



**HAL**  
open science

# Etudes Expérimentales et lois prédictives des foyers d'incendies

Benjamin Betting

► **To cite this version:**

Benjamin Betting. Etudes Expérimentales et lois prédictives des foyers d'incendies. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Normandie Université, 2018. Français. NNT: 2018NORMR054 . tel-01935884

**HAL Id: tel-01935884**

**<https://theses.hal.science/tel-01935884v1>**

Submitted on 27 Nov 2018

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

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

# THÈSE

**Pour obtenir le diplôme de doctorat**

**Spécialité Physique**

**Préparée au sein de l'Université de Rouen**

**Études expérimentales et lois prédictives des foyers d'incendie**

**Présentée et soutenue par  
Benjamin BETTING**

**Thèse soutenue publiquement le 21 septembre 2018  
devant le jury composé de**

Mr Olivier VAUQUELIN	Professeur, Aix-Marseille Université,	Rapporteur
Mr Hugues PRETREL	Ingénieur de recherche, HDR, IRSN Cadarache	Rapporteur
Mr Pascal BOULET	Professeur, Université de Lorraine	Examineur
Mr Emilien VAREA	Maître de conférences, Université de Rouen Normandie	Examineur
Mr Frédéric GRISCH	Professeur, INSA de Rouen	Examineur
Mr Xavier SILVANI	Ingénieur de recherche, Université de Corse	Examineur
Mr Michel LEBEY	Maître de conférences, HDR, Université du Havre Normandie	Co-directeur de thèse
Mme Béatrice PATTE-ROULAND	Professeure, Université de Rouen Normandie	Directrice de thèse
Mr Daniel JOYEUX	Président Efectis Group	Invité
Mr Jean-Yves LAGALLE	Directeur Départemental des Services d'Incendie et de Secours de Seine-Maritime	invité
Mr Anthony COLLIN	Maître de conférences, Université de Lorraine	invité

**Thèse dirigée par Béatrice PATTE-ROULAND, laboratoire CORIA, UMR 6614**

# Remerciements

La rédaction du manuscrit de thèse signe la fin de trois années de recherche, d'essais, de doutes mais aussi de réussites. Au travers de ces quelques lignes, je souhaite remercier les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'accomplissement de cette thèse.

Comme il est souvent d'usage de commencer par la direction du laboratoire, je remercie Mr Mourad BOUKHALFA, directeur du CORIA lors de mon recrutement en tant que jeune thésard, pour m'avoir permis d'effectuer ma thèse dans ce laboratoire extraordinaire qu'est le CORIA. Ensuite, je remercie très chaleureusement mes directeurs de thèse, Mme Béatrice PATTE-ROULAND et Mr Émilien VAREA pour leur disponibilité, leur écoute, leurs apports scientifiques mais surtout pour la gentillesse et la patience dont ils ont su faire preuve pendant ma thèse. Travailler avec des personnes humaines et compétentes permet d'effectuer ses travaux de recherche dans de bonnes conditions.

Je remercie également mes rapporteurs, Mr Hugues PRETREL et Mr Olivier VAUQUELIN sans qui je ne serais pas là aujourd'hui. Je n'oublie pas l'ensemble des membres de mon jury. Merci pour leurs corrections, leurs conseils avisés mais aussi pour leur support scientifique au cours de ma thèse. Je remercie particulièrement Mr Daniel JOYEUX qui m'a permis de réaliser ma mission expertise chez Efectis. Pendant ces deux années, j'ai pu bénéficier de l'appui technique de Mr Pascal VAN HULLE grâce à qui j'ai énormément appris.

Je tiens également à remercier les Colonels André BENKEMOUN et Jean-Yves LAGALLE, qui ont mis de nombreuses ressources du SDIS 76 à ma disposition afin de mener à bien ces travaux. Je pense également au personnel du site de formation incendie de Tourville-la-rivière, notamment le Capitaine DAVY, L'Adjudant-Chef GUILLEMELLE, l'Adjudant DIEPPOIS mais aussi le personnel technique ainsi que les formateurs COEPT pour leur aide

## II

et leurs conseils. Grâce à nos différents échanges, j'ai pu évoluer et me perfectionner afin de m'approprier pleinement mon sujet qui, lors de mon arrivée, me paraissait si complexe.

Je n'oublie pas non plus les personnes des services supports comme Cédric de l'informatique, Thierry, Bruno, les Romains de l'atelier, Gilles et Franck du pôle métrologie ainsi que le reste du laboratoire qui a participé, de près ou de loin à ces travaux.

Comme une thèse est composée de différents moments, de joie et d'avancées scientifiques, mais aussi d'échec et de doutes, je remercie chaleureusement mes amis du laboratoire pour nos fous rires, nos échanges interminables mais aussi leur bonne humeur et leur joie de vivre au quotidien.

Parce qu'il y a des gens qui sont spéciaux, merci à Carole, ma collègue de bureau, sans qui ma manip n'aurait jamais vu le jour. Merci pour toutes les petites attentions dont tu as su faire preuve pendant ces trois années de thèse, ces gestes qui font de toi quelqu'un d'irremplaçable.

Parce qu'il y a des personnes qui sont comme une deuxième famille, je remercie PI, Boubou, Flaviane, Sabrina et Adriane d'avoir toujours été là, pour certains depuis le début.

Un très grand merci à mes trois coloc, Pierre Malboix, Juanita et son fameux oiseau mort y gordita que gusta la polla, pour leur bonne humeur, nos nombreuses soirées endiablées et pour nos séances de fous rires intensives. Merci également pour les cours d'espagnol qui m'ont rendu complètement bilingue ainsi que pour les cours de CFD avancés qui ont fait de moi un numéricien confirmé.

Comme on garde souvent le meilleur pour la fin, je remercie ma famille d'avoir toujours été là, de m'avoir soutenu et d'y avoir cru quand parfois je doutais moi-même. Bien que ce soit ma thèse, vous êtes pour beaucoup dans sa réussite.

# Table des matières

Liste des symboles	X
Liste des figures	XVI
Introduction	1
<b>1 Science du feu</b>	<b>7</b>
1.1 Généralités incendie . . . . .	7
1.1.1 Bases théoriques de l'incendie . . . . .	7
1.1.1.1 Notions fondamentales . . . . .	7
1.1.1.2 Les différents types de flammes . . . . .	11
1.1.2 Système feu . . . . .	15
1.1.2.1 Développement du feu . . . . .	15
1.1.2.2 Flashover . . . . .	17
1.1.2.3 Backdraft . . . . .	20
1.1.2.4 Fire Gas Ignition (FGI) . . . . .	23
1.2 Transferts thermiques . . . . .	24
1.2.1 Conduction . . . . .	24
1.2.2 Convection . . . . .	26
1.2.3 Rayonnement . . . . .	27
1.3 Feux de compartiments . . . . .	31
1.3.1 Influence du compartiment sur l'incendie . . . . .	31
1.3.2 Fumées d'incendie . . . . .	35

1.3.2.1	Les panaches d'incendie . . . . .	36
1.3.2.2	Dynamique des fumées d'incendie . . . . .	38
1.4	Conclusion du chapitre 1 . . . . .	41
<b>2</b>	<b>Présentation de l'installation expérimentale</b>	<b>43</b>
2.1	Description de la cellule Firediag . . . . .	43
2.2	Configurations étudiées . . . . .	48
2.2.1	Petit volume . . . . .	48
2.2.2	Grand volume . . . . .	49
2.2.2.1	Configuration exutoire ouvert . . . . .	49
2.2.2.2	Configuration porte ouverte . . . . .	50
2.2.2.3	Configuration ventilation mécanique . . . . .	51
2.3	Techniques de mesure . . . . .	52
2.3.1	Chimiluminescence . . . . .	52
2.3.1.1	Principe de base . . . . .	52
2.3.1.2	Installation expérimentale . . . . .	53
2.3.2	Mesures de températures . . . . .	54
2.3.2.1	Principe . . . . .	54
2.3.2.2	Installation expérimentale . . . . .	55
2.3.3	Vélocimétrie par Image de Particules . . . . .	58
2.3.3.1	Principe . . . . .	58
2.3.3.2	Installation expérimentale . . . . .	59
2.4	Contraintes expérimentales . . . . .	63
2.5	Conclusion du chapitre 2 . . . . .	67
<b>3</b>	<b>Outil numérique</b>	<b>69</b>
3.1	Simulation des écoulements à faible nombre de Mach . . . . .	70
3.1.1	Approximation des équations de Navier Stokes . . . . .	71
3.1.2	Analyse asymptotique . . . . .	75
3.1.3	Richesse et fraction de mélange . . . . .	76
3.2	Logiciel Fire Dynamics Simulator (FDS) . . . . .	79

3.2.1	Turbulence : Modèle de Smagorinsky . . . . .	81
3.2.2	Équations utilisées . . . . .	82
3.2.2.1	Modèle hydrodynamique . . . . .	83
3.3	Hypothèses de calcul . . . . .	83
3.3.1	Étude de maillage . . . . .	83
3.3.2	Conditions limites . . . . .	91
3.4	Conclusion du chapitre 3 . . . . .	97
<b>4</b>	<b>Résultats</b> . . . . .	<b>99</b>
4.1	Chimiluminescence . . . . .	99
4.2	Champs de températures instantanés . . . . .	101
4.2.1	Essais à 200 kW . . . . .	102
4.2.2	Essais à 500 kW . . . . .	104
4.2.3	Essais à 800 kW . . . . .	105
4.2.4	Comparaison du Heat Release Rate (HRR) . . . . .	107
4.3	Flux thermiques . . . . .	108
4.4	Champs de températures moyennes . . . . .	110
4.4.1	Essais à 200 kW . . . . .	111
4.4.2	Essais à 500 kW . . . . .	115
4.4.3	Essais à 800 kW . . . . .	119
4.5	Champs de vitesses . . . . .	124
4.5.1	Configuration porte ouverte . . . . .	126
4.5.1.1	Champs instantanés . . . . .	127
4.5.1.2	Champs moyens . . . . .	130
4.5.2	Configuration exutoire ouvert . . . . .	133
4.5.2.1	Champs instantanés . . . . .	134
4.5.2.2	Champs moyens . . . . .	137
4.5.3	Configuration ventilation mécanique . . . . .	141
4.5.3.1	Champs instantanés . . . . .	141
4.5.3.2	Champs moyens . . . . .	143

4.6	Comparaison des champs de vitesses numériques et expérimentaux . . . . .	146
4.6.1	Comparaison des profils de vitesse en configuration porte ouverte . .	146
4.6.2	Comparaison des profils de vitesses en configuration exutoire ouvert .	148
4.6.3	Comparaison des profils de vitesses en configuration ventilation méca- nique . . . . .	151
4.7	Conclusion du chapitre 4 . . . . .	154
	<b>Conclusion</b>	<b>155</b>
	<b>Annexe1</b>	<b>156</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>185</b>

# Liste des symboles

## Roman Letters

$A$	Surface d'échange
$A_0$	Aire de l'ouverture
$A_t$	Somme des aires de l'ensemble des parois
$A_w$	Aire de l'ouverture du local concerné
$c$	Fraction massique
$c_0$	Vitesse de la lumière
$C_p$	Capacité calorifique à pression constante
$C_s$	Modèle de Smagorinsky
$d_p$	Diamètre de particule
$D_{th}$	Coefficient de diffusivité thermique
$D$	Coefficient de diffusion
$E_j$	Énergie d'activation
$E(k)$	Spectre d'énergie cinétique de la turbulence
$\overrightarrow{grad} T$	Gradient de température
$g$	Champs d'accélération de la pesanteur
$h$	Constante de Planck
$h$	Coefficient de transfert convectif
$h$	Hauteur de l'ouverture
$h_s$	Enthalpie spécifique
$H_0$	Hauteur de l'ouverture
$J$	Flux massique de matière
$k$	Constante de Boltzmann
$k$	Coefficient d'absorption
$k$	Conductivité thermique
$L$	Luminance
$L_V$	Quantité de chaleur nécessaire à la pyrolyse
$m$	Masse
$\dot{m}$	Débit massique
$\dot{m}_{fuel}$	Taux de combustion
$\dot{m}_{fuel}$	Débit massique de fuel produit par la pyrolyse
$\dot{m}_{entrant}$	Débit massique d'air entrant dans le compartiment

**Roman Letters**

$P$	Pression
$q_i$	Flux d'énergie
$\dot{Q}$	Flux de chaleur
$Q_{fo}$	Flux de chaleur nécessaire pour obtenir un flashover
$Q_F$	Flux de chaleur de la flamme reçu par le combustible
$Q_L$	Flux de chaleur perdu à travers le combustible
$Q_E$	Flux rayonné par les parois et les fumées chaudes
$R$	Constante des gaz parfaits
$r_{fuel-air}$	Rapport stœchiométrique de la réaction de combustion
$S_{ij}$	Tenseur de déformation
$s_L$	Vitesse de flamme
$T_s$	Température considérée de la surface du fluide
$T_\infty$	Température du fluide éloigné de la surface
$T$	Température
$t$	Temps
$u$	Vitesse
$V$	Volume
$V_k$	Vitesse de diffusion de l'espèce $k$
$W_k$	Masse molaire de l'espèce $k$
$Y_k$	Fraction massique de l'espèce $k$
$X_k$	Fraction massique de l'espèce $k$
$Z$	Fraction de mélange

**Greek letters**

$\alpha$	Absorptivité
$\alpha$	Coefficient de transfert convectif
$\epsilon$	Émissivité
$\epsilon$	Taux de dissipation
$\lambda$	Conductivité thermique du matériau
$\lambda$	Longueur d'onde
$\mu$	Viscosité dynamique
$\nu$	Viscosité cinématique
$\omega_v$	Intégrale de collision
$\rho$	Masse volumique
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann
$\tau_{ij}$	Tenseur de cisaillement
$\tau$	Temps caractéristique
$\theta$	Angle de la direction du rayonnement
$\phi$	Angle de la direction du rayonnement
$\psi$	Dimension de la flamme dans la direction x
$\dot{\omega}$	Terme source
$\vec{\varphi}$	Densité de flux de chaleur
$\sigma_\alpha$	Diamètre de sphère dure de Lennard-Jones



# Table des figures

1.1	Triangle du feu . . . . .	8
1.2	Flamme de bec bunsen . . . . .	11
1.3	Structure d'une flamme de pré-mélange . . . . .	12
1.4	Structure d'une flamme de diffusion . . . . .	13
1.5	Flamme de bougie . . . . .	14
1.6	Flammes turbulentes issues du brûleur Firediag . . . . .	14
1.7	Phases de développement d'un feu . . . . .	15
1.8	Domaine d'inflammabilité . . . . .	17
1.9	Illustration d'un flashover . . . . .	20
1.10	Illustration d'un backdraft . . . . .	21
1.11	Étapes du backdraft, [44] . . . . .	22
1.12	Illustration d'un flash fire . . . . .	23
1.13	Exemple de propriétés thermiques de matériaux . . . . .	25
1.14	Exemple de propriétés convectives . . . . .	26
1.15	Répartition spectrale de l'émittance du corps noir pour différentes températures. . . . .	28
1.16	Transferts thermiques lors d'un feu de compartiment . . . . .	32
1.17	Positionnement du foyer [106] . . . . .	33
1.18	Évolution du taux de combustion en fonction de l'ouverture . . . . .	34
1.19	Entraînement de l'air par un panache de fumée . . . . .	38
1.20	Représentation du plan neutre . . . . .	39
1.21	Exemple de volumes de fumées dégagées . . . . .	40
1.22	Effets de la pression dans un volume en feu [13] . . . . .	41

2.1	Représentation numérique des deux cellules . . . . .	44
2.2	Matrice de 36 brûleurs, foyer Firediag . . . . .	44
2.3	Différentes flammes à 500 kW, 36 brûleurs (a), 24 brûleurs (b) . . . . .	45
2.4	Isolation de la cellule d'essais . . . . .	46
2.5	Vue de haut de l'installation . . . . .	47
2.6	Vue numérique de la configuration petit volume . . . . .	48
2.7	Vue numérique de la configuration grand volume . . . . .	49
2.8	Vue numérique de la configuration grand volume, exutoire ouvert . . . . .	50
2.9	Vue numérique de la configuration grand volume, porte ouverte . . . . .	51
2.10	Vue numérique de la configuration grand volume avec ventilation mécanique . . . . .	52
2.11	Pics d'émission des principales espèces . . . . .	53
2.12	Vue numérique de profil de l'installation expérimentale . . . . .	54
2.13	Vue numérique la position du fluxmètre . . . . .	55
2.14	Représentation numérique de la position des thermocouples . . . . .	56
2.15	Représentation numérique de la zone de mesure des températures . . . . .	57
2.16	Principe de la technique PIV, [29] . . . . .	59
2.17	Représentation numérique de l'installation PIV . . . . .	60
2.18	Vue du cheminement laser . . . . .	61
2.19	Vue intérieure de la cellule essais . . . . .	62
2.20	Vue de face de la modification de l'exutoire . . . . .	64
2.21	Vue de profil de la modification de l'exutoire . . . . .	64
2.22	Ensemenceur utilisé pour les essais PIV . . . . .	65
2.23	Montage provisoire . . . . .	66
2.24	Montage définitif . . . . .	67
3.1	Principales caractéristiques du code de calcul FDS . . . . .	81
3.2	Comparaison entre des mailles de 10 et 20 cm . . . . .	84
3.3	Comparaison entre des mailles de 5 et 20 cm . . . . .	85
3.4	Comparaison entre des mailles de 5 et 10 cm . . . . .	86
3.5	Comparaison entre des mailles de 5 et 2.5 cm . . . . .	87

3.6	Comparaison entre des mailles de 2.5, 5, 10 et 20 cm . . . . .	88
3.7	Récapitulatif des temps de simulation, cellule expérimentale 38 m <sup>3</sup> . . . . .	89
3.8	Vue FDS du maillage de la cellule . . . . .	89
3.9	Profil de température adiabatique . . . . .	92
3.10	Profil de température non adiabatique . . . . .	93
3.11	Comparaison des profils de température adiabatique et non adiabatique . . .	94
3.12	Comparaison des profils de température expérimentales et numériques . . . .	95
3.13	Comparaison des profils de températures expérimentales et numériques modifiés	96
4.1	Moyenne de l'émission OH* . . . . .	100
4.2	RMS de l'espèce OH* . . . . .	101
4.3	Comparaison des profils de température numérique / expérimentale à 200 kW	102
4.4	Champs de température instantanée à 200 kW, 300 s, simulation FDS . . .	103
4.5	Comparaison des profils de température numérique / expérimentale à 500 kW	104
4.6	Champs de température instantanée à 500 kW, 300 s, simulation FDS . . .	105
4.7	Comparaison des profils de température numérique / expérimentale à 800 kW	106
4.8	Champs de température instantanée à 800 kW, 300 s, simulation FDS . . .	107
4.9	Courbes HRR à 200 kW (a), 500 kW (b), 800 kW (c) . . . . .	108
4.10	Représentation numérique du flux thermique reçu par les obstacles modélisés à 200 kW . . . . .	109
4.11	Représentation numérique du flux thermique reçu par les obstacles modélisés à 500 kW . . . . .	110
4.12	Représentation numérique du flux thermique reçu par les obstacles modélisés à 800 kW . . . . .	110
4.13	Températures numériques et expérimentales à 200 kW, Position 1 (a), Position 2 (b), Position 3 (c), Position 4 (d), Position 5 (e), Position 6 (f) . . . . .	112
4.14	Températures numériques et expérimentales à 200kW (suite), Position 7 (a), Position 8 (b), Position 9 (c), Position 10 (d), Position 11 (e), Position 12 (f)	113
4.15	Comparaison de la température moyenne de l'ensemble des capteurs à diffé- rentes positions à 200 kW . . . . .	114

