a été utilisée pour déterminer le temps auquel arrivait le front de décomposition à une position donnée. Ceci est illustré en Figure 7.14 pour un bloc de 1,00 m de côté.

Les temps correspondent aux points où l'augmentation de température dépasse la valeur arbitraire de $10^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$, car il a été considéré que cette augmentation brusque permet de représenter le début de la décomposition et la proximité d'une flamme. Connaissant la position des thermocouples par rapport au centre du bloc, où avait lieu l'allumage et donc prise ici comme le centre du foyer, il est possible de visualiser la propagation aux quatre profondeurs auxquelles étaient placés les capteurs, comme présenté en Figure 7.15 pour les trois essais sur des blocs de 1,00 m de côté.

Ceci permet par exemple de comparer facilement les répétitions entre elles. La Figure 7.15 montre ainsi des tendances similaires entre les essais. En effet, la pente des points $r = f(t)$ augmente avec la profondeur des thermocouples, c'est-à-dire d'un graphe à l'autre. Ceci signifie qu'en surface la flamme arrive d'abord au centre du bloc, puis ensuite aux bords, formant ainsi un profil courbe, tandis qu'en profondeur la flamme arrive au même moment au centre et aux bords de l'échantillon, ce qui donne un profil plutôt plat. La régression de la mousse semble donc devenir de plus en plus uniforme au fur et à mesure que l'échantillon se creuse.

La Figure 7.15 met aussi en évidence un décalage temporel entre les essais, qui pourrait être dû à une latence lors de l'allumage de certains blocs, à une dissymétrie dans la

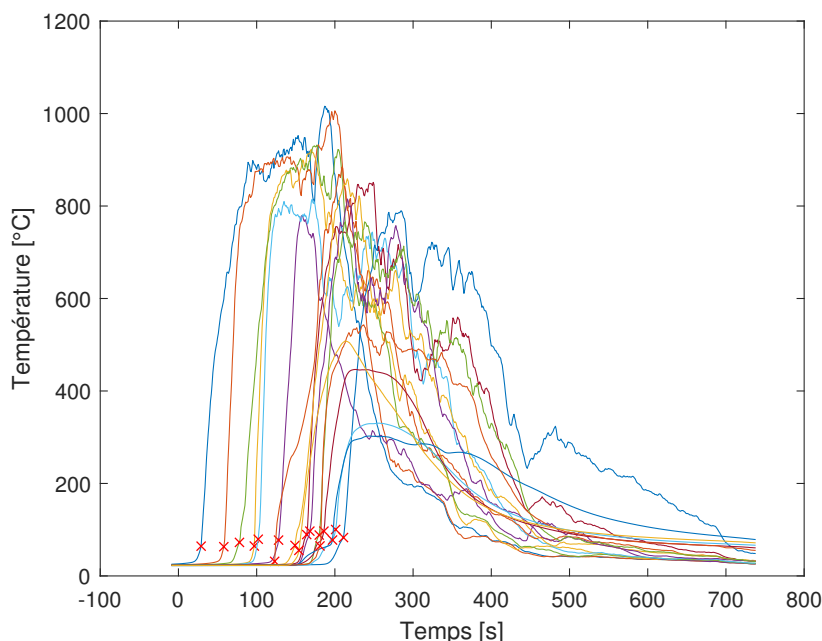
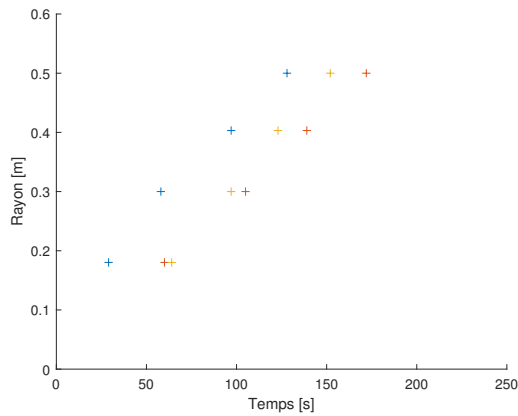


FIGURE 7.14 – Données pour les différents thermocouples placés dans un bloc de mousse polyuréthane de 1,00 m de côté, et temps sélectionnés pour représenter l'arrivée du front de décomposition (première augmentation de température supérieure à $10^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$, voir croix rouges).

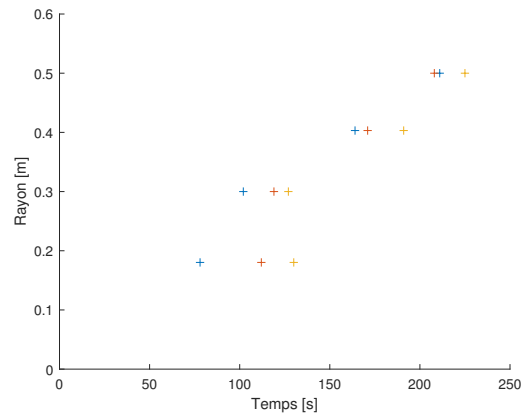
propagation et/ou une mauvaise position de certains capteurs. Cette tendance est aussi observée sur les résultats de blocs de 1,75 et 2,50 m de côté (non présentés ici), bien que moins marquée. La comparaison de ces résultats aux autres données disponibles (p. ex. vidéos brutes ou traitement d'images en Section 7.2.a.i) n'a pour l'instant pas permis de déterminer la cause de ces différences entre répétitions. C'est pourquoi ces résultats ne seront pas discutés davantage ici, et que seuls quelques éléments complémentaires sont fournis en Annexe D afin d'illustrer l'exploitation envisagée pour ces mesures.

7.2.b.ii Résultats de la photogrammétrie

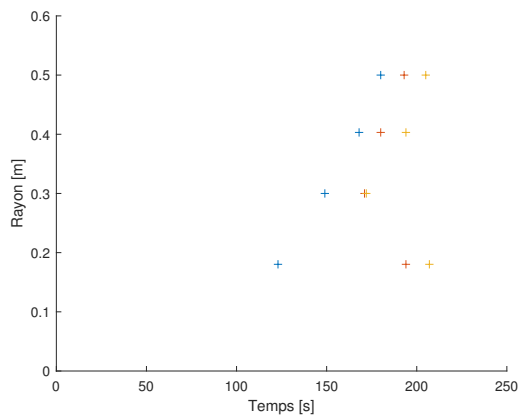
Comme décrit en Section 4.3.c, des photos visibles ont été utilisées pour reconstruire des nuages de points afin de caractériser la dégradation d'échantillons de mousse polyuréthane figés à différents instants (lorsque la propagation atteignait un diamètre prédéfini, voir liste en Section 4.3.c). Ces résultats de photogrammétrie ont été validés en les comparant à ceux obtenus avec un bras de mesure. Un exemple du traitement (combinaison des images, extraction de la zone d'intérêt et du nuage de points) est donné en Figure 4.10. Afin de faciliter les comparaisons avec les autres moyens de mesure, les nuages de points ont été réalignés afin que l'origine du système de coordonnées se situe au centre de la zone dégradée (considérée comme étant au centre des blocs). Pour rappel, la mise à l'échelle avait été faite directement avec le logiciel CloudCompare en utilisant la mire présente sur



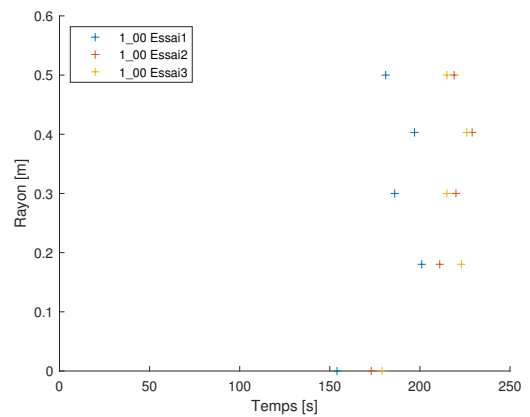
(a) Thermocouples A (-5 cm).



(b) Thermocouples B (-10 cm).



(c) Thermocouples C (-15 cm).



(d) Thermocouples D (-20 cm).

FIGURE 7.15 – Position estimée du front de décomposition au cours du temps pour tous les blocs de mousse polyuréthane de $1,00 \times 1,00 \times 0,20 \text{ m}^3$. Un graphe par profondeur, voir lettres et valeurs entre parenthèses (données par rapport à la surface du bloc).

les clichés. Les nuages de points ainsi obtenus permettent de caractériser la dégradation à différentes étapes, comme illustré en Figure 7.16 avec des nuages de points, colorés suivant leur altitude. Deux profils, en $x = 0$ et $y = 0$, sont aussi reportés en Figure 7.16a, et l'ensemble de la zone dégradée est représenté en noir et cerclé de rouge sur la Figure 7.16b.

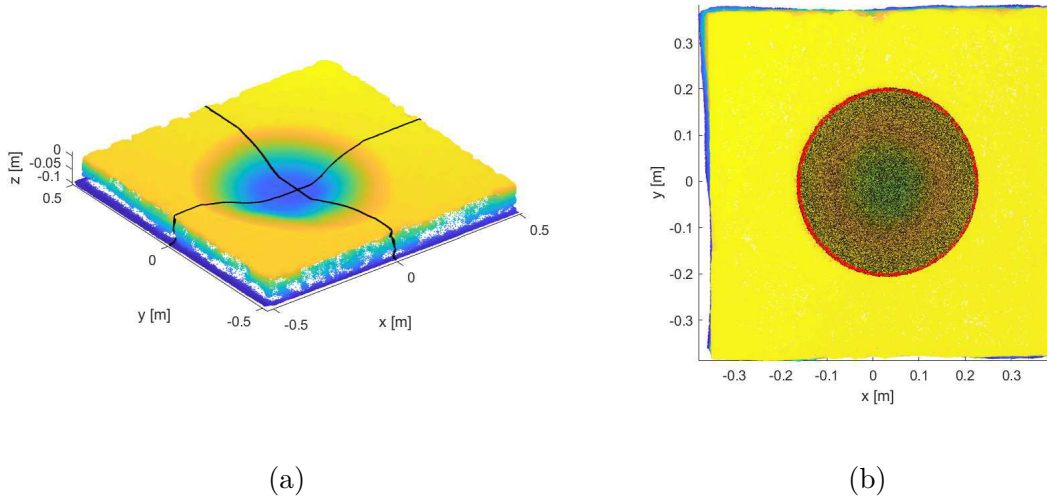


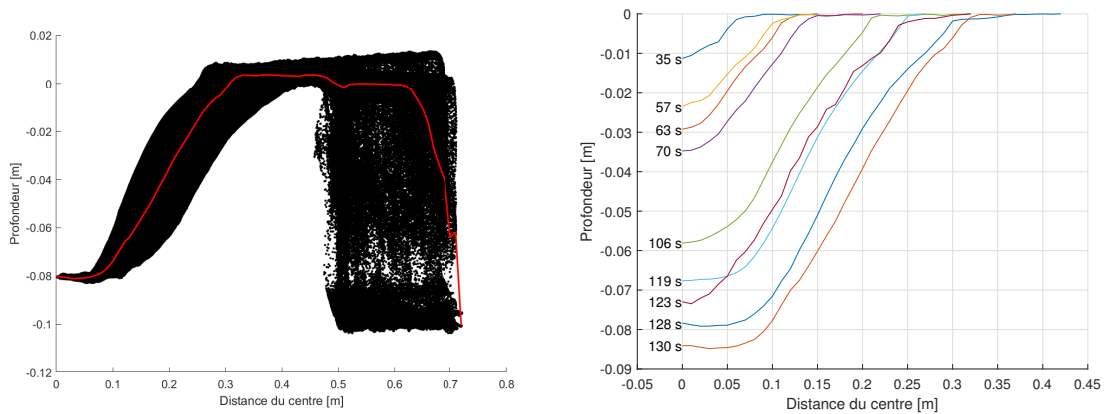
FIGURE 7.16 – Nuages de points pour des blocs dont la propagation a été arrêtée à des diamètres de 75 cm et 40 cm respectivement (blocs d'environ 100 et 75 cm de côté). Les profils en $x = 0$ et $y = 0$ sont aussi donnés en Figure a (lignes noires), et la zone dégradée est mise en évidence sur la Figure b (cercle rouge, noirci à l'intérieur).

Afin de visualiser et comparer plus facilement la forme tridimensionnelle de la cuvette sans pour autant se limiter à des profils particuliers comme en Figure 7.16a (lignes noires), il est possible de considérer les profondeurs z en fonction de la distance au centre du bloc $d = \sqrt{x^2 + y^2}$, comme illustré en Figure 7.17 pour le bloc dont la propagation a été stoppée à 75 cm.

Le traitement illustré en Figure 7.17a, c'est-à-dire la détermination du profil médian (ligne rouge) en se basant sur les données $z = f(d)$ expérimentales (points noirs), permet d'obtenir les résultats en Figure 7.17b. Celle-ci donne une représentation de la propagation à différents instants (voir temps correspondants sur la figure) qui pourra être comparée aux autres mesures, comme illustré en section suivante.

On peut déjà remarquer que les différents profils ont la même allure et sont cohérents avec les temps de combustion (creusement de plus en plus prononcé), hormis celui à 123 s (diamètre visé 60 cm). Cet essai a été réalisé deux fois : la répétition, stoppée à 119 s, présente une tendance plus proche des autres résultats.

La surface dégradée peut aussi être mesurée en sélectionnant les points appartenant à la « cuvette » et en calculant l'aire qu'ils représentent, en utilisant par exemple une fonction Matlab comme `delaunay` (triangulation). Le contour de cette zone peut aussi être extrait, l'évolution de la propagation en surface étant aussi intéressante à caractériser (voir Section 7.2.a.i). La sélection des points avait été illustrée en Figure 7.16b pour un



(a) Détermination du profil médian (ligne rouge) à partir des profondeurs (points noirs). (b) Ensemble des résultats, avec les durées de combustion associées.

FIGURE 7.17 – Profils médians de la cuvette formée par la propagation sur les blocs de mousse polyuréthane. L'exemple de détermination du profil médian (Figure a) correspond au bloc dont la propagation a été arrêtée à 75 cm.

bloc dont la propagation a été arrêtée à environ 40 cm de diamètre, avec l'ensemble de la zone dégradée en noir et son contour en rouge.

7.2.c Perte de masse

En plus des mesures présentées jusqu'ici, il est aussi possible de caractériser le comportement au feu des blocs de mousse polyuréthane en suivant sa vitesse de perte de masse (MLR). En effet, bien qu'elle n'offre pas la résolution spatiale que présentaient les autres approches, elle fournit des informations complémentaires sur la décomposition tout au long de l'essai. Les résultats pour tous les essais exploités sont présentés en Figure 7.18. On peut remarquer la très bonne répétabilité, quelle que soit la taille du foyer. Une analyse plus détaillée sera faite dans la section suivante en utilisant ces données en conjonction avec les autres mesures caractérisant la décomposition/propagation.

7.2.d Comparaison des résultats

Les différentes mesures effectuées pour caractériser la propagation à échelle réelle peuvent maintenant être comparées, pour en évaluer la qualité lorsqu'elles décrivent la même grandeur, mais aussi en utilisant les données complémentaires ensemble (p. ex. aire en feu et MLR pour déduire le MLRPUA), afin de compléter la description du comportement au feu de la mousse polyuréthane.

La première comparaison est présentée en Figure 7.19, avec des estimations de la zone dégradée pour des blocs de 70 ou 100 cm de côté à environ 130 s. Il a été choisi d'utiliser

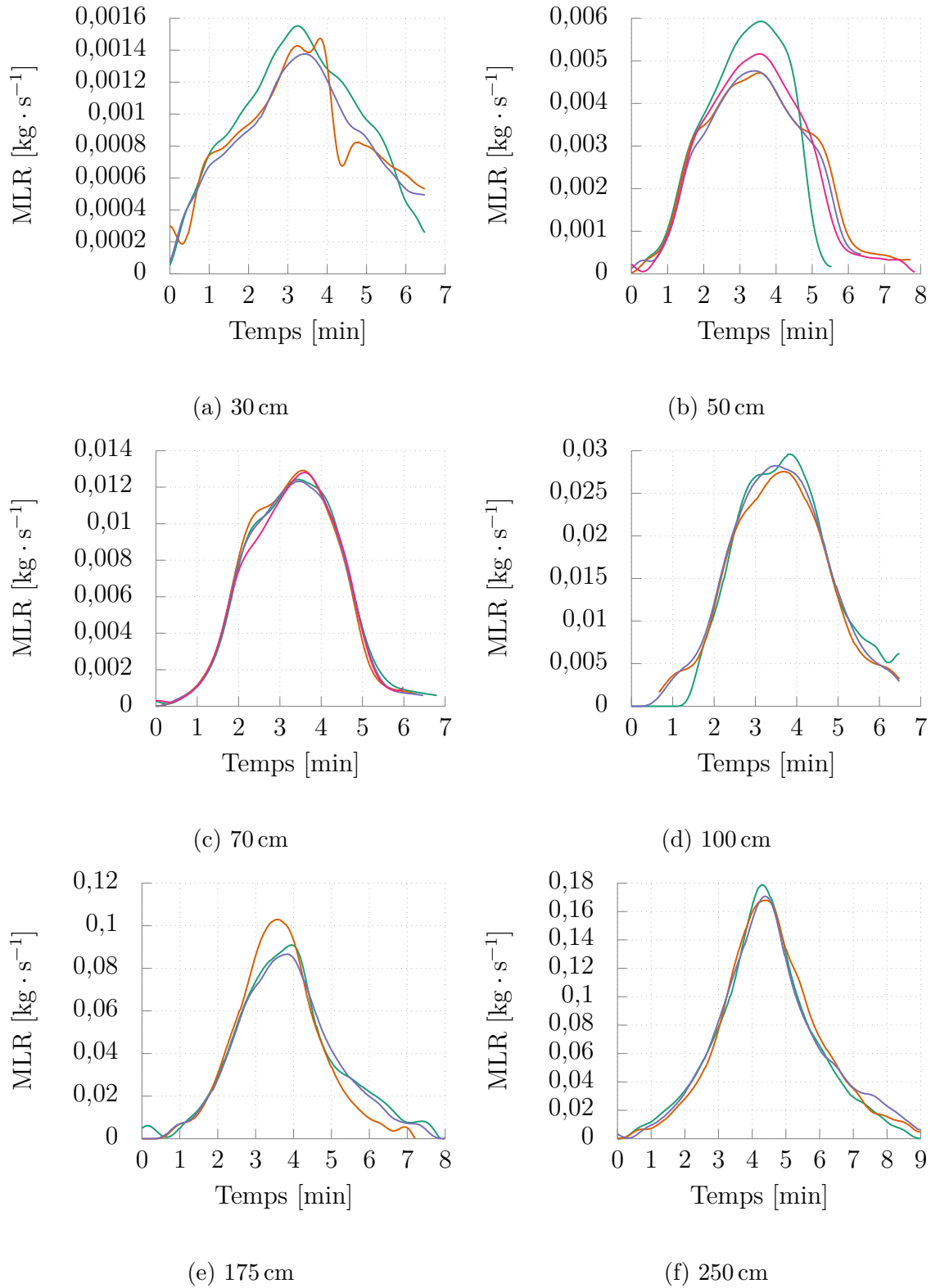


FIGURE 7.18 – Vitesses de perte de masse (MLR) pour les essais de mousse polyuréthane exploités (un graphique par largeur de bloc, une courbe par répétition).

les résultats des blocs de 70 cm de côté pour illustrer le traitement vidéo car il s'agit de la plus petite taille pouvant être comparée à tous les résultats de photogrammétrie. Le temps choisi (130 s) est la durée de combustion maximale pour les échantillons étudiés par photogrammétrie. Il a été remarqué que les résultats de cette technique sont proches de ceux obtenus par traitement vidéo, à un décalage temporel près (voir aussi Figure 7.21) : c'est pourquoi les données de l'analyse vidéo présentées en Figure 7.19 (cercle noir) sont celles à 103 s et non 130 s.

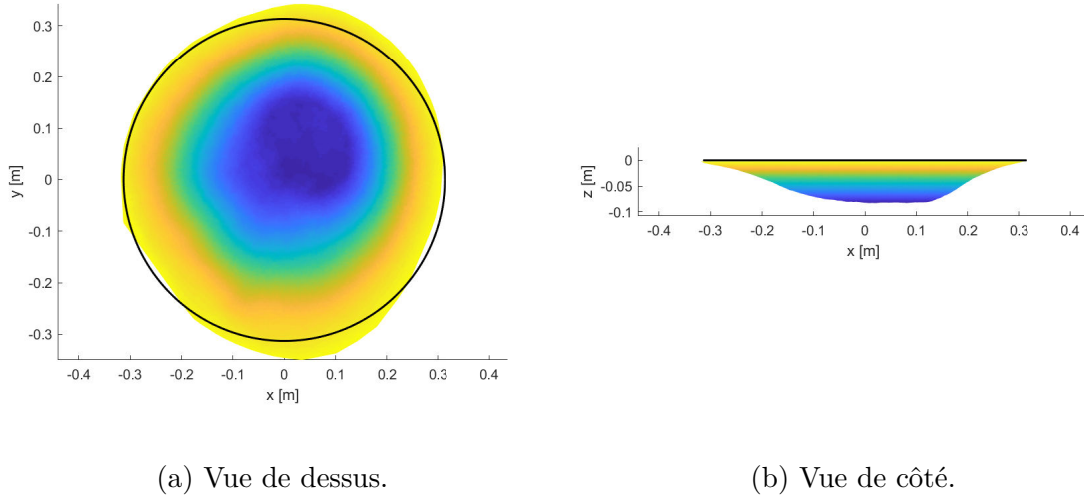


FIGURE 7.19 – Représentations de la zone dégradée suivant deux techniques : traitement vidéo pour le cercle noir (blocs de 70 cm à 103 s) et photogrammétrie pour la surface restante (bloc de 100 cm à 130 s).

On peut remarquer qu'une fois recalés, les résultats des traitements d'image (vidéo et photo) permettant de décrire le diamètre de la zone en dégradée en surface sont en bon accord. Le décalage temporel arbitraire choisi ici donne aussi de bons résultats pour les autres données disponibles (voir Figure 7.21).

Les résultats du traitement vidéo et de la photogrammétrie peuvent aussi être comparés en deux dimensions, en incluant également les données de la littérature que fournissent Mizuno et al. [126] (*burn-out sections*), comme présenté en Figure 7.20.

Pour les valeurs présentées, les traitements vidéo sur différentes tailles de bloc (voir les trois types de symbole : +, $\times$ et $\circ$ pour des blocs de 100 ; 175 et 250 cm resp.) donnent des résultats similaires. Ces derniers sont aussi en accord avec la photogrammétrie, à un décalage temporel près (environ 30 s), comme discuté pour la Figure 7.19. Concernant les données de Mizuno et al. [126], les profils sont similaires bien que les temps observés soient différents, allant d'un écart de 20 s (profils à 15 et 35 s) à 40 s (profils à 90 et 130 s). Comme pour l'évolution des rayons de la zone en feu (Section 7.2.a.ii), ces différences pourraient être dues à l'utilisation de mousses polyuréthane différentes.

En plus des Figures 7.19 et 7.20, les traitements d'image (vidéo et photo) peuvent aussi être comparés sur leurs estimations de l'aire en feu, comme présenté en Figure 7.21. Cette

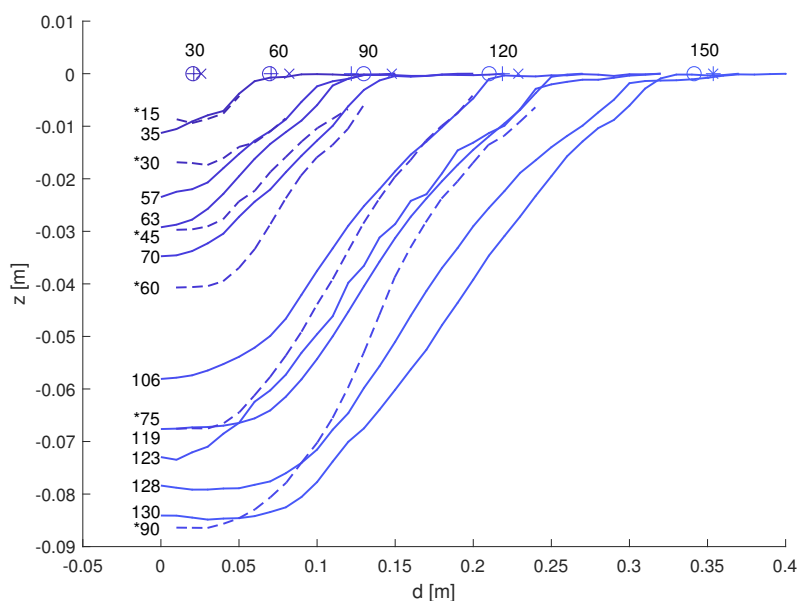


FIGURE 7.20 – Profils de la décomposition de blocs de mousse polyuréthane, obtenus dans le cadre de ce travail par photogrammétrie (traits pleins) et traitement vidéo (+, × et o pour des blocs de 100 ; 175 et 250 cm resp.) ainsi que par Mizuno et al. [126, p. 36] (traitillés et temps précédés d’un astérisque). Temps donnés en secondes.

aire peut être calculée en surface des blocs (traitement vidéo en traitillés et photogrammétrie en carrés et ligne rouges) mais aussi en profondeur, en considérant alors l’aire réelle de la « cuvette » en trois dimensions (photogrammétrie en cercles et ligne bleus).

Comme mentionné précédemment, on peut remarquer qu’après une synchronisation temporelle les résultats des deux traitements sont très proches. Ceci est confirmé par les ajustements avec l’Équation 2.24, déjà utilisée en Section 7.2.a.ii sur les résultats du traitement vidéo (voir Figure 7.11), et reportés en traits pleins sur la Figure 7.21 pour la photogrammétrie. Pour cette dernière, les coefficients sont presque égaux pour les évolutions de l’aire en surface et en profondeur (voir Tableau 7.3), et du même ordre que ceux donnés plus tôt pour le traitement vidéo (voir Tableau 7.2).

TABLEAU 7.3 – Valeurs des paramètres pour l’Équation 2.24 décrivant l’aire de la zone en feu à la surface et en profondeur de blocs de mousse polyuréthane. Valeurs obtenues par photogrammétrie (« Photo. ») et traitement vidéo (résultats tirés du Tableau 7.2).

	C_1 [m ²]	C_2 [s ⁻¹]	RMSE [m ²]
Photo. en surface	$7,060 \times 10^{-4}$	$3,864 \times 10^{-2}$	$1,960 \times 10^{-2}$
Photo. en profondeur	$7,297 \times 10^{-4}$	$3,872 \times 10^{-2}$	$2,271 \times 10^{-2}$
Vidéo (blocs de 70 cm)	$1,128 \times 10^{-3}$	$3,567 \times 10^{-2}$	$5,666 \times 10^{-3}$

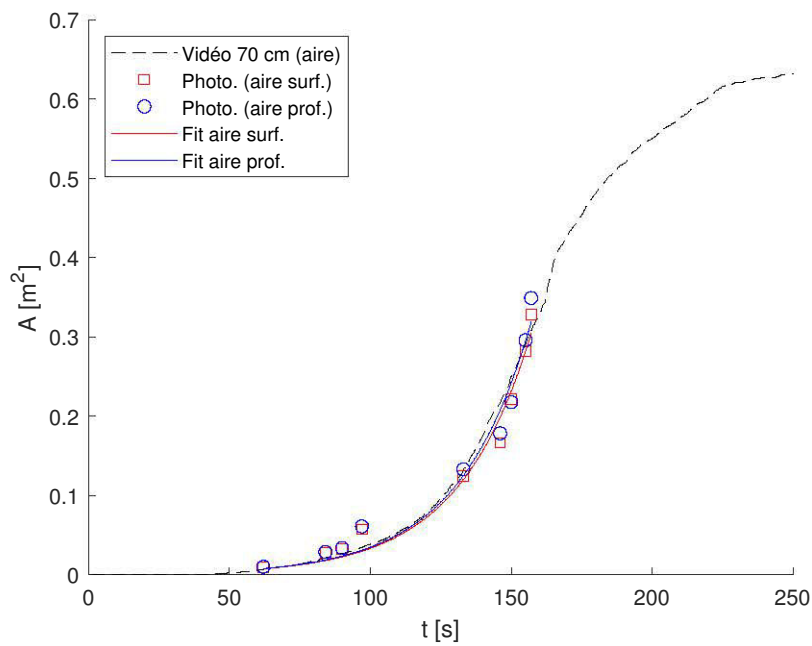


FIGURE 7.21 – Estimations de l’aire en feu suivant deux mesures permettant de caractériser la zone dégradée visible en surface (traitement vidéo et photogrammétrie) ou en profondeur (photogrammétrie). Les ajustements des mesures par photogrammétrie avec l’Équation 2.24 sont aussi donnés. Un décalage temporel de 27 s est appliqué aux résultats de la photogrammétrie.

La concordance des ajustements met en évidence que les aires en surface (traitillés noirs, carrés et ligne rouges) et en profondeur (cercles et ligne bleus) sont relativement proches pour les données présentées ici. Une différence plus importante était attendue, étant donné la forme que prend la mousse lorsqu'elle se dégrade : il est probable que l'écart augmentera avec la durée de combustion, au fur et à mesure que la mousse se creusera.

La dernière comparaison est faite avec la vitesse de perte de masse, en la mettant en parallèle avec l'estimation de l'aire en feu par traitement vidéo. Ces données sont présentées en Figure 7.22 pour les blocs de 70 cm de côté.