4.16	Champs de température moyenne à 200 kW . . . . .	115
4.17	Températures numériques et expérimentales à 500 kW, Position 1 (a), Position 2 (b), Position 3 (c), Position 4 (d), Position 5 (e), Position 6 (f) . . . . .	116
4.18	Températures numériques et expérimentales à 500kW (suite), Position 7 (a), Position 8 (b), Position 9 (c), Position 10 (d), Position 11 (e), Position 12 (f) . . . . .	117
4.19	Comparaison de la température moyenne de l'ensemble des capteurs à différentes positions à 500 kW . . . . .	118
4.20	Champs de température moyenne à 500 kW . . . . .	119
4.21	Températures numériques et expérimentales à 800 kW, Position 1 (a), Position 2 (b), Position 3 (c), Position 4 (d), Position 5 (e), Position 6 (f) . . . . .	120
4.22	Températures numériques et expérimentales à 800 kW (suite), Position 7 (a), Position 8 (b), Position 9 (c), Position 10 (d), Position 11 (e), Position 12 (f) . . . . .	121
4.23	Comparaison de la température moyenne de l'ensemble des capteurs à différentes positions à 800 kW . . . . .	122
4.24	Champs de température moyenne à 800 kW . . . . .	123
4.25	Mire reconstituée . . . . .	124
4.26	Image complète avec laser et particules d'alumine . . . . .	125
4.27	Image complète avec laser et sans particules d'alumine . . . . .	126
4.28	Emplacement des mesures PIV . . . . .	127
4.29	Champs de vitesse instantané configuration porte ouverte, 100kW . . . . .	127
4.30	Vitesses expérimentales instantanées en configuration porte ouverte, 200kW (a), 300kW (b), 400kW (c), 500kW (d) . . . . .	128
4.31	Vitesses expérimentales instantanées en configuration porte ouverte, 600kW (a), 700kW (b), 800kW (c), 900kW (d) . . . . .	129
4.32	Champs de vitesse moyenne configuration porte ouverte, 100kW . . . . .	130
4.33	Vitesses expérimentales moyennes en configuration porte ouverte, 200kW (a), 300kW (b), 400kW (c), 500kW (d) . . . . .	131
4.34	Vitesses expérimentales moyennes en configuration porte ouverte, 600kW (a), 700kW (b), 800kW (c), 900kW (d) . . . . .	132

4.35	Évolution de la vitesse moyenne maximale en fonction de la puissance, porte ouverte . . . . .	133
4.36	Emplacement des mesures PIV . . . . .	134
4.37	Vitesses expérimentales instantanées en configuration exutoire ouvert, 100kW (a), 200kW (b), 300kW (c), 400kW (d) . . . . .	135
4.38	Vitesses expérimentales instantanées en configuration exutoire ouvert, 500kW (a), 600kW (b), 700kW (c), 800kW (d) . . . . .	136
4.39	Vitesses expérimentales instantanées en configuration exutoire ouvert, 900kW (a), 1000kW (b) . . . . .	137
4.40	Vitesses expérimentales moyennes en configuration exutoire ouvert, 100kW (a), 200kW (b), 300kW (c), 400kW (d) . . . . .	138
4.41	Vitesses expérimentales moyennes en configuration exutoire ouvert, 600kW (a), 700kW (b), 800kW (c), 900kW (d) . . . . .	139
4.42	Vitesses expérimentales moyennes en configuration exutoire ouvert, 900kW (a), 1000kW (b) . . . . .	140
4.43	Évolution de la vitesse moyenne maximale en fonction de la puissance, exutoire ouvert . . . . .	140
4.44	Vitesses expérimentales instantanées en configuration ventilation mécanique / exutoire ouvert, VM200kW (a), EXU200kW (b), VM500kW (c), EXU500kW (c)	142
4.45	Vitesses expérimentales instantanées en configuration ventilation mécanique / exutoire ouvert, VM800kW (a), EXU800kW (b) . . . . .	143
4.46	Vitesses expérimentales moyennes en configuration ventilation mécanique / exutoire ouvert, VM200kW (a), EXU200kW (b), VM500kW (c), EXU500kW (c)	144
4.47	Vitesses expérimentales moyennes en configuration ventilation mécanique / exutoire ouvert, VM800kW (a), EXU800kW (b) . . . . .	145
4.48	Evolution de la vitesse en fonction de la puissance, ventilation mécanique .	145
4.49	Comparaison vitesses numériques et expérimentales, porte ouverte, 200 kW .	146
4.50	Comparaison vitesses numériques et expérimentales, porte ouverte, 500 kW .	147
4.51	Comparaison vitesses numériques et expérimentales, porte ouverte, 800 kW .	148
4.52	Comparaison vitesses numériques et expérimentales, exutoire ouvert, 200 kW	149

4.53	Comparaison vitesses numériques et expérimentales, exutoire ouvert, 500 kW	149
4.54	Comparaison vitesses numériques et expérimentales, exutoire ouvert, 800 kW	150
4.55	Comparaison vitesses numériques et expérimentales, ventilation mécanique, 200 kW . . . . .	151
4.56	Comparaison vitesses numériques et expérimentales, ventilation mécanique, 500 kW . . . . .	152
4.57	Comparaison vitesses numériques et expérimentales, ventilation mécanique, 800 kW . . . . .	152
4.58	Comparaison vitesses numériques et expérimentales . . . . .	153

# Introduction

Au cours de ces dernières années, de nombreux sapeurs-pompiers, volontaires comme professionnels, civils comme militaires, hommes et femmes, sont décédés en service commandé. Les causes de ces décès sont diverses et variées. L'année 2002-2003 a été particulièrement meurtrière dans les rangs des services de secours. On peut notamment citer l'accident de Neuilly-sur-Seine, en septembre 2002, où cinq pompiers de Paris ont trouvé la mort lors d'une intervention pour feu d'appartement. Cette même année, sur l'autoroute A7, à Loriol dans la Drôme, six sapeurs-pompiers avaient été fauchés par un véhicule alors qu'ils étaient en intervention. Cinq d'entre eux ont perdu la vie (novembre 2002).

Suite à ces tragiques accidents, Mr Nicolas Sarkozy, ministre de l'intérieur de l'époque, demanda un rapport visant à "étudier l'ensemble des missions confiées aux sapeurs-pompiers et de faire des propositions pour améliorer la sécurité active et passive des intervenants". Cette mission donna lieu à un rapport portant le nom de son auteur, très connu dans le monde des sapeurs-pompiers, le rapport POURNY [93]. De ce dernier découle plusieurs constats et de nombreuses recommandations. Dans le cadre de ces travaux de recherche, deux points particulièrement importants de ce rapport seront retenus :

- Le manque d'échanges avec les scientifiques ;
- Trop peu d'outils technologiques à disposition du Commandant des Opérations de Secours (COS).

Depuis la parution de ce rapport, bien des choses ont changées. En effet, de nombreuses recherches ont vu le jour dans le domaine du développement des outils intelligents. On peut citer entre autre, de nombreux travaux effectués au laboratoire CORIA [42], [43], [46], [82],

[84], [83], [90] [91]. D'autre part, bien que la recherche sur les incendies existe depuis très longtemps, les échanges entre universitaires et services de secours se sont intensifiés en France [50] [120] et à l'international [64],[121], [65]. Ces nombreux travaux portent sur des sujets divers et variés tels que l'analyse des Équipements de Protection Individuelle (EPI) des sapeurs-pompiers [26], l'efficacité des techniques d'intervention des équipes de secours, la compréhension des phénomènes thermiques [13], [44] ou encore l'analyse des feux de compartiments [100], [76]. Cette liste non exhaustive met en avant la diversité des champs de recherche possibles dans le domaine de l'incendie.

Lors d'un feu de compartiment, les fumées d'incendie, bien que particulièrement dangereuses, sont une véritable source d'informations. En effet, une analyse détaillée de ces dernières pourrait permettre d'obtenir de nombreux éléments d'information sur le foyer, son évolution, sa composition ou encore la possibilité d'apparition de phénomènes thermiques fortement redoutés par les pompiers. Pour ces différentes raisons, l'analyse des fumées s'est développée ces dernières années, notamment au travers de l'étude de sa température, de sa composition chimique, de son opacité, de sa toxicité ou encore de sa vitesse. En effet, certains travaux mettent en évidence un lien entre la vitesse des fumées et l'évolution de la température [64]. Pour cela, de nombreux capteurs ou sondes sont à disposition des scientifiques (thermocouple, opacimètre, sonde de Pitot...). Cependant, ces techniques de mesure sont pour la plupart, considérées comme intrusives. Elles peuvent donc perturber la dynamique des gaz chauds au cours de l'acquisition. Pour cela, de nombreuses techniques lasers sont utilisées pour l'étude des incendies car elles présentent l'avantage de ne pas perturber l'écoulement étudié. C'est le cas de la méthode Particle Image Velocimetry (PIV) qui est utilisée pour mesurer des champs de vitesses.

L'utilisation de cette technique est rendue difficile par les conditions extrêmes qu'il est possible de retrouver dans les incendies. En effet, les températures élevées, le rayonnement important mais aussi la forte production de suies compliquent l'obtention de mesures expérimentales. Cependant, malgré ces contraintes expérimentales, la PIV est utilisée depuis plusieurs années pour l'étude des vitesses des fumées d'incendies [41], [114], [108]. Dans certains cas, il est possible d'utiliser cette méthode pour réaliser des mesures en configuration

"grands champs", permettant ainsi d'obtenir des informations sur de grandes surfaces pouvant être de l'ordre du  $m^2$ . Ce dernier point s'avère particulièrement intéressant dans l'étude des incendies. En effet, de par leur dynamique et leur ampleur, ils nécessitent bien souvent une étude à grande échelle afin de bien cerner tous les mécanismes qui entrent en jeu au cours d'un sinistre. Suite à ce constat, de nombreux travaux ont utilisés la PIV grand champ pour étudier l'incendie dans différentes configurations. En effet, bien que difficile à mettre en place, cette technique s'est avérée très intéressante, que ce soit pour l'étude des feux de bâtiment ou pour des feux de végétaux. Ces études ont été principalement menées dans de bonnes conditions de ventilation [22], [21], [23], [49], [77] [94], [104], [116].

C'est dans ce contexte que le projet ANR FIREDIAG a vu le jour. Ce dernier vise à améliorer la compréhension de la dynamique des fumées d'incendie lors des feux de compartiments. Pour cela, deux caissons maritimes ont été installés sur le site de formation des sapeurs-pompier de Seine-Maritime. Les containers de bateaux sont régulièrement choisis pour les entraînements des sapeurs-pompier car ils présentent un volume assez proche d'un bureau ou d'une cuisine, feux majoritairement rencontrés en intervention. Il est alors possible d'observer de nombreux phénomènes thermiques et de s'entraîner à les combattre [13]

Dans le cadre du projet FIREDIAG, un caisson a été modifié et équipé d'un brûleur au propane pouvant fournir une puissance de feu allant jusqu'à 1 MW et ainsi produire des fumées dont la température est proche de  $500^\circ C$ . La présence d'une paroi amovible et de deux exutoires permet d'étudier différentes configurations, en conditions ventilées ou sous-ventilées. Le deuxième container permet d'installer le matériel nécessaire à la mise en place de la PIV grand champ. Des mesures de vitesses sur  $1m^2$  seront réalisées au cours de ces travaux. L'installation expérimentale sera détaillée dans le chapitre 3.

L'objectif final de ces travaux sera de mettre un outil d'aide à la décision à disposition du COS, développé et breveté par la société Groupe Leader. Ce dernier, sous forme de capteur présent dans le bâtiment avant sinistre, devra apporter des informations sur l'évolution de l'incendie, notamment sur le risque d'apparition des phénomènes thermiques. Ce transfert d'informations pourra s'effectuer grâce à une tablette ou un smartphone directement à dispo-

sition du COS. Cette tâche est confiée aux laboratoires LITIS et IRSEEM qui s'assurent que les informations émises par le capteur arriveront à la tablette du COS. Ils sont également en charge du développement de l'interface graphique de cette dernière. Ceci devrait permettre, dans le futur, de limiter les accidents dans les rangs des services de secours. Ce projet regroupe plusieurs laboratoires. Le CORIA s'est vu attribuer la partie relative à l'acquisition de données, nécessaire à la compréhension de la dynamique des fumées. Le CORIA partage cette tâche avec le laboratoire LOMC ainsi qu'avec le SDIS 76. Ces travaux serviront de base de données pour alimenter l'outil d'aide à la décision. Ceci pourra être réalisé grâce à l'étude des températures et des vitesses de fumées, notamment en étudiant la dynamique des fumées d'incendie aux exutoires ainsi que les écoulements sous plafond, en configurations ventilée et sous ventilée. Les résultats expérimentaux obtenus au cours de ces travaux seront comparés à ceux obtenus numériquement grâce au code de calcul Fire Dynamics Simulator (FDS). La composante numérique permettra, à priori, de définir des scénarii (flashover, sous ventilation), vérifiés par l'expérimental. La double compétence (numérique / expérimentale) est essentielle dans ce type d'étude où les données expérimentales souffrent d'un manque de résolution (spatiale, temporelle) mais pour autant représentent des informations nécessaires à la validation des codes.

Ce manuscrit de thèse est composé de quatre chapitres. Le premier, intitulé sciences du feu, reprend les bases indispensables pour une bonne compréhension des phénomènes observés en incendie. Le chapitre 2 quant à lui détaille le code de calcul FDS. En effet, une bonne connaissance du logiciel est nécessaire pour en apprécier ses forces et ses faiblesses et ainsi, être critique sur les résultats obtenus. Le troisième chapitre permettra aux lecteurs d'avoir une représentation de l'installation expérimentale, des techniques de mesures utilisées, des contraintes expérimentales observées ainsi que des solutions techniques mises en place pour y remédier. Pour finir, le chapitre 4 présentera les résultats expérimentaux obtenus et les comparera aux résultats numériques.

Au travers de ces différents chapitres, les travaux de thèse se proposent d'apporter des connaissances supplémentaires dans la compréhension des incendies, notamment au travers de l'étude

des écoulements de fumées sous plafond, au niveau des exutoires et ce, dans des conditions ventilées et sous-ventilées.



# Chapitre 1

## Science du feu

### 1.1 Généralités incendie

L'incendie est un phénomène de combustion non maîtrisé par l'Homme et pouvant conduire à des situations parfois dramatiques. Lors d'un feu, de nombreuses réactions physicochimiques entrent en jeu, ce qui rend difficile la compréhension et de l'évolution d'un sinistre.

#### 1.1.1 Bases théoriques de l'incendie

##### 1.1.1.1 Notions fondamentales

Pour naître et se développer, un feu a besoin de trois éléments essentiels :

- Le combustible : Élément, matériau ou encore molécule qui, dans certaines conditions, peut intervenir dans une réaction de combustion (ex : bois, papier...);
- Le comburant : Espèce chimique qui va permettre au combustible d'être oxydé. Le comburant principal intervenant dans les incendies est le dioxygène de l'air. Cependant, bien que plus rares, d'autres molécules comme les peroxydes, certains halogènes ou oxydes métalliques peuvent jouer le rôle de comburant ;
- L'énergie d'activation : Source de chaleur permettant d'apporter l'énergie suffisante pour enflammer le combustible (ex : étincelle, flamme...).

De ces trois définitions découle la notion de triangle du feu, visible sur la figure 1.1 et représenté comme suit :

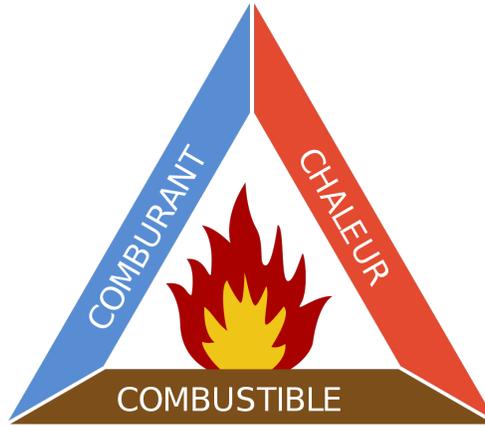


FIGURE 1.1: Triangle du feu

Ce triangle représente les trois éléments essentiels au développement d'un incendie. Si l'on supprime l'un des trois, l'incendie est maîtrisé. C'est à partir de ce constat que sont organisées les techniques de prévention et de lutte contre l'incendie. Pour illustrer ces propos, prenons quelques exemples :

- Les sapeurs-pompiers utilisent des lances à eau qui agissent par refroidissement et suppriment l'énergie d'activation, maîtrisant ainsi l'incendie ;
- Utilisation de gaz inertes dans les locaux où l'eau ne peut être utilisée (locaux informatiques, archives papiers...). L'oxygène de l'air n'est plus suffisant pour alimenter le feu. La suppression du comburant entraîne la maîtrise du sinistre ;
- Si l'on retire la bûche de la cheminée, le combustible est supprimé. La combustion prendra fin dès que le combustible restant sera épuisé.

Il existe une variante du triangle du feu appelée le tétraèdre du feu. Ce dernier prend en compte les radicaux libres produits au cours des réactions chimiques.

La combustion met en jeu de nombreuses réactions chimiques d'oxydoréduction [119] de type :



Cette réaction entraîne des ruptures de liaisons entre les molécules du combustible mais également la création de produits de combustion chimiquement plus stables. Le gain d'énergie résultant de ces transformations chimiques entraîne également un fort dégagement de chaleur. La réaction est alors dite exothermique. La zone de réaction chimique donnant lieu au dégagement de chaleur est localisée dans la flamme, également siège de phénomènes de diffusion mais aussi d'émissions lumineuses spectrales, spécifiques aux espèces qui réagissent. C'est sur ce principe qu'est utilisée la chimiluminescence détaillée dans la partie expérimentale. Pour la plupart des flammes, la zone de réaction a une épaisseur moyenne de l'ordre du millimètre [16]. En fonction de l'énergie sous forme de chaleur dégagée par la flamme, des gradients de températures très importants peuvent être présents au sein d'un même volume sinistré. Ceci entraîne de fortes variations de la masse volumique et donc, de nombreux transferts de masse et de chaleur (notamment au niveau des fumées).

Pour un solide, la combustion a lieu après le phénomène de pyrolyse [115]. Sous l'effet d'un flux thermique, le matériau solide se dégrade libérant ainsi des gaz de pyrolyse. Ces derniers, hautement combustibles, s'enflamment et libèrent à leur tour de l'énergie sous forme de chaleur qui va venir entretenir, voire augmenter le flux thermique responsable de ce phénomène [35]. C'est ce qui va permettre l'auto entretien du foyer et éventuellement, sa propagation. La pyrolyse n'est pas uniquement un changement de phase, elle modifie chimiquement la structure du matériau, rendant ce phénomène de dégradation irréversible.