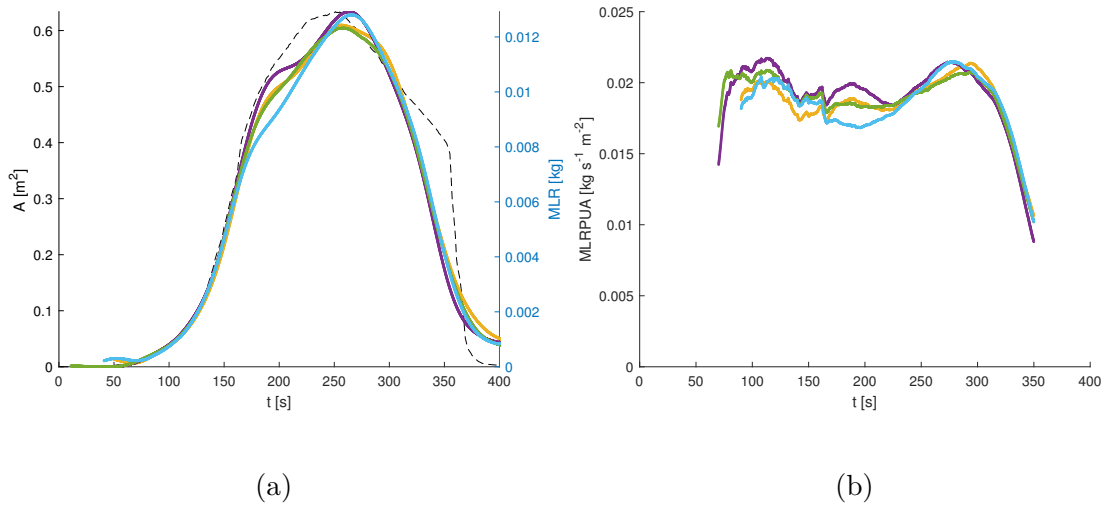


FIGURE 7.22 – Vitesse de perte de masse (MLR) et estimations de l'aire en feu par traitement vidéo (traitillés noirs) pour les essais de 70 cm (Figure a, données calées en temps), ainsi que le rapport de ces grandeurs (vitesse de perte de masse surfacique, $MLRPUA$, Figure b ; seule la partie centrale est présentée).

On peut remarquer que l'accord est particulièrement bon pour ces données : l'aire en feu suit la même évolution que le MLR (voir Figure 7.22a). La vitesse de perte de masse surfacique, $MLRPUA = MLR/A$, présente donc une valeur quasi-constante, comme mis en évidence en Figure 7.22b. Ces résultats vont dans le sens de ce qui était montré en Figure 7.21, à savoir que l'aire en surface et en profondeur sont relativement proches, du moins pour les temps et tailles de bloc présentés ici : la propagation observée en surface (aire en feu) semble donc pouvoir représenter bien la décomposition globale de l'échantillon (MLR). Pour les propagations plus longues, il serait intéressant d'étudier si l'aire en surface ne permet plus de décrire le MLR convenablement, et si l'aire en profondeur commence à montrer de meilleurs résultats. Ceci n'a pas pu être fait ici notamment parce que les deux approches permettant de caractériser la propagation en profondeur, la photogrammétrie et les mesures de température, n'étaient pas suffisamment résolues (en temps et en espace respectivement).

Chapitre 8

Modélisation de la propagation

Sommaire

8.1	Implémentation FDS	157
8.1.a	Fonctions concernées	158
8.1.b	Ajouts et modifications	160
8.2	Application	163
8.2.a	Simulation de blocs $1,00 \times 1,00 \times 0,05 \text{ m}^3$: FDS original	165
8.2.b	Simulation de blocs $1,00 \times 1,00 \times 0,05 \text{ m}^3$: FDS modifié	167
8.2.c	Comparaisons	167
8.2.d	Échantillons plus épais	170

Une bonne description du terme source est primordiale pour étudier correctement un incendie, mais peut s'avérer complexe lorsque le combustible a un comportement au feu particulier comme dans le cas de la mousse polyuréthane (propagation, creusement... voir Section 7.2). Un compromis doit donc être fait : l'approche retenue pour ces travaux, présentée en Section 2.2.b, consiste à ne décrire le MLR qu'en fonction des transferts thermiques, et plus particulièrement du rayonnement (voir Section 2.2.b.iii). L'objectif des sections suivantes est d'illustrer comment les résultats obtenus à petite échelle (Section 7.1) ont été utilisés dans l'outil retenu, à savoir le code de CFD *Fire dynamics simulator* – FDS (voir Section 1.2.b.ii), et donc comment cette approche thermique a été implémentée.

8.1 Implémentation FDS

Du point de vue d'un utilisateur final, FDS est disponible comme un exécutable³⁰ et les paramètres des simulations sont transmis à cet exécutable via un fichier d'entrée avec l'extension `.fds`. Le guide utilisateur [103] décrit en détails les procédures d'installation,

30. <https://pages.nist.gov/fds-smv/downloads.html>

de construction des scénarios et de lancement des calculs. Le code source de FDS étant ouvert, les fichiers Fortran 90 sur lesquels il est basé sont aussi disponibles en ligne³¹, accompagnés d'instructions pour utiliser le gestionnaire de versions Git et compiler le code³². C'est dans ces fichiers `.f90` que seront modifiées et/ou ajoutées les variables et fonctions (ou plus généralement « procédures ») permettant d'implémenter l'approche thermique présentée précédemment.

8.1.a Fonctions concernées

Afin de piloter le MLR en fonction des transferts radiatifs, il a été choisi de se baser sur l'une des approches disponibles actuellement dans FDS pour décrire le foyer, à savoir l'utilisation d'un terme source prescrit auquel des variations temporelles sont imposées (voir résumé des modèles disponibles dans FDS en Section 2.2.b.iii). Ce fonctionnement est décrit dans la section ci-après, du point de vue des paramètres d'entrée (fichier `.fds`) ainsi que des variables et procédures impliquées (fichiers `.f90`). Ensuite, le calcul des transferts radiatifs dans FDS sera abordé, dans l'optique d'utiliser ces valeurs pour contrôler le MLR. L'ensemble de ces éléments est résumé en Figure 8.1, qui reprend les principaux paramètres d'entrée (ellipses vertes) et éléments du code source (rectangles jaunes et oranges).

Définition et contrôle du MLR : listes `SURF` et `RAMP` Dans un fichier d'entrée `.fds`, la définition d'un terme source simple peut se faire grâce aux lignes

```
&OBST XB=-0.5,0.5,-0.5,0.5,0.,0., SURF_ID='burner' /
&SURF ID='burner', MLRPUA=0.04 /
```

La liste `OBST`³³ contrôle la géométrie du foyer, avec ses coordonnées `XB` et les caractéristiques de sa surface en précisant l'identifiant `ID` de la liste `SURF` correspondante. Cette dernière contient la vitesse de perte de masse surfacique de référence `MLRPUA` : connaissant l'aire en feu A , déterminée à partir du `XB` (ici $A = 1 \text{ m}^2$), le MLR peut être calculé. Une puissance surfacique peut remplacer le `MLRPUA`, en utilisant le paramètre `HRRPUA` : dans ce cas, la puissance sera ramenée à une vitesse de perte de masse en la divisant par la chaleur de combustion (par défaut ou donnée par l'utilisateur).

Le terme source peut être contrôlé au cours du temps, par exemple en utilisant la liste `RAMP` :

```
&OBST XB=-0.5,0.5,-0.5,0.5,0.,0., SURF_ID='burner' /
&SURF ID='burner', MLRPUA=0.04, RAMP_Q='fireramp' /
&RAMP ID='fireramp', T=0., F=0. /
&RAMP ID='fireramp', T=60., F=1. /
&RAMP ID='fireramp', T=120., F=1. /
&RAMP ID='fireramp', T=180., F=0. /
```

31. <https://github.com/firemodels/fds>

32. <https://github.com/firemodels/fds/wiki>

33. Il est aussi possible d'utiliser la liste `VENT`.

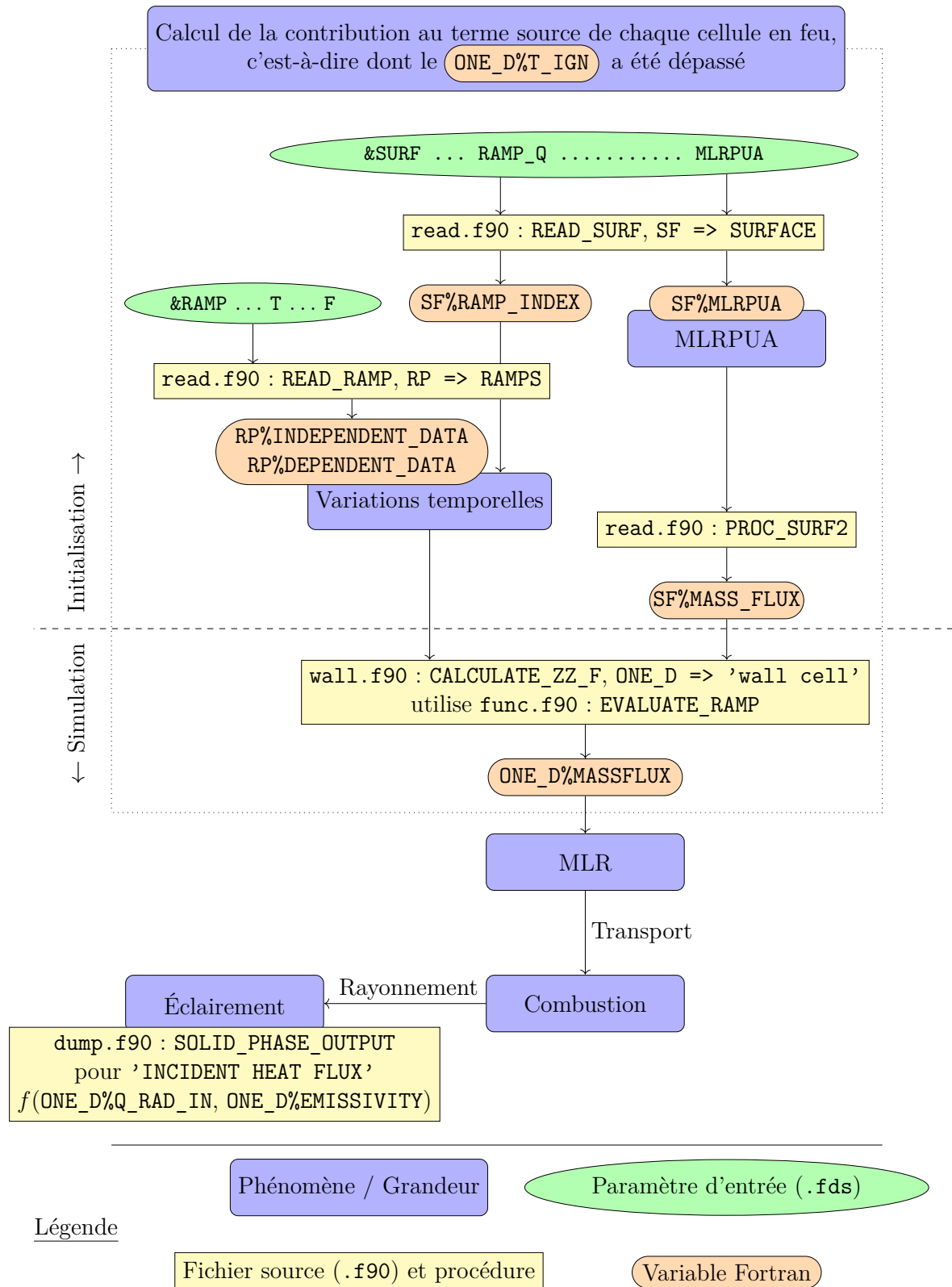


FIGURE 8.1 – Fonctionnement basique de FDS avant implémentation, articulation des variables et procédures.

Les paramètres **T** et **F** correspondent au temps, en secondes, et à la fraction du **MLRPUA** ou du **HRRPUA** de référence (**MLRPUA** ou **HRRPUA**). Une interpolation linéaire est faite entre les temps déclarés par l'utilisateur. Ainsi pour l'extrait de code donné ci-dessus, le **MLR** sera nul au début de la simulation (**T=0.**, **F=0.**) et vaudra par exemple à 30 s $MLR = A \times MLRPUA \times F = 1 \times 0,04 \times 0,5 = 0,04 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

Au niveau du code source, ce fonctionnement est assuré par les types **SURFACE** et **RAMPS**, désignées par les pointeurs **SF** et **RP** respectivement. On trouve ainsi la variable **SF%MLRPUA** qui définit le **MLRPUA** pour la surface **SF**, et **SF%RAMP_INDEX** ainsi que **RP%INDEPENDENT_DATA** et **RP%DEPENDENT_DATA** qui définissent la **RAMPS** à lire, les valeurs de temps et les fractions de **MLRPUA** à imposer. Ces variables sont utilisées dans la procédure **EVALUATE_RAMP** pour déterminer **ONE_D%MASSFLUX**, qui représente le **MLRPUA** pour la frontière solide **ONE_D**. Cette procédure étant effectuée pour chaque cellule en feu, c'est-à-dire dont le temps d'inflammation **ONE_D%T_IGN** a été dépassé³⁴, il est alors possible de déterminer la quantité de gaz combustible injectée et transportée dans le domaine de calcul, qui peut contribuer à la combustion. Cette dernière produira de la chaleur qui sera en partie transmise par rayonnement : un moyen pour caractériser l'énergie rayonnée est donné en section suivante.

Informations sur les flux thermiques : listes DEVC et BNDF FDS permet d'enregistrer différentes grandeurs [103, p. 293] (listes **DEVC** ou **BNDF** dans le fichier d'entrée p. ex.), et notamment les flux thermiques aux parois [103, p. 271]. Afin de contrôler le **MLR** en fonction de la sollicitation thermique, la quantité la plus appropriée serait le flux net ('**NET HEAT FLUX**'). Toutefois, le calcul de celui-ci fait intervenir des termes dont la détermination est difficile, notamment concernant les échanges convectifs. C'est pourquoi il a été choisi de considérer la grandeur la plus basique possible, à savoir le flux (radiatif) incident ('**INCIDENT HEAT FLUX**'). La formulation de ce dernier a pu être trouvée dans le fichier **dump.f90**, qui gère le calcul et l'écriture des résultats, à savoir

```
! INCIDENT HEAT FLUX
SOLID_PHASE_OUTPUT
    = ( ONE_D%Q_RAD_IN / ( ONE_D%EMISSIVITY + 1.0E-10_EB ) ) * 0.001_EB
```

Cette formulation simple permet ainsi de limiter le nombre d'approximations. Les coefficients, donnés avec une précision **EB = SELECTED_REAL_KIND(12)**, permettent juste d'éviter une division par zéro et de convertir le résultat ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ à $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$).

8.1.b Ajouts et modifications

Nous avons donc vu les principaux éléments permettant de définir un **MLRPUA** et ses variations temporelles, ainsi que la façon dont FDS renvoie les valeurs de flux radiatif à

34. Ce temps d'inflammation peut être contrôlé, directement ou indirectement, par la définition d'un **SPREAD_RATE** ou d'une **IGNITION_TEMPERATURE**. À noter que dans le code, parce que les variables sont notées en majuscules, la lettre **T** désigne des temps et non des températures, qui elles sont notées **TMP**.

une frontière solide. Ceci a servi d'inspiration pour les implémentations présentées ici et résumées en Figure 8.2.

De manière générale, le fonctionnement change peu : un MLRPUA est défini par l'utilisateur (`&SURF ... MLRPUA` dans le fichier `.fds`) et l'évolution du MLR est contrôlée par un système de rampe. L'ajout consiste à utiliser un tableau plutôt qu'un seul vecteur/liste `&RAMP ... T ... F`, afin de pouvoir prendre en compte les variations d'éclairement. Ce genre de structure est déjà utilisé dans FDS (liste `TABL`) et permet par exemple de déclarer la forme du jet d'un sprinkleur (`SPRAY_PATTERN_TABLE` [103, p. 230]) ou les propriétés radiatives de particules en fonction de la longueur d'onde (`RADIATIVE_PROPERTY_TABLE` [103, p. 203]). Il a donc aussi servi d'inspiration, notamment pour la nouvelle procédure permettant de lire et stocker les données, `READ_MLR_TABLE`, dans le fichier `read.f90`, qui est basée sur `READ_TABL`. Afin de faciliter la déclaration des paramètres d'entrée et ne pas alourdir le fichier `.fds`, les rampes décrivant la fraction de MLRPUA (F) à imposer en fonction du temps (t) et du flux ($\dot{q}''$) sont contenues dans un fichier indépendant, au format `.csv` (séparateur virgule)

	$\dot{q}''_1$	$\dot{q}''_2$	$\dot{q}''_3$	
t_1	F_{11}	F_{12}	F_{13}	
t_2	F_{21}	F_{22}	F_{23}	$\dots$
t_3	F_{31}	F_{32}	F_{33}	
		$\dots$		

Cette table est directement issue du modèle présenté en Section 7.1, qui utilise les résultats obtenus au cône calorimètre. Il a été choisi de ne pas modifier les données issue du modèle lorsqu'elles sont importées dans FDS, en considérant qu'elles sont déjà suffisamment résolues. Contrairement à la procédure `READ_RAMP`, la nouvelle `READ_MLR_TABLE` n'effectue donc pas d'interpolation (en temps ou en flux). Cette procédure ne fait que charger le fichier et assigner les données aux variables dédiées (voir Tableau 8.1). La première action se fait en utilisant le chemin complet du fichier, qui est passé au programme via le nouveau paramètre `MLR_TABLE_ID` (liste `SURF`). La seconde consiste à stocker le contenu dans la variable `TABLE_DATA_MLR`³⁵ et à calculer les « intégrales » de chaque colonne (associer à chaque ligne i la somme cumulative $\int_1^i F$), stockées dans `TABLE_DATA_MASS`. Malgré leurs noms, `TABLE_DATA_MLR` et `TABLE_DATA_MASS` sont des grandeurs surfaciques, respectivement les fractions de MLRPUA et leurs intégrales.

L'utilisation de ces nouvelles données à chaque pas de temps se fait à l'aide de deux procédures, appelées `MY_EVALUATE_RAMP1` et `MY_EVALUATE_RAMP2` car basées sur celle utilisée à l'origine pour les `RAMP` (`EVALUATE_RAMP`, dans le fichier `func.f90`). Toutes deux vont permettre de sélectionner la rampe/colonne appropriée en fonction du flux incident $\dot{q}''_{\text{inc}}$: c'est la valeur $\dot{q}''$ la plus proche qui est retenue. Le flux incident est déterminé selon la relation donnée plus tôt et tirée du fichier `dump.f90`. À noter que ce calcul a été ajouté à la

35. On a donc `TABLE_DATA_MLR(1,2:)` qui représente les flux ($\dot{q}''$), `TABLE_DATA_MLR(2:,1)` les temps (t) et `TABLE_DATA_MLR(2:,2:)` les fractions de MLRPUA (F).

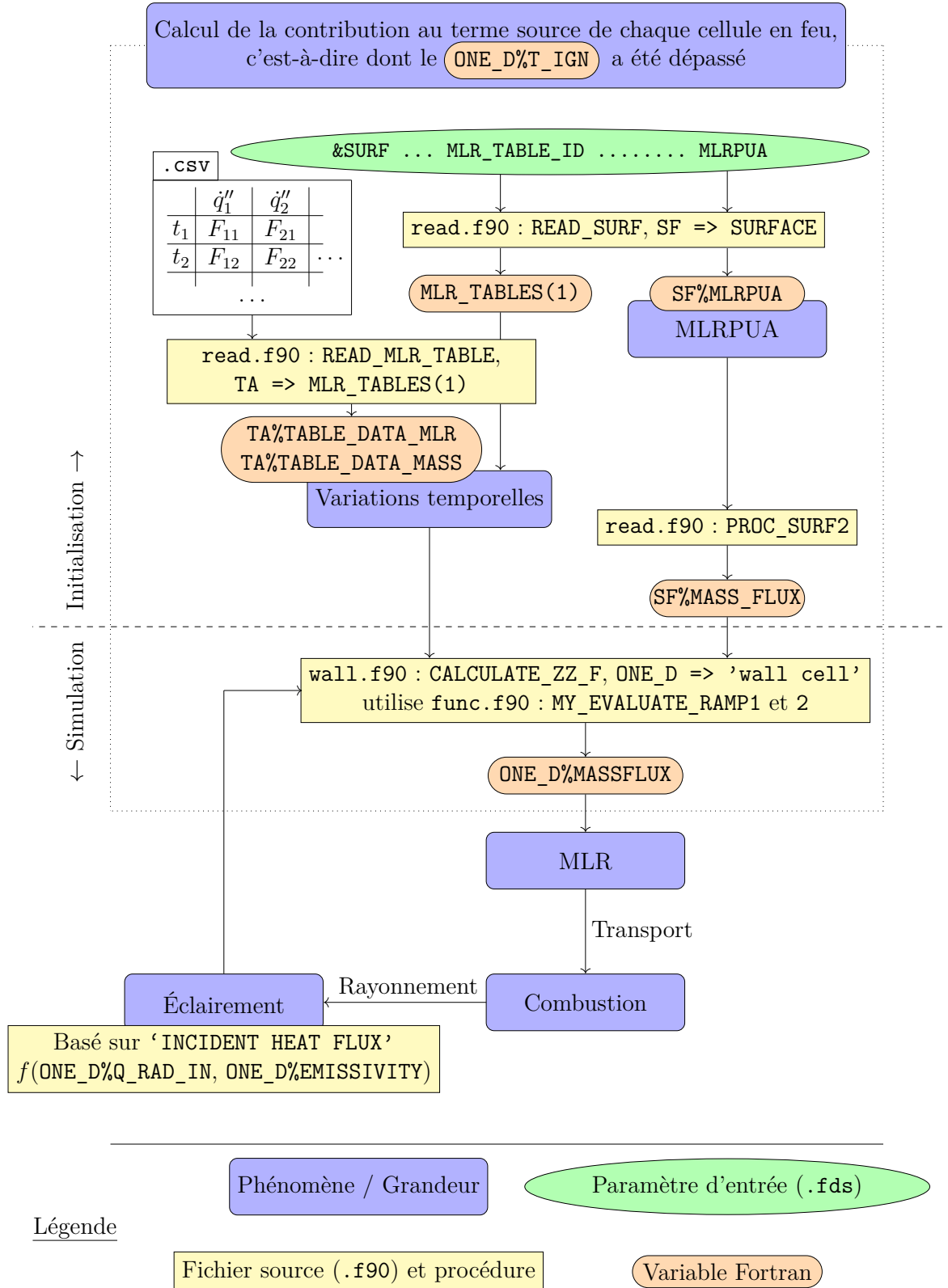


FIGURE 8.2 – Fonctionnement basique de FDS après implémentation, articulation des variables et procédures.

procédure `CALCULATE_ZZ_F` (`wall.f90`) : il est donc indépendant des grandeurs de sortie choisies par l'utilisateur et il n'est pas nécessaire d'utiliser de `DEVC` ou `BNDF` à la surface du combustible. Lorsque $\dot{q}''_{inc}$ est inférieur à la plus petite valeur de la table, une fraction F nulle est retournée, c'est-à-dire que la cellule ne perd pas de masse. À l'opposé, si le flux incident est supérieur à tous les flux définis dans la table, la rampe correspondant au $\dot{q}''$ le plus élevé est retenue. Le choix du temps/de la ligne approprié diffère ensuite suivant la situation, à savoir si la cellule a déjà perdu de la masse ou non. Cette information est contenue dans une nouvelle variable, `BURNED_SURFMASS`, définie dans `CALCULATE_ZZ_F` comme

```
ONE_D%BURNED_SURFMASS(N)
= ONE_D%BURNED_SURFMASS(N) + (DT * ONE_D%MASSFLUX_PREV(N))
```

Elle représente donc la masse perdue jusqu'au pas de temps précédent, à laquelle s'ajoute celle perdue pendant le pas de temps, de durée `DT`, et contrôlée par le `MLRPUA` au temps précédent, `MASSFLUX_PREV` (une nouvelle variable).

Si `BURNED_SURFMASS` est nulle, `MY_EVALUATE_RAMP1` est appelée et retourne la ligne correspondant au temps courant : ce fonctionnement est identique à celui de `EVALUATE_RAMP` sauf que la rampe est choisie en fonction du flux incident. En revanche si `BURNED_SURFMASS` n'est plus nulle, `MY_EVALUATE_RAMP2` est appelée. Celle-ci utilise la valeur de masse perdue, `BURNED_SURFMASS`, ainsi que `TABLE_DATA_MASS` pour garantir la conservation de la masse : une fois la colonne sélectionnée en fonction du flux, c'est la ligne pour laquelle `TABLE_DATA_MASS` est supérieure ou égale à `BURNED_SURFMASS` qui est retenue.

En résumé, les ajouts apportés au code source FDS (voir Figure 8.2 et Tableau 8.1) permettent :

- de lire les propriétés du foyer (liste `SURF`), dont un nouveau paramètre, `MLR_TABLE_ID`, qui indique le chemin et le nom du fichier `.csv` contenant les rampes permettant de contrôler l'évolution du MLR en fonction du temps t et de l'éclairement $\dot{q}''$;
- de lire le contenu du fichier `.csv` (procédure `READ_MLR_TABLE`) pour en extraire les temps et fractions de MLR correspondantes (stockés dans `TABLE_DATA_MLR`) et de calculer l'intégrale de chaque rampe (`TABLE_DATA_MASS`) ;
- de suivre l'éclairement à la surface du combustible (calcul inspiré de la grandeur de sortie `INCIDENT HEAT FLUX`) et de choisir la rampe appropriée ;
- de lire la ligne adéquate pour garantir la conservation de la masse, grâce aux variables `TABLE_DATA_MASS` et `BURNED_SURFMASS`, et ainsi de calculer la contribution de chaque cellule au terme source.

8.2 Application

Afin d'évaluer les implémentations présentées ci-dessus, des essais réalisés à échelle réelle (voir Section 7.2) vont être simulés, et les calculs/prédictions comparées aux mesures.

TABEAU 8.1 – Principaux ajouts et modifications (*) au code source de FDS.

Nature et nom	Description
Paramètre d'entrée	
(<code>&SURF</code>) <code>MLR_TABLE_ID</code>	Chemin et nom du fichier contenant la table $F = f(t, \dot{q}'')$
Type	
<code>MLR_TABLES_TYPE</code>	Nouveau type défini dans <code>type.f90</code>
Tableau et variables	
<code>MLR_TABLES</code>	Ensemble de <code>MLR_TABLES_TYPE</code> contenant les variables :
<code>TABLE_DATA_MLR</code>	Données du fichier <code>MLR_TABLE_ID</code> (t , $\dot{q}''$ et F)
<code>TABLE_DATA_MASS</code>	Somme cumulative de chaque colonne/rampe ($\int_1^i F$)
...	Autres variables inspirées de <code>RAMPS</code> (temps max/min et différence, pas de temps) : <code>T_MIN</code> , <code>T_MAX</code> , <code>SPAN</code> et <code>RDT</code>
<code>MASSFLUX_PREV</code>	Permet de garder en mémoire le <code>MLRPUA</code> du pas de temps précédent
<code>BURNED_SURFMASS</code>	Permet de garantir la conservation de la masse
Procédures	
<code>READ_MLR_TABLE</code>	Lecture et stockage des données de <code>MLR_TABLE_ID</code> (<code>read.f90</code>)
<code>CALCULATE_ZZ_F*</code>	Donne $MLRPUA = f(\dot{q}'', t$ ou $\int_1^i F)$ (<code>wall.f90</code>)
<code>MY_EVAUATE_RAMP1</code>	Donne $F = f(\dot{q}'', t)$ (<code>func.f90</code>)
<code>MY_EVAUATE_RAMP2</code>	Donne $F = f(\dot{q}'', \int_1^i F)$ (<code>func.f90</code>)

Dans un premier temps, le cas le plus simple à modéliser a été choisi, à savoir les blocs de $1,00 \times 1,00 \times 0,05 \text{ m}^3$. En effet, ce sont des échantillons de surface assez importante pour simuler une propagation, sans être aussi grande que pour les blocs de 3 ou 6 m^2 , mais surtout ils ont la même épaisseur que les échantillons étudiés au cône calorimètre et qui servent à construire le modèle de perte de masse (voir Section 7.1). Ceci permet d'éviter pour l'instant la complexité supplémentaire introduite par un changement d'épaisseur entre la petite et la grande échelle, et de ne considérer qu'un changement d'aire en passant de $0,10 \times 0,10$ à $1,00 \times 1,00 \text{ m}^2$.

8.2.a Simulation de blocs $1,00 \times 1,00 \times 0,05 \text{ m}^3$: FDS original

Avant d'utiliser la version modifiée de FDS, il est intéressant de réaliser la simulation des essais $1,00 \times 1,00 \times 0,05 \text{ m}^3$ avec la version originale du code et un terme source prescrit classique. Il est donc nécessaire de définir en amont le MLRPUA ou HRRPUA et ses variations temporelles, afin de renseigner les paramètres dédiés (voir Section 8.1.a). Pour cela, un modèle par convolution développé au LCPP par Sayada [129] et présenté en Section 2.2.b.ii a été utilisé. Pour rappel, il s'agit de prédire l'évolution du HRR à échelle réelle à partir du HRRPUA à petite échelle et de l'évolution de l'aire en feu, prédite sur la base de transferts thermiques. Les résultats bruts obtenus au cône calorimètre (Section 7.1) ont donc été utilisés en donnée d'entrée, et le HRR prédit par le modèle est présenté en Figure 8.3. Celui-ci a été utilisé en entrée de FDS, en définissant le HRRPUA et la RAMP associée. L'épaisseur utilisée pour les calculs thermiques, THICKNESS dans la liste SURF, était fixée à l'épaisseur de l'échantillon modélisé (ici 0,05 m). Le reste des paramètres est donné dans le Tableau 8.2, sachant qu'il a été choisi de faire « disparaître » les cellules brûlées (BURN_AWAY=.TRUE.) d'où la définition de BULK_DENSITY.