Les combustibles pouvant être à l'origine ou intervenir lors d'un incendie sont extrêmement nombreux. Il peut s'agir d'un simple morceau de bois comme d'un matériau très complexe. Ils seront sous forme d'un solide, d'un liquide ou d'un gaz. Chaque combustible est défini par son pouvoir calorifique qui est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de masse ou de volume de combustible (exprimée en MJ/kg ou MJ/m<sup>3</sup>, il s'agit de l'enthalpie de combustion). Selon la prise en compte ou non de l'énergie de condensation de l'eau produite par la combustion, il existe deux sortes de pouvoir calorifique :

- Pouvoir calorifique inférieur (PCI), qui ne prend pas en compte la condensation de l'eau ;
- Pouvoir calorifique supérieur (PCS), qui prend en compte la condensation de l'eau.

À titre d'exemple, voici quelques PCI :

- Le bois : 17 MJ/kg ;
- Le charbon : 33 MJ/kg ;
- L'essence : 46,7 MJ/kg ;
- Le dihydrogène : 142 MJ/kg.

Habituellement, dans le domaine de la sécurité incendie, c'est le PCI qui est pris en compte. En effet, la vapeur d'eau est supposée entraînée par les fumées sans se condenser. D'autres notions essentielles en sécurité incendie doivent être définies [13] :

- La puissance du feu qui exprime le taux de chaleur produit par l'incendie, en watt. En ingénierie de la sécurité incendie, la puissance du feu est le produit du taux de perte massique du combustible ( $\text{g}/\text{m}^2.\text{s}$ ), de la surface ( $\text{m}^2$ ) et de la chaleur effective de combustion du matériau en question (enthalpie de combustion exprimée en kJ/g). Afin de sensibiliser le lecteur aux puissances de feu dont voici quelques exemples [60] :
  - Feu de corbeille à papier : de quelques kW à quelques dizaines de kW ;
  - Feu de fauteuils : en moyenne de 0,5 à 1 MW ;
  - Feu de literie : en moyenne de quelques MW
  - Feu de chambre : de 3 à 10 MW ;
  - Feu de véhicule léger : de 3 à 7 MW ;
  - Feu industriel : plusieurs centaines de MW.
- La charge calorifique est la quantité de chaleur susceptible d'être produite par la combustion complète de l'ensemble des substances combustibles présentes dans le local (MJ/kg) ;
- Le potentiel calorifique qui est la charge calorifique par unité de surface ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ).  
Ci-dessous, quelques exemples :
  - Fauteuil : 330  $\text{MJ}/\text{m}^2$  ;
  - Rideaux : 10  $\text{MJ}/\text{m}^2$  ;
  - Tapis (moquette) : 50  $\text{MJ}/\text{m}^2$ .

### 1.1.1.2 Les différents types de flammes

Dans la plupart des incendies, il s'agit d'une combustion vive avec présence de flammes [48]. Cependant, il est important de préciser que des feux couvants peuvent exister. Ce type de feu est caractérisé par une combustion relativement lente, sans présence de flamme [87] en raison de la forte sous ventilation. On les retrouve notamment dans les feux de combles, quand l'incendie se propage sous toiture. La porosité du combustible (ici des isolants altérés) permet l'apport de comburant nécessaire à la combustion du solide (e.g. chevrons de toiture). Comme il est plus difficile à détecter qu'un feu avec flamme vive, il peut se propager un long moment, d'où sa dangerosité.

Lors d'un incendie, les flammes rencontrées sont principalement des flammes de diffusion. Dans la vie courante, on retrouve des flammes de pré-mélange (bec bunsen).

#### Flamme de pré-mélange

Dans une flamme de pré-mélange, le comburant et le combustible sont mélangés de manière homogène, permettant l'inflammation ou la déflagration dès lors qu'une énergie d'activation est apportée. L'exemple souvent utilisé pour illustrer une flamme de pré-mélange est le bec bunsen, représenté sur la figure 1.2.



FIGURE 1.2: Flamme de bec bunsen

En effet, le butane et l'oxygène sont mélangés dans des conditions stœchiométriques avant l'apport d'une énergie d'activation.

La structure de la flamme de pré-mélange est composée de trois zones [66], illustrées sur la figure 1.3.

- Une zone de préchauffage où les gaz frais sont chauffés. l'épaisseur de cette zone, notée  $\delta_l$ , avoisine les 3 mm ;
- Une zone de réaction, partie visible de la flamme, siège de la réaction chimique, d'une épaisseur d'environ 1 mm, noté  $\delta_r$  ;
- Une zone post flamme, siège des radicaux et caractérisée par des températures élevées.

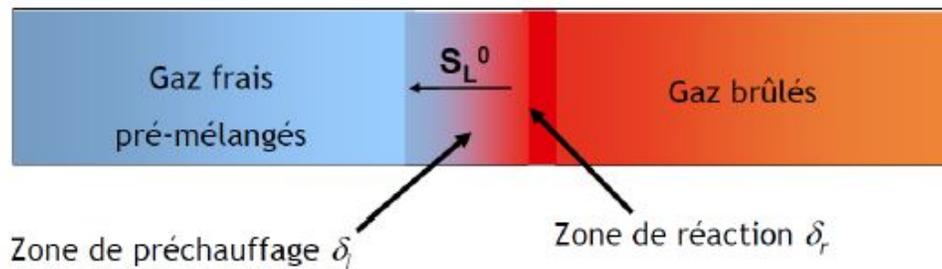


FIGURE 1.3: Structure d'une flamme de pré-mélange

Les flammes de pré-mélange sont reconnaissables par leur couleur bleue. Elles sont très chaudes à l'intérieur mais, en raison de leur faible production de suies, ne dégagent que peu d'énergie [118].

### Flamme de diffusion

Dans une flamme de diffusion, le comburant et le combustible sont initialement séparés. Ils sont transportés par diffusion jusqu'à la zone de réaction grâce au gradient de concentration défini par la loi de Fick (1855).

$$J_j = -\rho D_j \nabla C \quad (1.2)$$

Avec :

$J_j$  : Flux massique en  $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$

$\rho$  : Masse volumique en  $\text{kg.m}^{-3}$

$D_j$  : Coefficient de diffusion binaire en  $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$

$C$  : Fraction massique

Une fois que les espèces ont diffusé vers la zone de réaction, l'énergie d'activation permettra la mise à feu, si les conditions d'inflammation sont respectées. La structure de la flamme de diffusion est présentée à la figure 1.4.

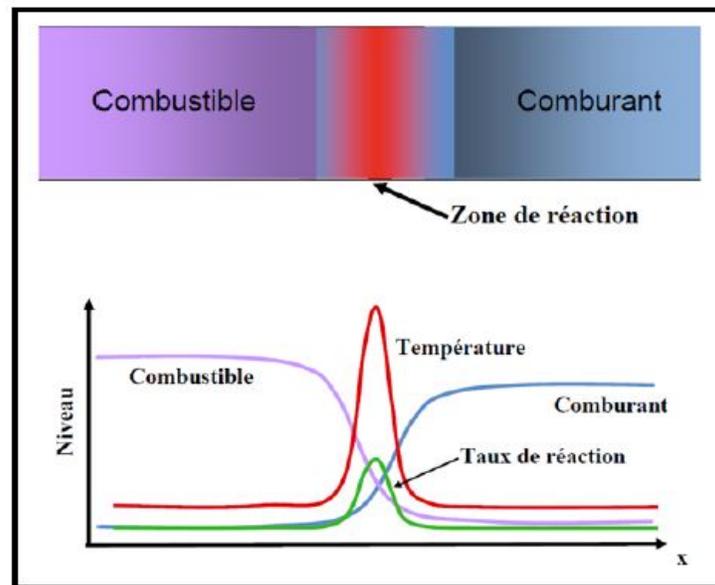


FIGURE 1.4: Structure d'une flamme de diffusion

La combustion se produit dans la zone de réaction, lieu où les proportions de combustible et de comburant se situent dans le domaine d'inflammabilité. Sur cette courbe, il est possible d'observer que la température de la flamme est plus importante lorsque l'on se rapproche de la stœchiométrie.

Cette flamme a une couleur jaune / orangée, pouvant virer vers le rouge en situation de sous ventilation. Cette couleur est due à la présence de suies, produites au cours de ce type de combustion qui s'éloigne un peu plus de la stœchiométrie que la flamme de pré-mélange. L'intérieur de la flamme est moins chaud qu'une flamme de pré-mélange mais l'énergie dégagée est elle, bien plus importante. Ce constat introduit la notion de rayonnement mais explique également pourquoi ce type de flamme participe activement à la propagation d'un incendie. Comme cité précédemment, la flamme de diffusion est principalement rencontrée lors d'un

incendie [48] [33]. A grande échelle, le rayonnement émis par la flamme peut atteindre des valeurs très élevées et donc, participer à la propagation du feu.

L'exemple type d'illustration de la flamme de diffusion est la bougie [36], illustrée par la figure 1.5.



FIGURE 1.5: Flamme de bougie

Une flamme de diffusion peut être laminaire ou turbulente. Dans le cas de la bougie, l'écoulement est laminaire. Dans les incendies, les flammes sont généralement turbulentes. Elles sont caractérisées par des structures turbulentes, visibles sur la figure 1.6.



FIGURE 1.6: Flammes turbulentes issues du brûleur Firediag

Lors d'un feu de compartiment, différents phénomènes thermiques peuvent avoir lieu. Ils dépendent de certaines conditions, comme la ventilation ou encore la plage d'inflammabilité. Ces notions, fondamentales dans la compréhension du système feu, sont définies dans la suite de ce chapitre.

## 1.1.2 Système feu

### 1.1.2.1 Développement du feu

Dans un incendie "standard", le feu suit un développement comme représenté sur la figure 1.7.

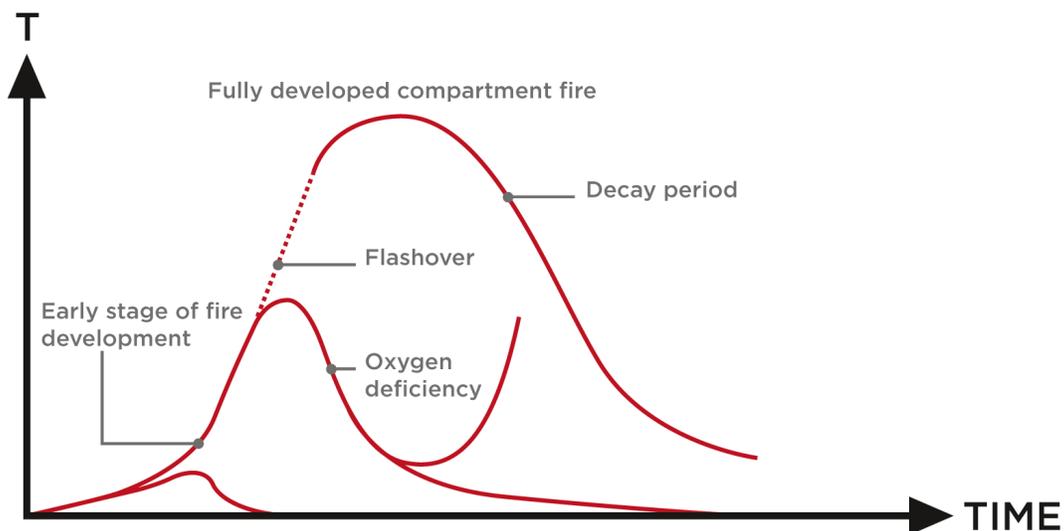


FIGURE 1.7: Phases de développement d'un feu

Il se décompose en cinq phases principales [115] :

1. Une phase de latence pendant laquelle il est possible d'observer une libération de gaz et d'énergie sous forme de chaleur assez localisée. La durée de la phase de latence est fonction de plusieurs paramètres comme le combustible, le comburant disponible, l'énergie d'activation et les transferts thermiques.
2. Une phase de démarrage correspondant à la phase de naissance du feu. Les émissions

en gaz de pyrolyse deviennent plus importantes et l'on observe l'apparition d'une flamme.

3. Une phase d'accélération présentant la phase de croissance de l'incendie. Elle est principalement dépendante du combustible (via le dégagement de fumées qu'il va produire) mais aussi de la ventilation.
4. Une phase d'embrasement généralisé (pas obligatoire) au cours de laquelle survient l'inflammation instantanée de l'ensemble du combustible présent dans le volume. Ce phénomène va être défini dans la suite de ce chapitre.
5. Une phase de déclin caractérisée par un épuisement de l'incendie, notamment au travers d'une baisse de température. Le feu s'éteint naturellement par manque de comburant, de combustible ou par une action extérieure (intervention des secours).

Lors du développement du feu, l'incendie sera soit contrôlé par le combustible, et dans ce cas on parle de Feu Limité par le Combustible (FLC), soit par la ventilation et on parlera alors de Feu Limité par la Ventilation (FLV). Dans la littérature, il est également possible de trouver l'appellation feu contrôlé par le combustible ou la ventilation.

Dans une configuration FLV, le comburant disponible n'est pas suffisant pour consommer l'ensemble du combustible disponible. C'est généralement le cas lorsqu'un feu est bien développé.

Dans une configuration FLC, la quantité de comburant disponible est largement supérieure à celle nécessaire pour alimenter le combustible. Le fait que l'air disponible soit en excès dans le local a pour conséquence d'abaisser la température du volume sinistré. C'est ce qui explique que les feux limités par le combustible soient généralement moins destructeurs que les feux limités par la ventilation [35]. On retrouve généralement cette situation en tout début ou en fin d'un sinistre. On peut également retrouver cette situation lors de la phase pleinement développée de l'incendie si l'apport d'air est suffisant pour la réaction (ex : feu dans un hangar, feu de forêt...).

Ces notions sont fondamentales car elles définissent une partie des facteurs d'apparition des phénomènes thermiques, notamment la ventilation.

**Domaine d'inflammabilité [115] :**

Le domaine d'inflammabilité correspond à la plage dans laquelle la concentration du mélange comburant / combustible va permettre, en présence d'une énergie d'activation suffisante, au mélange de s'enflammer. Il est défini par deux limites [106] :

- La limite inférieure d'inflammabilité : Concentration en comburant / combustible en dessous de laquelle le mélange ne pourra pas s'enflammer ;
- La limite supérieure d'inflammabilité : Concentration en comburant / combustible au dessus de laquelle le mélange ne pourra pas s'enflammer.

Le mélange atteint sa valeur d'inflammabilité maximum lorsqu'il est à la stoechiométrie.

Ces limites sont présentées grâce à la figure 1.8.

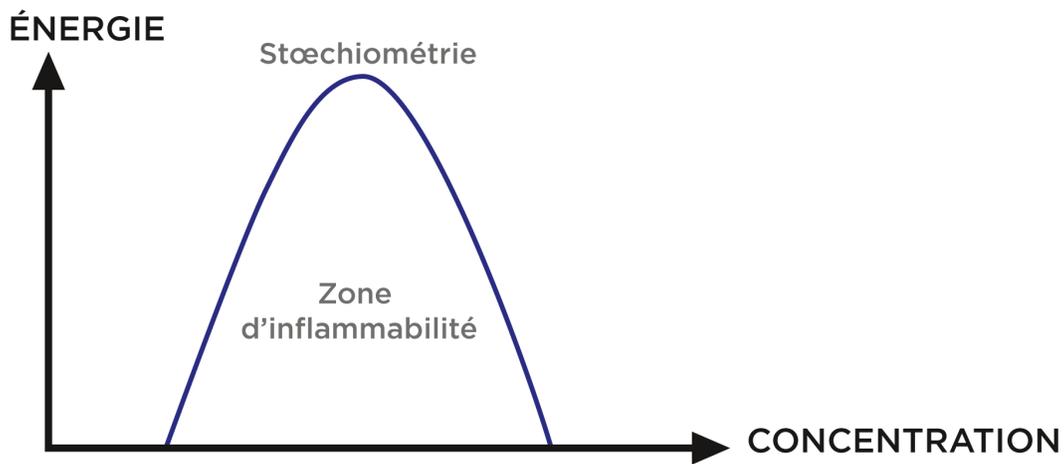


FIGURE 1.8: Domaine d'inflammabilité

**1.1.2.2 Flashover**

Ce phénomène se produit lorsque les surfaces combustibles présentes dans un local en feu semi ouvert, chauffées par les fumées et le rayonnement, voient s'enflammer spontanément et simultanément les gaz de pyrolyse produits [15] [112] [39]. Pour observer ce phénomène, l'apport en comburant doit être suffisant d'où la nécessité de se trouver dans un local semi ouvert. Ceci met en avant l'importance des notions de domaine d'inflammabilité et de feu limité par le combustible ou par la ventilation définies précédemment. Il s'agit du principal

phénomène thermique rencontré par les pompiers dans le cadre de leurs interventions car il s'inscrit comme une étape naturelle du développement d'un feu de compartiment. Contrairement aux autres phénomènes thermiques détaillés ci-dessous, le taux de chaleur dégagé après l'apparition du phénomène reste maintenu dans le temps. En effet, la température très élevée des gaz chauds (supérieure à 500 ° C) associée à un apport d'air suffisant (fenêtre cassée par la chaleur ou porte ouverte pour l'intervention des secours) permet au phénomène d'apparaître assez facilement. Ce constat permet de mieux comprendre l'adage pompier "qui contrôle l'ouvrant contrôle le feu". De nombreux signes annonciateurs permettent (en théorie) d'anticiper l'apparition d'un flashover. On peut notamment citer les signes préalables suivants :

- Le fait de se trouver dans un milieu semi-ouvert ;
- Les fumées qui s'épaississent ;
- La dynamique des fumées qui s'accélère ;
- La chaleur écrasante ;
- L'apparition de rollovers ;
- L'émission de gaz de pyrolyse au niveau de l'ensemble des surfaces combustibles.

La taille du compartiment sinistré, la taille des ouvrants, les caractéristiques des parois ou encore le type de combustible sont autant de critères qui jouent un rôle fondamental dans l'apparition ou non d'un flashover. De ce fait, un certain nombre de formules empiriques prennent en compte une partie de ces paramètres afin de calculer le flux de chaleur, noté  $Qfo$  exprimé en kW/m<sup>2</sup>, nécessaire pour obtenir un flashover.

Certaines de ces formules sont présentées ci-dessous :

**Formule de Babrauskas adaptée [11], [13] :**

$$Qfo = 750.A_0\sqrt{H_0} \quad (1.3)$$

Avec :

$A_0$  exprimé en m<sup>2</sup> qui correspond à l'aire de l'ouverture.

$H_0$  exprimé en m qui correspond à la hauteur de l'ouverture.

Dans cette formule, seuls les paramètres liés à la ventilation sont pris en compte.

**Formule de Thomas [111] :**

$$Qfo = 7,8A_t + 378.A_0\sqrt{H_0} \quad (1.4)$$

Avec :

$A_t$  en  $m^2$  qui correspond à la somme des aires de l'ensemble des murs, plafond et sol présents dans le volume, auquel on soustrait l'aire des ouvertures.

$A_0$  en  $m^2$  qui correspond à l'aire de l'ouverture.

$H_0$  en m qui correspond à la hauteur de l'ouverture.

$A_t$  directement lié aux dimensions du volume sinistré.

Les paramètres  $H_0$  et  $A_0$  sont relatifs à la ventilation.

**Formule de MacCaffrey, Quintiere et Harkleroad adaptée [70] :**

$$Qfo = 610.(H_k A_t A_0 \sqrt{H_0})^{\frac{1}{2}} \quad (1.5)$$

Avec :

$A_t$  en  $m^2$  qui correspond à la somme des aires des murs, plafond et sol présents dans le volume, auquel on soustrait l'aire des ouvrants.

$A_0$  en  $m^2$  correspondant à l'aire de l'ouvrant.

$H_0$  en m correspondant à la hauteur de l'ouvrant.

$A_t$  est relatif aux dimensions du volume.

$A_0$  et  $H_0$  sont liés à la ventilation du local.

$H_k$  en  $kW/m^2K$  qui correspond à un coefficient d'isolation des parois du local.

Ce paramètre est relatif aux propriétés thermiques des parois.

Ces formules peuvent être utilisées en prévention car elle permettent de déterminer au préalable si un flashover peut apparaître dans un local. Cependant, elles ne donneront pas d'in-

formations sur le moment où le phénomène pourra se produire. Pour observer l'apparition d'un flashover, il est généralement admis qu'un rayonnement de  $20\text{kW}/\text{m}^2$  et une température des gaz chauds en partie haute du volume de  $500^\circ\text{C}$  sont nécessaires. Une fois le flashover apparu, des températures avoisinants les  $1000^\circ\text{C}$  peuvent être observées. Le phénomène de flashover est illustré à la figure 1.9.



FIGURE 1.9: Illustration d'un flashover

### 1.1.2.3 Backdraft

Ce phénomène particulier apparaît lorsqu'au cours d'un feu de compartiment, le comburant disponible pour le développement du feu est consommé,[44]. Le volume étant alors rempli par les fumées produites chargées en gaz imbrûlés, le feu s'étouffe de lui-même créant une atmosphère très chaude et fortement chargée en gaz combustibles. Seules les fuites propres au bâtiment (interstices de portes...) permettent au feu de "respirer" et de rester couvant. Dans ce cas, le feu est limité par la ventilation. Lorsqu'une ouverture est faite (rupture d'une fenêtre, ouverture de porte...), la sortie des gaz chauds va permettre une entrée d'air frais qui va ramener le mélange combustible dans le domaine inflammabilité. Ceci va permettre de raviver le foyer, entraînant ainsi une dilatation des gaz et donc, une augmentation de

pression dans le volume qui va propulser les gaz chauds hors du compartiment à très haute vitesse. Ces derniers s'enflammeront au contact de l'air, créant ainsi une boule de feu à la sortie du local sinistré. Il est important de préciser que ce phénomène, bien que redoutable pour les services de secours, reste occasionnel. En effet, il s'agit d'un équilibre thermique entre le contenant, le contenu et les échanges gazeux, qui est complexe et sensible et donc très difficile à atteindre [57].

Afin d'apprécier le phénomène, la photo 1.10 représente un backdraft.



FIGURE 1.10: Illustration d'un backdraft

Comme pour le flashover, certains signes permettent d'anticiper (en théorie) l'apparition d'un backdraft (liste non exhaustive) :

- Fumées de couleurs inhabituelles, signe qu'elles sont chargées en imbrûlés ;
- Dépôts huileux sur les vitres, signe que les produits de pyrolyse ont condensés sur les surfaces froides ;
- Portes et fenêtres chaudes ;
- Bouffées de fumées qui s'échappent par les interstices en raison de la surpression du volume ;

— Bruits inhabituels.

Les différentes étapes de ce phénomène thermique décrites précédemment sont très bien illustrées par les travaux de recherche de Gottuk et al. [44], figure 1.11.

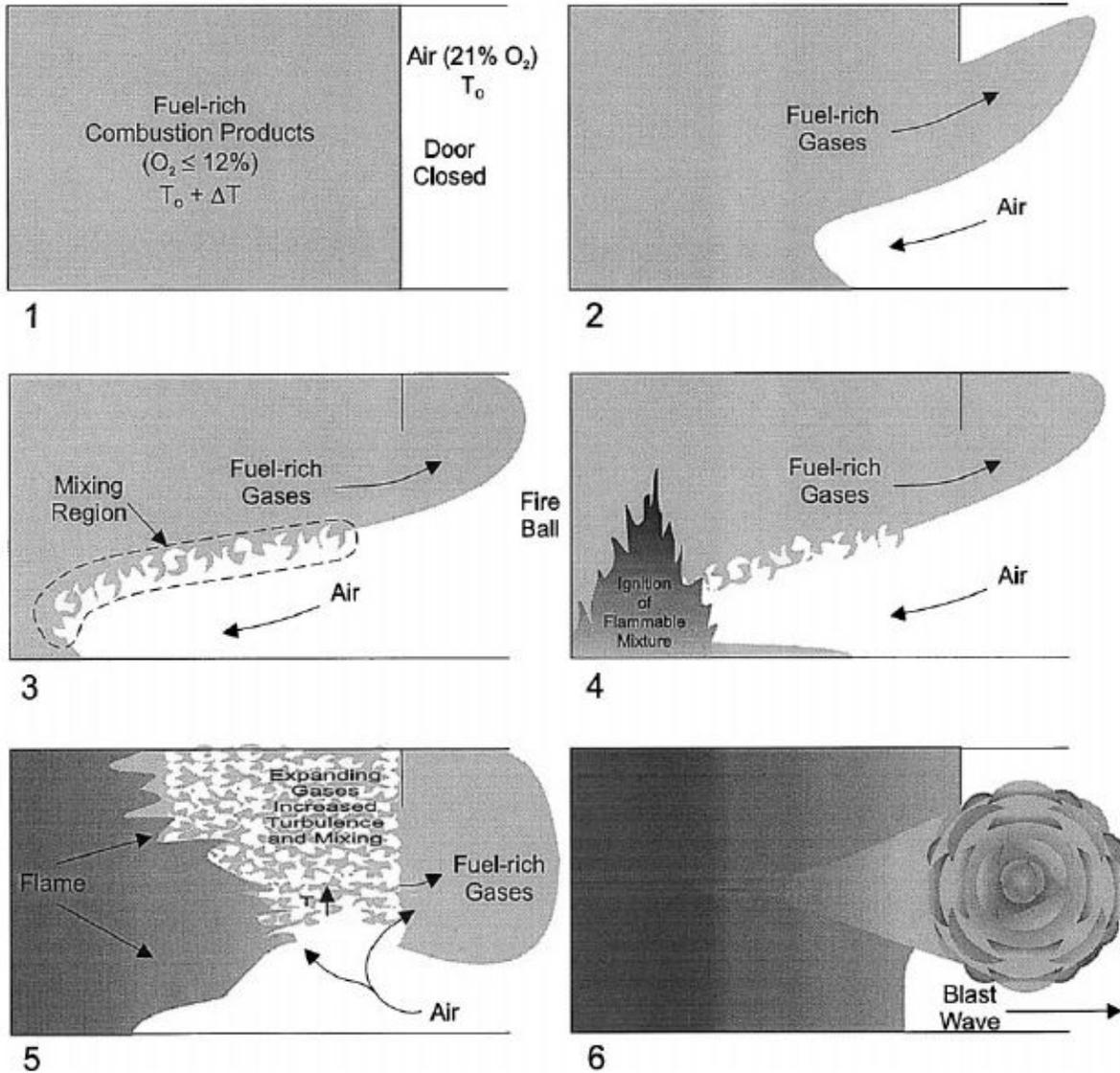


FIGURE 1.11: Étapes du backdraft, [44]

#### 1.1.2.4 Fire Gas Ignition (FGI)

Le phénomène d'inflammation des gaz, appelé FGI, correspond à l'inflammation des gaz de pyrolyse et des produits de combustion. Contrairement au backdraft, le facteur conduisant au

phénomène n'est pas la ventilation mais bien l'ignition du mélange combustible. Aujourd'hui, les FGI sont classés dans deux grandes catégories :

- Flash fire : Ce terme regroupe les phénomènes pour lesquels le front de flamme ne dégage qu'une faible onde de surpression. Il inclut notamment les signes annonciateurs du flashover tel que les anges danseurs illustrés à la figure 1.12, les flash-back (terme qui correspond à l'inflammation des fumées chaudes que l'on retrouve à la sortie d'un compartiment sinistré), l'inflammation des gaz de pyrolyse ou encore les rollovers. Ce type de phénomène est dû à l'inflammation d'un mélange combustible, dans le domaine d'inflammabilité, mais pas aux conditions stœchiométriques, d'où la vitesse de combustion assez faible. Bien que la cinétique du phénomène reste modérée, ce type de FGI reste dangereux pour les équipes de secours en raison des fortes températures présentes ;



FIGURE 1.12: Illustration d'un flash fire

- Smoke explosion : Ce FGI regroupe les phénomènes thermiques liés à l'inflammation d'un mélange combustible (air / gaz imbrûlés ou de pyrolyse) dont la vitesse de l'onde de surpression est bien plus importante que le précédent. Ils sont considérés comme un type d'explosion, plus précisément de déflagration. D'après la littérature, certaines ondes de surpression peuvent atteindre jusqu'à 8 bars [110], dans une pièce fermée et en présence d'un mélange stœchiométrique [12]. Cela explique la dangerosité du phénomène pour les bâtiments mais surtout pour les équipes de secours engagées sur

un sinistre. Il est important de préciser que le mélange combustible peut être à une température bien plus faible que les fumées d'incendie car dilué dans le volume. En effet, si des gaz de pyrolyse ou imbrûlés se propagent dans une pièce avoisinante (ex : conduit de ventilation) et restent dans le domaine d'inflammabilité, même "froids", ils pourront s'enflammer au contact d'une énergie d'activation (cigarette, interrupteur...). D'autre part, les fumées peuvent être claires car elles résultent des produits de pyrolyse qui ont souvent une couleur d'un blanc laiteux. Ces deux caractéristiques, bien qu'inhabituelles, sont à prendre en compte par les sapeurs-pompiers pour sécuriser leurs interventions.

## 1.2 Transferts thermiques

Lors d'un sinistre, l'incendie peut se propager de quatre manières différentes. Que ce soit par la conduction, la convection ou le rayonnement (transfert thermique), il est important de comprendre chaque mécanisme afin de lutter efficacement contre la propagation du feu. La partie ci-dessous détaille les modes de propagations que sont la conduction, la convection et le rayonnement. Il est important de préciser qu'il existe un quatrième mode de propagation, le transfert de matières enflammées (transfert de masse), qui est également à l'origine de la propagation de certains sinistres. Cependant, ne présentant pas d'intérêt pour les travaux de cette thèse, il ne sera pas détaillé.

### 1.2.1 Conduction

C'est le mode de transfert thermique que l'on retrouve principalement dans les milieux solides. La conduction a lieu par diffusion moléculaire grâce à des particules massiques, en contact les unes avec les autres dans le matériau impliqué. La composition chimique du matériau en question le rend plus ou moins conducteur. Les métaux sont connus pour être particulièrement bons conducteurs en raison de leurs liaisons chimiques moins rigides, contrairement au plâtre ou au béton.

La conduction est définie par la loi de Fourier, comme suit :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (1.6)$$

Avec :

$\vec{\varphi}$  : Densité de flux de chaleur en  $\text{W.m}^{-2}$

$\lambda$  (ou  $k$ ) : Conductivité thermique du matériau en  $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

$\overrightarrow{\text{grad}} T$  : Gradient de température en  $\text{K.m}^{-1}$

Comme indiqué ci-dessus,  $\lambda$  ou  $k$  représentent la conductivité thermique du matériau. C'est la quantité de chaleur transférée par unité de surface et de temps nécessaire pour obtenir un gradient de température d'un degré Kelvin sur un mètre. La conductivité thermique est une propriété intrinsèque du matériau. Des tables regroupent les valeurs des différents matériaux (ex : figure 1.13). Cependant, elles évoluent avec l'humidité et la température du milieu et donc, du matériau.

Rang	Matériau	Conductivité ( $\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
1	Polyuréthane	0.022
2	Fibre de bois	0.04
3	PSE extrudé	0.04
4	Laine de verre	0.04
5	PSE expansé	0.04
6	Laine de roche	0.044
7	liège	0.05
8	Béton cellulaire	0.09
9	Laine de bois	0.1
10	Panneau OSB	0.12
11	Acier	50

FIGURE 1.13: Exemple de propriétés thermiques de matériaux

## 1.2.2 Convection

La convection correspond à la propagation de la chaleur au sein d'un fluide, principalement gazeux. C'est un mode de propagation très important dans les incendies qui représente environ

2/3 de l'énergie libérée. En effet, lors d'un feu, une quantité importante d'énergie est véhiculée par les gaz chauds, ce qui dans le cas d'un feu de compartiment augmente le risque de propagation du sinistre à des volumes avoisinants. Le phénomène de convection est décrit par la loi de Newton grâce à la formule suivante :

$$\dot{Q} = \alpha A (T_s - T_\infty) \quad (1.7)$$

Avec :

$\dot{Q}$  : Flux de chaleur (W)

A : Surface d'échange (m<sup>2</sup>)

$T_s$  : Température considérée de la surface du fluide (en K)

$T_\infty$  : Température du fluide éloigné de la surface (en K)

$\alpha$  ou h : Coefficient de transfert convectif (en W.m<sup>2</sup>.K<sup>-1</sup>)

La principale difficulté de cette relation réside dans l'estimation du coefficient de transfert convectif qui dépend, entre autres, de l'état de la surface et de la vitesse du fluide considéré. Comme pour la conduction, des tables de valeurs existent afin de réaliser les calculs (ex : figure 1.14).

Situation	h (W.m <sup>-2</sup> . °C <sup>-1</sup> )
Convection libre dans l'air	5 to 25
Convection libre dans l'eau	500 to 1 000
Convection forcée dans l'air	10 to 500
Convection forcée dans l'eau	100 to 15 000
Eau bouillante	2 500 to 2 5000
Courant de condensation	5 000 to 100 000

FIGURE 1.14: Exemple de propriétés convectives

### 1.2.3 Rayonnement

Tout corps ayant une température supérieure à 0 ° C émet un rayonnement [103] sous forme d'onde électromagnétique, lié à l'énergie interne du corps en lui même. De l'énergie est constamment échangée entre tout système situé dans le champ du rayonnement thermique en question. Dans les incendies, le rayonnement est un mode de transfert thermique très important car il représente environ 1/3 de l'énergie libérée. Le rayonnement diffère de la conduction et de la convection en trois points principaux [109], [113] :

- L'énergie rayonnée est proportionnelle à la puissance quatre de la température ;
- Le rayonnement ne nécessite pas de contact matériel pour se propager ;
- Le rayonnement est dit isotrope.

#### Corps noir

Afin de comprendre le rayonnement thermique, il est nécessaire d'introduire la notion de corps noir. Ce dernier est défini comme un corps capable d'absorber la totalité d'un flux rayonné et de le réémettre en intégralité. L'émittance d'un corps se définit comme la puissance totale rayonnée par un élément, dans toutes les directions, ramenée à une unité de surface. La fonction de Planck donne la distribution spectrale de l'émittance du corps noir :

$$e_{\lambda,b} = \frac{2\pi h c_0^2 \lambda^{-5}}{\exp \frac{hc_0}{\lambda kT} - 1} \quad (1.8)$$

Avec :

$\lambda$  : La longueur d'onde (m) ;

$c_0$  : Vitesse de la lumière (m.s<sup>-1</sup>) ;

$k$  : La constante de Boltzmann (J.K<sup>-1</sup>) ;

$h$  : La constante de Planck(J.s).

Cette relation est tracée pour différentes températures et présentée à la figure 1.15 [33].

En intégrant l'émittance spectrale du corps noir, on obtient l'émittance totale qui est définie par la relation suivante :

$$e_b = \int_0^{\infty} e_{\lambda,b} d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{2\pi hc_0^2 \lambda^{-5}}{\exp\frac{hc_0}{\lambda kT} - 1} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c_0^2 h^3} = \sigma T^4 \quad (1.9)$$

Avec :

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann

Lors d'un incendie, les propriétés des suies produites se rapprochent de celle d'un corps noir.

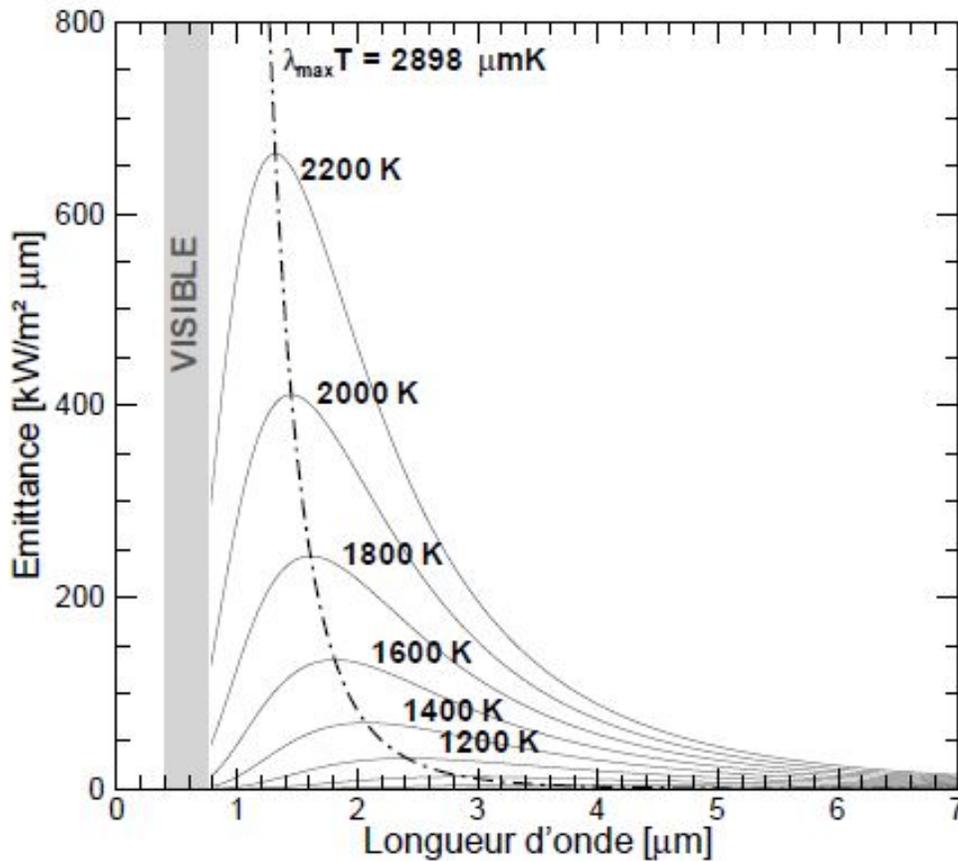


FIGURE 1.15: Répartition spectrale de l'émittance du corps noir pour différentes températures.