TABLEAU 8.2 – Valeurs de certains paramètres utilisés pour les simulations de feux de mousse polyuréthane avec FDS (en plus de ceux donnés dans le Tableau 6.2).

Paramètre	Valeur	Unité	Source
CONDUCTIVITY	0.049	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	[156] valeurs moyennes
SPECIFIC_HEAT	2.616	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	
DENSITY	28.	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Fournisseur
EMISSIONIVITY	0.8	—	[157, p. 187]*
IGNITION_TEMPERATURE	250.	$^{\circ}\text{C}$	[129, p. 32]†
BULK_DENSITY	28.	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Fournisseur

* Estimation des auteurs.

† L'auteur indique 250 à 400°C .

Le HRR retourné par FDS est aussi présenté en Figure 8.3. Les valeurs en entrée et sortie sont quasiment identiques car la combustion s'effectue ici en atmosphère libre, sans

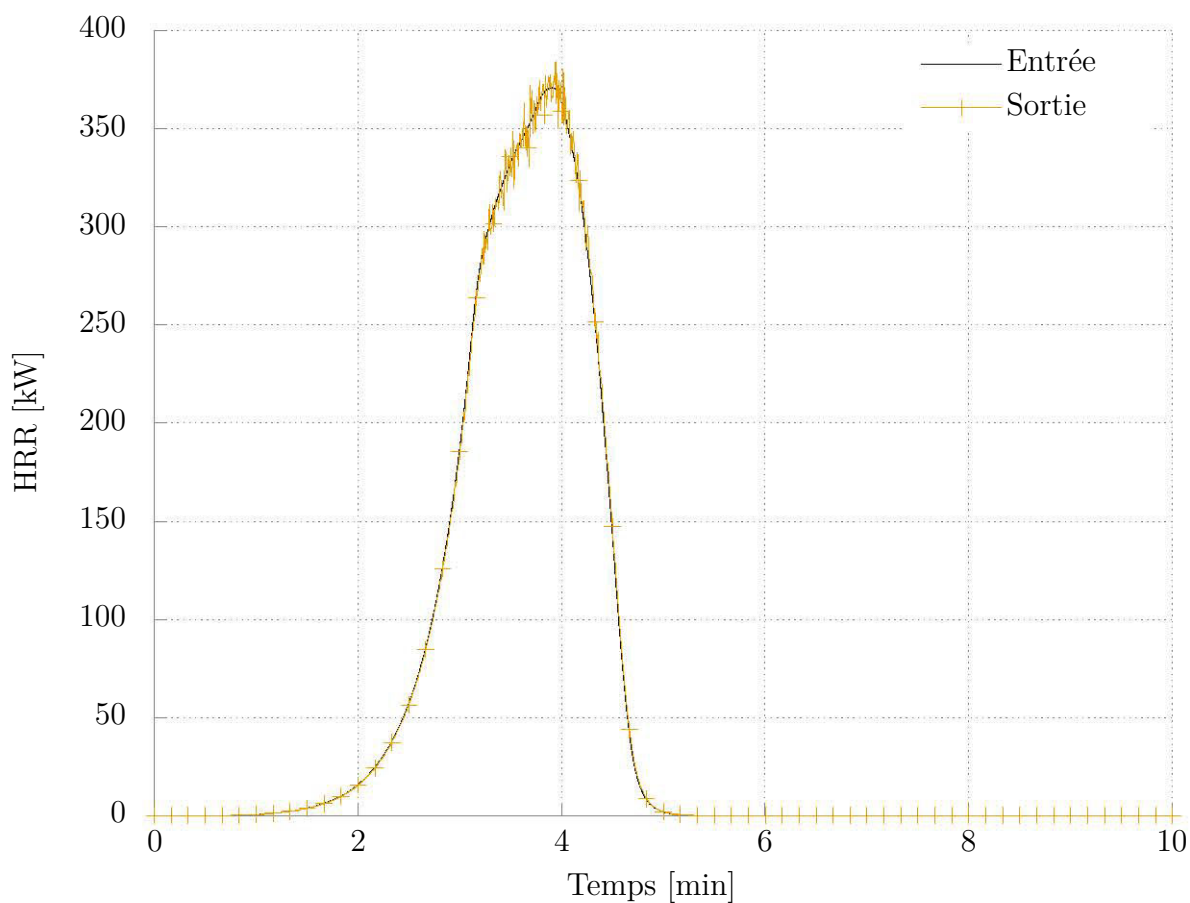


FIGURE 8.3 – Débits calorifiques pour un bloc de mousse polyuréthane de $1,00 \times 1,00 \times 0,05 \text{ m}^3$, en entrée et en sortie d’une simulation avec le code FDS non modifié. Le HRR en entrée a été obtenu avec le modèle de Sayada [129].

limitation d'oxygène, et le terme source prescrit peut donc être suivi exactement. Ces résultats de simulation seront ensuite comparés à ceux obtenus avec la version modifiée de FDS, présentés ci-après.

8.2.b Simulation de blocs $1,00 \times 1,00 \times 0,05 \text{ m}^3$: FDS modifié

La version modifiée de FDS a été utilisée pour reproduire les essais sur de blocs de mousse polyuréthane de $1,00 \times 1,00 \times 0,05 \text{ m}^3$. Le débit de perte de masse était donc prédit en fonction du flux incident, comme décrit en Section 8.1.b : ce fonctionnement est illustré en Figure 8.4, qui présente les valeurs de flux incident et de débit massique de combustible à la surface du foyer à deux instants.

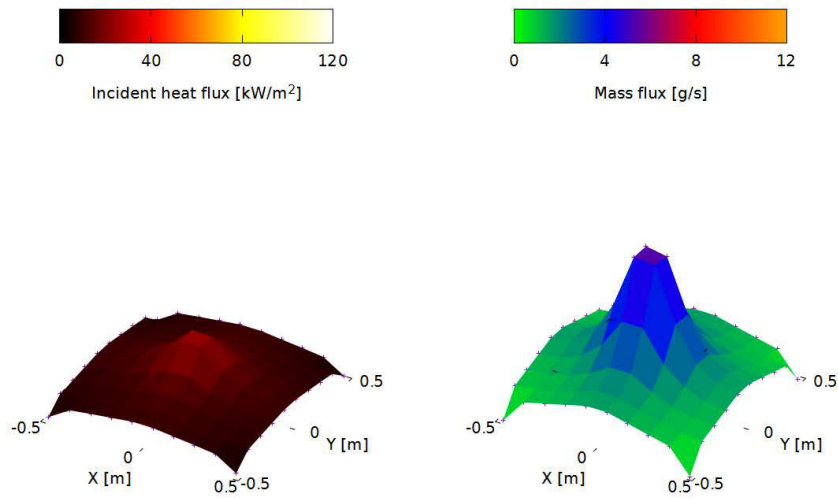
On peut constater qu'en début de simulation (Figure 8.4a), les valeurs de MLR sont directement liées aux valeurs de flux radiatif. Plus en avant dans la simulation (Figure 8.4b), ce dernier contrôle toujours la perte de masse, mais une diminution de MLR est observée au centre de l'échantillon. Ceci est attendu car un combustible soumis à une forte sollicitation thermique se décomposera plus vite et sera donc rapidement épuisé. Ce comportement est ici reproduit dans FDS grâce à la nouvelle donnée d'entrée qu'est la table $MLR = f(t, \dot{q}'')$. Cette dernière est obtenue à partir des essais au cône calorimètre (Section 7.1) et a été modifiée pour tenir compte d'un flux radiatif de la flamme de $10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ (valeurs estimées dans la littérature souvent entre 10 et $40 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, voir p. ex. [153, p. 145, 154]). De plus, le flux minimal a été estimé à $10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$: en dessous de cet éclaircissement les éléments de surface ne perdent pas de masse.

Il est maintenant intéressant de voir si cet ajout permet de reproduire une grandeur globale comme la vitesse de perte de masse : c'est ce qui est présenté en section suivante en comparant les résultats à ceux obtenus avec le modèle de Sayada et aux données expérimentales.

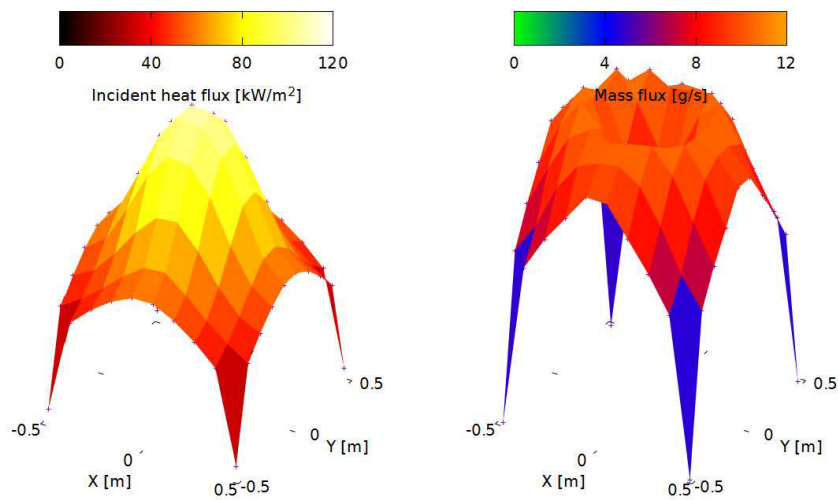
8.2.c Comparaisons

La Figure 8.5 présente la comparaison des résultats des simulations FDS, avec les versions originale et modifiée, aux mesures réalisées lors des essais. On peut remarquer que les MLR prédits par les deux modèles sont proches des données expérimentales, dans leur allure « triangulaire » classique [123] ainsi que par les valeurs qu'ils présentent. Suivant la répétition considérée, le maximum de MLR est tantôt mieux prédit par le modèle de Sayada, tantôt par la version modifiée de FDS. Cette dernière semble mieux prédire la phase de décroissance et la durée de combustion. À noter que les résultats présentés ont été recalés en temps pour faciliter les comparaisons, car il a été jugé qu'une période de latence pouvait avoir lieu après allumage, et cette phase n'est pas étudiée/prise en compte ici.

Ces résultats confirment que le modèle de Sayada donne de bons résultats pour les foyers à échelle intermédiaire, comme cela avait été noté pour un échantillon de $0,3 \times 0,4 \times 0,1 \text{ m}^3$



(a)



(b)

FIGURE 8.4 – Valeurs de flux incident à la surface du foyer (figures de gauche) et de débit massique de combustible (figures de droite) tirées d’une simulation FDS (bloc de mousse polyuréthane de $1,00 \times 1,00 \times 0,05 \text{ m}^3$) à deux instants arbitraires.

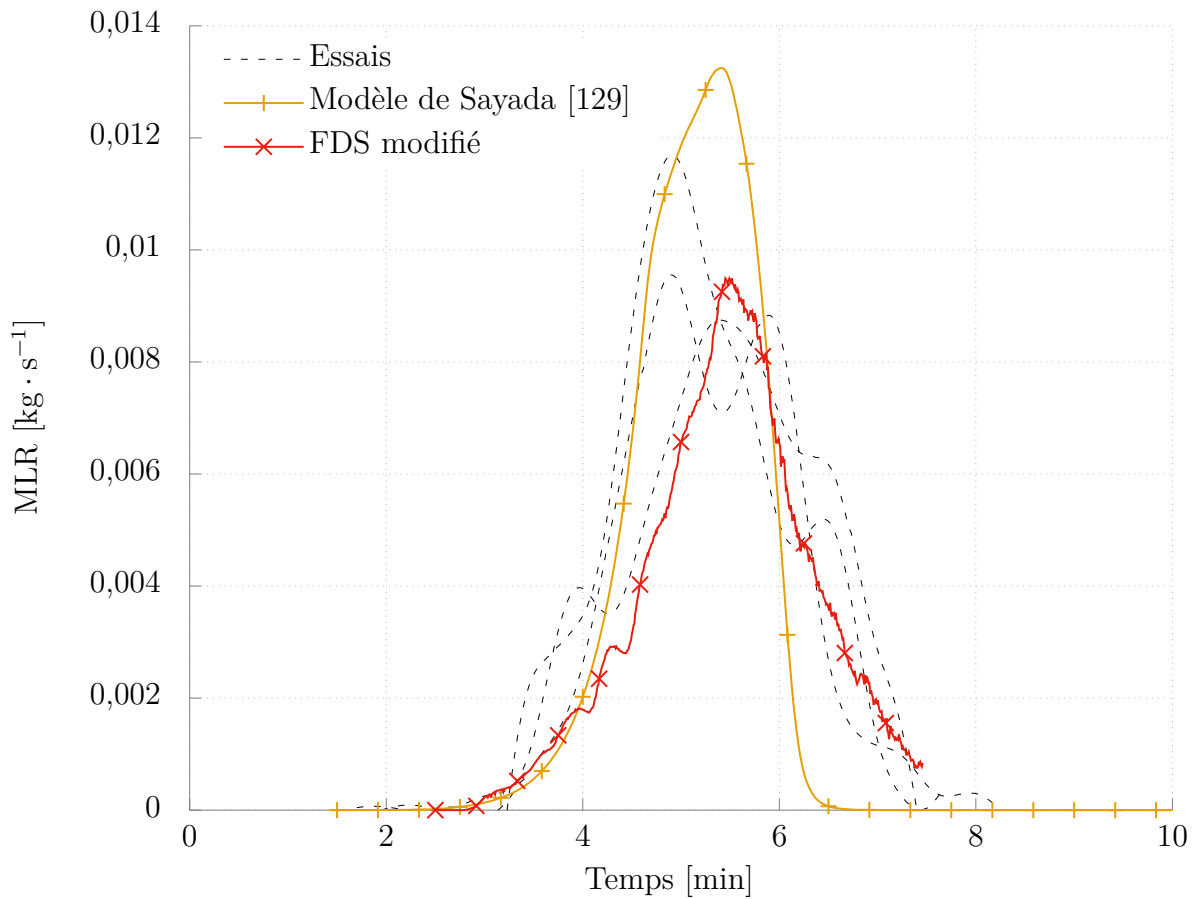


FIGURE 8.5 – Vitesses de perte de masse (MLR) pour des blocs de mousse polyuréthane de $1,00 \times 1,00 \times 0,05 \text{ m}^3$. Comparaison des résultats d’essais, du modèle « simple » de Sayada [129] et de FDS (avec les implémentations présentées plus tôt). Les données ont été recalées en temps.

[129]. Ils montrent aussi que les implémentations effectuées dans le code source permettent de modéliser une propagation de manière crédible, du moins pour l'échelle considérée ici. Il serait maintenant intéressant de voir si ce nouveau modèle permet une prédiction de la propagation à une échelle supérieure, c'est-à-dire pour des échantillons de surface et/ou épaisseur plus importante(s). En effet, c'est par exemple pour des blocs de $1 \times 1,4 \times 0,16 \text{ m}^3$ que le modèle de Sayada atteignait ses limites [129]. Des résultats préliminaires de ce travail sont présentés en section suivante.

8.2.d Échantillons plus épais

Les premières simulations complémentaires ont été faites pour des blocs deux fois plus épais que les échantillons utilisés au cône calorimètre, soit $1,00 \times 1,00 \times 0,10 \text{ m}^3$. Afin de prendre cette différence en compte, une première approche a consisté à considérer deux couches de combustible, c'est-à-dire

```
&OBST XB=-0.5,0.5,-0.5, 0.5,0.0, 0.05, SURF_ID='Foyer',
      BULK_DENSITY=28. /
&OBST XB=-0.5,0.5,-0.5, 0.5,0.05, 0.1, SURF_ID='Foyer',
      BULK_DENSITY=28. /
```

Chaque couche était traitée avec les données du modèle $MLR = f(t, \dot{q}'')$ établi plus tôt pour les échantillons de 5 cm d'épaisseur, et ce jusqu'à éventuellement disparaître (`BURN_AWAY=.TRUE.`).

Une seconde approche a été inspirée par les travaux du CBUF [127] et de Sayada [129] : l'objectif est de modifier le modèle qui prédit le MLR afin de reproduire la combustion d'un échantillon plus épais, en prenant en compte la masse supplémentaire et en déterminant le(s) moment(s) où elle serait perdue. Les données publiées par Robson [124], dont un exemple est donné en Figure 8.6a, montrent que la première croissance n'est pas modifiée par un changement d'épaisseur. En supposant que la diminution du pic de HRRPUA avec l'augmentation de l'épaisseur n'est en fait due qu'à un éloignement de la résistance chauffante (solicitation thermique et donc combustion moins intenses), la principale variation semble être la durée de la première phase. Il a donc été choisi de prolonger cette dernière jusqu'à ce que la masse de l'échantillon plus épais soit atteinte. Cette modification est illustrée en Figure 8.6b. Les courbes $MLR = f(t)$ ainsi « corrigées » ont ensuite été traitées comme décrit en Section 7.1 pour aboutir à un modèle $MLR = f(t, \dot{q}'')$ valable pour les échantillons de 10 cm d'épaisseur.

Des simulations FDS ont été conduites en utilisant l'une ou l'autre de ces approches : deux couches de combustible utilisant les données établies pour 5 cm d'épaisseur, ou une couche utilisant le modèle modifié, représentant une épaisseur de 10 cm. Les résultats de vitesse de perte de masse sont présentés en Figure 8.7, où ils sont aussi comparés au seul essai réalisé pour cette taille d'échantillon.

On peut déjà observer que les deux approches ne donnent pas les mêmes résultats. Après une croissance similaire, la simulation considérant deux couches de 5 cm (Approche 1)

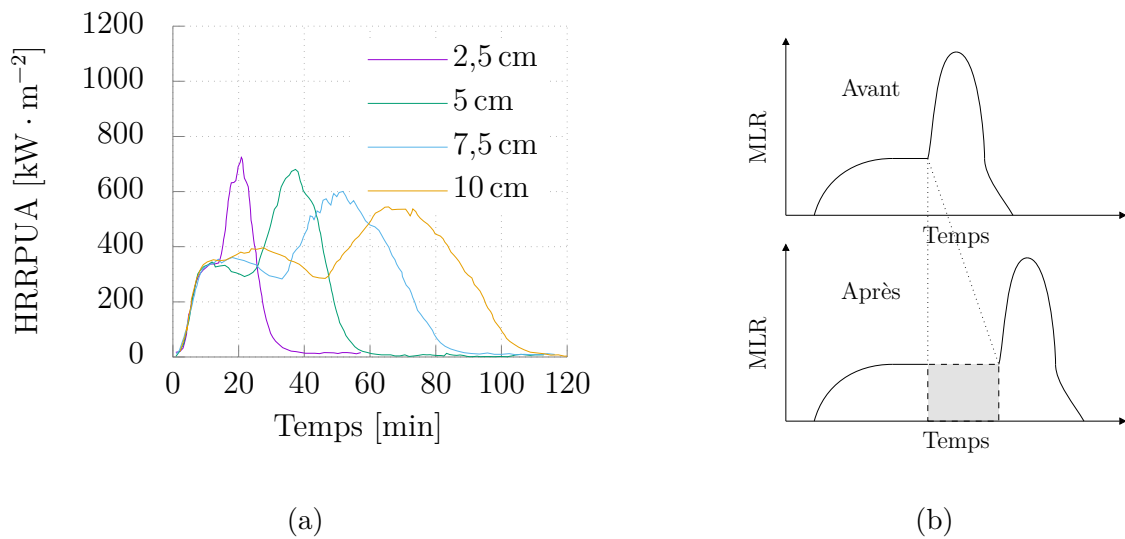


FIGURE 8.6 – Changement d’épaisseur au cône calorimètre : résultats expérimentaux à gauche ($50 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, tirés de [124]) et principe de la correction apportée aux données à droite (masse supplémentaire illustrée par le rectangle gris).

présentent une décroissance, suivie d’un regain d’intensité. Ceci pourrait correspondre aux deux couches qui brûlent l’une après l’autre, la première ne se décomposant pas « assez vite » pour que la propagation s’entretienne et soit continue. Une autre observation intéressante concerne les données expérimentales, qui sont bien reproduites par la seconde approche (une couche de combustible avec le modèle modifié). Ces bons résultats sont à relativiser car un seul essai est disponible pour ces dimensions, mais sont tout de même encourageants. C’est pourquoi un scénario plus compliqué a été simulé ensuite, à savoir un bloc de $1,00 \times 1,00 \times 0,20 \text{ m}^3$.

Les mêmes approches ont été adoptées pour prendre en compte le changement d’épaisseur : l’Approche 1 considère quatre couches de combustible se décomposant suivant le modèle établi pour une épaisseur de 5 cm et l’Approche 2 consiste à corriger les données pour qu’elles représentent une épaisseur de 20 cm. Une combinaison de ces approches est aussi possible, en utilisant le modèle corrigé pour une épaisseur de 10 cm et en l’appliquant à deux couches (Approche 1+2). Les résultats de ces différentes simulations sont présentés en Figure 8.8.

Ici aussi, on remarque une différence entre les Approches 1 et 2, et l’explication formulée précédemment (combustion successive des différentes couches) est cohérente avec le MLR obtenu avec l’Approche 1. Cet effet n’est toutefois pas observé pour l’Approche 1+2, qui considère aussi plusieurs couches de combustible mais donne pourtant les mêmes résultats que l’Approche 2. Ces différences doivent encore être étudiées en détails afin d’en comprendre les causes et idéalement améliorer les modèles.

Concernant la comparaison aux données expérimentales, elle est malheureusement moins bonne que pour les échantillons d’épaisseur moindre : la croissance est relativement bien reproduite mais le MLR maximal est sous-estimé, et la durée de combustion sur-estimée.

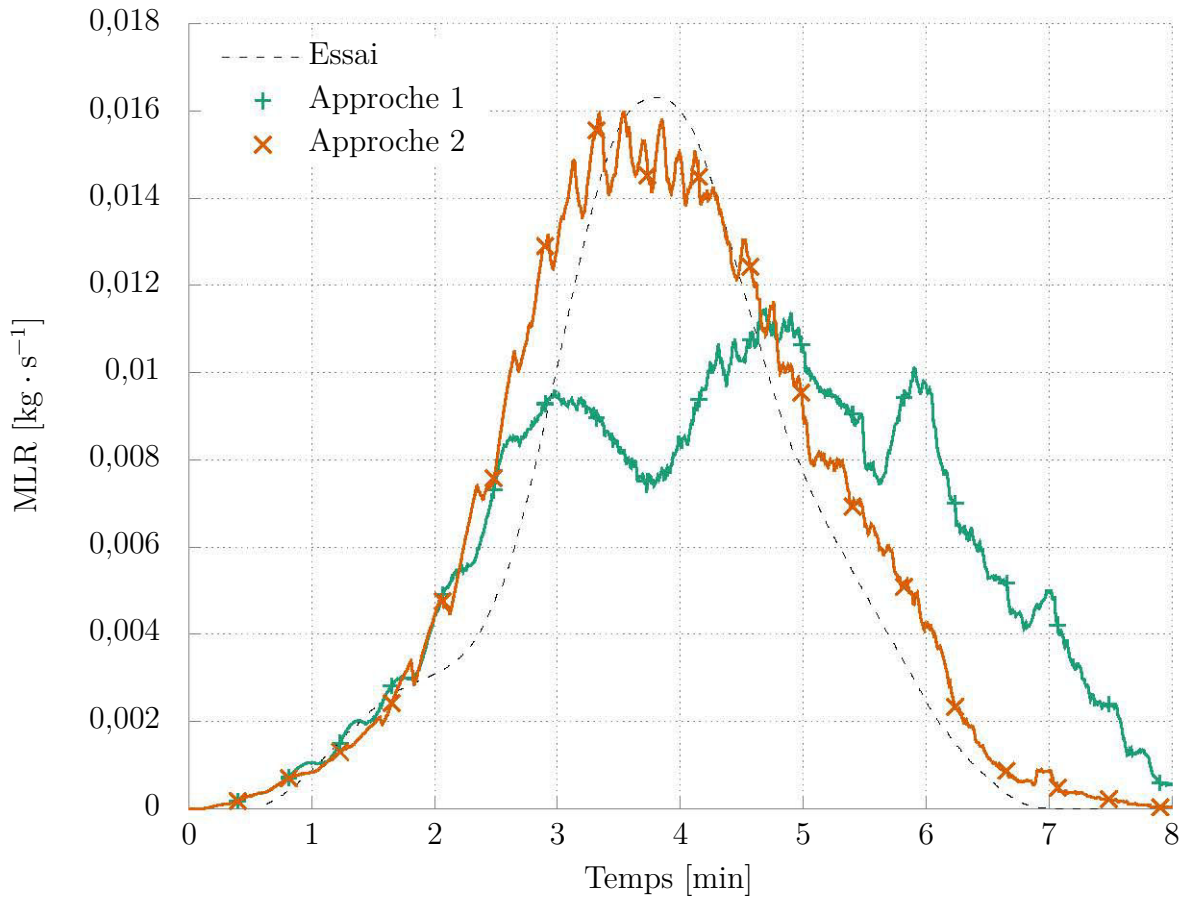


FIGURE 8.7 – Vitesses de perte de masse (MLR) pour des blocs de mousse polyuréthane de $1,00 \times 1,00 \times 0,10 \text{ m}^3$. Comparaison des résultats expérimentaux et numériques (FDS avec les implémentations présentées plus tôt). Données recalées en temps.

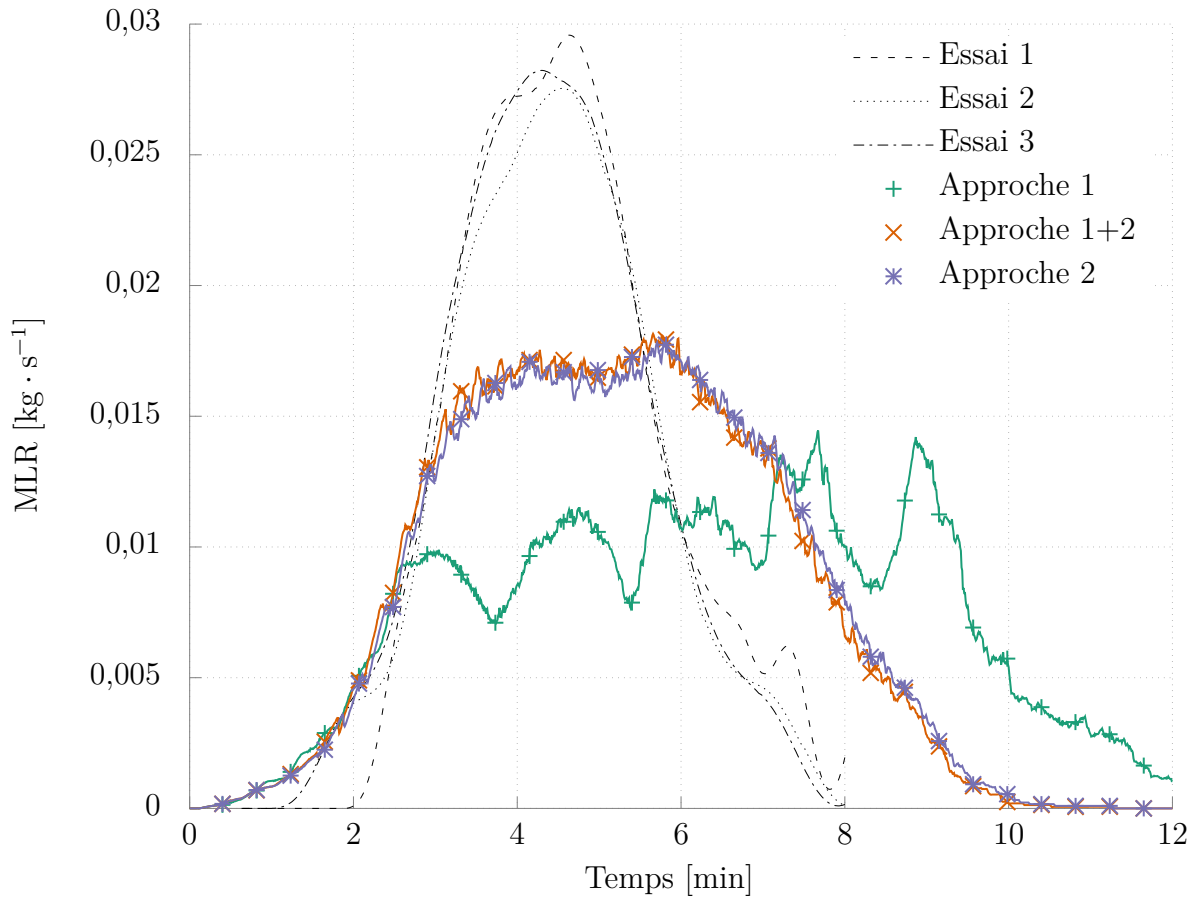


FIGURE 8.8 – Vitesses de perte de masse (MLR) pour des blocs de mousse polyuréthane de $1,00 \times 1,00 \times 0,20 \text{ m}^3$. Comparaison des résultats expérimentaux et numériques (FDS avec les implémentations présentées plus tôt). Données recalées en temps.