## Emissivité

Lorsqu'un corps réel ne présente pas de direction d'émission privilégiée, sa caractérisation par rapport au corps noir peut être simplifiée. C'est ce que l'on nomme l'émissivité spectrale d'un corps. Elle se définit comme étant le rapport, dans les mêmes conditions, entre l'émittance spectrale réelle du corps que l'on considère et celle du corps noir.

La notion de corps gris émet l'hypothèse que l'émissivité spectrale soit indépendante de la longueur d'onde, ce qui est généralement vérifié [113]. Dans ce cas, l'émittance s'écrit comme suit :

$$e = \epsilon e_b = \epsilon \sigma T^4 \quad (1.10)$$

L'émissivité dépendant de nombreux facteurs (nature du matériau, température...), sa valeur reste difficile à connaître avec précision mais de nombreuses informations sont disponibles dans les neufs volets des Eurocodes [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10].

## Loi de Kirchhoff

Lorsqu'un solide reçoit un rayonnement thermique, ce dernier peut être absorbé, transmis ou réfléchi, selon les caractéristiques de chaque matériau. La partie du rayonnement absorbée est convertie en énergie interne et participe alors à l'émissivité du matériau. Le rayonnement incident absorbé par le matériau est appelé absorptivité. Lorsque l'équilibre thermodynamique est atteint dans la loi de Kirchhoff, l'absorptivité spectrale est égale à l'émissivité spectrale, comme le montre l'expression suivante :

$$\epsilon_\lambda (T, \theta, \phi) = \alpha_\lambda (T, \theta, \phi) \quad (1.11)$$

Avec :

$\alpha$  : L'absorptivité;

$\theta, \phi$  : Angles solides de la direction du rayonnement.

### Calcul du rayonnement des flammes

Si l'on considère une flamme pour laquelle la température et le coefficient d'absorption restent constants, il est assez aisé d'estimer le rayonnement thermique de cette flamme. Cette dernière occupe le domaine  $x > 0$  et donc, la luminance en dehors de la flamme est nulle. Dans ce cas, l'équation caractérisant l'évolution de la luminance dans la flamme s'écrit comme suit [76] :

$$\frac{dL}{dx} = k \left( \frac{\sigma T^4}{\pi} - L \right) \quad (1.12)$$

Avec :

$k$  = Coefficient d'absorption ;

$L$  : Luminance ( $\text{cd.m}^{-2}$ )

$L(0)=0$

La solution de cette équation est proche de l'équation de Beer et peut donc s'écrire :

$$L(x) = (1 - e^{-kx}) \frac{\sigma T^4}{\pi} = \epsilon \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad (1.13)$$

Avec :

$\epsilon$  :  $1 - e^{-kx}$

$x$  : Surface émettrice

Le flux radiatif d'une flamme peut donc s'écrire :

$$\phi = \epsilon \sigma T^4 \quad (1.14)$$

Avec :

$\epsilon = 1 - e^{-k\psi}$  = Émissivité de la flamme ;

$\psi$  : Dimension de la flamme dans la direction x.

## 1.3 Feux de compartiments

### 1.3.1 Influence du compartiment sur l'incendie

On entend par feu de compartiment tout incendie se développant dans un volume partiellement fermé par des parois. La puissance du foyer peut aller de quelques kiloWatts (kW) lors d'un feu de poubelle à plusieurs méga watts (MW) pour un feu industriel.

Lors du démarrage du foyer, la progression du feu n'est pas contrainte par le local. Pendant cette période, il n'est pas limité par le combustible ou par la ventilation. Cette phase dure jusqu'à ce que le feu prenne de l'ampleur et que le local, en raison des parois, influe sur la dynamique des fumées, la ventilation mais aussi sur les transferts thermiques. Un fois ce stade atteint, soit le feu peut s'éteindre par manque de comburant ou de combustible, soit il poursuit son développement normal et présente éventuellement un phénomène thermique détaillé précédemment dans ce chapitre.

Pour mieux comprendre l'influence du compartiment sur le développement de l'incendie, il est intéressant de comparer le taux de combustion  $\dot{m}_{fuel}$  avec et sans l'influence du volume. Sans influence du volume, l'équation s'écrit :

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{Q_F - Q_L}{L_V} \quad (1.15)$$

Avec :

$Q_F$  : Flux de chaleur de la flamme que reçoit le combustible (W) ;

$Q_L$  : Flux de chaleur qui est perdu à travers le combustible (W) ;

$L_V$  : Quantité de chaleur nécessaire à la pyrolyse.

Comme détaillé dans la littérature [35] [33], pour les feux dépassants une vingtaine de centimètre, le flux de chaleur  $Q_F$  est en partie dû au rayonnement. En fonction du combustible, la fraction d'énergie que libère le rayonnement est variable. Il est admis que cette valeur représente en moyenne 30% de l'énergie totale que libèrent les réactions chimiques mises en jeu lors d'un feu. Au cours d'un feu de compartiment, cette énergie va chauffer les fumées ainsi que les parois du volume qui vont rayonner à leur tour. Ceci modifie donc l'équation précédente et donne :

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{Q_F - Q_L + Q_E}{L_V} \quad (1.16)$$

Avec :

$Q_E$  : Flux rayonné par les parois et les fumées chaudes (W).

Ces interactions sont représentées sur la figure 1.16.

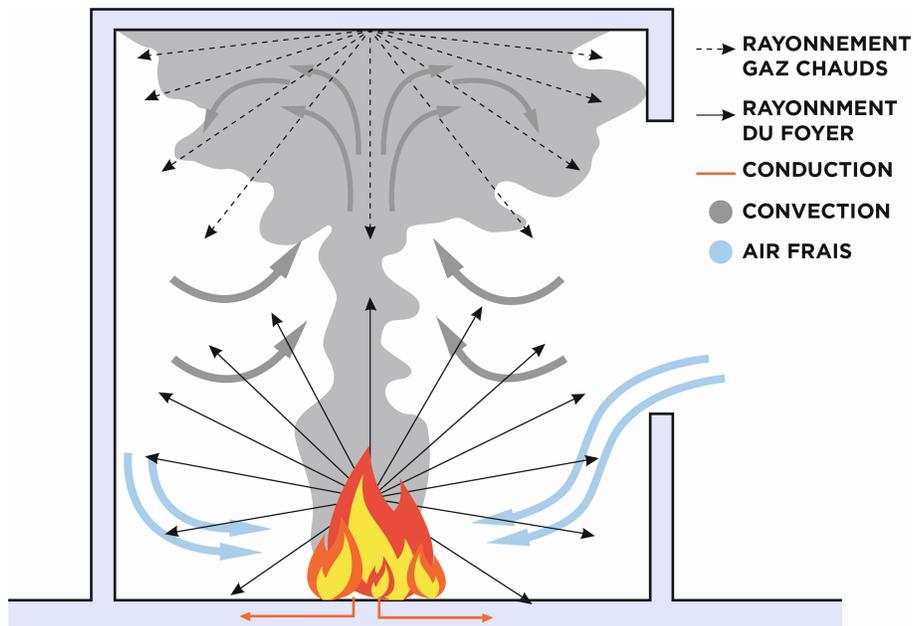


FIGURE 1.16: Transferts thermiques lors d'un feu de compartiment

Lors d'un feu de compartiment la disposition du combustible a également son importance [19]. En effet, si un feu se déclare dans un coin de la pièce, les fumées chaudes émanant de

la combustion sont moins diluées que si le foyer se trouvait au centre de la pièce. Dans cette dernière configuration, les fumées seraient diluées par l'air frais sur les quatre faces du foyer contre trois si le foyer est apposé à un mur et deux faces si il se trouve dans un coin de la pièce. Les fumées moins diluées par l'air frais seront plus chaudes et permettront ainsi une meilleure propagation du sinistre. C'est pour cette raison que les feux se déclarant dans un coin de la pièce ont une dynamique de propagation généralement plus rapide [13]. Ce phénomène est illustré à la figure 1.17.



FIGURE 1.17: Positionnement du foyer [106]

Dans le cas d'un feu contrôlé par la ventilation, l'énergie sous forme de chaleur dégagée par le local sinistré est directement liée à l'apport d'air fourni pour alimenter le foyer. Les ouvrants d'un local en feu jouent donc un rôle primordial dans la dynamique de l'incendie. K. Kawagowe démontre cela en 1958 [53] en utilisant des foyers à base de bois, dans des locaux de différents volumes munis d'un ouvrant en façade. Lorsque le feu atteint son stade de plein développement, les dimensions de l'ouvrant influent fortement sur le taux de combustion noté  $\dot{m}_{fuel}$ . La relation qui en découle est la suivante :

$$\dot{m}_{fuel} \propto A_w \sqrt{h} \quad (1.17)$$

Avec :

$A_w$  = Aire de l'ouverture du local concerné ( $m^2$ );

$\alpha$  = Coefficient de transfert convectif;

$h$  = Hauteur de l'ouverture (m).

Il est important de préciser que la relation de Kawagoe ne se vérifie que dans le cas de feux contrôlés par la ventilation. Dès lors que le feu devient contrôlé par le combustible, l'évolution du taux de combustion n'est plus représentée par la relation de Kawagoe. On retrouve cet effet sur la courbe 1.18, [33],[32] où la relation de Kawagoe est représentée par des pointillés. La courbe pleine représente quant à elle, le développement du feu lorsqu'il est contrôlé par le combustible.

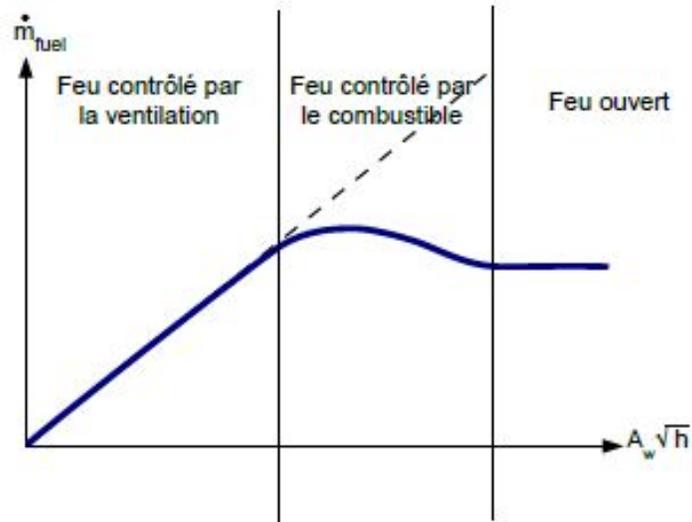


FIGURE 1.18: Évolution du taux de combustion en fonction de l'ouverture

Cependant, ces expériences ne prennent en compte qu'un foyer cellulosique. D'autres expériences menées avec différents combustibles ont démontré que le taux de combustion ne peut se déterminer uniquement avec le facteur d'ouverture du local [24], [35]. Ceci explique l'importance de différencier les matériaux dont les gaz forment une couche carbonisée (comme le bois) des autres matériaux tels que les plastiques dont la pyrolyse est proportionnelle au flux incident. La majorité des essais incendie utilisent le bois comme foyer car il est considéré comme représentatif des feux domestiques. Cependant, il est important de garder à l'esprit que les feux que rencontrent les sapeurs-pompiers sont souvent composés de différents maté-

riaux, ce qui complexifie la dynamique du feu.

Par ailleurs, la relation de Kawagoe n'est pas la seule à proposer une estimation du taux de combustion dans un local. En effet, on peut citer M. Law qui propose d'y ajouter un facteur prenant en compte la géométrie du volume [3], [58], [59]. On comprend alors que chaque paramètre d'un compartiment peut agir sur le feu qui s'y trouve.

### Richesse globale et feux de compartiments :

Lorsque l'on parle de feux de compartiments, la notion de richesse globale peut être introduite. Ce nombre adimensionnel est utilisé pour estimer les espèces intermédiaires produites. Il est défini comme suit :

$$\phi = r_{fuel-air} \frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{entrant}} \text{ avec } r_{fuel-air} = \left( \frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{entrant}} \right)_{stoechio} \quad (1.18)$$

Avec :

$r_{fuel-air}$  : Rapport stoechiométrique de la réaction de combustion ;

$\dot{m}_{fuel}$  et  $\dot{m}_{entrant}$  : Débit massique de fuel que produit la pyrolyse et débit massique d'air qui pénètre dans le compartiment (kg/s).

Si  $\phi < 1$ , l'apport d'air est en excès par rapport au fuel ;

si  $\phi > 1$ , l'apport d'air est inférieur par rapport au fuel produit. Les gaz sont donc chargés en combustible ce qui explique l'apparition de flammes hors du compartiment, appelées flammes extérieures.

### 1.3.2 Fumées d'incendie

La fumée est un élément à part entière d'un incendie. Lors d'un sinistre, elle est source de nombreux dangers. Très toxique de par les nombreuses espèces chimiques qui la composent

(HCN, HCL benzène, suies, carbone...), c'est la principale cause de décès lors d'un incendie. Elle impose aux équipes de secours de se munir d'Appareils Respiratoires Isolants (ARI) afin de pouvoir intervenir sans risque d'intoxication. De plus, en raison de leur température très élevée, leur vitesse de déplacement mais aussi de leur caractère fortement combustible, les fumées d'incendie participent largement à la propagation du feu. En effet, la convection et le rayonnement des gaz chauds jouent un rôle important dans le développement du feu ainsi que dans le maintien de conditions extrêmes dans le compartiment sinistré. Comme détaillé dans les paragraphes ci-dessus, les fumées sont le siège des phénomènes thermiques. Les nombreux imbrûlés qu'elles contiennent sont en partie responsables de l'apparition des FGI ainsi que du flashover.

Cependant, de part ses nombreux aspects, la fumée contient de très précieuses informations [20]. Une bonne "lecture" de celle-ci permet d'apporter de nombreux éléments sur la dynamique du feu mais aussi sur le risque de survenue d'un accident thermique, quel qu'il soit. En effet, une bonne observation de l'aspect visuel (couleur, densité, dynamique, changement de comportement...) apporte des éléments essentiels pour la compréhension de l'état d'avancement du sinistre en cours. Cette connaissance du feu associée à des informations sur la vitesse des gaz, la teneur en imbrûlés ou encore la température qui pourraient être apportées grâce à des capteurs intelligents permettraient d'améliorer la sécurité des équipes de secours lors de leurs interventions mais aussi de développer un outil d'aide à la décision.

### 1.3.2.1 Les panaches d'incendie

Pour avoir une bonne compréhension de la dynamique des fumées d'incendies, certaines notions sur les panaches sont nécessaires. Les premières études sur les panaches sont apparues dans les années cinquante [78], [99], [101]. C'est la notion physique de flottabilité qui permet aux fumées du panache de s'élever jusqu'au plafond du compartiment et ainsi de propager l'incendie. La flottabilité se définit comme suit :

$$-\frac{d_p}{d_z} - \rho g = (\rho_{amb} - \rho) g \quad (1.19)$$

Avec :

$g$  = Champs d'accélération de la pesanteur,  $\text{m.s}^{-2}$ .

En s'élevant, le panache va entraîner avec lui une certaine quantité d'air qui va participer à l'augmentation du volume de fumées. La masse entraînée par le panache est définie par la relation suivante [52] :

$$\dot{m}_{ent} = \frac{3}{4} \rho_{amb} \left( \frac{25}{48\pi a^2} \right)^{-2/3} \left( \frac{g}{\rho_{amb} T_{amb} c_p} \right)^{1/3} \dot{Q}_{conv}^{1/3} z^{5/3} \quad (1.20)$$

Avec :

$$\rho_{amb} = 1.2 \text{ kg/m}^3;$$

$$T_{amb} = 293 \text{ K};$$

$$c_p = 1 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1};$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$a = 0.15$$

Cette notion d'entraînement d'air [47] est importante à appréhender car en fonction de la hauteur du volume, la quantité d'air entraînée sera plus ou moins importante ce qui aura un impact direct sur les caractéristiques des fumées produites lors de l'incendie. En effet, plus le plafond du compartiment sera haut, plus le panache va entraîner l'air et plus les fumées seront diluées. Par conséquent, le volume de fumées va augmenter mais la température et la toxicité seront moins importantes. Ce phénomène est illustré par la figure 1.19. La baisse de température des fumées est illustrée grâce à un code couleur allant du rouge vif (très chaud) à l'orange clair (chaud). Par ailleurs, bien qu'elles soient diluées, les fumées seront toujours toxiques et présenteront quand même un risque de propagation du feu.

Il est important de préciser que dans un compartiment comme la cellule expérimentale à foyer piloté utilisée dans cette étude, cet effet sera assez limité. Par ailleurs, les écoulements sous

plafond observés dans ce type de compartiments sont détaillés dans la littérature [27].

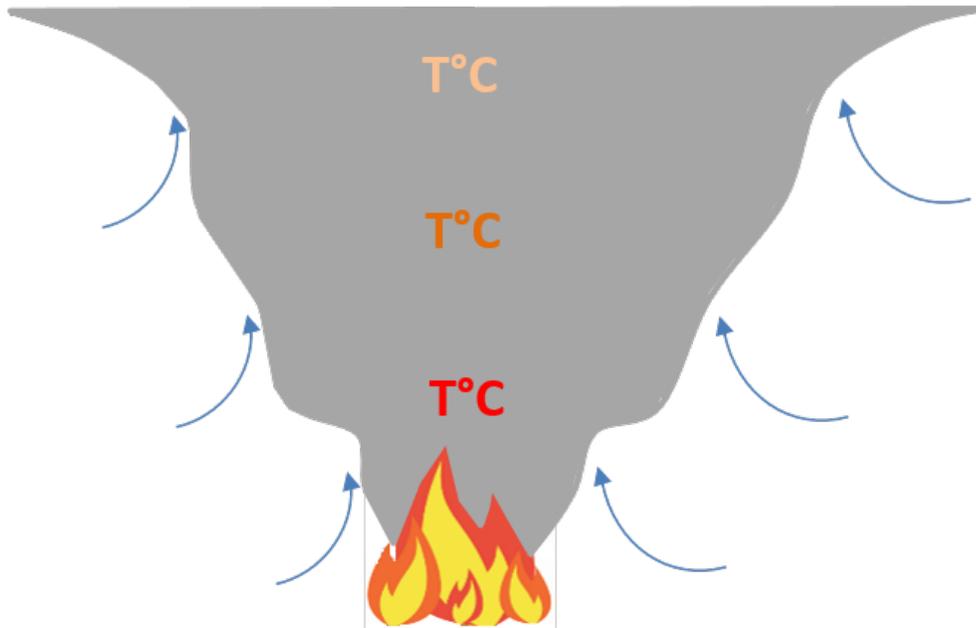


FIGURE 1.19: Entraînement de l'air par un panache de fumée

### 1.3.2.2 Dynamique des fumées d'incendie

Comme cité précédemment dans ce chapitre, les fumées d'incendie apportent de nombreux renseignements sur le développement du feu ainsi que sur l'apparition de phénomènes thermiques, notamment grâce aux informations qu'elles véhiculent en nombre. Pour les comprendre au mieux, certaines notions sont essentielles. On peut notamment citer :

- Le plan neutre ;
- La couleur des fumées ;
- La pression / dynamique des fumées.