Ces écarts n'ont pas encore pu être expliqués, et pourraient être dus à plusieurs facteurs, comme par exemple :

- Une mauvaise estimation de l'éclairement. Étant à la base de l'approche thermique mise en place ici, cette donnée doit être déterminée précisément : il avait été montré que FDS prédisait convenablement les flux radiatifs à différentes positions à l'extérieur de la flamme, mais la qualité des résultats pourrait finalement ne pas être suffisante, ou du moins à l'intérieur de la flamme.
- Un bilan thermique incomplet. Il a été supposé qu'une prise en compte du rayonnement serait suffisante pour prédire le MLR, mais d'autres modes de transfert pourraient s'avérer non négligeables.
- Un modèle $MLR = f(t, \dot{q}'')$ incomplet. En plus de négliger les autres modes de transfert, ce modèle présente aussi des faiblesses dans sa prise en compte du rayonnement, par exemple pour les faibles flux, ce qui pourrait avoir un impact important sur la cinétique de la propagation.
- D'autres phénomènes négligés. Il avait été considéré que le comportement au feu à petite échelle pouvait représenter correctement celui à grande échelle, mais cette hypothèse atteint peut-être ses limites au-delà d'une certaine taille d'échantillon, et des phénomènes propres à l'échelle réelle deviendraient alors importants.

Cette liste n'est pas exhaustive, et sera complétée par les perspectives envisagées (Section 9.2) ainsi que les biais potentiels identifiés tout au long des travaux présentés ici (Annexe A).

Résumé

L'approche thermique retenue pour les travaux présentés ici, c'est-à-dire la prédiction du terme source en fonction des échanges de chaleur, impliquait d'établir le lien entre vitesse de perte de masse (MLR) et rayonnement. La décomposition de la mousse polyuréthane a donc été caractérisée en fonction de l'éclairement, en utilisant le cône calorimètre. Les résultats ont permis d'établir des corrélations décrivant l'évolution temporelle du MLR et les paramètres de ces relations ont ensuite été corrélés au flux radiatif imposé afin d'aboutir à la prédiction recherchée, $MLR = f(t, \dot{q}'')$.

En complément, des essais à plus grande échelle ont permis d'étudier la propagation du feu. Les différents moyens de mesure, et principalement les traitements d'images (vidéos et photos), ont permis de suivre la forme et la taille de la zone dégradée au cours de la propagation. En plus de l'acquisition de connaissances que permettent ces données, résolues en temps et en espace pour certaines, en surface mais aussi à l'intérieur des échantillons, les résultats semblent indiquer que la propagation peut raisonnablement être représentée par une succession d'éléments de surface qui brûlent, en négligeant l'aspect tridimensionnel (« cuvette »). Ceci revient à décrire le combustible comme un assemblage de « briques élémentaires », dont le comportement au feu est déterminé à petite échelle (voir modèle $MLR = f(t, \dot{q}'')$ défini plus tôt), et donc considérer qu'une montée en échelle est possible pour la définition du terme source.

Il a donc été choisi d'utiliser ces résultats dans FDS. Ce dernier n'étant pas prévu pour définir le terme source par une approche thermique, le code a été modifié. Ceci a permis de prendre en compte les données issues du modèle $MLR = f(t, \dot{q}'')$, et donc de simuler la propagation du feu sur des échantillons à échelle réelle à partir de données obtenues au cône calorimètre. Les résultats pour des bloc de mousse polyuréthane de faible épaisseur (5 cm) sont satisfaisants : ils sont comparables sinon meilleurs que ceux obtenus avec le précédent modèle basé sur cette approche (travaux Sayada [129]). De plus, la solution présentée ici est directement intégrée dans l'outil de CFD couramment utilisé en ingénierie et recherche incendie, ce qui la rendrait d'autant plus facile à utiliser. Les simulations pour des épaisseurs plus importantes montrent des résultats encourageants (bon accord pour 10 cm), et différentes pistes d'amélioration ont été proposées pour continuer cette montée en échelle.

Cinquième partie

Conclusion

Chapitre 9

Conclusions et perspectives

9.1 Conclusions

Comme mentionné en introduction, le LCPP peut être amené à utiliser des outils numériques afin de valider des scénarios dans le cadre de la recherche des causes et circonstances d'incendie. La qualité des résultats est directement liée à la façon dont le foyer est décrit, c'est-à-dire à la modélisation du terme source. En effet, tous les sous-modèles des codes de simulation vont, directement ou indirectement, utiliser cette donnée pour prédire les grandeurs d'intérêt (champs de température, de vitesses, flux thermiques...). Plusieurs approches ont été proposées pour définir le terme source, en se basant sur des résultats expérimentaux obtenus à grande ou petite échelle : cette dernière est souvent privilégiée car plus facile et moins coûteuse à mettre en œuvre. Il est alors nécessaire d'utiliser des modèles pour extrapoler les données à l'échelle réelle.

Une brève discussion avait montré que les modèles de pyrolyse, très prometteurs car leur description des réactions en phase condensée les rend théoriquement applicables à tous les scénarios, ne sont pas encore mûrs pour les applications d'investigation post-incendie. Une approche plus simple et robuste a donc été retenue, à savoir les modèles thermiques. Ceux-ci prédisent le terme source uniquement à partir des échanges de chaleur : ici, l'objectif était de prédire la vitesse de perte de masse (MLR) en fonction du rayonnement thermique impactant le combustible. Il a été choisi de ne considérer que les transferts radiatifs car ils jouent un rôle prédominant dans l'entretien de la combustion et la propagation. Il s'agissait donc de caractériser ce mode de transfert, à différentes échelles et pour plusieurs combustibles, afin notamment de déterminer comment le flux rayonné par la flamme peut être prédit, soit par un modèle indépendant, soit par un code de simulation existant, *Fire dynamics simulator* (FDS). La deuxième étape du travail avait pour objectif de déterminer si des données récoltées à petite échelle permettraient de simuler une propagation en vraie grandeur et, le cas échéant, de fournir un modèle permettant de prédire la décomposition en fonction de la sollicitation radiative, pour ensuite le mettre en application dans FDS. Ces travaux et les principaux résultats sont résumés ci-après.

Le rayonnement des flammes a été caractérisé pour différents combustibles (kérosène,

gazole, heptane, mousse polyuréthane et bois) et de nombreuses tailles de foyer (de 0,3 à 3,5 m de côté) grâce à des images visibles ainsi qu'un dispositif d'opacimétrie multispectrale et un spectromètre infrarouge. Les deux principales caractéristiques des flammes, à savoir leur forme et leur puissance émissive, ont ainsi pu être déterminées. Ces résultats montrent par exemple qu'une géométrie simple tel qu'un cône permet de bien reproduire les flammes de kérosène et de mousse polyuréthane, et que l'émission des suies qu'elles contiennent peut être représentée par celle d'un milieu homogène isotherme équivalent. Il est aussi mis en évidence que les flammes étudiées ne peuvent jamais être considérées comme des corps gris, et que seules les flammes de grandes dimensions (ici plus larges que 2 m) émettent comme des corps noirs : une description spectrale du rayonnement peut donc souvent s'avérer utile, notamment lors des premiers instants d'un incendie, lorsque les foyers sont encore de dimension modeste.

Les propriétés de flamme déterminées expérimentalement ont ensuite été utilisées dans un modèle de rayonnement (méthode de Monte-Carlo réciproque) afin de calculer les flux thermiques reçus à différentes positions. Ces prédictions sont en bon accord avec les mesures effectuées lors des essais, ce qui montre que les principaux phénomènes contrôlant le rayonnement des flammes ont été identifiés, caractérisés et pris en compte, pour toutes les tailles de foyer. Les paramètres du milieu équivalent utilisé pour modéliser l'émission des flammes sont aussi faiblement dépendants de la taille du foyer, du moins pour le kérosène, ce qui constitue un avantage de cette approche et semble indiquer que des mesures d'opacimétrie et de spectrométrie réalisées sur quelques tailles de foyer permettraient de prédire le rayonnement de flammes de dimensions variées.

Parce que l'objectif global est de contribuer à l'amélioration de la simulation incendie pour l'investigation, il a été jugé qu'utiliser un code existant, comportant déjà les couplages nécessaires entre prédiction du rayonnement et des autres grandeurs, serait plus judicieux que de développer un nouveau modèle indépendant. C'est pourquoi FDS a été évalué quant à sa capacité à calculer les flux radiatifs reçus à différentes positions. Ceci a été fait en simulant différents essais, et en comparant les prédictions numériques aux mesures. Ce travail montre que FDS donne des résultats convaincants sur ce plan, et il a donc été choisi d'utiliser ce code pour le reste des travaux.

Une fois les transferts radiatifs caractérisés et pris en compte, il était nécessaire de définir leur influence sur la décomposition. Ceci a été fait via une campagne expérimentale au cône calorimètre qui a permis de récolter les données nécessaires à la construction d'un modèle permettant de prédire le MLR en fonction du temps et de l'éclairement. Pour cela, deux fonctions simples (tangente hyperbolique et gaussienne) ont été utilisées pour décrire l'évolution temporelle des résultats de vitesse de perte de masse ($MLR = f(t)$), et leurs paramètres ont ensuite été corrélés au flux radiatif imposé ($\dot{q}''$) afin d'aboutir à un modèle prédisant $MLR = f(t, \dot{q}'')$.

La décomposition, et plus particulièrement la propagation, ont été caractérisées pour des blocs de mousse polyuréthane de taille plus importante, l'étude la plus complète ayant été faite sur des échantillons de 1 à 6 m². Différents moyens de mesure ont permis de suivre les dimensions de la zone dégradée, en surface mais aussi à l'intérieur des blocs. Les résultats montrent pour l'instant que la prise en compte des phénomènes macroscopiques/tridi-

mensionnels comme le creusement de la mousse ne semble pas essentielle, et suggèrent donc qu'une modélisation de la propagation comme une succession d'éléments de surface débitant plus ou moins de gaz combustible est raisonnable. C'est donc l'approche qui a été mise en œuvre dans FDS, en utilisant les données déterminées au cône calorimètre ($MLR = f(t, \dot{q}'')$) pour prédire le comportement au feu de blocs de mousse polyuréthane de différentes dimensions.

Dans sa version originale, FDS ne permet pas d'utiliser l'approche thermique retenue ici. C'est pourquoi des modifications ont été apportées au code source, afin d'utiliser le modèle $MLR = f(t, \dot{q}'')$ développé plus tôt. Ce mode de fonctionnement est jugé plus efficace et robuste que les modèles de pyrolyse, mais aussi moins rigide que les termes sources prescrits habituels, qui par définition ne s'adaptent pas à la sollicitation thermique en cours de simulation. Les résultats pour des échantillons de $1,00 \times 1,00 \times 0,05 \text{ m}^3$ et de $1,00 \times 1,00 \times 0,10 \text{ m}^3$ sont d'ores et déjà satisfaisants, tandis que ceux pour des blocs plus épais doivent encore être améliorés.

En résumé, le terme source a été modélisé selon une approche thermique à partir de données récoltées à petite échelle. L'étude des transferts de chaleur s'est focalisée sur le rayonnement et a mis en évidence les principaux phénomènes impliqués ainsi que leur dépendance spectrale. Des corrélations permettant de prédire le MLR en fonction de l'éclairement ont été déterminées à partir de résultats obtenus au cône calorimètre. Ces prédictions ont ensuite été utilisées dans une version modifiée de FDS afin de prédire la propagation du feu sur des échantillons à échelle réelle. Les simulations menées jusqu'à maintenant présentent des résultats prometteurs.

9.2 Perspectives

Les parties présentées précédemment donnent certes un aperçu de l'ensemble des essais réalisés, mais ne détaillent ensuite que quelques résultats pour le kérosène et la mousse polyuréthane, afin d'illustrer les méthodes et outils mis en place pour l'instant. De nombreuses perspectives sont envisageables, comme exposé ci-dessous, avec les données et modèles disponibles à l'heure actuelle, mais aussi en développant la métrologie, le traitement des résultats expérimentaux ainsi que les modèles.

9.2.a Consolidation et valorisation de l'existant

Le premier travail concernant l'existant serait de traiter les données expérimentales déjà récoltées pour les autres combustibles (heptane, gazole et bois), afin d'aboutir au même type de résultat que pour le kérosène et la mousse polyuréthane. Ceci apporterait des informations sur les propriétés de ces différentes flammes et sur la possibilité d'adopter une démarche de montée en échelle pour ces autres combustibles.

Les données existantes sont aussi résolues temporellement, et cet aspect serait intéressant à prendre en compte dans l'exploitation. Par exemple, la forme de la flamme et ses pro-

priétés radiatives pourraient être décrites tout au long des essais et non plus uniquement en considérant des valeurs moyennes sur la phase stationnaire. Ce travail serait particulièrement utile pour la mousse polyuréthane car elle présente une importante phase de propagation pendant laquelle la flamme est susceptible de changer de propriétés.

L'exploitation des données relatives à la propagation pour la mousse polyuréthane reste aussi à finaliser, notamment en validant les mesures de température et en comparant l'ensemble des résultats.

Les données expérimentales disponibles pourraient être utilisées pour évaluer différents modèles de rayonnement, par exemple des approches simplifiées utilisées en ingénierie (panneau radiant équivalent, flamme solide/facteurs de forme, point source...).

Étant donné qu'il fournit des résultats cohérents à l'extérieur de la flamme, le lancer de rayons pourrait être utilisé pour étudier l'éclairement à l'intérieur de la flamme, là où les mesures sont difficiles à réaliser. Ceci fournirait des informations sur la sollicitation thermique reçue par le combustible et l'entretien de la combustion, ainsi que sur l'évolution de ces grandeurs avec la taille du foyer.

Les résultats obtenus avec la version modifiée de FDS pourraient aussi être comparés à d'autres approches permettant de simuler la décomposition/propagation, à commencer par FDS lui-même mais en utilisant un modèle de pyrolyse ou une vitesse de propagation déterminée.

Enfin, il est important de vérifier et valider les modifications apportées à FDS. Une évaluation de l'influence des modifications sur les performances du code serait aussi utile.

9.2.b Développement des outils et méthodes

Concernant le rayonnement, le modèle de flamme équivalente pourrait être amélioré en prenant en compte de la contribution des gaz (H_2O et CO_2), que ce soit leur émission ou leur absorption.

Le modèle actuel prédisant le MLR en fonction de l'éclairement est aussi perfectible, notamment pour les faibles flux. Ceci pourrait potentiellement être fait en choisissant d'autres fonctions à la place de la tangente hyperbolique et de la gaussienne utilisées ici, ou en adoptant une approche différente pour décrire la dépendance $MLR = f(t, \dot{q}'')$, par exemple par *machine learning* (apprentissage supervisé).

Un autre axe d'amélioration serait de compléter la description des transferts thermiques incluant la convection et la conduction. Ceci passerait par exemple par un bilan thermique plus détaillé au cône calorimètre, pour caractériser en détails la sollicitation. La prise en compte de la variation d'éclairement avec la régression de l'échantillon serait également une amélioration importante. Ces informations pourraient ensuite être intégrées au modèle prédisant le MLR et être utilisées dans FDS.

Les approches pour tenir compte d'un changement d'épaisseur entre la petite et la grande échelle peuvent aussi être améliorées, en utilisant les données de la littérature (p. ex. [124])

ou des essais dédiés. Les résultats pourront être évalués par rapport aux essais présentés dans ce travail (mousse polyuréthane grande échelle). Ce travail est essentiel pour produire un modèle prédisant correctement la propagation dans des configurations réelles à partir de données obtenues à échelle réduite (échantillons plus petits et fins que le combustible modélisé).

À moyen et long termes, les travaux présentés ici pourraient être appliqués à d'autres matériaux mais aussi d'autres configurations de foyer (p. ex. avec des éléments verticaux, un allumage qui ne soit pas central, etc. voir p. ex. [122, 124, 158-160]). L'influence d'un compartiment sur la ventilation et les transferts thermiques pourra aussi être intégrée (voir p. ex. [161]), pour tendre vers une description complète des incendies domestiques.

Bibliographie

- [1] Mathieu SUZANNE. « Conditions d'utilisation de modèles numériques pour l'évaluation de scénarios de départ de feu dans un cadre d'investigation post-incendie ». Thèse de doct. Rouen, France : Institut national des sciences appliquées de Rouen, 5 nov. 2009.
- [2] Camille RIERA. « Modélisation des dégradations relevées après sinistre, couplage avec une campagne expérimentale pour la validation d'une méthodologie d'investigations post-incendie par simulation numérique ». Thèse de doct. Rouen, France : Institut national des sciences appliquées de Rouen, 20 déc. 2013.
- [3] Louis DECOSTER. « Contribution à l'étude et à la modélisation du dépôt des suies lors d'un incendie ». Thèse de doct. Marseille, France : Institut universitaire des systèmes thermiques industriels, 12 jan. 2017.
- [4] K. T. PAUL et D. A. KING. « The burning behaviour of domestic upholstered chairs containing different types of polyurethane foams ». In : *Fire Safety Journal* 16.5 (1^{er} jan. 1990), p. 389-410. ISSN : 0379-7112. DOI : 10.1016/0379-7112(90)90010-C.
- [5] John F. KRASNY, William J. PARKER et Vytenis BABRAUSKAS. *Fire Behavior of Upholstered Furniture and Mattresses*. Norwich, New York, USA : Noyes Publications / William Andrew Publishing, 4 déc. 2000. 447 p. ISBN : 978-0-8155-1720-7.
- [6] R. H. KRÄMER et al. « Heat release and structural collapse of flexible polyurethane foam ». In : *Polymer Degradation and Stability* 95.6 (juin 2010), p. 1115-1122. ISSN : 0141-3910. DOI : 10.1016/j.polyimdegradstab.2010.02.019.
- [7] *White paper on Upholstered Furniture Flammability*. Quincy, Massachusetts : National Fire Protection Association, sept. 2013, p. 32.
- [8] Marthy AHRENS. *Home Fires That Began With Upholstered Furniture*. Quincy, Massachusetts : National Fire Protection Association, fév. 2017, p. 61.
- [9] René HAGEN et al. *Fire safety of upholstered furniture and mattresses in the domestic area : European fire services recommendations on test methods*. Federation of the European Union Fire Officer Associations (FEU), mai 2017, p. 61.
- [10] FIRE SERVICE ACADEMY. *Fatal residential fires in Europe. A preliminary assessment of risk profiles in nine European countries*. Arnhem, the Netherlands : Institute for Safety, 20 nov. 2018, p. 85.

- [11] C. CHIVAS et al. « Assessment of risks and benefits in the use of flame retardants in upholstered furniture in continental Europe ». In : *Fire Safety Journal* 44.5 (1^{er} juil. 2009), p. 801-807. ISSN : 0379-7112. DOI : 10.1016/j.firesaf.2009.03.009.
- [12] *Évaluation des risques liés à l'exposition aux retardateurs de flamme dans les meubles rembourrés - Partie 1 - Efficacité contre le risque d'incendie des retardateurs de flamme dans les meubles rembourrés*. Rapport d'expertise collective. Maison-Alfort, France : Anses, sept. 2014.
- [13] *Évaluation des risques liés à l'exposition aux retardateurs de flamme dans les meubles rembourrés - Partie 2 - Évaluation des effets sur la santé et sur l'environnement, et estimation qualitative du rapport bénéfices/risques*. Avis de l'Anses, Rapport d'expertise collective. Maison-Alfort, France : Anses, sept. 2015.
- [14] Aurélien THIRY. « Modélisation de la décomposition thermique des solides ». Thèse de doct. Nancy, France : Université de Lorraine, 13 déc. 2018.
- [15] K.T. PAUL et S.D. CHRISTIAN. « Standard Flaming Ignition Sources for Upholstered Composites, Furniture and Bed Assembly Tests ». In : *Journal of Fire Sciences* 5.3 (1^{er} mai 1987), p. 178-211. ISSN : 0734-9041. DOI : 10.1177/073490418700500304.
- [16] Vytenis BABRAUSKAS et Richard D. PEACOCK. « Heat release rate : The single most important variable in fire hazard ». In : *Fire Safety Journal* 18.3 (1992), p. 255-272. ISSN : 0379-7112. DOI : [http://dx.doi.org/10.1016/0379-7112\(92\)90019-9](http://dx.doi.org/10.1016/0379-7112(92)90019-9). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0379711292900199>.
- [17] Vytenis BABRAUSKAS. « Heat Release Rates ». In : *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Sous la dir. de Morgan J. HURLEY et al. New York, NY : Springer New York, 2016, p. 799-904. ISBN : 978-1-4939-2565-0. DOI : 10.1007/978-1-4939-2565-0_26.
- [18] M.J. HURLEY et al., éd. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Fifth Edition. New York, USA : Springer-Verlag, 2016. ISBN : 978-1-4939-2565-0.
- [19] Vytenis BABRAUSKAS. « Estimating large pool fire burning rates ». In : *Fire Technology* 19.4 (1^{er} nov. 1983), p. 251-261. ISSN : 0015-2684, 1572-8099. DOI : 10.1007/BF02380810.
- [20] D. BURGESS et M. HERTZBERG. « Heat transfer in flames ». In : *Advances in thermal engineering*. Sous la dir. de N. H. AFGAN et J. M. BEER. Second Edition. Washington, USA : Scripta Book Co., 1974, p. 413. ISBN : 0-470-00931-4 978-0-470-00931-4.
- [21] John L. DE RIS. « Fire radiation—A review ». In : *Symposium (International) on Combustion*. Seventeenth Symposium (International) on Combustion 17.1 (1^{er} jan. 1979), p. 1003-1016. ISSN : 0082-0784. DOI : 10.1016/S0082-0784(79)80097-1.
- [22] A. C. FERNANDEZ-PELLO et T. HIRANO. « Controlling Mechanisms of Flame Spread ». In : *Combustion Science and Technology* 32.1 (1^{er} juin 1983), p. 1-31. ISSN : 0010-2202. DOI : 10.1080/00102208308923650.

-
- [23] D. BURTON et al. « Development of a Hybrid Field/Zone Fire Model ». In : *Fire Safety Science* 10 (2011), p. 1373-1385. DOI : 10.3801/IAFSS.FSS.10-1373.
- [24] James G. QUINTIERE et Colleen A. WADE. « Compartment Fire Modeling ». In : *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Sous la dir. de Morgan J. HURLEY et al. New York, NY : Springer New York, 2016, p. 981-995. ISBN : 978-1-4939-2565-0. DOI : 10.1007/978-1-4939-2565-0_29.
- [25] William D. WALTON, Douglas J. CARPENTER et Christopher B. WOOD. « Zone Computer Fire Models for Enclosures ». In : *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Sous la dir. de Morgan J. HURLEY et al. New York, NY : Springer New York, 2016, p. 1024-1033. ISBN : 978-1-4939-2565-0. DOI : 10.1007/978-1-4939-2565-0_31.
- [26] Samia HAOUARI HARRAK. « Effets couplés des systèmes de sécurité en situation d'incendie à l'échelle d'un bâtiment ». GDR Feux. 22èmes journées du GDR Feux. Paris, France, 2 juin 2016. URL : <http://docs.gdrfeux.univ-lorraine.fr/Paris2/LEMTA1.pdf>.
- [27] W. JAHN, G. REIN et J. L. TORERO. « Forecasting fire growth using an inverse zone modelling approach ». In : *Fire Safety Journal* 46.3 (1^{er} avr. 2011), p. 81-88. ISSN : 0379-7112. DOI : 10.1016/j.firesaf.2010.10.001.
- [28] Tarek BEJI et al. « On the Use of Real-Time Video to Forecast Fire Growth in Enclosures ». In : *Fire Technology* 50.4 (1^{er} juil. 2014), p. 1021-1040. ISSN : 1572-8099. DOI : 10.1007/s10694-012-0262-0.
- [29] Cheng-Chun LIN et Liangzhu (Leon) WANG. « Real-Time Forecasting of Building Fire Growth and Smoke Transport via Ensemble Kalman Filter ». In : *Fire Technology* 53.3 (1^{er} mai 2017), p. 1101-1121. ISSN : 1572-8099. DOI : 10.1007/s10694-016-0619-x.
- [30] Kevin MCGRATTAN et Stewart MILES. « Modeling Fires Using Computational Fluid Dynamics (CFD) ». In : *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Sous la dir. de Morgan J. HURLEY et al. New York, NY : Springer New York, 2016, p. 1034-1065. ISBN : 978-1-4939-2565-0. DOI : 10.1007/978-1-4939-2565-0_32.
- [31] W M G MALALASEKERA et F LOCKWOOD. « Computer Simulation of the King's Cross Fire : Effect of Radiative Heat Transfer on Fire Spread ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Mechanical Engineering Science* 205.3 (1^{er} mai 1991), p. 201-208. ISSN : 0263-7154. DOI : 10.1243/PIME_PROC_1991_205_110_02.
- [32] O. DELÉMONT et J. -C. MARTIN. « Application of Computational Fluid Dynamics modelling in the process of forensic fire investigation : Problems and solutions ». In : *Forensic Science International. Selected Articles of the 4th European Academy of Forensic Science Conference (EAFS2006)* June 13-16, 2006 Helsinki, Finland 167.2 (11 avr. 2007), p. 127-135. ISSN : 0379-0738. DOI : 10.1016/j.forsciint.2006.06.053.

- [33] Tzu-Sheng SHEN, Yu-Hsiang HUANG et Shen-Wen CHIEN. « Using fire dynamic simulation (FDS) to reconstruct an arson fire scene ». In : *Building and Environment* 43.6 (1^{er} juin 2008), p. 1036-1045. ISSN : 0360-1323. DOI : 10.1016/j.buildenv.2006.11.001.
- [34] Gregory E. GORBETT. « Computer Fire Models for Fire Investigation and Reconstruction ». In : *Proceedings of the Third International Symposium on Fire Investigation Science and Technology*. ISFI 2008. Cincinnati, USA : National Association of Fire Investigators, 2008, p. 23-34.
- [35] Jen-Hao CHI. « Reconstruction of an Inn Fire Scene Using the Fire Dynamics Simulator (FDS) Program ». In : *Journal of Forensic Sciences* 58 (s1 2013), S227-S234. ISSN : 1556-4029. DOI : 10.1111/j.1556-4029.2012.02297.x.
- [36] Jen-Hao CHI. « Using thermal analysis experiment and Fire Dynamics Simulator (FDS) to reconstruct an arson fire scene ». In : *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 113.2 (1^{er} août 2013), p. 641-648. ISSN : 1572-8943. DOI : 10.1007/s10973-012-2764-x.
- [37] Anthony Chun Yin YUEN et al. « Fire scene investigation of an arson fire incident using computational fluid dynamics based fire simulation ». In : *Building Simulation* 7.5 (1^{er} oct. 2014), p. 477-487. ISSN : 1996-8744. DOI : 10.1007/s12273-014-0164-9.
- [38] Wolfram JAHN et al. « Using Computational Fluid Dynamics in the forensic analysis of a prison fire ». In : *Forensic Science International* 253 (1^{er} août 2015), e33-e42. ISSN : 0379-0738. DOI : 10.1016/j.forsciint.2015.06.003.
- [39] Guillermo REIN et al. « Round-robin study of a priori modelling predictions of the Dalmarnock Fire Test One ». In : *Fire Safety Journal* 44.4 (1^{er} mai 2009), p. 590-602. ISSN : 0379-7112. DOI : 10.1016/j.firesaf.2008.12.008.
- [40] Michael F MODEST. *Radiative Heat Transfer*. Third Edition. Boston, USA : Academic Press, 1^{er} jan. 2013. ISBN : 978-0-12-386944-9.
- [41] Kevin MCNESBY. *Flame and Temperature Measurement Using Vibrational Spectroscopy*. ARL-TR-2378. Army Research Lab Aberdeen Proving Ground MD, jan. 2001. DOI : 10.1016/B978-0-12-374413-5.00146-9.
- [42] C. L. TIEN et S. C. LEE. « Flame radiation ». In : *Progress in Energy and Combustion Science* 8.1 (1^{er} jan. 1982), p. 41-59. ISSN : 0360-1285. DOI : 10.1016/0360-1285(82)90008-9.
- [43] Merwin SIBULKIN. « Estimates of the Effect of Flame Size on Radiation from Fires ». In : *Combustion Science and Technology* 7.3 (1^{er} mai 1973), p. 141-143. ISSN : 0010-2202. DOI : 10.1080/00102207308952352.
- [44] A. ÀGUEDA et al. « Experimental study of the emissivity of flames resulting from the combustion of forest fuels ». In : *International Journal of Thermal Sciences* 49.3 (1^{er} mar. 2010), p. 543-554. ISSN : 1290-0729. DOI : 10.1016/j.ijthermalsci.2009.09.006.