Ces dernières sont présentées ci-dessous.

#### Plan neutre

Dans un volume, on parle de plan neutre lorsque l'on observe une limite entre la zone d'air frais et la zone de stratification des fumées où la vitesse est nulle. Sur la figure 1.20, cette

limite est représentée grâce aux lignes en pointillés bleus. Lorsque la température augmente, le volume de fumée augmentera également faisant descendre la position du plan neutre (visible sur la figure de droite). A contrario, si la température diminue dans le volume, le plan neutre va avoir tendance à remonter (visible sur la figure gauche).

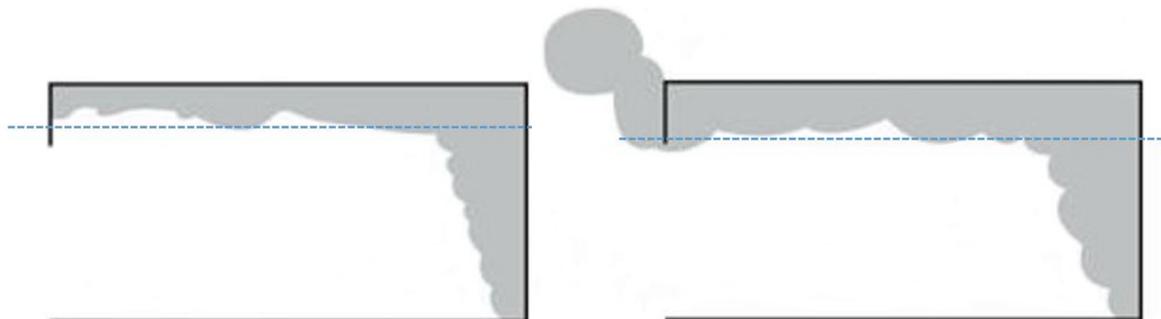


FIGURE 1.20: Représentation du plan neutre

Cette observation permet d'évaluer l'efficacité d'une action de lance lors des interventions de sapeurs-pompiers mais donne aussi des informations sur l'évolution du sinistre. C'est sur ce principe que sont développés les modèles de calculs de type code à zones utilisés en ingénierie de la sécurité incendie.

### Couleur des fumées

La couleur des fumées d'incendie permet d'obtenir plusieurs informations sur le sinistre en cours. Lors d'un incendie, les couleurs de fumées passent généralement par les stades suivants :

- Fumée blanche : Présente au début de l'incendie, le dégagement de fumée blanche indique une évaporation de l'eau. En effet, c'est la première phase de dégradation d'un matériau soumis à flux thermique.
- Fumée brunâtre : Cette couleur permet d'indiquer que le matériau soumis au flux thermique a atteint le stade de pyrolyse. Par exemple, une fumée brunâtre qui se dégage d'une toiture en feu peut indiquer que les matériaux présents sont au stade de pyrolyse et donc, proches de la combustion. Généralement, il n'y a pas encore de

flamme à ce stade de développement du feu.

- Fumée grise : Présence de flamme dans le compartiment sinistré.
- Fumée noire : Forte concentration de carbone et donc d'imbrûlés. La couleur noire indique également que le feu est sous oxygéné. Par ailleurs, cette couleur peut aussi s'expliquer par la combustion de produits synthétiques.

D'autre part, le volume de fumées produites est aussi un indicateur du produit qui brûle. Certains matériaux dégagent bien plus de fumées que d'autres en raison du fort taux de carbone présent dans leur composition. C'est le cas des nouveaux matériaux d'ameublement par exemple. Le tableau suivant, figure 1.21, permet une rapide comparaison de dégagement de fumée en fonction du type de matériau [115] [20].

Matériau (10kg)	Volume de fumée dégagée en m <sup>3</sup>
Papier	10 000
Polyuréthane	22 000
Polyéthylène	22 000
Caoutchouc	25 000
Essence	25 000
Gazoil	25 000

FIGURE 1.21: Exemple de volumes de fumées dégagées

Plus d'informations sur les couleurs de fumées et la lecture du feu sont disponibles dans certains ouvrages [20], [34], [106]. Par ailleurs, il est important de préciser que la couleur des fumées ne représente pas à elle seule une information fiable. Par exemple, la couleur jaunâtre est souvent apparentée à un backdraft. Cependant, pour être signe de ce phénomène thermique, d'autres indicateurs sont à prendre en compte (température des gaz, dynamique...).

### Pression dans le volume

Lors d'un feu de compartiment, l'observation de la vitesse de sortie des fumées permet de compléter les informations obtenues grâce à la lecture du feu. En effet, plus la température à l'intérieur du compartiment sinistré sera élevée, plus les fumées auront tendance à sortir rapidement par le ou les ouvrant(s) disponible(s).

La figure 1.22 représente l'évolution de la pression à l'intérieur du compartiment en fonction

du stade de développement du feu.  $P_0$  représente la pression atmosphérique alors que  $P_1$  représente la pression à l'intérieur du volume.

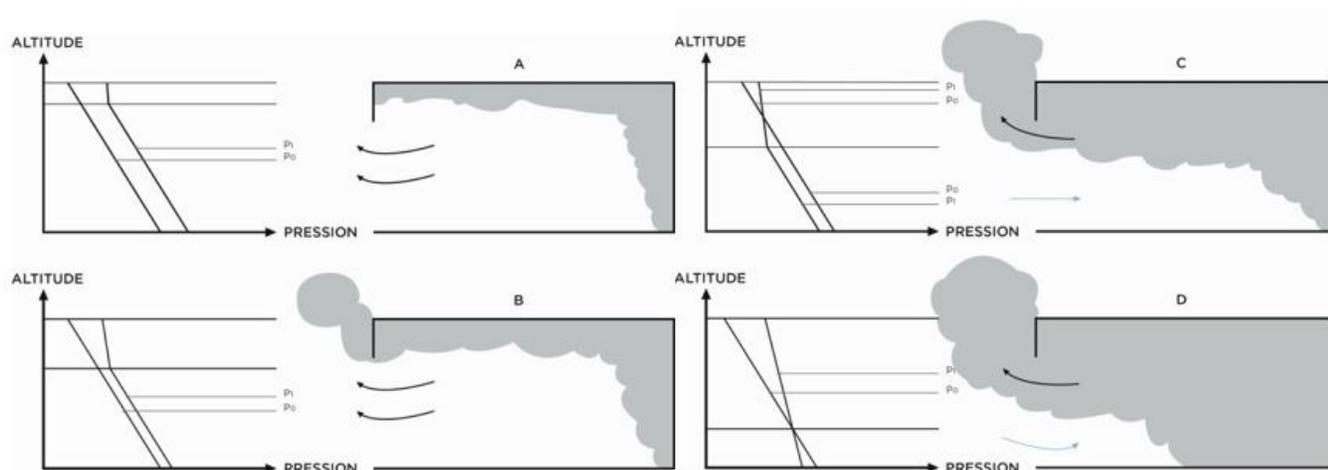


FIGURE 1.22: Effets de la pression dans un volume en feu [13]

Dans les cas A et B, la pression du volume est supérieure à la pression atmosphérique sur l'ensemble du compartiment. Les fumées commencent à s'échapper mais il n'y pas d'entrée d'air en partie basse. Sur les cas C et D, on observe que la pression atmosphérique est plus importante en partie basse, permettant l'entrée d'air frais. Ceci s'explique par le besoin en oxygène, nécessaire pour alimenter le foyer. Plus la quantité de fumées qui s'échappe est importante, plus la pression  $P_0$  sera élevée. Dans un incendie, les variations de pression générées sont de l'ordre de quelques dizaines de Pascal. Ce schéma permet également d'observer le plan neutre qui s'abaisse au cours du temps en raison de la stratification des fumées.

## 1.4 Conclusion du chapitre 1

Ce chapitre avait pour objectif de définir les principes essentiels de la compréhension du système feu. Les notions présentées vont permettre d'aborder la suite de ce manuscrit de thèse avec les bases nécessaires pour une bonne compréhension de la physique du feu. Ce chapitre est volontairement axé sur des notions à la fois scientifique et sapeur-pompier. En effet, l'ensemble de ce travail de thèse a eu lieu grâce au partenariat entre le CORIA et le SDIS 76 suite à l'obtention de l'ANR Firediag en octobre 2014. La compréhension du sujet doit

donc être optimale et ce, pour tout public. L'incendie étant un sujet très vaste et largement étudié, il a été choisi de travailler principalement sur les feux de compartiments mais aussi sur la dynamique des fumées. En effet, ces recherches étant très orientées dynamique des fumées d'incendie dans un volume semi clos, ces notions étaient essentielles. Dans la suite de ce manuscrit, les expériences réalisées seront comparées aux simulations LES effectuées grâce au logiciel Fire Dynamics Simulator présenté dans le chapitre suivant.

# Chapitre 2

## Présentation de l'installation expérimentale

Dans le cadre du projet ANR Firediag, les différents partenaires ont établi un cahier des charges pour la réalisation d'une cellule expérimentale à foyer piloté. Cette dernière, installée sur le site de formation incendie des sapeurs-pompiers de Seine Maritime, va permettre l'analyse à taille réelle des phénomènes thermiques susceptibles d'être rencontrés par les sapeurs-pompiers dans leurs missions de lutte contre les feux urbains.

### 2.1 Description de la cellule Firediag

Cette cellule est constituée de deux containers maritimes installés perpendiculairement. Ils sont respectivement appelés « cellule mesures » ainsi que « cellule essais ». L'installation expérimentale dans son ensemble est représentée sur la figure [2.1](#).

La taille standard des caissons maritimes est de 6m de long, 2.59m de haut et 2.45m de large soit un volume d'environ 38m<sup>3</sup>. Initialement, ces structures sont apparues comme outils de formation dans les services de secours afin d'entraîner les sapeurs-pompiers à détecter les signes annonciateurs de phénomènes thermiques et ainsi, lutter efficacement contre ces derniers [115]. Par ailleurs, le volume de ces caissons est proche de celui d'une chambre

ou d'une cuisine de taille standard. Ce type de feux est régulièrement rencontré dans les interventions de lutte contre l'incendie.

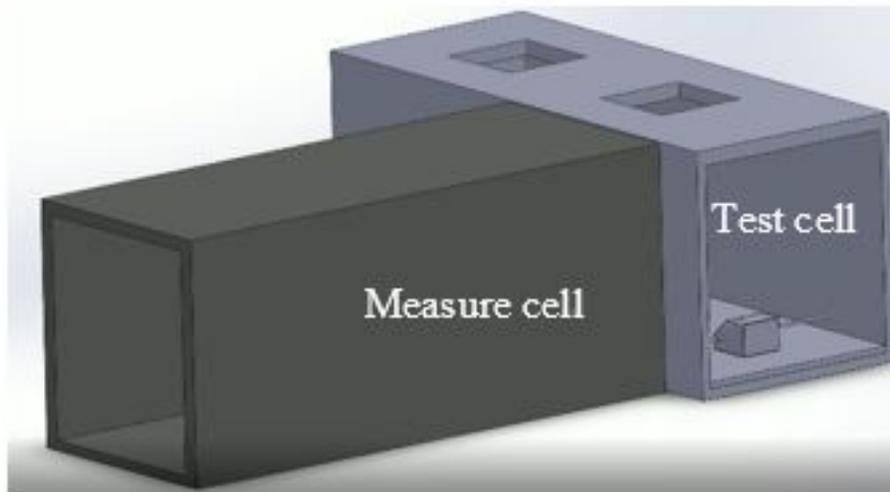


FIGURE 2.1: Représentation numérique des deux cellules

Pour reproduire les conditions d'un incendie, un brûleur alimenté en propane a été installé. Ce dernier est constitué d'une matrice de 36 brûleurs, répartis sur une surface d'1 m<sup>2</sup> pouvant atteindre une puissance d'1 MW et des températures avoisinant les 1000 °C.

La matrice de brûleurs est visible sur la figure 2.2.

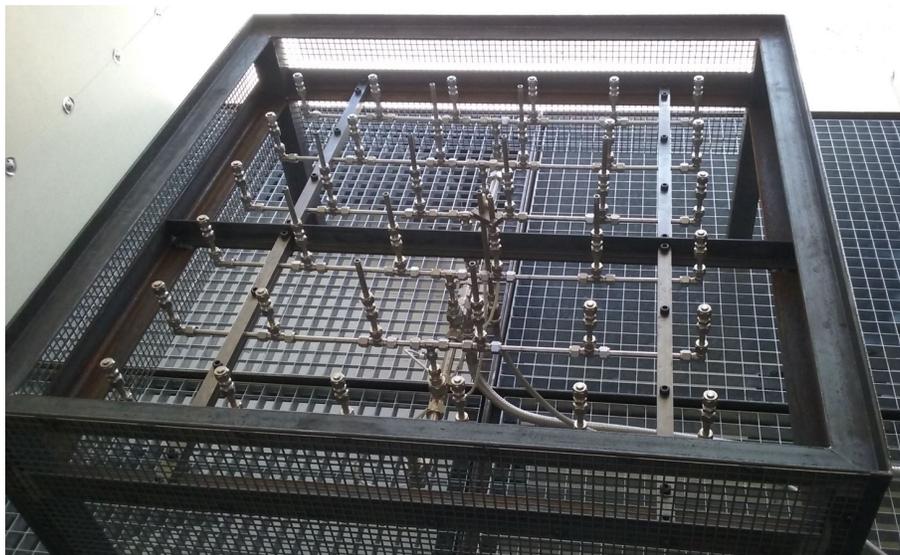


FIGURE 2.2: Matrice de 36 brûleurs, foyer Firediag

Les fumées générées par ce brûleur pourront, en théorie, atteindre des valeurs de température

d'environ  $800^{\circ}\text{C}$ . Bien que faiblement rencontré dans les feux urbains, le brûleur utilisant du propane comme combustible a été retenu car il présente l'avantage de maîtriser parfaitement la puissance et la reproductibilité du foyer. De plus, ces travaux de recherches ont été réalisés en conditions sous ventilées, propice à la forte production de suies. Il est important de rappeler que les suies ont un impact direct sur la qualité des mesures PIV, notamment en raison de l'absorption du signal laser par ces dernières.

De par sa configuration, le brûleur permet de modifier la flamme et donc, la puissance surfacique. Différentes flammes de même puissance peuvent ainsi être créées. Sur la figure 2.3, la puissance du foyer est de 500 kW mais les flammes observées sont différentes en raison du nombre de brûleurs activés. En effet, sur la figure 2.3(a), tous les brûleurs sont activés contre seulement 24 sur la figure 2.3(b). Ceci permet de modifier la puissance surfacique du brûleur. Cependant, cette possibilité d'obtenir différentes flammes ne sera pas étudiée au cours de ces travaux. En effet, la totalité des brûleurs sera utilisée au cours des différents essais réalisés dans le cadre de ces travaux de thèse.

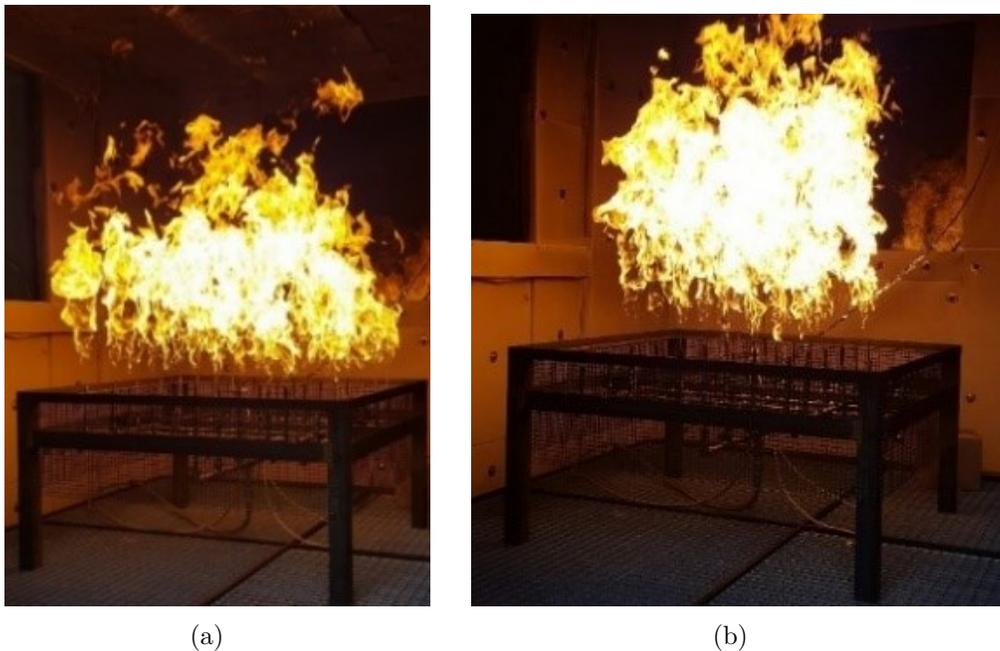


FIGURE 2.3: Différentes flammes à 500 kW, 36 brûleurs (a), 24 brûleurs (b)

En raison des fortes températures qui seront atteintes au cours des campagnes de mesures,

l'isolation de la cellule essais a été une étape importante dans la conception du caisson expérimental. La composition de l'isolation est détaillée ci-dessous. Par ailleurs, le container isolé est visible sur la figure 2.4.

- Blocs de béton cellulaire d'une épaisseur de 70 mm au sol ;
- Laine de roche et laine minérale installées au plafond ;
- Laine de roche et plaques de vermiculite (30 mm) sur les parois.



FIGURE 2.4: Isolation de la cellule d'essais

Pour étudier différents scénarii, le volume de la cellule essais peut être modulé grâce à une paroi amovible. Son accès optique d' $1 \text{ m}^2$  en quartz permet l'installation de moyens de mesures lasers directement dans l'axe du foyer. Deux exutoires manœuvrables de l'extérieur, permettront d'évacuer les gaz chauds et d'étudier leurs interactions avec l'air ambiant, notamment les phénomènes d'intermittences qui seront détaillés dans le chapitre résultats. Par ailleurs, ces deux exutoires permettent de réaliser des feux en conditions ventilées ou sous-ventilées.

La cellule essais est équipée de deux arbres de dix thermocouples de type K, un opacimètre et un analyseur de gaz, permettant notamment de mesurer les concentrations en CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S et en O<sub>2</sub>. Les mesures de températures ont été réalisées en configuration petit et grand

volume, notamment au niveau de l'exutoire. La cellule mesure est équipée d'un laser Quantel Twins Qsmart 850 afin de réaliser des mesures de PIV grands champs dans les gaz chauds, au niveau de l'exutoire et ce, grâce à l'accès optique d' $1 \text{ m}^2$ . L'ensemble de ces dispositifs de mesure va permettre d'obtenir des informations précises sur la dynamique du foyer ainsi que sur les mouvements de fumées qui y sont liés.

La vue de haut de l'installation présentée à la figure 2.5 permet d'observer et de localiser une partie des éléments présentés précédemment.