-
- [45] G. PARENT et al. « Measurement of infrared radiation emitted by the flame of a vegetation fire ». In : *International Journal of Thermal Sciences* 49.3 (1^{er} mar. 2010), p. 555-562. ISSN : 1290-0729. DOI : 10.1016/j.ijthermalsci.2009.08.006.
- [46] P. BOULET et al. « Experimental Investigation of Radiation Emitted by Optically Thin to Optically Thick Wildland Flames ». In : *Journal of Combustion* 2011 (2011), p. 137437. DOI : 10.1155/2011/137437.
- [47] S. SUDHEER et S. V. PRABHU. « Measurement of flame emissivity of gasoline pool fires ». In : *Nuclear Engineering and Design*. 4th International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology (HTR 2008), with Regular Papers 240.10 (1^{er} oct. 2010), p. 3474-3480. ISSN : 0029-5493. DOI : 10.1016/j.nucengdes.2010.04.043.
- [48] Ashok T. MODAK. « The burning of large pool fires ». In : *Fire Safety Journal* 3.3 (1^{er} fév. 1981), p. 177-184. ISSN : 0379-7112. DOI : 10.1016/0379-7112(81)90042-4.
- [49] Lawrence ORLOFF. « Simplified radiation modeling of pool fires ». In : *Symposium (International) on Combustion*. Eighteenth Symposium (International) on Combustion 18.1 (1^{er} jan. 1981), p. 549-561. ISSN : 0082-0784. DOI : 10.1016/S0082-0784(81)80060-4.
- [50] A. SHINOTAKE, S. KODA et K. AKITA. « An Experimental Study of Radiative Properties of Pool Fires Of an Intermediate Scale ». In : *Combustion Science and Technology* 43.1 (1^{er} mai 1985), p. 85-97. ISSN : 0010-2202. DOI : 10.1080/00102208508946998.
- [51] Elsa PASTOR et al. « Experimental methodology for characterizing flame emissivity of small scale forest fires using infrared thermography techniques ». In : *Proceedings of the 4th Int. Conf. on Forest Fire Research*. Sous la dir. de D.X. VIEGAS. Coimbra, Portugal : Millpress, Rotterdam, Netherlands, 2002, p. 1-11.
- [52] Eulàlia PLANAS-CUCHI et al. « Determination of Flame Emissivity in Hydrocarbon Pool Fires Using Infrared Thermography ». In : *Fire Technology* 39.3 (1^{er} juil. 2003), p. 261-273. ISSN : 1572-8099. DOI : 10.1023/A:1024193515227.
- [53] Jean-Luc DUPUY et al. « Thermal infrared emission–transmission measurements in flames from a cylindrical forest fuel burner ». In : *International Journal of Wildland Fire* 16.3 (20 juil. 2007), p. 324-340. ISSN : 1448-5516. DOI : 10.1071/WF06043.
- [54] S. SUDHEER et S. V. PRABHU. « Measurement of Flame Emissivity of Hydrocarbon Pool Fires ». In : *Fire Technology* 48.2 (1^{er} avr. 2012), p. 183-217. ISSN : 0015-2684, 1572-8099. DOI : 10.1007/s10694-010-0206-5.
- [55] Vinay C. RAJ et S. V. PRABHU. « A refined methodology to determine the spatial and temporal variation in the emissivity of diffusion flames ». In : *International Journal of Thermal Sciences* 115 (1^{er} mai 2017), p. 89-103. ISSN : 1290-0729. DOI : 10.1016/j.ijthermalsci.2017.01.016.

- [56] Vinay C. RAJ et S. V. PRABHU. « Measurement of geometric and radiative properties of heptane pool fires ». In : *Fire Safety Journal* 96 (1^{er} mar. 2018), p. 13-26. ISSN : 0379-7112. DOI : 10.1016/j.firesaf.2017.12.003.
- [57] Işıl AYRANCI et al. « Determination of soot temperature, volume fraction and refractive index from flame emission spectrometry ». In : *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. EURO THERM Seminar 78 - Computational Thermal Radiation in Participating Media II 104.2 (1^{er} mar. 2007), p. 266-276. ISSN : 0022-4073. DOI : 10.1016/j.jqsrt.2006.07.013.
- [58] Işıl AYRANCI, Rodolphe VAILLON et Nevin SELÇUK. « Near-infrared emission spectrometry measurements for nonintrusive soot diagnostics in flames ». In : *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. The Fifth International Symposium on Radiative Transfer 109.2 (1^{er} jan. 2008), p. 349-361. ISSN : 0022-4073. DOI : 10.1016/j.jqsrt.2007.08.013.
- [59] Jill M. SUO-ANTTILA et al. « Characterization of thermal radiation spectra in 2m pool fires ». In : *Proceedings of the Combustion Institute* 32.2 (1^{er} jan. 2009), p. 2567-2574. ISSN : 1540-7489. DOI : 10.1016/j.proci.2008.06.044.
- [60] L. A. GRITZO, Y. R. SIVATHANU et W. GILL. « Transient Measurements of Radiative Properties, Soot Volume Fraction and Soot Temperature in a Large Pool Fire ». In : *Combustion Science and Technology* 139.1 (1^{er} oct. 1998), p. 113-136. ISSN : 0010-2202. DOI : 10.1080/00102209808952083.
- [61] Huai-Chun ZHOU et al. « Experimental investigations on visualization of three-dimensional temperature distributions in a large-scale pulverized-coal-fired boiler furnace ». In : *Proceedings of the Combustion Institute* 30.1 (1^{er} jan. 2005), p. 1699-1706. ISSN : 1540-7489. DOI : 10.1016/j.proci.2004.08.090.
- [62] Huawei LIU et al. « Measurement of distributions of temperature and wavelength-dependent emissivity of a laminar diffusion flame using hyper-spectral imaging technique ». In : *Measurement Science and Technology* 27.2 (2016), p. 025201. ISSN : 0957-0233. DOI : 10.1088/0957-0233/27/2/025201.
- [63] J. R. BEYREIS, H. W. MONSEN et A. F. ABBASI. « Properties of wood crib flames ». In : *Fire Technology* 7.2 (1^{er} mai 1971), p. 145-155. ISSN : 1572-8099. DOI : 10.1007/BF02588954.
- [64] P. H. THOMAS. « Rates of Spread of Some Wind-driven Fires ». In : *Forestry : An International Journal of Forest Research* 44.2 (1^{er} jan. 1971), p. 155-175. ISSN : 0015-752X. DOI : 10.1093/forestry/44.2.155.
- [65] C. QIAN et K. SAITO. « Measurements of pool-fire temperature using IR technique ». In : *Combustion Fundamentals and Applications : Joint Technical Meeting Proceedings*. San Antonio, USA, 1995, p. 81-86.
- [66] E. DEN BREEJEN et al. « Infrared Measurements of Energy Release and Flame Temperatures of Forest Fires ». In : *Proceedings of the 3rd Int. Conf. on Forest Fire Research*. Sous la dir. de D.X. VIEGAS. Coimbra, Portugal : ADAI - Associacao para o Desenvolvimento da Aerodinamica Industrial, 1998, p. 517-553.

-
- [67] Giacomo EREZ et al. « Flame properties of large kerosene fires ». In : *Journal of Physics : Conference Series* 1107.4 (2018), p. 042035. ISSN : 1742-6596. DOI : 10.1088/1742-6596/1107/4/042035.
- [68] Michael F MODEST. « Radiative Properties of Particulate Media ». In : *Radiative Heat Transfer*. Sous la dir. de Michael F MODEST. Third Edition. Boston, USA : Academic Press, 1^{er} jan. 2013, p. 387-439. ISBN : 978-0-12-386944-9. DOI : 10.1016/B978-0-12-386944-9.50012-1.
- [69] Thomas STEINHAUS et al. « Large-scale pool fires ». In : *Thermal Science* 11.2 (2007), p. 101-118.
- [70] K. WAKATSUKI et al. « Effects of fuel absorption on radiative heat transfer in methanol pool fires ». In : *Proceedings of the Combustion Institute* 31.2 (1^{er} jan. 2007), p. 2573-2580. ISSN : 1540-7489. DOI : 10.1016/j.proci.2006.08.049.
- [71] Gregory LINTERIS et al. « Absorption and reflection of infrared radiation by polymers in fire-like environments ». In : *Fire and Materials* 36.7 (2012), p. 537-553. ISSN : 1099-1018. DOI : 10.1002/fam.1113.
- [72] P. BOULET et al. « Optical and radiative properties of clear PMMA samples exposed to a radiant heat flux ». In : *International Journal of Thermal Sciences* 82 (1^{er} août 2014), p. 1-8. ISSN : 1290-0729. DOI : 10.1016/j.ijthermalsci.2014.03.013.
- [73] Topi SIKANEN et Simo HOSTIKKA. « Modeling and simulation of liquid pool fires with in-depth radiation absorption and heat transfer ». In : *Fire Safety Journal* 80 (1^{er} fév. 2016), p. 95-109. ISSN : 0379-7112. DOI : 10.1016/j.firesaf.2016.01.002.
- [74] Gunnar HESKESTAD. « Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment ». In : *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Sous la dir. de Morgan J. HURLEY et al. New York, NY : Springer New York, 2016, p. 396-428. ISBN : 978-1-4939-2565-0. DOI : 10.1007/978-1-4939-2565-0_13.
- [75] P. H. THOMAS. « The size of flames from natural fires ». In : *Symposium (International) on Combustion* 9.1 (1^{er} jan. 1963), p. 844-859. ISSN : 0082-0784. DOI : 10.1016/S0082-0784(63)80091-0.
- [76] Gunnar HESKESTAD. « Luminous heights of turbulent diffusion flames ». In : *Fire Safety Journal* 5.2 (1^{er} jan. 1983), p. 103-108. ISSN : 0379-7112. DOI : 10.1016/0379-7112(83)90002-4.
- [77] E. E. ZUKOSKI. « Fluid Dynamic Aspects of Room Fires ». In : *Fire Safety Science : Proceedings of the First International Symposium*. New York, USA : Hemisphere, 1986, p. 1-30. ISBN : 978-0-89116-456-2.
- [78] J. COOK, Z. BAHRAMI et R. J. WHITEHOUSE. « A comprehensive program for calculation of flame radiation levels ». In : *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 3.1 (1^{er} jan. 1990), p. 150-155. ISSN : 0950-4230. DOI : 10.1016/0950-4230(90)85039-C.

- [79] A. PALACIOS et J. CASAL. « Assessment of the shape of vertical jet fires ». In : *Fuel* 90.2 (1^{er} fév. 2011), p. 824-833. ISSN : 0016-2361. DOI : 10.1016/j.fuel.2010.09.048.
- [80] Gansu SHEN et al. « A Model Considering the Flame Volume for Prediction of Thermal Radiation from Pool Fire ». In : *Fire Technology* (26 sept. 2018). ISSN : 1572-8099. DOI : 10.1007/s10694-018-0779-y.
- [81] Kuibin ZHOU et Juncheng JIANG. « Thermal Radiation From Vertical Turbulent Jet Flame : Line Source Model ». In : *Journal of Heat Transfer* 138.4 (29 déc. 2015), p. 042701-042701-8. ISSN : 0022-1481. DOI : 10.1115/1.4032151.
- [82] Delphine M. LABOUREUR et al. « Experimental study on propane jet fire hazards : Assessment of the main geometrical features of horizontal jet flames ». In : *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 41 (1^{er} mai 2016), p. 355-364. ISSN : 0950-4230. DOI : 10.1016/j.jlp.2016.02.013.
- [83] Kuibin ZHOU et al. « Thermal Radiation from Fire Whirls : Revised Solid Flame Model ». In : *Fire Technology* 50.6 (1^{er} nov. 2014), p. 1573-1587. ISSN : 1572-8099. DOI : 10.1007/s10694-013-0360-7.
- [84] John R. HOWELL et M. Pinar MENGÜÇ. « Radiative transfer configuration factor catalog : A listing of relations for common geometries ». In : *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 112.5 (1^{er} mar. 2011). With supplementary material, p. 910-912. ISSN : 0022-4073. DOI : 10.1016/j.jqsrt.2010.10.002.
- [85] Ashok T. MODAK. « Thermal radiation from pool fires ». In : *Combustion and Flame* 29 (1^{er} jan. 1977), p. 177-192. ISSN : 0010-2180. DOI : 10.1016/0010-2180(77)90106-7.
- [86] Lawrence ORLOFF et John DE RIS. « Froude modeling of pool fires ». In : *Symposium (International) on Combustion*. Nineteenth Symposium (International) on Combustion 19.1 (1^{er} jan. 1982), p. 885-895. ISSN : 0082-0784. DOI : 10.1016/S0082-0784(82)80264-6.
- [87] H. E. ANDERSON. « Fire spread and flame shape ». In : *Fire Technology* 4.1 (1^{er} fév. 1968), p. 51-58. ISSN : 1572-8099. DOI : 10.1007/BF02588606.
- [88] P. S. MASON et al. « Estimating Thermal Radiation Fields from 3D Flame Reconstruction ». In : *Fire technology* (2009). ISSN : 0015-2684. DOI : 10.1007/s10694-008-0041-0.
- [89] L. ROSSI et al. « A 3D vision system for the measurement of the rate of spread and the height of fire fronts ». In : *Measurement Science and Technology* 21.10 (août 2010), p. 105501. ISSN : 0957-0233. DOI : 10.1088/0957-0233/21/10/105501.
- [90] L. ROSSI, M. AKHLOUFI et Y. TISON. « On the use of stereovision to develop a novel instrumentation system to extract geometric fire fronts characteristics ». In : *Fire Safety Journal*. Forest Fires 46.1 (1^{er} jan. 2011), p. 9-20. ISSN : 0379-7112. DOI : 10.1016/j.firesaf.2010.03.001.

-
- [91] L. ROSSI et al. « Measurement of the geometric characteristics of a fire front by stereovision techniques on field experiments ». In : *Measurement Science and Technology* 22.12 (nov. 2011), p. 125504. ISSN : 0957-0233. DOI : 10.1088/0957-0233/22/12/125504.
- [92] J. DOI, S. SATO et T. MIYAKE. « Three-Dimensional Measurement of the Shape of Combustion Flames ». In : *Laser Diagnostics and Modeling of Combustion*. Sous la dir. de Kazuo IINUMA et al. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1987, p. 195-202. ISBN : 978-3-642-45635-0. DOI : 10.1007/978-3-642-45635-0_25.
- [93] Frédéric MORANDINI et al. « Image-Based Diagnostic System for the Measurement of Flame Properties and Radiation ». In : *Fire Technology* (15 mai 2019). ISSN : 1572-8099. DOI : 10.1007/s10694-019-00873-1.
- [94] F. C. LOCKWOOD et N. G. SHAH. « A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures ». In : *Symposium (International) on Combustion*. Eighteenth Symposium (International) on Combustion 18.1 (1^{er} jan. 1981), p. 1405-1414. ISSN : 0082-0784. DOI : 10.1016/S0082-0784(81)80144-0.
- [95] Bengt G. CARLSON et Kaye D. LATHROP. « Transport Theory — The Method of Discrete Ordinates ». In : *Computing Methods in Reactor Physics*. Sous la dir. de H. GREENSPAN, C. N. KELBER et D. OKRENT. New York, USA : Gordon & Breach, 1968.
- [96] W. A. FIVELAND. « Discrete-Ordinates Solutions of the Radiative Transport Equation for Rectangular Enclosures ». In : *Journal of Heat Transfer* 106.4 (1^{er} nov. 1984), p. 699-706. ISSN : 0022-1481. DOI : 10.1115/1.3246741.
- [97] G. D. RAITHBY et E. H. CHUI. « A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures With Participating Media ». In : *Journal of Heat Transfer* 112.2 (1^{er} mai 1990), p. 415-423. ISSN : 0022-1481. DOI : 10.1115/1.2910394.
- [98] John C. CHAI, HaeOk S. LEE et Suhas V. PATANKAR. « Finite volume method for radiation heat transfer ». In : *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 8.3 (1994), p. 419-425. DOI : 10.2514/3.559.
- [99] G. D. RAITHBY. « Discussion of the Finite-Volume Method for Radiation, and Its Application Using 3d Unstructured Meshes ». In : *Numerical Heat Transfer, Part B : Fundamentals* 35.4 (1^{er} juin 1999), p. 389-405. ISSN : 1040-7790. DOI : 10.1080/104077999275802.
- [100] Craig L. BEYLER. « Fire Hazard Calculations for Large, Open Hydrocarbon Fires ». In : *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Sous la dir. de M.J. HURLEY et al. Fifth Edition. New York, USA : Springer-Verlag, 2016, p. 2591-2663. ISBN : 978-1-4939-2565-0.
- [101] Dougal DRYSDALE. *An Introduction to Fire Dynamics*. Third Edition. Chichester, UK : John Wiley & Sons, 12 juil. 2011. ISBN : 978-0-470-31903-1 978-1-119-97546-5. DOI : 10.1002/9781119975465.

- [102] Anthony COLLIN. « Transferts de chaleur couplés rayonnement - conduction - convection : Application à des rideaux d'eau soumis à une intense source radiative ». thesis. Nancy 1, 1^{er} jan. 2006.
- [103] Kevin MCGRATTAN et al. *Fire Dynamics Simulator - User's Guide*. NIST Special Publication 1019 Sixth Edition. National Institute of Standards et Technology, VTT Technical Research Centre of Finland, 4 fév. 2019. DOI : 10.6028/NIST.SP.1019;Revision:FDS6.7.1-0-g14cc738.
- [104] Kevin MCGRATTAN et al. *Fire Dynamics Simulator - Technical Reference Guide Volume 1 : Mathematical Model*. NIST Special Publication 1019 Sixth Edition. National Institute of Standards et Technology, VTT Technical Research Centre of Finland, 4 fév. 2019. DOI : 10.6028/NIST.SP.1018;Revision:FDS6.7.1-0-g14cc738.
- [105] William L. GROSSHANDLER. *RADCAL : A Narrow-Band Model for Radiation Calculations in a Combustion Environment*. NIST Technical Note 1402 Sixth Edition. National Institute of Standards et Technology, avr. 1993.
- [106] Artur WITKOWSKI, Anna A. STEC et T. Richard HULL. « Thermal Decomposition of Polymeric Materials ». In : *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Sous la dir. de Morgan J. HURLEY et al. New York, NY : Springer New York, 2016, p. 167-254. ISBN : 978-1-4939-2565-0. DOI : 10.1007/978-1-4939-2565-0_7.
- [107] Amale BOUKRIM. « Mousses de polyuréthane à l'eau ». thesis. Pau, France : Université de Pau, 18 nov. 2011.
- [108] William M. PITTS. « Applied Heat Flux Distribution and Time Response Effects on Cone Calorimeter Characterization of a Commercial Flexible Polyurethane Foam ». In : *Fire Technology* 50.3 (1^{er} mai 2014), p. 635-672. ISSN : 1572-8099. DOI : 10.1007/s10694-011-0235-8.
- [109] M. RAVEY et Eli M. PEARCE. « Flexible polyurethane foam. I. Thermal decomposition of a polyether-based, water-blown commercial type of flexible polyurethane foam ». In : *Journal of Applied Polymer Science* 63.1 (3 jan. 1997), p. 47-74. ISSN : 1097-4628. DOI : 10.1002/(SICI)1097-4628(19970103)63:1<47::AID-APP7>3.0.CO;2-S.
- [110] Lucas BUSTAMANTE VALENCIA. « Experimental and numerical investigation of the thermal decomposition of materials at three scales : application to polyether polyurethane foam used in upholstered furniture ». Thèse de doct. Poitiers, France : École nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique, 20 nov. 2009.
- [111] Éric GUILLAUME. *Modélisation de la décomposition thermique des matériaux en cas d'incendie*. 10 avr. 2013. URL : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/risques-d-incendie-42583210/modelisation-de-la-decomposition-thermique-des-materiaux-en-cas-d-incendie-se2066/>.

-
- [112] *Essais de réaction au feu - Débit calorifique, taux de dégagement de fumée et taux de perte de masse - Partie 1 : Débit calorifique (méthode au calorimètre à cône) et taux de dégagement de fumée (mesurage dynamique)*. ISO 5660-1 :2015. ISO, mar. 2015.
 - [113] *Standard Test Methods for Measurement of Material Flammability Using a Fire Propagation Apparatus (FPA)*. ASTM E2058 - 13a. ASTM, 2013.
 - [114] *Reaction to fire tests – Spread of flame – Part 2 : Lateral spread on building and transport products in vertical configuration*. ISO 5658-2 :2006. ISO, sept. 2006.
 - [115] *Essais de réaction au feu des produits de construction - Produits de construction à l'exclusion des revêtements de sol exposés à une sollicitation thermique provoquée par un objet isolé en feu*. NF EN 13823+A1. AFNOR, jan. 2015.
 - [116] *Reaction to fire tests - Room corner test for wall and ceiling lining products - Part 1 : Test method for a small room configuration*. ISO 9705-1 :2016. ISO, fév. 2016.
 - [117] Vytenis BABRAUSKAS. « Development of the cone calorimeter—A bench-scale heat release rate apparatus based on oxygen consumption ». In : *Fire and Materials* 8.2 (1984), p. 81-95. ISSN : 1099-1018. DOI : 10.1002/fam.810080206.
 - [118] V. BABRAUSKAS. « The Development and Evolution of the Cone Calorimeter : A Review of 12 Years of Research and Standardization ». In : *Fire Standards in the International Marketplace* (jan. 1995). DOI : 10.1520/STP15551S.
 - [119] Vytenis BABRAUSKAS. « The Cone Calorimeter ». In : *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Sous la dir. de Morgan J. HURLEY et al. New York, NY : Springer New York, 2016, p. 952-980. ISBN : 978-1-4939-2565-0. DOI : 10.1007/978-1-4939-2565-0_28.
 - [120] Aurélien THIRY et al. « Different approaches for fire source modeling application to Arcueil experiments ». In : *INTERFLAM 2010*. T. Volume 2. Nottingham University, UK : Interscience Communications Ltd, 5 juil. 2010, p. 1623-1628. ISBN : 978-0-9541216-6-2.
 - [121] Frida VERMINA LUNDSTRÖM, Patrick van HEES et Éric GUILLAUME. « A review on prediction models for full-scale fire behaviour of building products ». In : *Fire and Materials* 41.3 (1^{er} avr. 2017), p. 225-244. ISSN : 1099-1018. DOI : 10.1002/fam.2380.
 - [122] John U. EZINWA. *Modeling Full Scale Fire Test Behaviour of Polyurethane Foams Using Cone Calorimeter Data*. Saskatoon, Canada : University of Saskatchewan, mai 2009.
 - [123] Stanley A. AMES. « Upholstered furniture : Prediction by Correlations ». In : *Heat Release in Fires*. Sous la dir. de Vytenis BABRAUSKAS et William J. PARKER. London, UK : Elsevier, 1992, p. 519-543. ISBN : 1-85166-794-6.
 - [124] Luke Douglas ROBSON. *Scalability of Cone Calorimeter Test Results for the Prediction of Full Scale Fire Behavior of Polyurethane Foam*. Saskatoon, Canada : University of Saskatchewan, août 2014.

- [125] Vytenis BABRAUSKAS et John F. KRASNY. *Fire behavior of upholstered furniture*. NBS Monograph 173. National Bureau of Standards, nov. 1985, p. 101.
- [126] Tomoyuki MIZUNO et al. « Burning Behaviour of Urethane Foam Mattresses ». In : *Fire Science and Technology* 1.1 (1981), p. 33-44. DOI : 10.3210/fst.1.33.
- [127] Björn SUNDSTRÖM, éd. *CBUF, Fire Safety of Upholstered Furniture - the final report of the CBUF research programme*. European Commission Measurements and Testing Report EUR 16477 EN. 1995. 395 p.
- [128] Krishna S. MUDAN. « Geometric view factors for thermal radiation hazard assessment ». In : *Fire Safety Journal* 12.2 (1^{er} oct. 1987), p. 89-96. ISSN : 0379-7112. DOI : 10.1016/0379-7112(87)90024-5.
- [129] Raphaël SAYADA. *Implémentation de modèles physiques pour améliorer la methode dite par produit de convolution pour transposer des résultats d'essais de comportement au feu du laboratoire à l'échelle réelle*. Paris, France : Laboratoire Central de la Préfecture de Police, Aix-Marseille Université, 25 mar. 2014.
- [130] A. LAMORLETTE. « Analytical Modeling of Solid Material Ignition Under a Radiant Heat Flux Coming From a Spreading Fire Front ». In : *Journal of Thermal Science and Engineering Applications* 6.4 (26 août 2014), p. 044501-044501. ISSN : 1948-5085. DOI : 10.1115/1.4028204.
- [131] H. S. CARSLAW et J. C. JAEGER. *Conduction of Heat in Solids*. Second Edition. London, UK : Oxford University Press, 1959.
- [132] Mark A. DIETENBERGER. « Upholstered furniture : detailed model ». In : *Heat Release in Fires*. Sous la dir. de Vytenis BABRAUSKAS et Stephen J. GRAYSON. London, UK : Elsevier, 1992, p. 479-518. ISBN : 1-85166-794-6.
- [133] Gamal N. AHMED, Mark A. DIETENBERGER et Walter W. JONES. *Calculating Flame Spread on Horizontal and Vertical Surfaces*. NISTIR 5392. Gaithersburg, USA : National Institute of Standards et Technology, avr. 1994.
- [134] Kazuhiko IDO et al. « Algebraic Equations for Calculating Surface Flame Spread and Burning of a Cubical-Shaped Polyurethane Foam Block ». In : *Fire Science and Technology 2015*. Singapore : Springer, 2017, p. 427-435.
- [135] ISO 5660-1. *Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1 : Heat release rate (cone calorimeter method)*. 2002.
- [136] Alexis LHUILLIER-MARCHAND. « Propagation des feux de végétation : expérimentations à l'échelle du laboratoire et validation d'un propagateur ». HAL Id : tel-01487015. thesis. Université de Lorraine, 23 sept. 2016. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01487015>.
- [137] Adrien LEROY. *Caractérisation expérimentale et modélisation du terme source à l'échelle du cône calorimètre*. Paris, France : Laboratoire Central de la Préfecture de Police, École Nationale Supérieure de Techniques Avancées Bretagne, sept. 2018.
- [138] Vytenis BABRAUSKAS, William H. TWILLEY et William J. PARKER. « The effects of specimen edge conditions on heat release rate ». In : *Fire and Materials* 17.2 (1^{er} mar. 1993), p. 51-63. ISSN : 1099-1018. DOI : 10.1002/fam.810170202.

-
- [139] E. PASTOR et al. « Computing the rate of spread of linear flame fronts by thermal image processing ». In : *Fire Safety Journal* 41.8 (1^{er} nov. 2006), p. 569-579. ISSN : 0379-7112. DOI : 10.1016/j.firesaf.2006.05.009.
- [140] Gilles PARENT et al. « Spectral radiation emitted by kerosene pool fires ». In : *Fire Safety Journal* 108 (1^{er} sept. 2019), p. 102847. ISSN : 0379-7112. DOI : 10.1016/j.firesaf.2019.102847.
- [141] Romain MEINIER. « Étude expérimentale et analytique de l'inflammation de câbles électriques ». GDR Feux. 25^{èmes} journées du GDR Feux. Rouen, France, 6 déc. 2018. URL : <http://docs.gdrfeux.univ-lorraine.fr/Rouen3/IRSN1.pdf>.
- [142] Gunnar HESKESTAD. « Engineering relations for fire plumes ». In : *Fire Safety Journal* 7.1 (1^{er} jan. 1984), p. 25-32. ISSN : 0379-7112. DOI : 10.1016/0379-7112(84)90005-5.
- [143] G. HESKESTAD. « Flame Heights Of Fuel Arrays With Combustion In Depth ». In : *Fire Safety Science* 5 (1997), p. 427-438. DOI : 10.3801/IAFSS.FSS.5-427.
- [144] E. E. ZUKOSKI, B. M. CETEGEN et T. KUBOTA. « Visible structure of buoyant diffusion flames ». In : *Symposium (International) on Combustion*. Twentieth Symposium (International) on Combustion 20.1 (1^{er} jan. 1985), p. 361-366. ISSN : 0082-0784. DOI : 10.1016/S0082-0784(85)80522-1.
- [145] J. M. SOUIL et al. « Experimental and Theoretical Study of Thermal Radiation from Freely Burning Kerosene Pool Fires ». In : *Dynamics of Reactive Systems Part I : Flames and Configurations ; Part II : Modeling and Heterogeneous Combustion*. Progress in Astronautics and Aeronautics 105 (Part I 1986), p. 388. DOI : 10.2514/5.9781600865794.0388.0401.
- [146] Hiroshi KOSEKI. « Combustion properties of large liquid pool fires ». In : *Fire Technology* 25.3 (1^{er} août 1989), p. 241-255. ISSN : 0015-2684, 1572-8099. DOI : 10.1007/BF01039781.
- [147] Camille SAUTOT et al. « Radiative Flux Affecting Vertical Steel Element Away from the Fire - Simplified Method LOCAFI ». In : *10th International Conference on Structures in Fire*. SiF 2018. Belfast, UK, 6 juin 2018.
- [148] C. H. LIN, Y. M. FERNG et W. S. HSU. « Investigating the effect of computational grid sizes on the predicted characteristics of thermal radiation for a fire ». In : *Applied Thermal Engineering* 29.11 (1^{er} août 2009), p. 2243-2250. ISSN : 1359-4311. DOI : 10.1016/j.applthermaleng.2008.11.010.
- [149] Y. M. FERNG et C. H. LIN. « Investigation of appropriate mesh size and solid angle number for CFD simulating the characteristics of pool fires_with experiments assessment ». In : *Nuclear Engineering and Design* 240.4 (1^{er} avr. 2010), p. 816-822. ISSN : 0029-5493. DOI : 10.1016/j.nucengdes.2009.12.001.

- [150] Adrien LEROY et al. « Simplified Methodology to Predict Polyurethane Foam Mass Loss Rate in the Cone Calorimeter ». In : *Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. ISFEH9. Sous la dir. d'A. SNEGIREV et al. T. 2. Saint Petersburg, Russia : Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 21 avr. 2019. ISBN : 978-5-7422-6498-9 (Vol. 2) ; 978-5-7422-6497-2. DOI : 10.18720/spbpu/2/k19-43.
- [151] Mary L. GALASKA et al. « Apparatus for the vertical orientation cone calorimeter testing of flexible polyurethane foams ». In : *Fire and Materials* 40.1 (2016), p. 158-176. ISSN : 1099-1018. DOI : 10.1002/fam.2277.
- [152] William M. PITTS. « Role of two stage pyrolysis in fire growth on flexible polyurethane foam slabs ». In : *Fire and Materials* 38.3 (1^{er} avr. 2014), p. 323-338. ISSN : 1099-1018. DOI : 10.1002/fam.2183.
- [153] Fabien HERMOUET. « Développement d'une approche innovante de modélisation de la cinétique de décomposition thermique des matériaux solides en espaces confinés sous-ventilés. Application aux incendies en tunnel ». Thèse de doct. Chasseneuil-du-Poitou, France : École nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique, 18 déc. 2015.
- [154] Conor G. MCCOY, Jessica L. TILLES et Stanislav I. STOLIAROV. « Empirical Model of flame heat feedback for simulation of cone calorimetry ». In : *Fire Safety Journal* 103 (1^{er} jan. 2019), p. 38-48. ISSN : 0379-7112. DOI : 10.1016/j.firesaf.2018.11.006.
- [155] Jianping ZHANG et al. « Experimental and numerical study of burning behaviors of flaxboard with intumescent coating and nanoparticles in the cone calorimeter and single burning item tests ». In : *Fire and Materials* 36.7 (2012), p. 554-564. ISSN : 1099-1018. DOI : 10.1002/fam.1114.
- [156] D. S. W. PAU et al. « Thermophysical properties of polyurethane foams and their melts ». In : *Fire and Materials* 38.4 (2014), p. 433-450. ISSN : 1099-1018. DOI : 10.1002/fam.2188.
- [157] Michael L. HOBBS et Gordon H. LEMMON. « Polyurethane foam response to fire in practical geometries ». In : *Polymer Degradation and Stability* 84.2 (1^{er} mai 2004), p. 183-197. ISSN : 0141-3910. DOI : 10.1016/j.polymdegradstab.2003.10.009.
- [158] Konrad WILKENS. « Large-scale fire testing of polyurethane foam slabs : the influence of ignition location and walls ». Poster. 12th International Symposium on Fire Safety Science. Lund, Sweden, 2017.
- [159] Marc L. JANSSENS et al. *Reducing Uncertainty of Quantifying the Burning Rate of Upholstered Furniture*. Washington, USA : National Institute of Justice, 31 mai 2012, p. 207.
- [160] Konrad WILKENS et Patrick VAN HEES. « Experimental Investigation into the Influence of Ignition Location on Flame Spread and Heat Release Rates ». In : *INTERFLAM 2019*. Royal Holloway College, UK : Interscience Communications Ltd, 1^{er} juil. 2019.

-
- [161] Jonathan WAHLQVIST. « Numerical modeling of the coupled feedback between pool fires and their environment ». Thèse de doct. Lund, Sweden : Lund University, 2018.
- [162] Anh-Thu TRAN. « Étude de la dégradation d'un matériau d'obturation endodontique soumis aux rayonnements thermiques : intérêt médico-légal ». Thèse d'exercice. Paris, France : Université Paris 7, 2015.

Annexe A

Liste des biais potentiels

Le travail présenté ici présente potentiellement plusieurs biais, que ce soit de manière générale dans l'approche retenue, les hypothèses adoptées, mais aussi dans la mise en pratique, dans la conception et l'exploitation des essais : cette partie, inspirée d'autres documents (p. ex. [162]), vise à en lister un maximum, en s'efforçant de comprendre leur origine, d'évaluer leur impact potentiel et éventuellement de proposer des solutions pour les éviter à l'avenir. L'accent est mis sur les travaux expérimentaux, mais une critique similaire pourrait être faite concernant la partie numérique (modèles de rayonnement, simulations FDS...).

A.1 Hypothèses générales

- L'approche thermique retenue fait l'hypothèse que la décomposition (MLR) peut être prédite uniquement à partir des transferts thermiques, ce qui néglige certains couplages qui peuvent exister. Il serait donc nécessaire d'évaluer la validité de cette hypothèse, d'autant plus si le travail présenté ici est appliqué aux feux sous-ventilés, pour lesquels le rôle de l'oxygène devient particulièrement important.
- En plus du point précédent, il a été supposé que les transferts thermiques peuvent être réduits au rayonnement, en négligeant ainsi entièrement la conduction et la convection. Cette hypothèse forte n'a pas été évaluée, et il serait utile d'étudier plus en détails la contribution des différents modes de transfert.

A.2 Partie expérimentale

A.2.a Mousses polyuréthane : essais et échantillons

- La mousse polyuréthane utilisée n'a jamais produit une quantité significative de liquide, et présente donc un comportement différent de ce qui est généralement décrit (expérience du LCPP mais aussi [6, 151] p. ex.). Ceci pourrait être dû à une

différence dans la formulation du produit (composants principaux, additifs) ou dans le procédé de fabrication, mais ces éléments n'ont pas été caractérisés. L'impact de cette différence sur les résultats n'a pas été évalué, mais il a été considéré que ce point n'était pas crucial car les principales comparaisons petite-grande échelle ont été faites entre échantillons de même nature.

- La combustion de certains blocs de mousse polyuréthane a été interrompue à l'aide d'extincteurs CO_2 , mais l'impact de ce procédé sur les échantillons n'a été évalué que visuellement (pas de phénomène particulier observé). En l'état il n'est pas possible de garantir que les échantillons aient été « figés » et que la décomposition ne se soit pas poursuivie. De plus, les mesures ont été réalisées quelques mois plus tard et sur un site différent : l'impact de cette période et du transport sur les échantillons dégradés n'a pas été quantifié (seul un bloc a été visiblement abîmé et donc écarté de l'exploitation).

A.2.b Traitement des résultats : généralités

- Afin d'effectuer des comparaisons entre les différentes mesures, les résultats ont été recalés *a posteriori* en fonction de leur allure. Il serait plus rigoureux de synchroniser l'ensemble de la métrologie afin d'éviter ce travail mais aussi de s'assurer que tout décalage ayant un sens physique soit conservé et puisse être interprété.
- La période considérée comme la phase stationnaire a été déterminée en se basant sur l'allure des résultats une fois recalés, en privilégiant le MLR et ensuite les autres grandeurs (hauteur de flamme, flux thermiques...). Il serait judicieux de définir cette phase de manière plus rigoureuse (p. ex. limites dans les variations du MLR), en particulier pour les essais ne présentant pas de « plateau » clair, comme par exemple certains foyers de mousse polyuréthane.
- De manière générale, l'analyse des incertitudes n'a pas été faite, ce qui peut limiter l'interprétation des résultats expérimentaux.

A.2.c Traitement d'images

- Certaines images étaient de faible qualité ou présentaient des éléments rendant difficile leur traitement. Ceci était dû à des contraintes techniques (puissance du foyer, matériel disponible...) mais devrait être évité autant que possible, en identifiant clairement les images destinées à un traitement/des mesures et en s'assurant de leur qualité, en particulier :
 - Le cadre, enfin d'englober tous les phénomènes d'intérêt. Par exemple ici le haut de certaines flammes n'a pas été capté.
 - L'angle de vue, afin de faciliter la calibration et de ne capter que les informations pertinentes. Par exemple ici certaines caméras avaient une vue sur l'intérieur de bacs utilisés pour les feux de liquide, ce qui a nécessité un travail supplémentaire lors du traitement pour distinguer la flamme du bac enflammé et a potentiellement conduit à une perte d'information.

- La calibration, afin de rapporter les résultats du traitement à des dimensions réelles et de corriger les déformations induites par la caméra et sa position par rapport à l'objet étudié. Par exemple ici certains essais ont été réalisés sans mire : la conversion pixels $\rightarrow$ mètres a été faite en se basant sur deux points du décor, mais la correction des déformations n'a pas pu être faite faute de références.
- Les reflets ou autre éléments du décor perturbant le traitement (seuillage, calculs...). Une attention particulière a par exemple été portée aux protections aluminisées qui peuvent refléter la flamme.
- Sauf cas particulier, une seule caméra a été exploitée, ce qui n'offre qu'un seul angle de vue et ne permet pas de détecter une éventuelle asymétrie de la flamme. Les quelques comparaisons de résultats issus de deux caméras perpendiculaires n'ont pas montré de différence notable, mais il serait judicieux de généraliser ces comparaisons.
- Des techniques de seuillage relativement basiques ont été utilisées, et leurs paramètres rarement ajustés au cas par cas (seulement pour les images particulièrement lumineuses ou sombres). Cette partie essentielle du traitement pourrait certainement être améliorée, et le seuillage adapté plus finement aux différentes images (à défaut de contrôler les conditions lors des essais).
- Les formes de flamme ont été déduites de profils constitués par les largeurs de flamme à des hauteurs arbitraires : l'influence de cette discrétisation n'a pas été évaluée.
- Des images dans le domaine visible ont été utilisées pour déterminer la forme de flamme et modéliser son rayonnement, qui se fait pourtant principalement dans le domaine infrarouge (les autres mesures sont d'ailleurs réalisées à ces longueurs d'onde). L'impact de ce choix n'a pas été évalué, et il serait intéressant de comparer les profils de flamme dans les domaines visible et infrarouge, ainsi que l'influence des éventuelles différences sur les résultats présentés ici.

A.2.d Thermométrie pour le suivi de la propagation

- La position des thermocouples à l'intérieur des blocs de mousse polyuréthane ne peut être garantie, et l'incertitude sur celle-ci est difficile à quantifier. Ces points semblent difficilement perfectibles.
- Le critère de température pour établir l'arrivée de la décomposition/flamme est basé sur différentes tentatives faites au début de l'exploitation des essais, mais il mériterait une étude de sensibilité plus approfondie et si possible une valeur basée sur des éléments physiques.
- L'inertie des thermocouples n'a pour l'instant pas été prise en compte : ceci pourrait être fait à partir des propriétés des capteurs.

Annexe B

Différences entre essais ADP et PROMETHEI

B.1 Rappel des différences observées

Lors de l'exploitation des hauteurs de flamme, des différences ont été observées entre les essais réalisés à PROMETHEI et ADP, alors que les résultats de chaque campagne indiquaient une bonne répétabilité (voir Figure B.1). À titre d'exemple, la taille de bac commune (70 cm de côté) présentait un MLR près de deux fois plus important à ADP (voir Figure B.2).

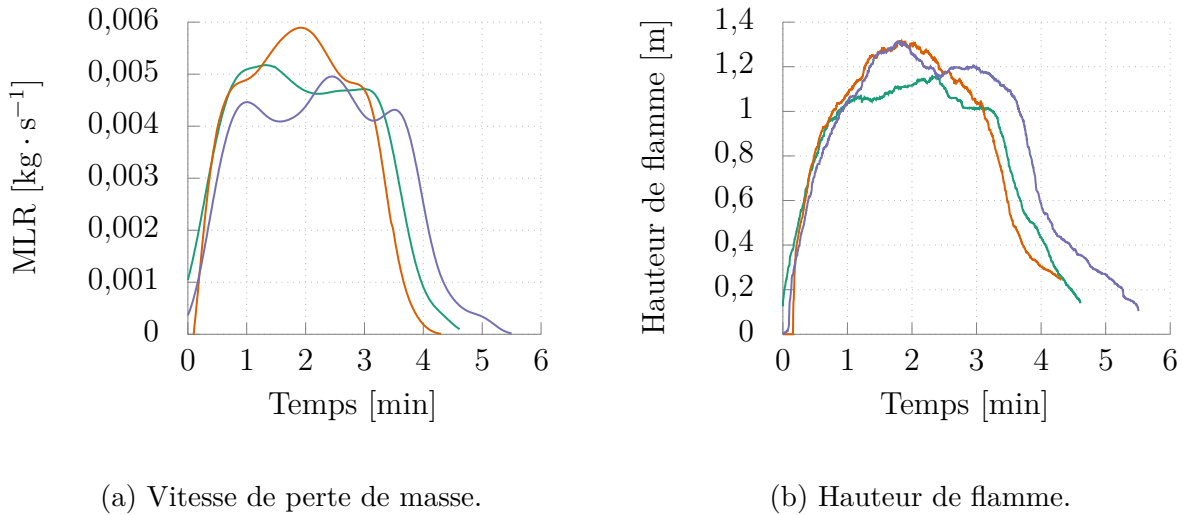


FIGURE B.1 – Exemples représentatifs de la répétabilité des mesures (bac de 50 cm de côté, une courbe par répétition).

Cette tendance est observée pour les autres tailles de bac, sur les résultats de MLR et de hauteur de flamme (voir Figure B.3). Étant donné que ces deux grandeurs étaient déterminées de manière indépendante (pesée et traitement d'images respectivement), il

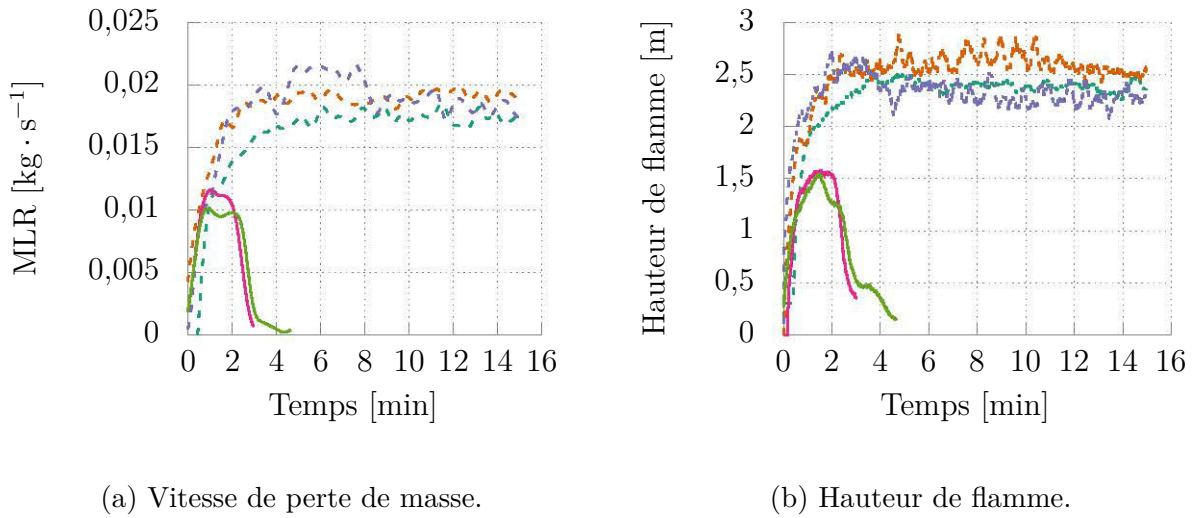


FIGURE B.2 – Illustration des différences entre les résultats obtenus à PROMETHEI et ADP (traitillés) pour les bacs de 70 cm de côté (une courbe par répétition).

est peu probable que ces différences soient dues à la métrologie. Après comparaison à des corrélations de la littérature, aussi reportées sur la Figure B.3, il apparaît que les résultats obtenus à ADP sont plus proches des valeurs attendues.

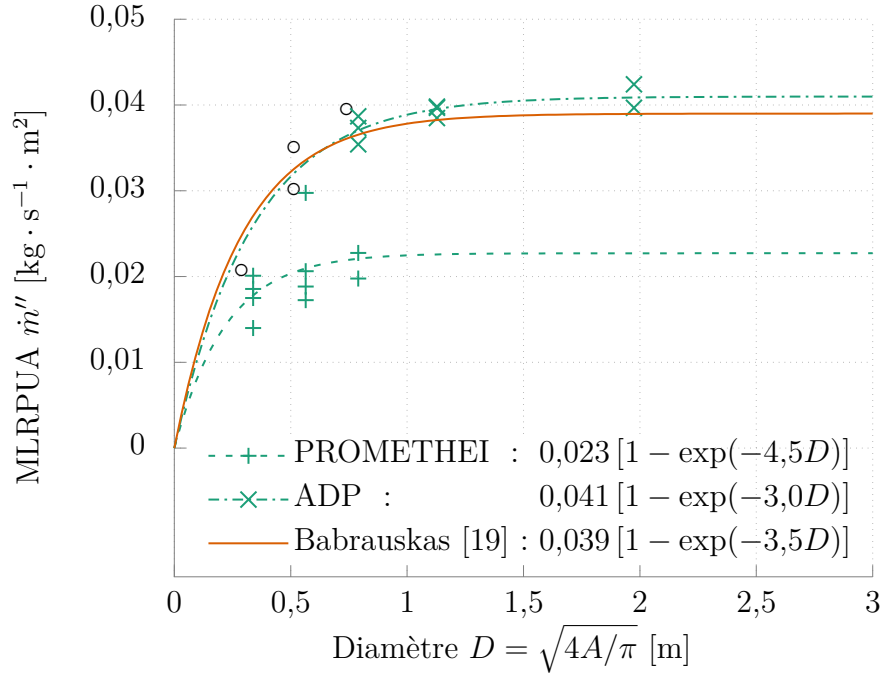
Vue la répétabilité des essais sur chaque site, il a été considéré que les résultats pouvaient être exploités et comparés pour une taille donnée, mais que le MLR et la hauteur de flamme ne pouvaient pas être comparés sur l'ensemble des tailles de foyer. Il s'agissait donc d'essayer de comprendre la cause des différences observées, et si les mesures d'opacimétrie et de spectrométrie étaient aussi impactées.

Pour y répondre, des essais complémentaires ont été réalisés à PROMETHEI et au fort de la Briche, en faisant varier la quantité de combustible et d'eau, ainsi que le bac utilisé. Les essais présentés ci-après sont désignés par : la largeur du bac (en cm), la masse de combustible (en g), celle d'eau (en g), le site d'essai, le bac utilisé et éventuellement d'autres détails. Par exemple :

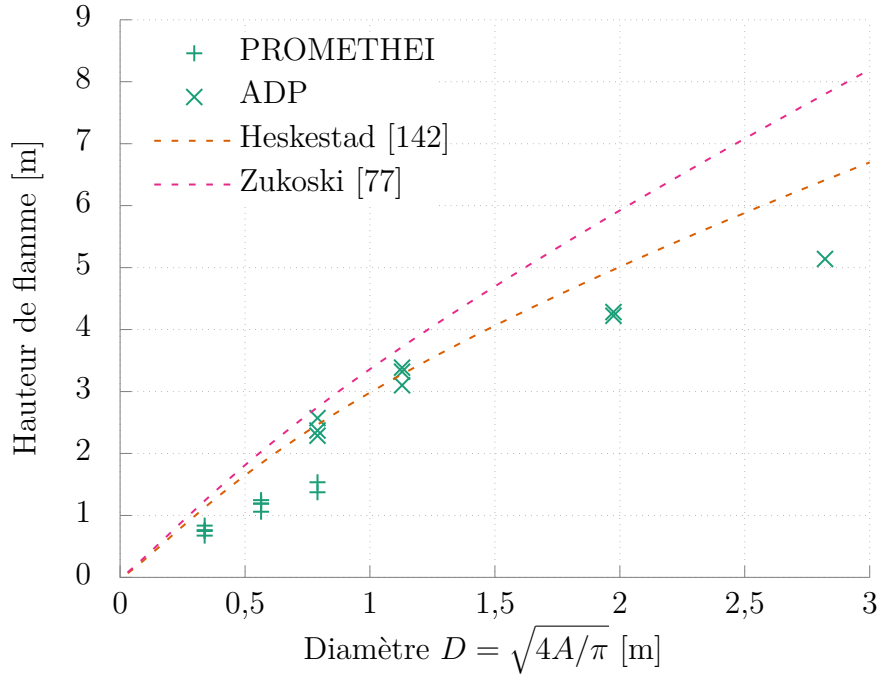
- 50_1000g_2000g_pro_pro ; ou
- 70_1500g_0g_bri_adp_1.

B.2 Analyse du MLR

Plusieurs essais ont été réalisés avec le bac de 50 cm de côté (utilisé à PROMETHEI), comme présenté en Figure B.4. Le MLR maximal semble être fonction de la quantité de combustible. On remarque aussi que tous ces essais présentent un premier court « palier » (MLR entre 4 et $5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$) qui, pour les essais « standards » à PROMETHEI, avait été pris pour une phase stationnaire : la différence avec les essais à ADP n'avait donc été détectée que tardivement, lors d'une exploitation globale des tous les résultats.



(a)



(b)

FIGURE B.3 – Évolution de la vitesse de perte de masse et de la hauteur de flamme avec la taille du bac, et comparaison à des corrélations de la littérature (rappels des Figures 5.5 et 5.4). Les cercles en Figure (a) représentent les valeurs obtenues en augmentant la quantité de combustible.

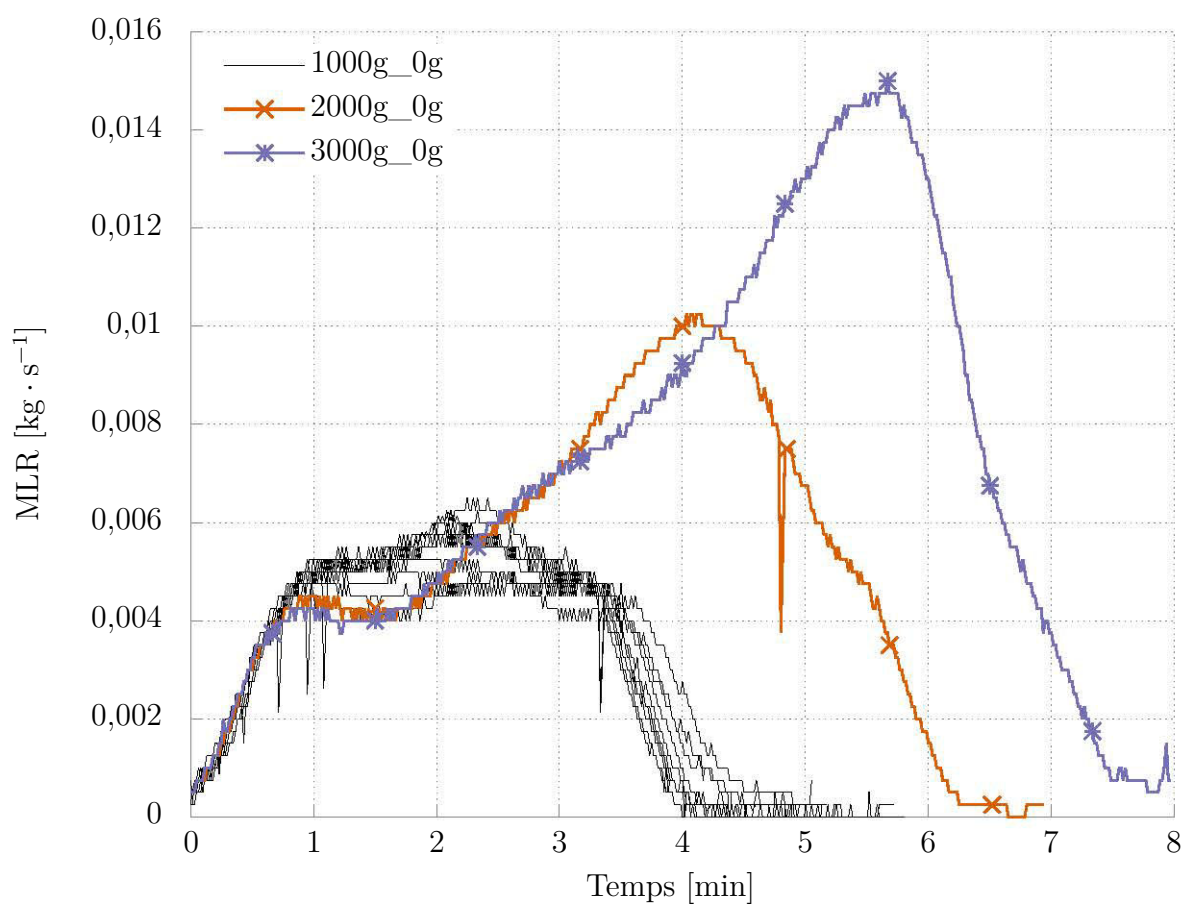


FIGURE B.4 – MLR en fonction du temps pour les essais de kérosène de 50 cm de côté sans eau à PROMETHEI (légendes : masse de combustible et d'eau en grammes).

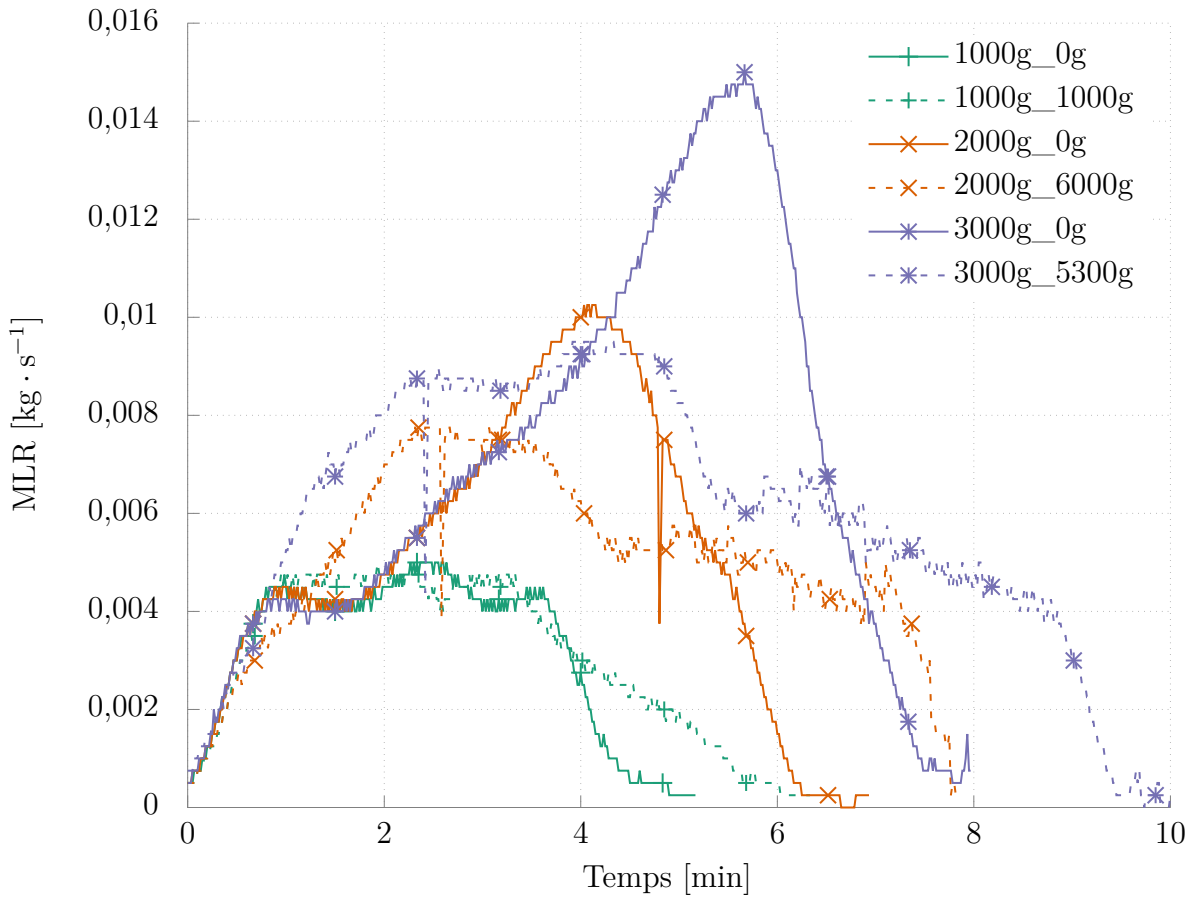


FIGURE B.5 – MLR en fonction du temps pour les essais de kérosène de 50 cm de côté avec et sans eau à PROMETHEI (légendes : masse de combustible et d'eau en grammes).

D'autres essais (50_2000g_6000g_pro_pro et 50_3000g_5300g_pro_pro, voir Figure B.5) ne présentent pas ce premier plateau, ou du moins pas au même MLR : ceci pourrait être dû à la hauteur de liquide plus importante et/ou à la présence d'eau (mais seulement à partir d'une certaine quantité, car aucun effet notable n'est observé pour l'essai 50_1000g_2000g_pro_pro).

On retrouve ces tendances avec le bac PROMETHEI de 50 cm de côté utilisé avec de l'eau (voir Figure B.6) : aucun plateau n'est visible et le MLR maximal augmente avec la quantité de combustible, jusqu'à s'approcher de celui observé sur la phase stationnaire à ADP. Malheureusement la forme du bac PROMETHEI ne permettait pas d'augmenter davantage la quantité de combustible pour vérifier que les résultats rejoignaient bien ceux obtenus à ADP. Néanmoins les tendances pour ces essais complémentaires sont clairement plus proches des valeurs obtenues à grande échelle et de celle de la littérature (voir cercles sur la Figure B.3a).