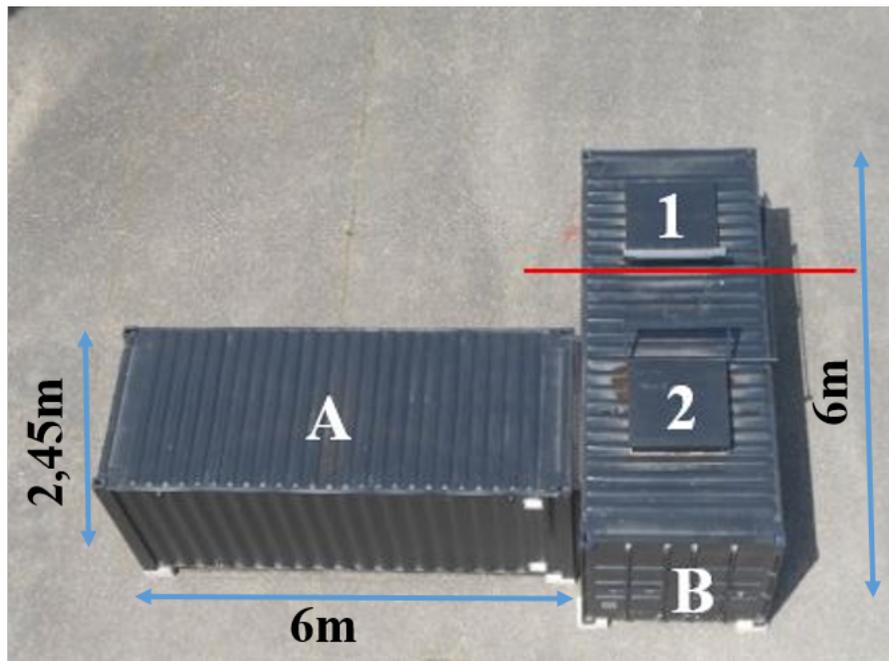


FIGURE 2.5: Vue de haut de l'installation

On y retrouve notamment :

- A : Cellule mesures ;
- B : Cellule essais ;
- 1 et 2 : Exutoires ;
- Le trait rouge représente la paroi amovible permettant d'obtenir un petit ou grand volume ;
- Avec présence de la paroi amovible, la partie 2 correspond au petit volume.

Afin d'approfondir la description de la cellule expérimentale, l'annexe 1 présente le manuel

d'exploitation ainsi que les caractéristiques techniques.

## 2.2 Configurations étudiées

Pour profiter au mieux des possibilités offertes par la cellule expérimentale, différentes configurations ont été étudiées. Celles-ci sont rapidement présentées ci-dessous.

### 2.2.1 Petit volume

Comme indiqué sur la figure 2.5, la configuration petit volume situe le foyer directement dans l'axe de la cellule mesure. Cette configuration a été utilisée pour mesurer les premières valeurs de température afin de les comparer aux valeurs numériques et ainsi, adapter les conditions initiales des simulations. Par ailleurs, les mesures de chimiluminescence ont également été réalisées en petit volume.

Cette configuration, représentée sur la figure 2.6, est définie comme suit :

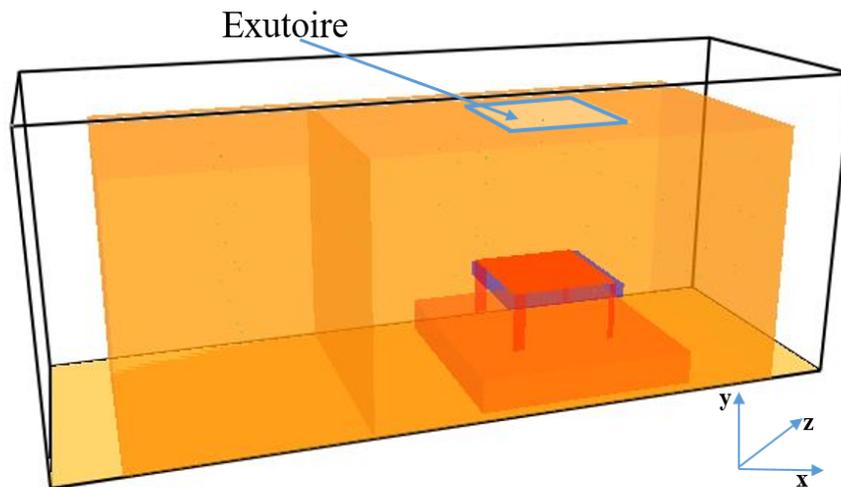


FIGURE 2.6: Vue numérique de la configuration petit volume

- Présence de la paroi amovible ;
- Brûleur dans l'axe de l'accès optique de la cellule mesure ;
- Exutoire ouvert ;

— Porte fermée.

### 2.2.2 Grand volume

Dans le cas de la configuration dite grand volume, plusieurs variantes ont été effectuées. Cependant, le modèle de base représenté sur la figure 2.7 reste toujours le même. Pour cette configuration, les vues numériques sont présentées sous un autre angle afin de faciliter la compréhension des résultats de PIV présentés par la suite

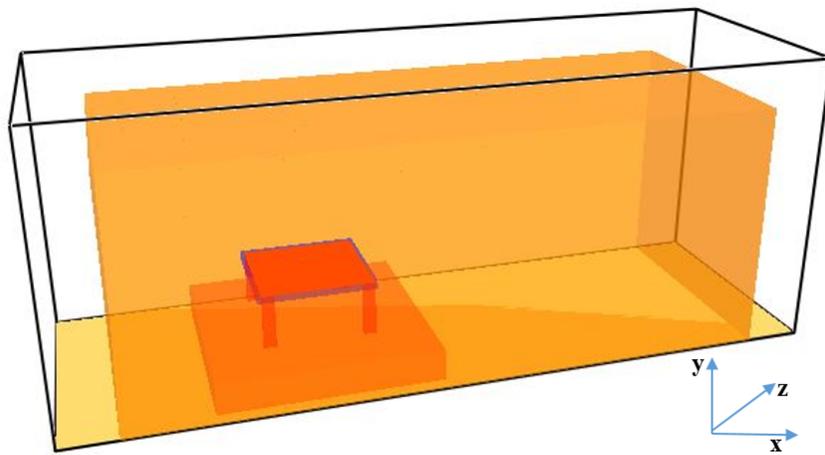


FIGURE 2.7: Vue numérique de la configuration grand volume

#### 2.2.2.1 Configuration exutoire ouvert

Il s'agit de la principale configuration étudiée lors de ces travaux de thèse. En effet, la présence d'un exutoire opposé au foyer a permis d'analyser des feux sous ventilés. De nombreuses mesures de températures et de vitesses ont ainsi pu être réalisées, permettant d'étudier entre autres, les phénomènes d'intermittence entre la sortie de fumées chaudes et l'entrée d'air frais. La configuration grand volume exutoire ouvert est représentée sur la figure 2.8. Par ailleurs, elle est définie comme suit :

- Retrait de la paroi amovible ;
- Brûleur décalé, à l'opposé de l'accès optique de la cellule mesure ;

- Exutoire opposé au foyer ouvert ;
- Porte fermée.

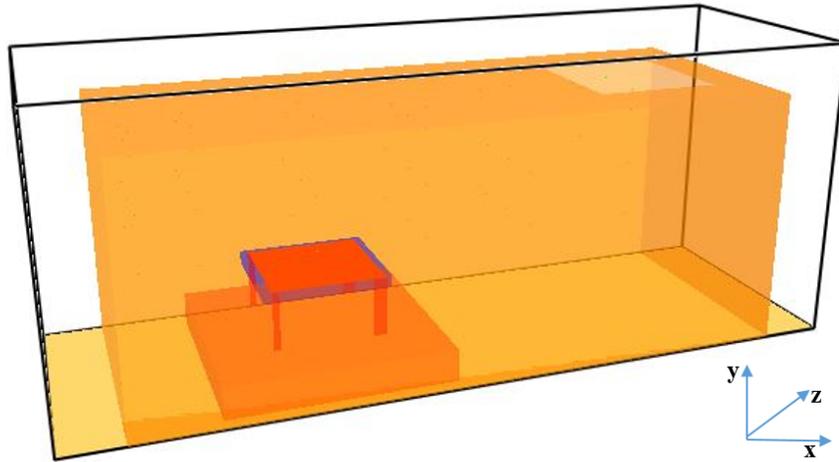


FIGURE 2.8: Vue numérique de la configuration grand volume, exutoire ouvert

### 2.2.2.2 Configuration porte ouverte

Les essais réalisés en configuration porte ouverte ont permis d'effectuer des mesures de vitesses non intrusives grâce à la PIV. L'ouverture de la porte représentant une surface importante, visible en bleue sur la figure 2.9, assure une ventilation suffisante pour permettre un développement correct du feu.

En effet, les fumées chaudes sont efficacement évacuées en partie haute du volume, permettant ainsi à une importante quantité d'air frais d'arriver en partie basse jusqu'au brûleur. Dans ce cas de figure, il est donc possible d'observer un feu largement ventilé.

La configuration grand volume porte ouverte est définie comme suit :

- Retrait de la paroi amovible ;
- Brûleur décalé, à l'opposé de l'accès optique de la cellule mesure ;
- Exutoire opposé au foyer fermé ;
- Porte ouverte.

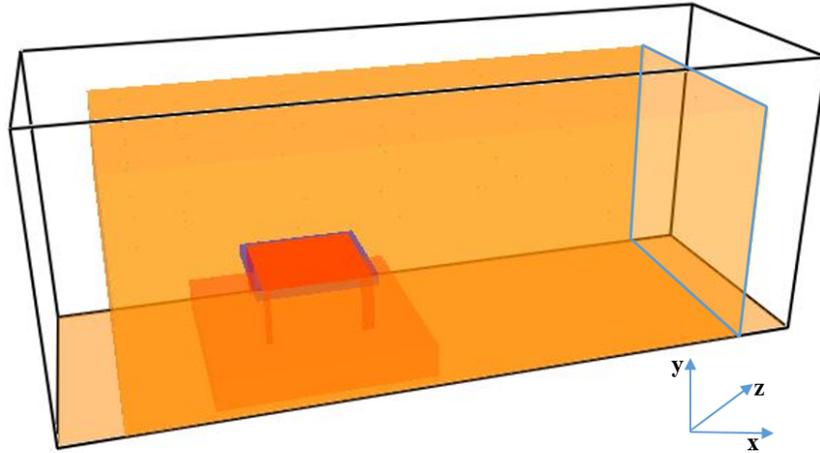


FIGURE 2.9: Vue numérique de la configuration grand volume, porte ouverte

### 2.2.2.3 Configuration ventilation mécanique

Lors des essais effectués dans cette configuration, une ventilation mécanique en partie basse a été ajoutée. Cette dernière est représentée par le plénum d'air de couleur bleue, visible sur la figure 2.10. Ces essais avaient pour objectifs d'observer l'influence d'un apport d'air frais en partie basse, tout en gardant la partie extraction naturelle en partie haute du volume grâce à l'exutoire.

Cette configuration a été utilisée uniquement pour réaliser des mesures de vitesse grâce à la PIV.

La configuration grand volume avec ventilation mécanique définie comme suit :

- Retrait de la paroi amovible ;
- Brûleur décalé, à l'opposé de l'accès optique de la cellule mesure ;
- Exutoire opposé au foyer ouvert ;
- Porte fermée ;
- Ajout d'une ventilation mécanique grâce au plénum d'air en partie basse ( $200 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

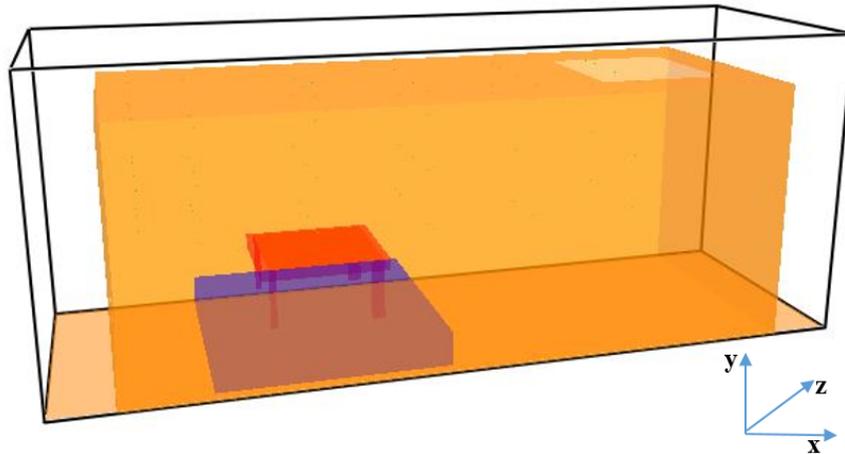


FIGURE 2.10: Vue numérique de la configuration grand volume avec ventilation mécanique

## 2.3 Techniques de mesure

Comme présenté précédemment, plusieurs diagnostics et techniques de mesures ont été utilisés pour mener à bien ces travaux. Ceux-ci sont détaillés dans la suite de ce chapitre.

### 2.3.1 Chimiluminescence

#### 2.3.1.1 Principe de base

Afin de caractériser l'émission lumineuse émise par les flammes du foyer, des mesures de chimiluminescence ont été réalisées. Cette technique de mesure résulte de l'analyse des radicaux formés lors des réactions chimiques présentes dans la flamme pendant le processus de combustion. En effet, ces radicaux excités doivent émettre de l'énergie sous forme radiative et ce, afin de retrouver leur état fondamental. Dans le domaine du visible et de l'ultra-violet, les principales espèces chimiques responsables de cette émission lumineuse sont  $\text{CH}^*$ ,  $\text{OH}^*$  et  $\text{C}^*_2$  [56]. Grâce à ces mesures, les zones de fortes réactions présentes dans la flamme pourront alors être mises en évidence.

Chaque espèce émet à une longueur d'onde spécifique. Les pics d'émission (pour un mélange

air / méthane) des trois espèces citées précédemment sont mis en évidence par les travaux de Kojima et al., 2000 [56] et représentés sur la figure 2.11.

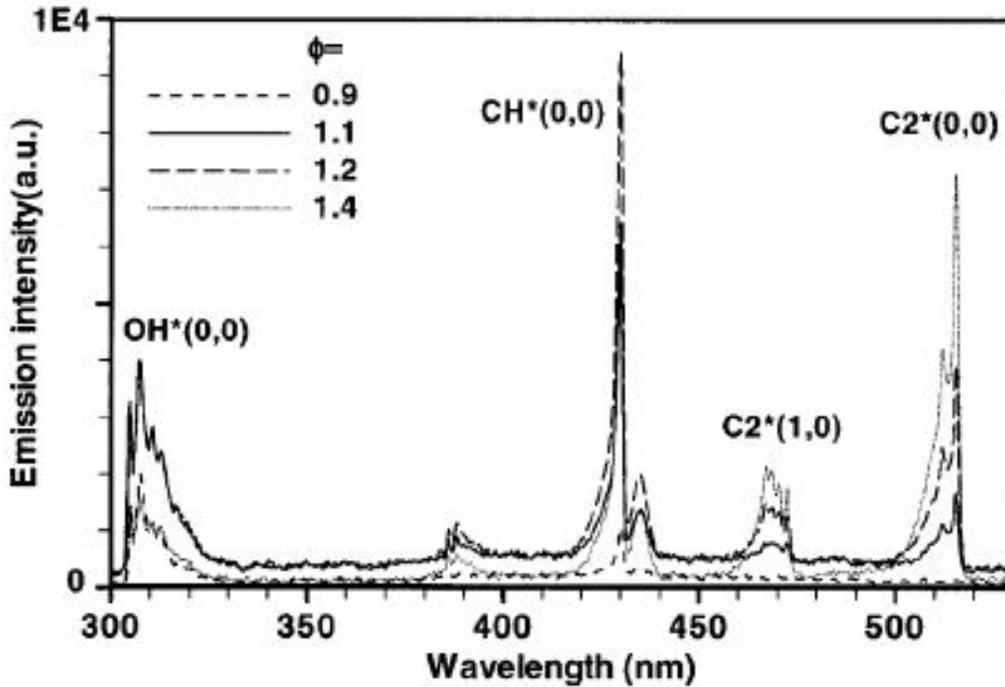


FIGURE 2.11: Pics d'émission des principales espèces

Dans ces travaux de recherche, le spectre d'émission de l'espèce  $\text{OH}^*$  a été étudié car il est considéré comme un bon marqueur de la zone de flamme [45]. D'après la littérature [88], la formation du radical  $\text{OH}^*$  serait principalement due à la réaction suivante :



### 2.3.1.2 Installation expérimentale

Pour réaliser des mesures de chimiluminescence dans les flammes du foyer Firediag, il a été choisi d'étudier l'espèce  $\text{OH}^*$ . Pour réaliser ces essais, une caméra intensifiée PI MAX 4 ainsi qu'un objectif CERCO UV 105 ont été utilisés. Afin d'observer le radical  $\text{OH}^*$ , plusieurs filtres optiques ont été installés sur la caméra :

- Un filtre UG11 ;
- Un filtre WG295 ;

- Un filtre infrarouge passe bas (0 à 800nm) afin de limiter l'influence de la flamme sur les mesures.

Afin d'apprécier l'axe de mesure réalisé, l'installation expérimentale est visible sur la figure 2.12.

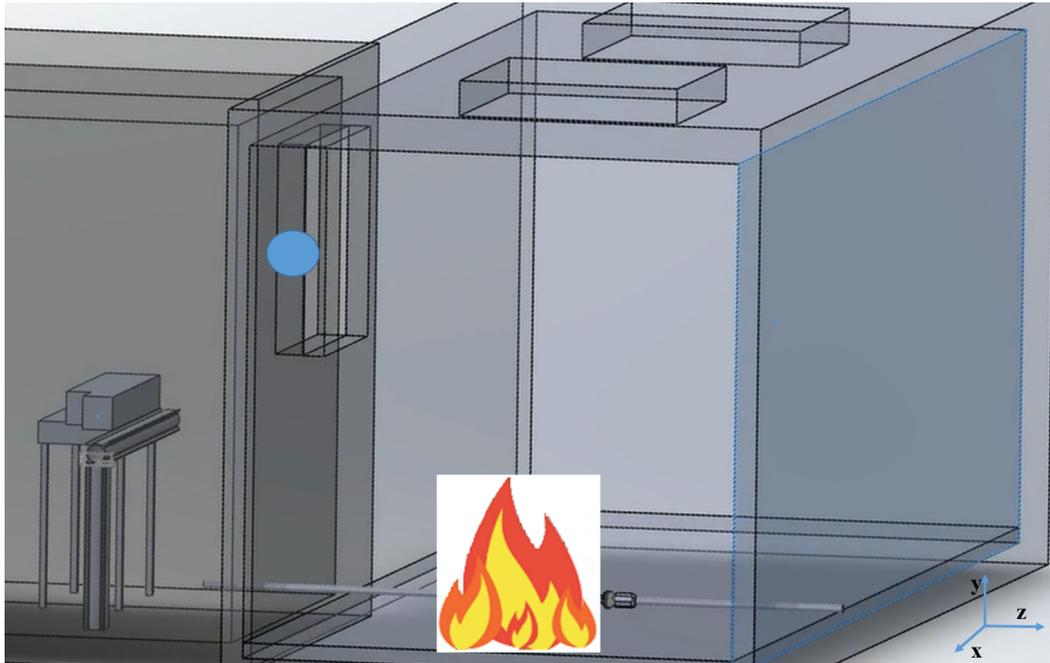


FIGURE 2.12: Vue numérique de profil de l'installation expérimentale

Sur cette figure, le point bleu représente la caméra. Cette dernière est localisée dans la cellule mesures afin de profiter de l'accès optique d'un mètre carré. Les résultats obtenus seront présentés dans le chapitre suivant.