Une recherche bibliographique semble indiquer que deux hypothèses pourraient expliquer les différences observées entre PROMETHEI (fine couche de kérosène sans eau) et

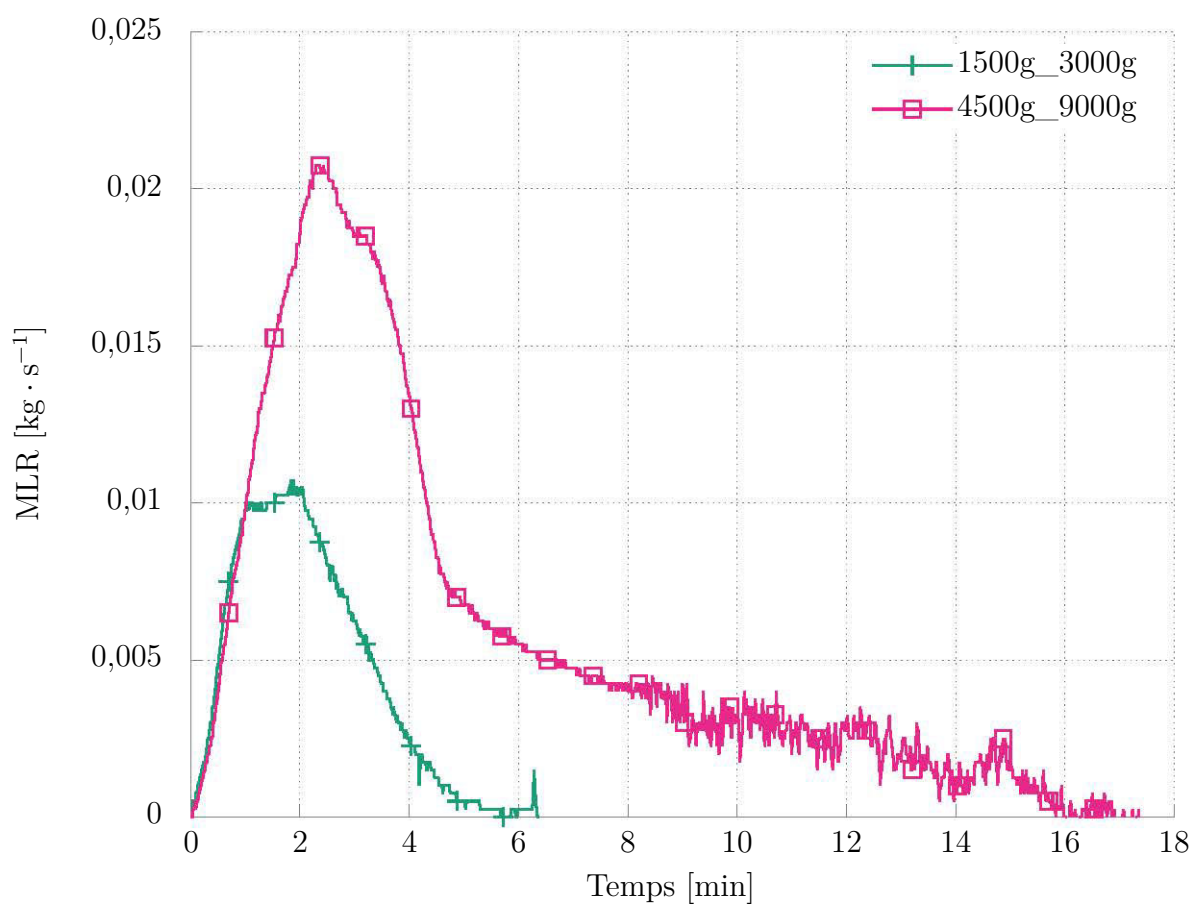


FIGURE B.6 – MLR en fonction du temps pour les essais de kérosène de $0,5\text{ m}^2$ avec eau à PROMETHEI (légendes : masse de combustible et d'eau en grammes).

ADP (couche de kérosène épaisse avec eau) : l'absorption de rayonnement en profondeur (*in-depth absorption*, voir p. ex. les travaux de Simo Hostikka et al.³⁶) et des mouvements convectifs du combustible qui augmentent les transferts et donc l'évaporation. Ces éléments n'ont pas pu (et ne pourront pas) être quantifiés, mais devront être pris en compte pour les futures campagnes expérimentales impliquant des feux de bac. Par précaution, il serait judicieux d'utiliser une épaisseur « importante » de combustible, afin de limiter ces potentielles causes.

B.3 Analyse des propriétés radiatives

L'un des objectifs principaux des feux de bac était l'étude des propriétés radiatives des flammes (mesures de transmittance et de luminance). Il semble donc important de déterminer si les différences observées pour le MLR et la hauteur de flamme se retrouvent pour les propriétés radiatives. Les épaisseurs optiques moyennes sur la phase considérée comme stationnaire sont tracées en Figure B.7 pour différents essais de 70 cm (7 essais à la Bouzule et 1 à ADP³⁷).

On remarque que globalement la valeur moyenne de l'épaisseur optique est répétable, et il ne semble pas y avoir de différence entre les essais à la Bouzule et celui à ADP. Ceci peut aussi être observé sur les résultats au cours du temps, comme illustré en Figure B.8 pour 785 et 1650 nm, les longueurs d'ondes communes à l'ensemble de ces essais.

En complément, on peut aussi observer qu'en ne changeant que la quantité de combustible (même bac, même ratio combustible/eau), l'épaisseur optique reste similaire (la combustion est simplement plus longue, voir Figure B.9). Ceci contraste encore une fois avec le MLR, où l'augmentation de la quantité de combustible entraînait une nette augmentation du MLR (voir Figure B.6).

Les résultats de transmittance et les grandeurs qui en sont déduites ne semblent donc pas affectés par le(s) phénomène(s) qui produise(nt) des MLR différents. Ceci signifie que les résultats de transmittance seraient exploitables pour tous les essais réalisés, quelles que soient les conditions expérimentales (p. ex. quantité de combustible ou bac). De plus, ceci pourrait appuyer une hypothèse du modèle de flamme équivalente, à savoir que les propriétés optiques dépendent principalement du combustible.

36. Par exemple Topi Sikanen, Simo Hostikka, Modeling and simulation of liquid pool fires with in-depth radiation absorption and heat transfer, Fire Safety Journal 80 (2016) pp. 95–109, doi:10.1016/j.firesaf.2016.01.002.

37. Un seul des trois essais de 70 cm est exploitable vis à vis ces mesures.

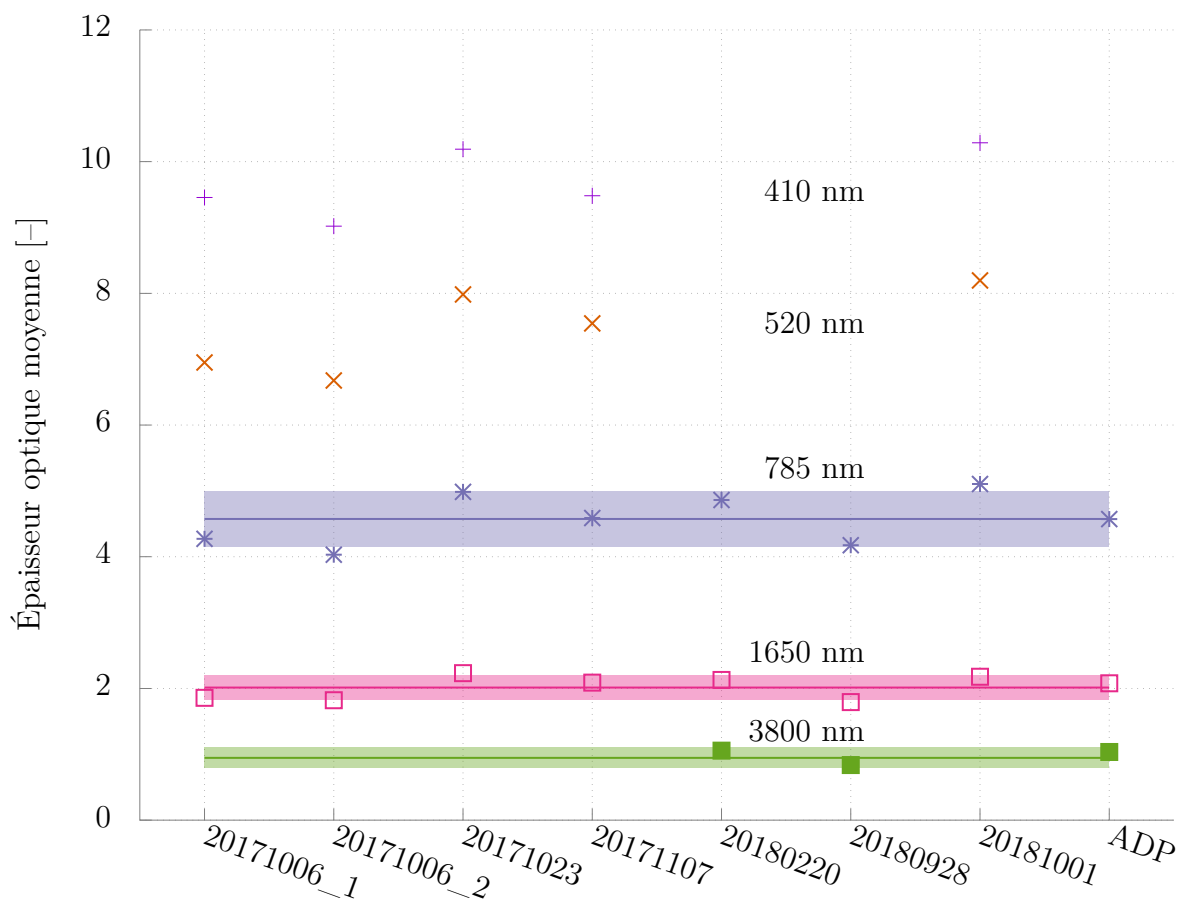


FIGURE B.7 – Épaisseurs optiques moyennes sur la phase stationnaire pour différentes longueurs d'ondes et différents essais de kérosène en $0,50 \text{ m}^2$ (marqueurs), moyennes et écarts-types pour les essais PROMETHEI (traits et plages de couleur).

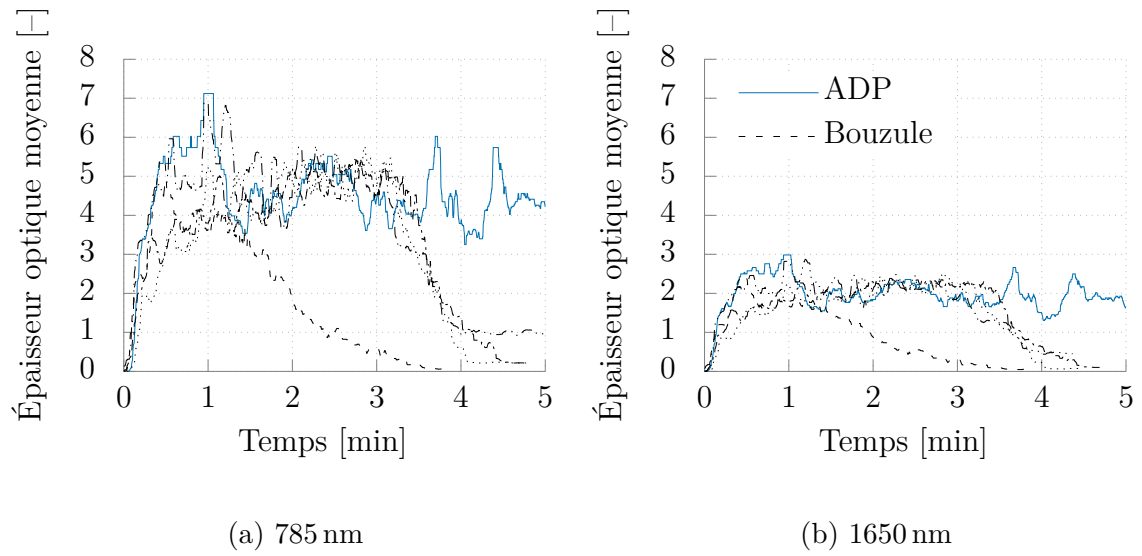
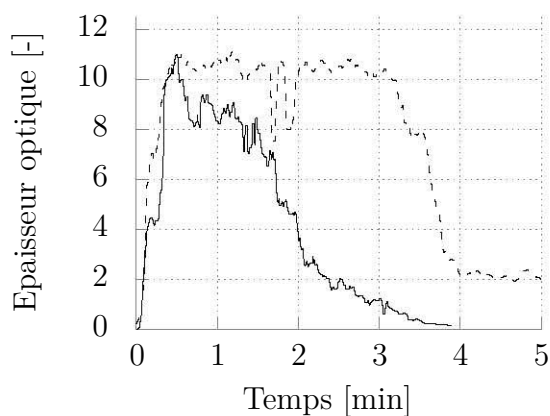
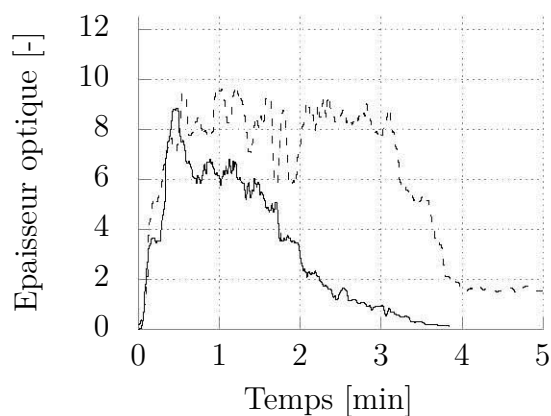


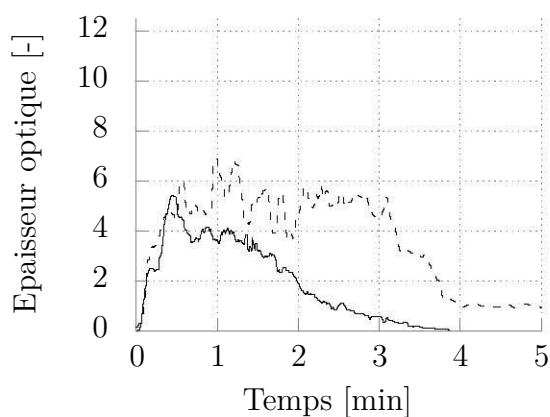
FIGURE B.8 – Épaisseurs optiques en fonction du temps pour les essais de kérosène de 70 cm. Deux longueurs d'ondes communes à tous ces essais.



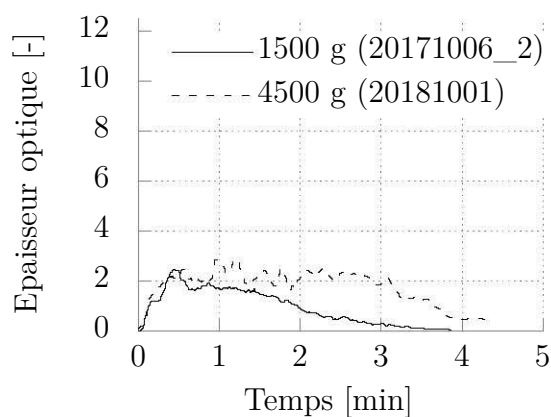
(a) 410 nm



(b) 520 nm



(c) 785 nm



(d) 1650 nm

FIGURE B.9 – Épaisseur optique en fonction du temps pour deux essais de $0,50 \text{ m}^2$ (1500 et 4500 g de kérosène respectivement, le double d'eau).

Annexe C

Détails des modèles de rayonnement

Les sections suivantes comportent des détails relatifs aux calculs de facteurs de forme et de lancer de rayons (voir Section 6.1.a), les premiers ayant été utilisés pour valider le second.

C.1 Facteur de forme surface-surface

Comme présenté en Section 2.1.b.i pour le panneau radiant, des expressions analytiques des facteurs de forme existent pour de nombreuses géométries. C'est le cas pour l'enveloppe d'un cylindre et un élément de surface à la base du cylindre (et distant de x de son axe), où l'on a ³⁸

$$F_{\text{c-cy}}(r, h, x) = \frac{\arccos R}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \left[\arctan \left(\frac{R}{\sqrt{1-R^2}} \right) - \frac{1+L^2-R^2}{X} \arctan \left(\frac{X \tan(0,5 \arccos R)}{1+L^2+R^2-2R} \right) \right], \quad (\text{C.1})$$

avec $R = r/x$, $L = h/x$ et $X = \sqrt{(1+L^2+R^2)^2 - 4R^2}$.

De manière similaire, on peut trouver une expression analytique du facteur de forme entre un élément de surface et l'enveloppe d'un cône tronqué (avec r_1 le rayon de la base

38. www.thermalradiation.net/sectionb/B-29.html

et r_2 celui à la hauteur h), à savoir³⁹

$$F_{\text{c-co}}(r_1, r_2, h, x) = \frac{1}{\pi} \left[\arctan \left(\sqrt{\frac{X+1}{X-1}} \right) + \frac{R-1}{\sqrt{(R-1)^2 + H^2}} \arctan \left(\sqrt{\frac{(R-1)^2 + H^2}{X^2 - 1}} \right) - \frac{X^2 - R^2 + H^2}{\sqrt{[(X-R)^2 + H^2][(X+R)^2 + H^2]}} \arctan \left(\sqrt{\frac{[(X+R)^2 + H^2](X-1)}{[(X-R)^2 + H^2](X+1)}} \right) \right], \quad (\text{C.2})$$

où $X = x/r_1$, $R = r_2/r_1$ et $H = h/r_1$.

Pour les géométries choisies pour modéliser la flamme, à savoir un cylindre surmonté d'un cône ou un cône (tronqué) surmonté d'un cylindre, les facteurs de forme présentés plus haut peuvent être combinés. Ainsi, pour le **cône sur cylindre** le facteur de forme globale entre un capteur en x_c et le modèle de flamme sera donné par

$$F_{\text{c-f}} = F_{\text{c-cy}}(r_{\text{cy}}, h_{\text{cy}}, x_c) + F_{\text{c-co}}(r_{\text{co-inter}}, 0, h_{\text{cy}} + h_{\text{co}}, x_c) - F_{\text{c-co}}(r_{\text{co-inter}}, r_{\text{co}}, h_{\text{cy}}, x_c), \quad (\text{C.3})$$

avec $r_{\text{co-inter}}$ le rayon du cône s'il interceptait le plan du capteur/de la base du cylindre.

Pour le **cylindre sur cône**, on aura

$$F_{\text{c-f}} = F_{\text{c-co}}(r_{\text{co}}, r_{\text{cy}}, h_{\text{co}}, x_c) + F_{\text{c-cy}}(r_{\text{cy}}, h_{\text{co}} + h_{\text{cy}}, x_c) - F_{\text{c-cy}}(r_{\text{cy}}, h_{\text{co}}, x_c). \quad (\text{C.4})$$

C.2 Facteur de forme volume-surface

Pour rappel (voir Section 2.1.b.ii), on peut exprimer un « facteur de forme » entre un volume V_f et une surface S_c comme

$$F = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} \int_{S_c} \frac{\cos \Theta}{4\pi s^2} dS dV. \quad (\text{c.f. 2.17})$$

L'angle Θ et la distance s sont illustrés sur la Figure 2.10.

C.2.a Volume cylindrique

Pour un volume cylindrique et un capteur infinitésimal ($S_c \rightarrow 0$), on peut réécrire, en coordonnées cylindriques (r, θ, z) et en notant x_e, y_e et z_e les coordonnées de l'élément de

39. www.thermalradiation.net/sectionb/B-37.html

volume dans le cylindre,

$$\cos \Theta = z s \quad (C.5)$$

et

$$s = \sqrt{(x_c - x_e)^2 + (y_c - y_e)^2 + (z_c - z_e)^2} \quad (C.6)$$

or $z_c = 0$ et $y_c = 0$ (car S_c est un élément de surface), d'où

$$= \sqrt{(x_c - x_e)^2 + (-y_e)^2 + (-z_e)^2} \quad (C.7)$$

$$= \sqrt{(x_c - r \cos \theta)^2 + (-r \sin \theta)^2 + (-z)^2} \quad (C.8)$$

$$s = \sqrt{x_c^2 - 2 x_c r \cos \theta + r^2 + z^2}, \quad (C.9)$$

ce qui donne

$$F_{cy} = \frac{1}{4\pi V_f} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_f} \int_0^{h_f} \frac{z r}{(x_c^2 - 2 x_c r \cos \theta + r^2 + z^2)^{3/2}} dz dr d\theta. \quad (C.10)$$

L'intégration⁴⁰ selon z et r permet d'obtenir les expressions analytiques

$$\begin{aligned} \int \frac{z r}{(x_c^2 - 2 x_c r \cos \theta + r^2 + z^2)^{3/2}} dz \\ = - \frac{r}{\sqrt{x_c^2 - 2 x_c r \cos \theta + r^2 + z^2}} \end{aligned} \quad (C.11)$$

et

$$\begin{aligned} \int - \frac{r}{\sqrt{x_c^2 - 2 x_c r \cos \theta + r^2 + z^2}} dr \\ = - \left[\sqrt{x_c^2 - 2 x_c r \cos \theta + r^2 + z^2} \right. \\ \left. + x_c \cos \theta \log \left(\sqrt{x_c^2 - 2 x_c r \cos \theta + r^2 + z^2} + r - x_c \cos \theta \right) \right]. \quad (C.12) \\ = f_{cy}(r, z, \theta, x_c) \end{aligned}$$

La fonction $f_{cy}(r, z, \theta, x_c)$ (résultat de l'Équation C.12) peut être intégrée numériquement selon θ , ainsi que sur les bornes adéquates pour z et r , afin de fournir le « facteur de forme » F_{cy} . En tirant aléatoirement un grand nombre de d'angles θ_i entre 0 et 2π on obtient pour la géométrie **cône sur cylindre**

$$\begin{aligned} F_{cy} = \frac{2\pi}{i} \sum_i \left(f_{cy}(r_{cy}, h_{cy}, \theta_i, x_c) - f_{cy}(0, h_{cy}, \theta_i, x_c) \right. \\ \left. - [f_{cy}(r_{cy}, 0, \theta_i, x_c) - f_{cy}(0, 0, \theta_i, x_c)] \right) \end{aligned} \quad (C.13)$$

et pour la géométrie **cylindre sur cône**

$$\begin{aligned} F_{cy} = \frac{2\pi}{i} \sum_i \left(f_{cy}(r_{cy}, h_{co} + h_{cy}, \theta_i, x_c) - f_{cy}(0, h_{co} + h_{cy}, \theta_i, x_c) \right. \\ \left. - [f_{cy}(r_{cy}, h_{co}, \theta_i, x_c) - f_{cy}(0, h_{co}, \theta_i, x_c)] \right). \end{aligned} \quad (C.14)$$

40. Intégrations réalisées à l'aide de Wolfram|Alpha (www.wolframalpha.com).

C.2.b Volume conique

Le cas d'un volume conique peut être traité de la même manière, les Équations C.5 et C.9 étant toujours valables, ce qui donne

$$F_{\text{co}} = \frac{1}{4\pi V_f} \int_0^{2\pi} \int_0^R \int_{h_1}^{h_2} \frac{z r}{(x_c^2 - 2 x_c r \cos \theta + r^2 + z^2)^{3/2}} dz dr d\theta. \quad (\text{C.15})$$

Les hauteurs h_1 et h_2 , ainsi que le rayon R , seront différents selon le modèle considéré :

$$\begin{aligned} \text{— géométrie cône sur cylindre : } & \begin{cases} h_1 = h_{\text{cy}} \\ h_2 = h_{\text{cy}} + h_{\text{co}} \\ R = r_{\text{cy}} \end{cases} ; \\ \text{— géométrie cylindre sur cône : } & \begin{cases} h_1 = 0 \\ h_2 = h_{\text{co}} \\ R = r_{\text{co}} \end{cases} . \end{aligned}$$

L'intégration⁴¹ suivant z devient donc

$$\begin{aligned} \int_{h_1}^{h_2} \frac{z r}{(x_c^2 - 2 x_c r \cos \theta + r^2 + z^2)^{3/2}} dz \\ = - \frac{r}{\sqrt{x_c^2 - 2 x_c r \cos \theta + r^2 + \left(h_2 + \frac{r(h_1 - h_2)}{R}\right)^2}} \end{aligned} \quad (\text{C.16})$$

et celle selon r donne la fonction $f_{\text{co}}(r, R, h_1, h_2, \theta, x_c)$ (voir Équation C.19 en page suivante).

Ici aussi l'intégration de la fonction $f_{\text{co}}(r, R, h_1, h_2, \theta, x_c)$ suivant θ , ainsi que la prise en compte des bornes adéquates pour r , sont faites numériquement pour obtenir le « facteur de forme » F_{co} . En tirant aléatoirement un grand nombre de d'angles θ_i entre 0 et 2π on obtient pour la géométrie **cône sur cylindre**

$$\begin{aligned} F_{\text{co}} = \frac{2\pi}{i} \sum_i \Big(& f_{\text{co}}(r_{\text{cy}}, r_{\text{cy}}, h_{\text{cy}}, h_{\text{cy}} + h_{\text{co}}, \theta_i, x_c) \\ & - f_{\text{co}}(0, r_{\text{cy}}, h_{\text{cy}}, h_{\text{cy}} + h_{\text{co}}, \theta_i, x_c) \\ & - [f_{\text{cy}}(r_{\text{cy}}, h_{\text{cy}}, \theta_i, x_c) - f_{\text{cy}}(0, h_{\text{cy}}, \theta_i, x_c)] \Big) \end{aligned} \quad (\text{C.17})$$

et pour la géométrie **cylindre sur cône** ($h_{\text{co-tot}} = h_{\text{co}} r_{\text{cy}} / (r_{\text{co}} - r_{\text{cy}})$) est la hauteur du

41. Intégrations réalisées à l'aide de Wolfram|Alpha (www.wolframalpha.com).

$$\begin{aligned}
 & \int - \frac{r}{\sqrt{x_c^2 - 2x_c r \cos \theta + r^2 + \left(h_2 + \frac{r(h_1 - h_2)}{R}\right)^2}} dr \\
 & = -R^2 \left\{ \sqrt{\frac{h_1^2 r^2}{R^2} - \frac{2h_1 h_2 r(r-R)}{R^2} + \frac{h_2^2 (r-R)^2}{R^2} + x_c^2 - 2x_c r \cos \theta + r^2} \right. \\
 & \quad - \frac{[h_2(h_1 - h_2) - R x_c \cos \theta]}{(h_1^2 - 2h_1 h_2 + h_2^2 + R^2)^{3/2}} \\
 & \quad \left. \log \left(R \sqrt{h_1^2 - 2h_1 h_2 + h_2^2 + R^2} \sqrt{\frac{h_1^2 r^2}{R^2} - \frac{2h_1 h_2 r(r-R)}{R^2} + \frac{h_2^2 (r-R)^2}{R^2} + x_c^2 - 2x_c r \cos \theta + r^2} \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + h_1^2 r - 2h_1 h_2 r + h_1 h_2 R + h_2^2 r - h_2^2 R + r R^2 - R^2 x_c \cos \theta \right) \right\} \\
 & = f_{\text{co}}(r, R, h_1, h_2, \theta, x_c)
 \end{aligned} \tag{C.19}$$

cône s'il n'était pas tronqué par le cylindre)

$$\begin{aligned}
 F_{\text{co}} = \frac{2\pi}{i} \sum_i \bigg(& \left\{ f_{\text{co}}(r_{\text{co}}, r_{\text{co}}, 0, h_{\text{co-tot}}, \theta_i, x_c) \right. \\
 & - f_{\text{co}}(0, r_{\text{co}}, 0, h_{\text{co-tot}}, \theta_i, x_c) \\
 & \left. - [f_{\text{cy}}(r_{\text{co}}, 0, \theta_i, x_c) - f_{\text{co}}(0, 0, \theta_i, x_c)] \right\} \\
 & - \left\{ f_{\text{co}}(r_{\text{cy}}, r_{\text{cy}}, h_{\text{co}}, h_{\text{co-tot}}, \theta_i, x_c) \right. \\
 & - f_{\text{co}}(0, r_{\text{cy}}, h_{\text{co}}, h_{\text{co-tot}}, \theta_i, x_c) \\
 & \left. - [f_{\text{cy}}(r_{\text{cy}}, h_{\text{cy}}, \theta_i, x_c) - f_{\text{co}}(0, 0, \theta_i, x_c)] \right\} \bigg). \tag{C.18}
 \end{aligned}$$

C.3 Lancer de rayons – émission volumique

Comme présenté en Section 2.1.b.ii, le lancer de rayons dans le cas d'une émission volumique permet de tenir compte de l'absorption du rayonnement dans la flamme, en fonction de la distance parcourue par chaque quantum à l'intérieur de celle-ci. Pour cela, il est d'abord nécessaire de générer les positions et directions de départ des rayons. Dans le cas de la méthode directe, et avec une géométrie simplifiée constituée d'un cylindre et/ou d'un cône (voir p. ex. Figure 2.9), les positions A dans le cylindre sont données par

$$r = r_{\text{cy}} \sqrt{R_r} \tag{C.20}$$

$$\varphi_A = 2\pi R_{\varphi_A} \tag{C.21}$$

$$x_A = r \cos \varphi_A \tag{C.22}$$

$$y_A = r \sin \varphi_A \tag{C.23}$$

$$z_A = h_{\text{cy}} R_z + h_{\text{offset}}, \tag{C.24}$$

où $h_{\text{offset}} = 0$ pour la géométrie **cône sur cylindre** et $h_{\text{offset}} = h_{\text{co}}$ pour la géométrie **cylindre sur cône**. Les directions $\vec{d}$ sont données par

$$\varphi = 2\pi R_{\varphi} \tag{C.25}$$

$$\theta = \arccos(1 - 2R_{\theta}) \tag{C.26}$$

$$\vec{d} = \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \end{pmatrix}. \tag{C.27}$$

Les positions dans le cône sont données de manière similaire avec, pour la géométrie **cône sur cylindre**,

$$r = r_{\text{co}} \sqrt{R_r} \quad (\text{C.28})$$

$$\varphi_A = 2\pi R_{\varphi_A} \quad (\text{C.29})$$

$$x_A = r \cos \varphi_A \quad (\text{C.30})$$

$$y_A = r \sin \varphi_A \quad (\text{C.31})$$

$$z_A = h_{\text{co}} R_z + h_{\text{cy}}, \quad (\text{C.32})$$

en s'assurant que tous les tirages respectent $z_A \leq h_{\text{co}}(1 - r/r_{\text{co}}) + h_{\text{offset}}$. Pour la géométrie **cylindre sur cône**, le calcul des altitudes z_A devient

$$z_A = h_{\text{co-tot}} R_z, \quad (\text{C.33})$$

où $h_{\text{co-tot}} = h_{\text{co}} r_{\text{cy}} / (r_{\text{co}} - r_{\text{cy}})$ est la hauteur du cône s'il n'était pas tronqué par le cylindre. Ici, on s'assure que tous les tirages respectent $z_A \leq h_{\text{co-tot}}(1 - r/r_{\text{co}})$ et $z_A \geq h_{\text{co}}$. Les directions sont déterminées selon l'Équation C.27. Un exemple de tirage (1000 rayons) est donné en Figure 2.11 (Section 2.1.b.ii).

Une fois les positions et directions de départ générées, il est nécessaire de déterminer la distance $d = s_{\text{co}} + s_{\text{cy}}$ parcourue par chaque quantum au sein de la flamme, ainsi que son point d'impact au sol (soit les distances s_{sol}). Pour cela, les intersections des rayons avec le cylindre, avec le cône et avec le sol sont calculées.

Dans le cas de la géométrie **cône sur cylindre** les points de sortie du cylindre sont déterminés en résolvant

$$(s_{\text{cy}} d_x + x_A)^2 + (s_{\text{cy}} d_y + y_A)^2 = r_{\text{cy}}^2 \quad (\text{C.34})$$

et en ne gardant que les distances s_{cy} positives. Les intersections avec le cône sont calculées en considérant que le cône continue jusqu'au sol ($h_{\text{co}} = h_{\text{co}} + h_{\text{cy}}$ et $r_{\text{tot}} = r_{\text{co}} h_{\text{tot}} / h_{\text{co}}$), selon

$$x_A^2 + y_A^2 = \frac{(h_{\text{tot}} - z_A)^2 r_{\text{tot}}^2}{h_{\text{tot}}^2}. \quad (\text{C.35})$$

Seules les solutions s_{co} positives et donnant une altitude d'intersection z inférieure à h_{tot} sont retenues. Enfin, les distances avant impact au sol répondent à

$$(s_{\text{sol}} d_z + z_A) = 0. \quad (\text{C.36})$$

La distance parcourue dans la flamme d est alors le minimum entre s_{cy} , s_{co} et s_{sol} .

Pour la géométrie **cylindre sur cône**, les points de sortie du cylindre sont déterminés avec l'Équation C.34 (en ne conservant que les solutions s_{cy} positives) lorsque les points de sortie ont des altitude $z_B > h_{\text{cy}}$. Pour les cas où $z_B > (h_{\text{cy}} + h_{\text{co}})$ (les rayons quittent le cylindre au-dessus de sa hauteur), on détermine s'ils intersectent le disque en haut du

cylindre en résolvant

$$s'_{cy} = s_{cy} \frac{h_{co} + h_{cy} - z_0}{z_B} \quad (C.37)$$

$$x'_B = s'_{cy} d_x + x_0 \quad (C.38)$$

$$y'_B = s'_{cy} d_y + y_0 \quad (C.39)$$

et en ne conservant que les solutions où $\sqrt{x'^2_B + y'^2_B} \leq r_{cy}$. Les intersections avec le cône sont déterminées avec l'Équation C.35, en prenant $h_{tot} = h_{co} r_{cy} / (r_{co} - r_{cy})$. Seules les distances s_{co} positives et donnant des altitudes $0 \leq z_B \leq h_{co}$ sont retenues. Les intersections avec le sol sont ici aussi données par l'Équation C.36. Contrairement à la géométrie **cône sur cylindre**, la détermination de la distance parcourue dans la flamme (d) n'est plus simplement la distance minimale parmi les intersections calculées (p. ex. un rayon peut sortir de la flamme et y re-renter). La distance d dépend ici de quelles solutions s sont définies, c'est-à-dire des intersections rencontrées ou non par un rayon (p. ex. s_{cy} n'est pas définie pour les quanta n'intersectant pas le cylindre). Ainsi, on a pour les rayons partant du cône

$$d = \begin{cases} \min(s_{co}, s_{sol}) & \text{si } s_{cy} \text{ n'est pas définie,} \\ s_{cy} & \text{s'il y a une } s_{cy}, \\ s_{co} + \Delta s_{cy} & \text{s'il y a deux } s_{cy}. \end{cases} \quad (C.40)$$

Pour les quanta partant du cylindre, la distance d vaut

$$d = \begin{cases} \min(s_{co}, s_{sol}) & \text{si } s_{cy} \text{ n'est pas définie,} \\ s_{cy} & \text{si } s_{co} \text{ n'est pas définie,} \\ s_{cy} + s_{sol} - \min(s_{co}) & \text{s'il y a une } s_{cy} \text{ et deux } s_{co}. \end{cases} \quad (C.41)$$

Une fois déterminées, les distances parcourues dans la flamme servent à calculer la puissance transportée par chaque quantum, pour rappel

$$P_{sortie} = P_{émission} \exp(-\kappa^a d), \quad (\text{c.f. 2.18})$$

où κ^a est le coefficient d'absorption et $P_{émission}$ la puissance initialement attribuée à chaque quantum (voir Équation 2.19).

L'Équation C.36 permet de déterminer les points d'impact au sol (voir Figure C.1, en vert). Comme pour le panneau radiant, on peut remarquer qu'environ la moitié des rayons n'impacte pas le sol (voir positions de départ en gris, les rayons ne sont pas représentés), du fait du tirage aléatoire des directions de départ.

En connaissant les points d'impact ainsi que l'énergie transportée par chaque quantum (Équation 2.18), il est possible de dresser une cartographie du flux reçu au sol (p. ex. Figures 2.12 et 2.13 en Section 2.1.b.ii).

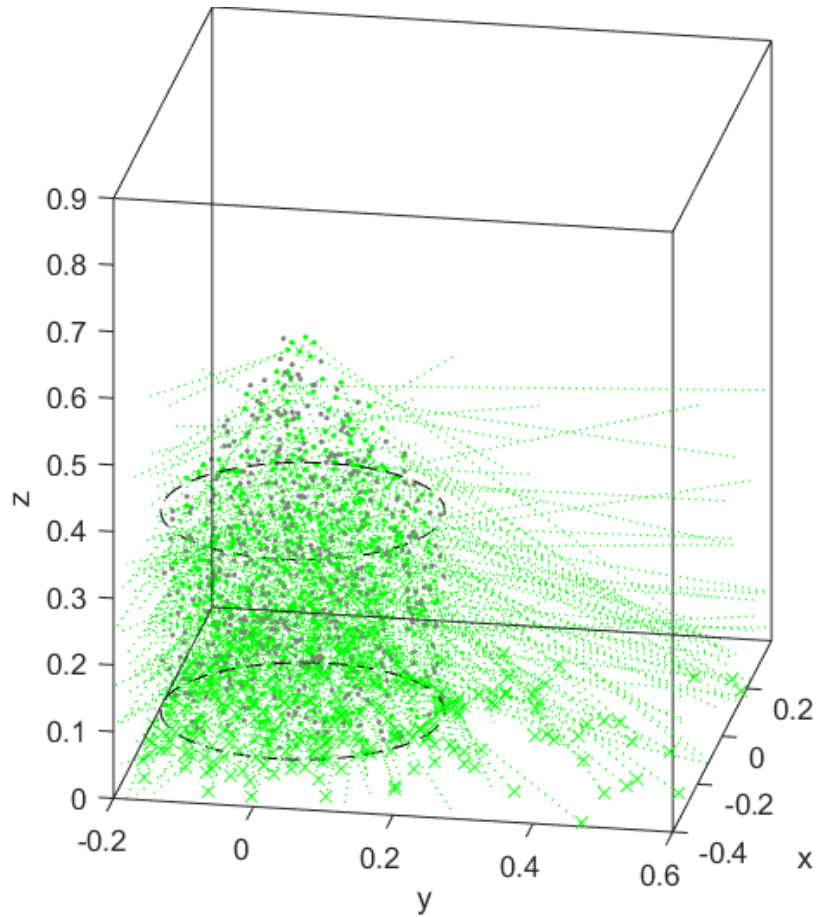


FIGURE C.1 – Modèle de flamme cône sur cylindre (base et haut du cylindre en noir), avec 1000 positions de départ : celles dont les rayons impactent le sol en vert (ces 501 rayons sont aussi représentés), les autres en gris.

Annexe D

Exploitation préliminaire des mesures de température

Des thermocouples ont été utilisés afin de suivre la propagation à l'intérieur des échantillons de mousse polyuréthane (voir Section 7.2.b.i). L'exploitation des résultats doit encore être validée et c'est pourquoi seul un aperçu est donné ici.

Pour rappel, les mesures de températures permettent de déterminer les temps auxquels la flamme arrive aux différentes positions des capteurs. Une interpolation permet ensuite d'étudier la propagation en trois dimensions (voir Section 4.3.a.ii), comme illustré en Figure D.1 avec des iso-surfaces à différents instants pour les résultats moyennés des blocs de 1,00 m.

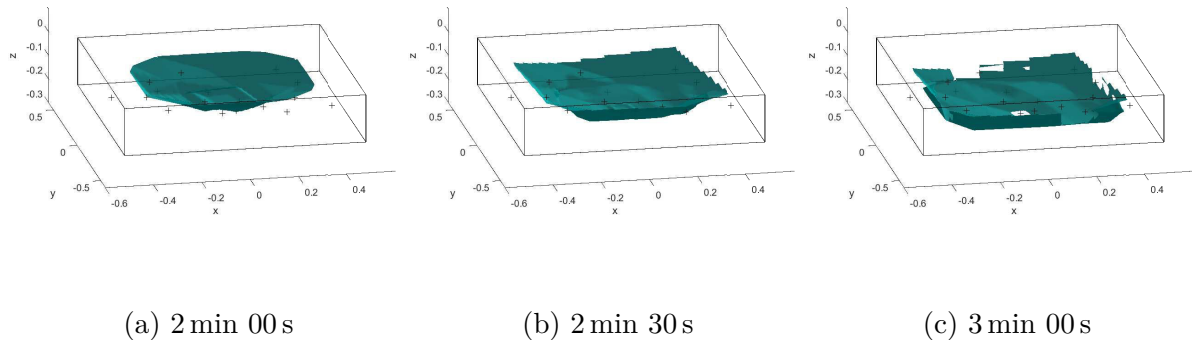


FIGURE D.1 – Position du front de décomposition au cours du temps pour les blocs de 1,00 m de côté, à différents instants. Les croix représentent les points de mesure.

Ces figures offrent une première représentation de la décomposition de la mousse polyuréthane et du creusement des blocs au cours de leur combustion. Cette description continue tout au long des essais apporte des informations intéressantes qui pourront, une fois validées, être comparées aux autres moyens de mesures et pourquoi pas à des modèles décrivant la décomposition de manière détaillée.

Un autre moyen pour étudier la propagation est d'extraire des coupes, comme présentées

en Figure D.2. De manière qualitative, l'allure continue de chaque iso-valeurs de temps suggère que l'hypothèse de symétrie utilisée pour faire les interpolations et déterminer ces résultats est raisonnable. Si la flamme s'était propagée plus rapidement d'un côté, les résultats auraient présenté des discontinuités.

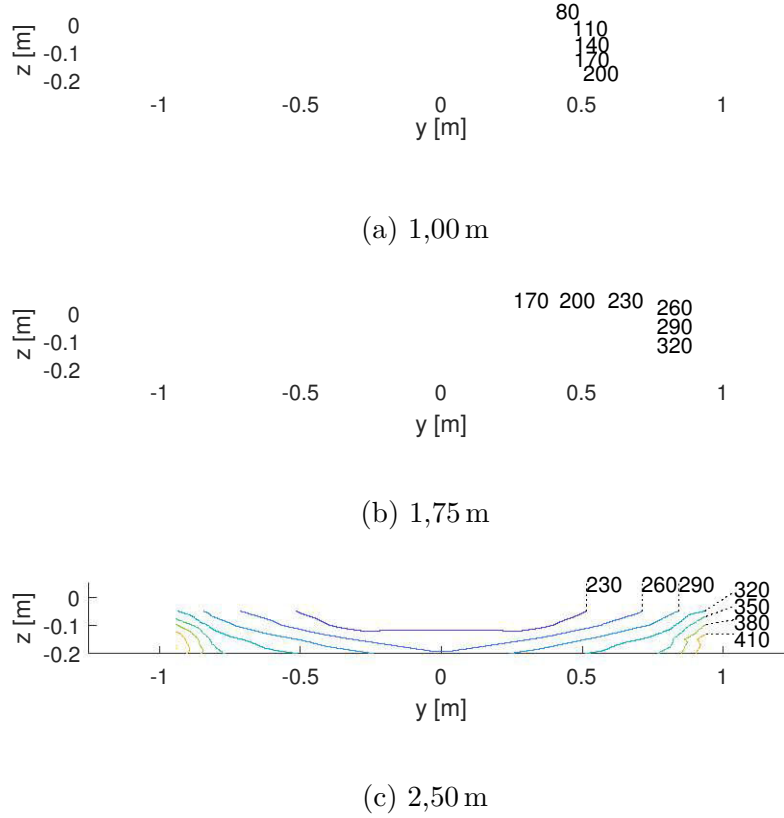
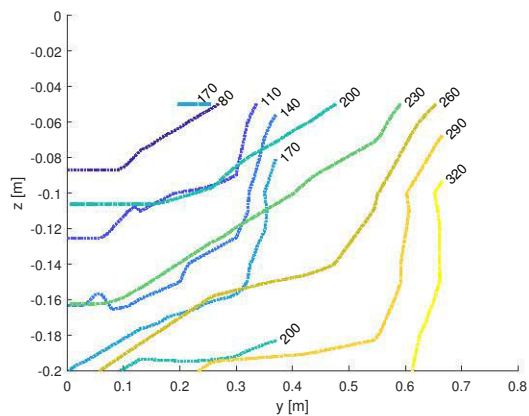


FIGURE D.2 – Isocontours de temps (arrivée estimée de la flamme, en secondes).
Coupes en $x = 0$ pour différentes tailles de bloc.

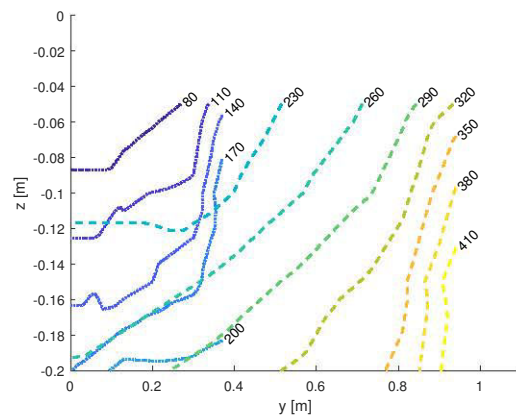
Les résultats obtenus pour les différentes tailles de bloc (1,00 ; 1,75 et 2,50 m de côté) peuvent être comparés, par exemple pour mettre en évidence d'éventuels effets de bords. La Figure D.3 présente des iso-valeurs de temps pour les trois tailles de bloc, comparés ici deux à deux pour plus de clarté.

Comme on peut le remarquer sur la Figure D.3a, les résultats moyens pour les blocs de 1,00 et 1,75 m de côté présentent des tendances similaires, mais les valeurs de temps associées sont différentes. Par exemple, les contours à 140 et 170 s pour les blocs de 1,00 m (lignes en pointillés) sont proches de ceux à 230 et 260 s pour les blocs de 1,75 m (lignes en tirets points). Ces différences, qui se retrouvent aussi en Figure D.3b, sont l'une des raisons pour lesquelles il a été estimé que ces résultats doivent encore être validés. On peut toutefois remarquer que pour les résultats pour les blocs de 1,75 et 2,50 m sont tout à fait comparables, en tendances et en valeurs (voir Figure D.3c).

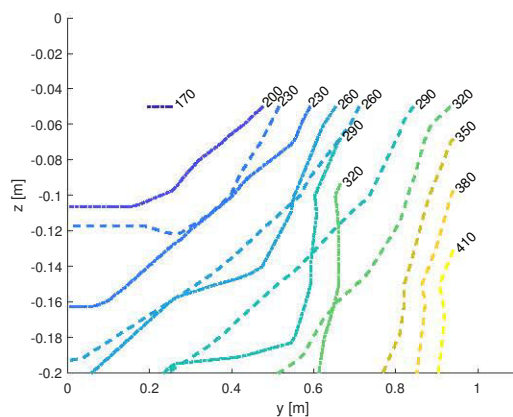
Malgré le fait que ce décalage temporel ne soit pas encore expliqué, il est intéressant



(a) Blocs de 1,00 et 1,75 m (pointillés et tirets points respectivement).



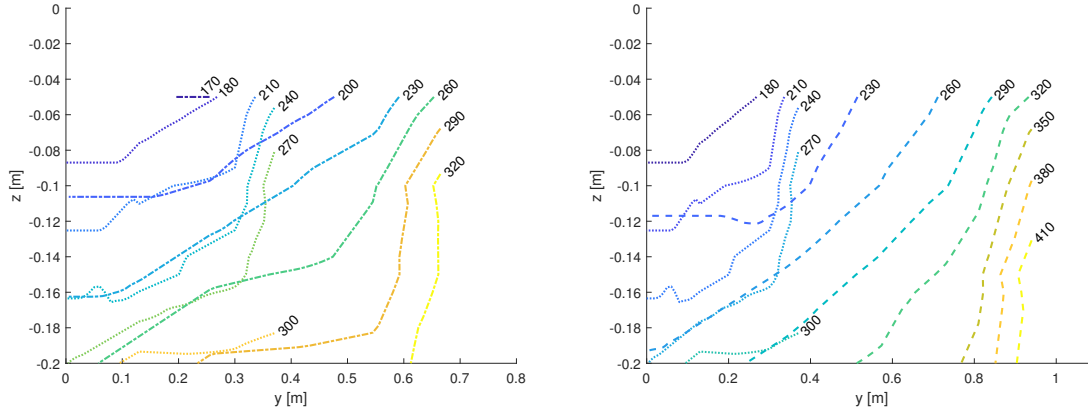
(b) Blocs de 1,00 et 2,50 m (pointillés et traitillés respectivement).



(c) Blocs de 1,75 et 2,50 m (tirets points et traitillés respectivement).

FIGURE D.3 – Isocontours de temps (arrivée estimée de la flamme, en secondes). Comparaisons des résultats moyens pour chaque taille de bloc, seules les valeurs pour $x = 0$ et $y > 0$ sont représentées.

de remarquer qu'un décalage des valeurs pour les blocs de 1,00 m (+100 s) permet de confirmer que les tendances sont très proches pour tous les résultats (voir Figure D.4). Dans ce cas, un bon accord est aussi obtenu avec les résultats du traitement vidéo, qui donnent le rayon de la zone en feu à la surface des blocs (voir Figure D.5, sur laquelle les croix à la surface sont bien dans le prolongement des lignes discontinues). Une étude plus approfondie est nécessaire pour expliquer cet apparent décalage (problème de métrologie, erreur lors de la synchronisation des résultats pendant le post-traitement...).



(a) Blocs de 1,00 et 1,75 m
(pointillés et tirets points respectivement). (b) Blocs de 1,00 et 2,50 m
(pointillés et traitillés respectivement).

FIGURE D.4 – Isocontours de temps avec une correction arbitraire de +100 s pour les blocs de 1,00 m. Résultats moyens pour chaque taille de bloc, seules les valeurs pour $x = 0$ et $y > 0$ sont représentées.

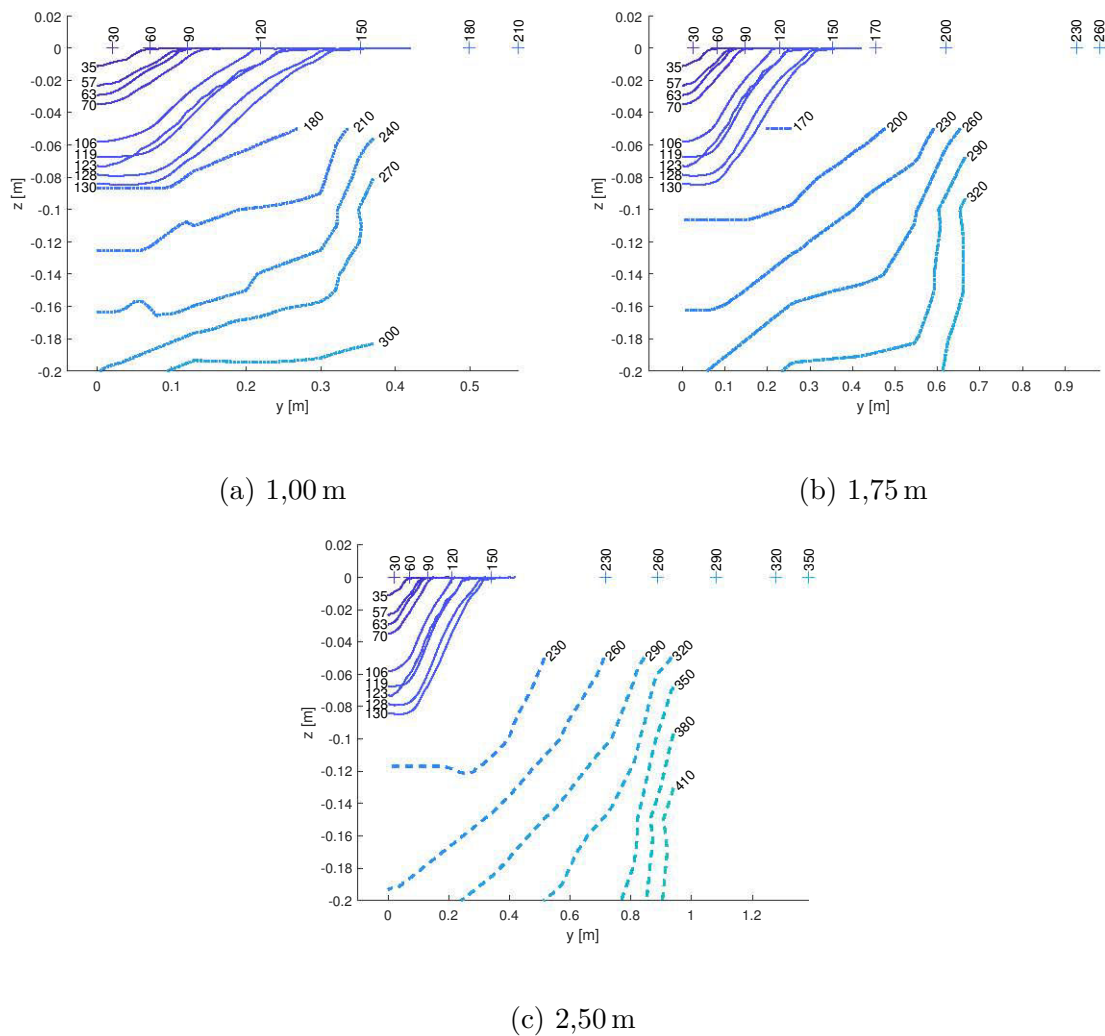


FIGURE D.5 – Limites de la zone dégradée suivant plusieurs approches, pour différentes tailles de bloc de mousse polyuréthane : rayons en surface d'après le traitement vidéo (croix), profils en profondeur d'après la photogrammétrie et l'exploitation des thermocouples (lignes continues et discontinues respectivement). Les temps sont donnés en secondes, seules les valeurs pour $x = 0$ et $y > 0$ sont représentées. Les données de l'exploitation des thermocouples pour les blocs de 1,00 m sont décalées de +100 s.

Modélisation du terme source d'incendie : montée en échelle à partir d'essais de comportement au feu vers l'échelle réelle – Approche « modèle », « numérique » et « expérimentale »

Résumé Le recours à la simulation numérique peut être précieux pour un investigateur cherchant à évaluer une hypothèse dans le cadre de la recherche des causes et circonstances d'un incendie. Pour utiliser cet outil, il est primordial de définir précisément le terme source, c'est-à-dire la quantité d'énergie ou de gaz combustibles que le foyer va dégager au cours du temps. Il peut être déterminé par des essais en échelle réduite ou réelle. La première approche est souvent préférée car plus facile à mettre en œuvre et moins coûteuse. Dans ce cas, il est ensuite nécessaire de transposer les résultats vers l'échelle réelle : pour cela, plusieurs types de modèles ont été proposés. Les plus complets reposent sur des modèles de pyrolyse, qui décrivent le comportement au feu à partir des réactions chimiques dans la phase condensée. Toutefois, ils ne sont pour l'instant pas mûrs pour les applications en investigation. C'est pourquoi une autre famille de modèles, dits thermiques, a été choisie dans l'étude présentée ici. Ces modèles visent à prédire le terme source en fonction de la sollicitation thermique uniquement. Les travaux sont divisés en deux parties principales, à savoir une caractérisation approfondie des transferts de chaleur au sein d'une flamme et une investigation de leur influence sur la décomposition des matériaux.

Pour le premier sujet, l'accent est mis sur les transferts radiatifs car ils jouent un rôle prédominant dans l'entretien de la combustion et la propagation. Le rayonnement des flammes a donc été caractérisé pour plusieurs combustibles (kérosène, gazole, heptane, mousse polyuréthane et bois) et de nombreuses tailles de foyer (de 0,3 m à 3,5 m de côté). Les mesures, incluant de l'imagerie visible mais aussi un dispositif d'opacimétrie multi-spectral et un spectromètre infrarouge, ont permis de décrire la forme et l'émission des flammes. Ces données ont ensuite été utilisées dans un modèle (méthode de Monte-Carlo) pour prédire les flux thermiques reçus à différentes positions. Ces prédictions reproduisent bien les valeurs mesurées lors des essais, ce qui montre que les principaux phénomènes contrôlant le rayonnement ont été identifiés et pris en compte, pour toutes les tailles de foyer. Étant donné que l'objectif final est de fournir un outil de simulation complet, il a été choisi d'évaluer Fire Dynamics Simulator (FDS) afin de déterminer si le code permet de décrire correctement ces transferts radiatifs. Ce travail a été fait grâce aux données et connaissances acquises précédemment et montre que le code prédit correctement les flux reçus. Il a donc été choisi, pour la suite des travaux, de se reposer sur le modèle de rayonnement déjà incorporé dans FDS, pour profiter de son couplage avec le reste des modèles utiles à la simulation incendie.

Concernant le second thème de l'étude, à savoir l'effet du rayonnement sur la décomposition, un travail expérimental a été mené sur la mousse polyuréthane au cône calorimètre, afin de lier la vitesse de perte de masse (MLR, pour Mass loss rate) au flux thermique imposé. Ces données ont permis de construire un modèle prédisant le MLR en fonction du

temps et de l'éclairement, ce qui représente bien l'approche thermique évoquée précédemment. Des essais à plus grande échelle ont servi à caractériser la propagation du feu à la surface du combustible mais aussi à l'intérieur des échantillons de mousse, en employant différents moyens de mesure (imagerie visible, thermométrie, photogrammétrie). En plus des connaissances acquises, cette étude indique que l'utilisation de données obtenues à petite échelle est possible pour prédire le comportement au feu à échelle réelle. C'est donc ce qui a été fait, en modifiant le code source de FDS, pour intégrer une approche thermique en utilisant les données du modèle décrivant le MLR en fonction du temps et de l'éclairement. Les premières simulations montrent des résultats encourageants, et seront complétées par l'étude de géométries plus complexes.

Mots-clés: incendie, montée en échelle, cône calorimètre, essais grande échelle, rayonnement thermique, simulation numérique, FDS

Modelling the fire source: small scale tests for full-scale applications

Abstract Numerical simulations can provide valuable information to fire investigators, but only if the fire source is precisely defined. This can be done through full- or small-scale testing. The latter is often preferred because these tests are easier to perform, but their results have to be extrapolated in order to represent full-scale fire behaviour. Various approaches have been proposed to perform this upscaling. An example is pyrolysis models, which involve a detailed description of condensed phase reactions. However, these models are not ready yet for investigation applications. This is why another approach was chosen for the work presented here, employing a heat transfer model : the prediction of mass loss rate for a material is determined based on a heat balance. This principle explains the two-part structure of this study : first, a detailed characterisation of heat transfers is performed ; then, the influence of these heat transfers on thermal decomposition is studied.

The first part focuses on thermal radiation because it is the leading mechanism of flame spread. Flame radiation was characterised for several fuels (kerosene, diesel, heptane, polyurethane foam and wood) and many fire sizes (from 0.3 m up to 3.5 m wide). Measurements included visible video recordings, multispectral opacimetry and infrared spectrometry, which allowed the determination of a simplified flame shape as well as its emissive power. These data were then used in a model (Monte-Carlo method) to predict incident heat fluxes at various locations. These values were compared to the measurements and showed a good agreement, thus proving that the main phenomena governing flame radiation were captured and reproduced, for all fire sizes. Because the final objective of this work is to provide a comprehensive fire simulation tool, a software already available, namely Fire Dynamics Simulator (FDS), was evaluated regarding its ability to model radiative heat transfers. This was done using the data and knowledge gathered before, and showed that the code could predict incident heat fluxes reasonably well. It was thus chosen to use FDS and its radiation model for the rest of this work.

The second part aims at correlating thermal decomposition to thermal radiation. This was done by performing cone calorimeter tests on polyurethane foam and using the results to build a model which allows the prediction of MLR as a function of time and incident heat flux. Larger tests were also performed to study flame spread on top and inside foam samples, through various measurements : videos processing, temperatures analysis, photogrammetry. The results suggest that using small-scale data to predict full-scale fire behaviour is a reasonable approach for the scenarios being investigated. It was thus put into practice using FDS, by modifying the source code to allow for the use of a thermal model, in other words defining the fire source based on the model predicting MLR as a function of time and incident heat flux. The results of the first simulations are promising, and predictions for more complex geometries will be evaluated to validate this method.

Keywords: fire, scaling, cone calorimeter, large scale tests, thermal radiation, numerical simulation, FDS