## 2.3.2 Mesures de températures

### 2.3.2.1 Principe

Un thermocouple est constitué de deux fils en métal de différentes natures. Chaque extrémité est reliée par une soudure. On observe alors une soudure dite "froide" et une soudure dite "chaude". La soudure froide est la jonction de référence, elle est conservée à température connue et constante. La soudure chaude est celle orientée vers le milieu dont on souhaite

connaître la température. Lorsqu'une différence de température s'installe entre les deux soudures, celle-ci entraîne la création d'une force électromotrice (noté f.é.m). Ce phénomène est en réalité dû à l'effet Peltier (lié à la différence de métaux) et à l'effet Thompson (lié aux gradients de températures présents dans le métal) [98].

Il existe différents types de thermocouples en fonction de la précision et de la température prévisionnelle du milieu en question. Dans notre cas, comme dans les études liées à l'incendie en général, des thermocouples de type K ont été utilisés.

### 2.3.2.2 Installation expérimentale

Afin d'étudier la propagation de l'incendie et l'influence de la puissance du foyer sur la dynamique des fumées, des mesures de températures et de flux thermiques ont été réalisées. Les mesures de températures ont été effectuées grâce à des thermocouples de type K de diamètre 1.5 mm. Le temps de réponse moyen dans l'air est estimé à 3 secondes.

Pour les mesures de flux thermiques, un fluxmètre a été positionné à 30 cm du sol et du mur, à l'opposé du foyer. Le fluxmètre était orienté vers le plafond afin de mesurer le flux provenant des fumées chaudes et des parois. Ce dernier était fixé sur la boîte de protection du cheminement PIV, encadré en bleu sur la figure 2.13.

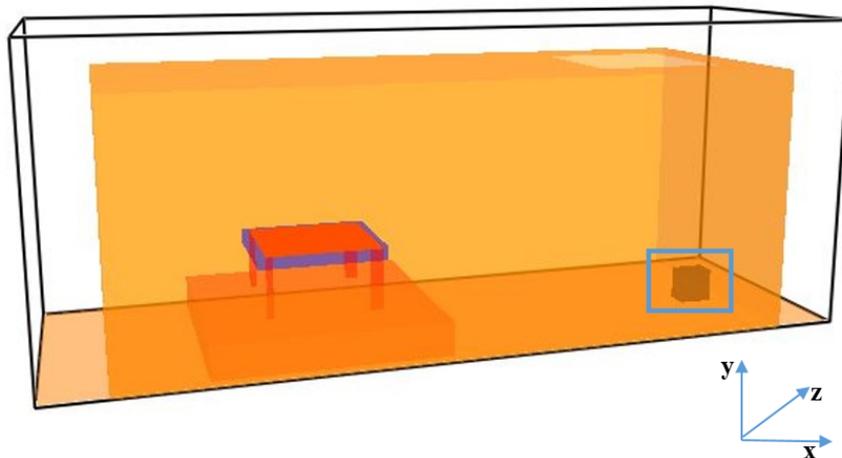


FIGURE 2.13: Vue numérique la position du fluxmètre

Des mesures moyennes ont été réalisées à l'état stationnaire pour des puissances de 200 kW,

500 kW et 800 kW. Ceci permet d'avoir une représentation approximative des flux présents dans le volume au cours des essais, notamment afin de protéger efficacement le cheminement laser utilisé lors des mesures PIV.

Afin d'obtenir des mesures de température complètes, différentes configurations ont été mises en place.

Dans un premier temps, des essais ont été réalisés en utilisant deux arbres de dix thermocouples. Sur chaque support, les thermocouples étaient espacés de 10 cm afin d'avoir une mesure sur 1 m. Dans le but d'obtenir une représentation significative de la cellule expérimentale, un arbre était placé horizontalement, à 10 cm sous le plafond et le second verticalement, à 50 cm du mur. La figure suivante, 2.14, représente une vue numérique, issue du logiciel FDS, qui permet de situer visuellement la position des thermocouples dans la cellule expérimentale.

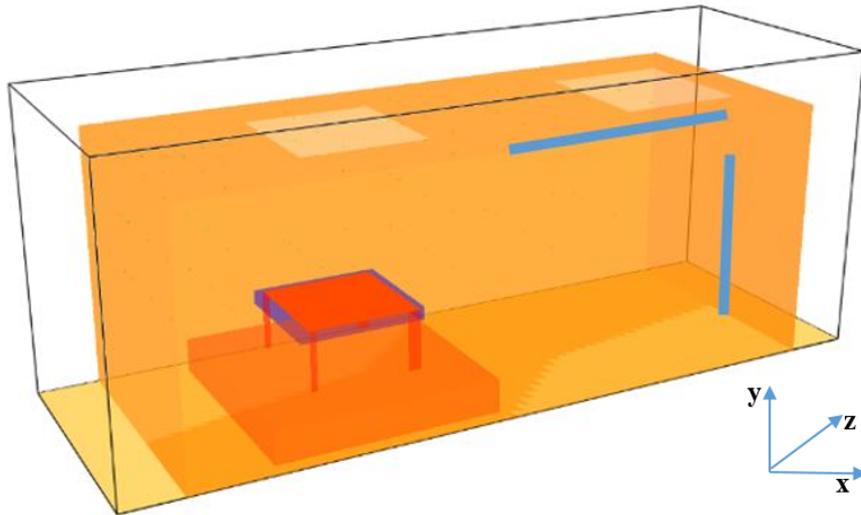


FIGURE 2.14: Représentation numérique de la position des thermocouples

Les deux arbres de thermocouples sont représentés par les traits bleus, positionnés verticalement et horizontalement. Dans cette configuration, des essais en petit et grand volume ont été effectués. En petit volume, les champs de températures expérimentaux et numériques ont été comparés. Comme présenté dans le chapitre précédent, ces mesures ont permis d'apporter des modifications aux hypothèses numériques afin d'obtenir des résultats proches de l'expérimental et ainsi, d'améliorer la fiabilité des simulations grand volume. Dans cette dernière

configuration, des mesures ont été réalisées pour des puissances de 200 kW, 500 kW et 800 kW. Les résultats seront présentés dans le chapitre suivant.

Dans un second temps, les vingt thermocouples de type K ont été installés sur un seul arbre vertical, également espacés de 10 cm. La moitié de la cellule où le foyer n'est pas présent a été entièrement sondée aux puissances de 200 kW, 500 kW et 800 kW. Pour ce faire, douze positions ont été parcourues en espaçant chaque mesure de 60 cm sur l'axe X et 75 cm sur l'axe Y. Cette partie de la cellule est représentée par le cadre bleu sur la vue numérique de la figure 2.15. Les croix bleues indiquent les différentes positions au sol de l'arbre de thermocouples. Pour chaque position, 10 min de temps physique ont été mesurées, soit un essai sur un temps total de 2 heures.

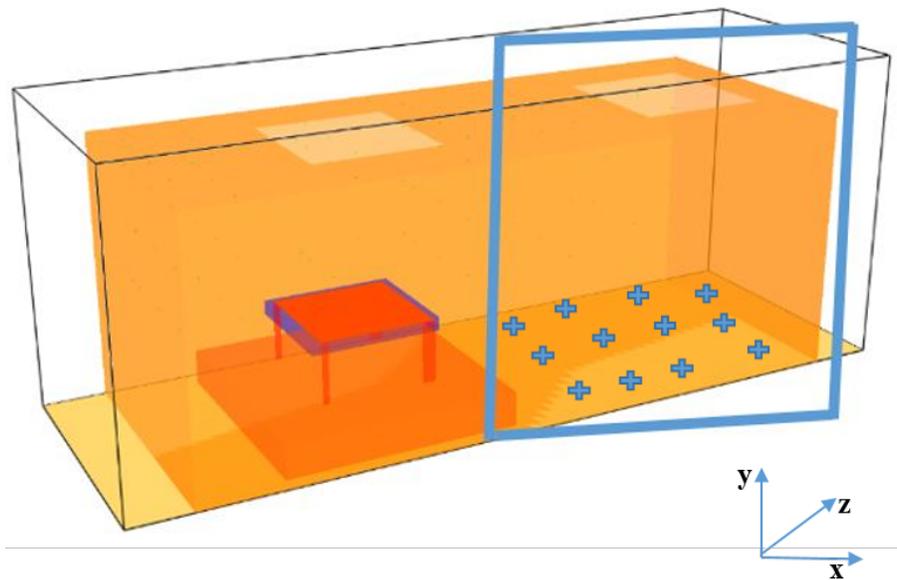


FIGURE 2.15: Représentation numérique de la zone de mesure des températures

Ces séries de mesures ont permis d'observer les températures instantanées ainsi que les champs moyens de température sur une partie importante du volume d'essai. Les résultats seront également présentés et comparés aux champs numériques dans le chapitre 4.

### 2.3.3 Vélocimétrie par Image de Particules

Lors de ces travaux de thèse, la vélocimétrie par image de particules a été utilisée. L'aspect novateur de ces travaux réside dans la réalisation de mesures grands champs dans un milieu fortement hostile. Cette partie comporte un rappel sur le principe général de la technique avant de détailler l'installation utilisée pour réaliser les mesures.

#### 2.3.3.1 Principe

La PIV a vu le jour au début des années 1980 où elle était principalement utilisée pour effectuer des mesures de vitesse dans des écoulements turbulents non-réactifs. Les progrès technologiques réalisés ces dernières années, notamment en imagerie et diagnostics lasers, ont permis de développer cette technique [97] qui est aujourd'hui utilisée dans de nombreuses applications [102].

Cette technique laser a pour but de calculer les champs de vitesse présents dans un écoulement, ici des fumées d'incendies [17], [18]. Cette technique consiste à suivre des particules, solides ou liquides, présentes dans l'écoulement étudié. Ces particules, caractérisant l'ensemencement, doivent être assez fines et légères afin de suivre fidèlement l'écoulement en question. Dans le cas de l'étude des incendies, l'ensemencement utilisé est bien souvent composé de particules solides de type alumine ( $Al_2O_3$ ) [81], [89], oxyde de titane ( $TiO_2$ ) [55], [40] ou oxyde de zirconium ( $ZrO_2$ ) [69], [29]. Dans ces travaux, c'est l'alumine qui a été utilisée. Ces particules ont un diamètre d'environ  $50 \mu m$ .

En théorie, si la particule se déplace sur une distance  $\overrightarrow{\Delta x}$  dans un intervalle de temps  $\Delta t$ , il est alors possible de calculer le vecteur vitesse noté  $\overrightarrow{V}$ , défini par la relation suivante :

$$\overrightarrow{V} = \frac{\overrightarrow{\Delta x}}{\Delta t} \quad (2.2)$$

La superposition de deux nappes laser espacées par un temps connu noté  $\Delta t$  permet d'obtenir

deux images de particules différentes. Le déplacement de ces dernières noté  $\vec{\Delta x}$  étant connu grâce à l'utilisation d'une mire de référence, il est alors possible de remonter jusqu'au vecteur vitesse en résolvant l'équation 2.2 présentée précédemment.

L'ensemble de la technique est résumé à la figure 2.16.

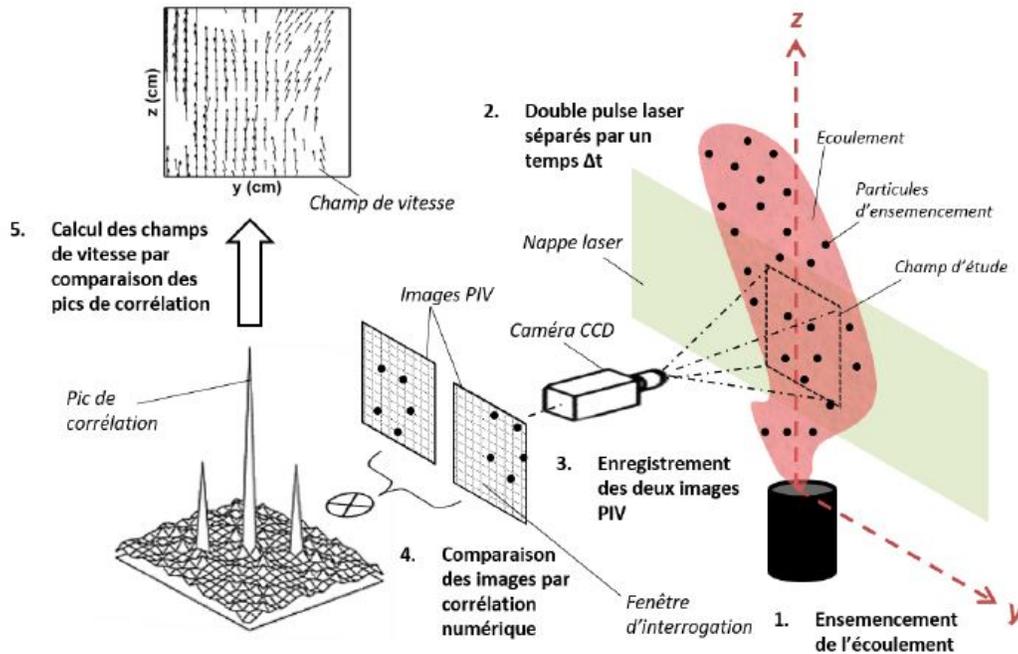


FIGURE 2.16: Principe de la technique PIV, [29]

Dans ces travaux de recherche, l'utilisation de la PIV était particulièrement intéressante car elle a permis d'obtenir des champs de vitesses sur une surface importante ( $1 \text{ m}^2$ ) [22], tout en étant non intrusif, ce qui présente l'avantage de ne pas perturber la dynamique des fumées d'incendie. Afin d'avoir une résolution spatiale de bonne qualité malgré la taille importante de la surface étudiée, la fenêtrage d'interrogation PIV utilisée est de  $64 \times 64$  pixels [1], [54].

### 2.3.3.2 Installation expérimentale

Afin d'étudier précisément l'écoulement et la dynamique des fumées d'incendies, des mesures de vitesses ont été réalisées dans les gaz chauds issus du brûleur. Pour cela, la méthode de Particle Image Velocimetry (PIV) a été utilisée. Cette dernière étant une technique non-intrusive, elle présente l'avantage d'obtenir des valeurs de vitesse sans perturber la dynamique des gaz. Ces mesures ont été mises en place dans trois configurations différentes afin d'observer

l'écoulement sous différentes formes. Ventilée grâce à la porte ouverte, sous ventilée avec l'ouverture de l'exutoire opposé au brûleur et avec présence de ventilation mécanique. La présence de l'accès optique a permis des mesures de vitesse par PIV sur une surface d' $1 \text{ m}^2$ .

L'emplacement de la nappe laser par rapport aux cellules essais et mesures est visible sur la figure 2.17. Pour rappel, le positionnement des deux containers est disponible sur la figure 2.1.

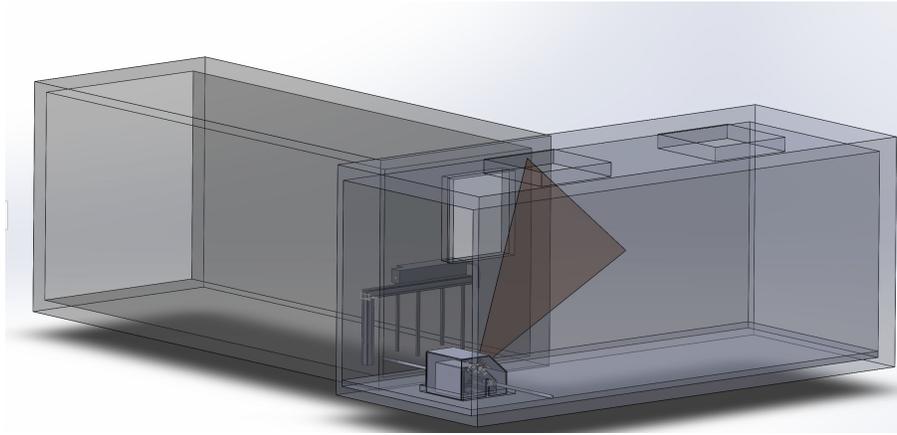


FIGURE 2.17: Représentation numérique de l'installation PIV

Afin de mettre en place cette technique, un laser Nd Yag (Quantel QSmart,  $2 * 400 \text{ mJ}$  / impulsion) combiné avec un objectif cylindrique de  $20 \text{ mm}$ , nécessaire pour produire une nappe laser d'environ  $0,5 \text{ mm}$  d'épaisseur ont été utilisés.

Pour obtenir un champ d' $1 \text{ m}^2$ , le signal émit par les particules d'alumine est collecté par 4 caméras CCD (Charge-Coupled Device, AIRM4200, 12 bits,  $2048 \times 2048 \text{ pix}^1$ ) montées avec un objectif Zeiss  $50 \text{ mm f} / 1.2$ . Un filtre interférentiel de  $532 \text{ nm}$  réduit le bruit provenant des sources de lumière ambiante. L'arrangement optique donne un grossissement de  $5 \text{ pix} / \text{mm}$ . La synchronisation des caméras a été effectuée en amont. Les quatre caméras sont reliées à l'ordinateur permettant ainsi d'acquérir les données. Les images sont recombinaées en une seule et même image à partir de la mire de référence.

Les données sont enregistrées à l'aide du logiciel Dantec Dynamics Studio. Les images brutes sont extraites et post-traitées avec un algorithme spécialement conçu pour la PIV et développé au laboratoire CORIA par le Dr B. Lecordier [61], [62]. De nombreux travaux sont

réalisés à partir de ce logiciel [30], [31], [63].

Grâce à ce dernier, les 4 images sont combinées sur une seule et même image en utilisant la mire de référence. La distorsion et l'inclinaison de l'image sont compensées. Par la suite, un prétraitement est réalisé pour réduire la corrélation sur les structures identifiées, résultant de la génération locale de suies ou des interfaces dues à l'air frais nonensemencé provenant de l'ouverture, porte ou exutoire. Le traitement PIV a été effectué avec une technique de corrélation croisée entre des paires d'images successives. La taille de la fenêtre d'interrogation PIV est de  $64 \text{ pix}^2$ . Un chevauchement de 50% est traité. L'intervalle de temps entre deux images consécutives est de l'ordre de 1,5 - 2 ms. Selon les puissances, le déplacement moyen observé est d'environ 10 pixels par fenêtre en accord avec les valeurs présentes dans la littérature [17].

Afin de s'assurer que le calcul des vecteurs vitesses s'effectue bien sur les particules d'alumine et non de suies, des essais ont été réalisés sans ensemencher le volume. Dans ce cas là, aucune corrélation n'est présente lors du post traitement. Ceci démontre l'efficacité et la qualité de l'ensemencement du volume. Afin de détailler précisément le cheminement optique, un zoom est présenté à la figure 2.18.

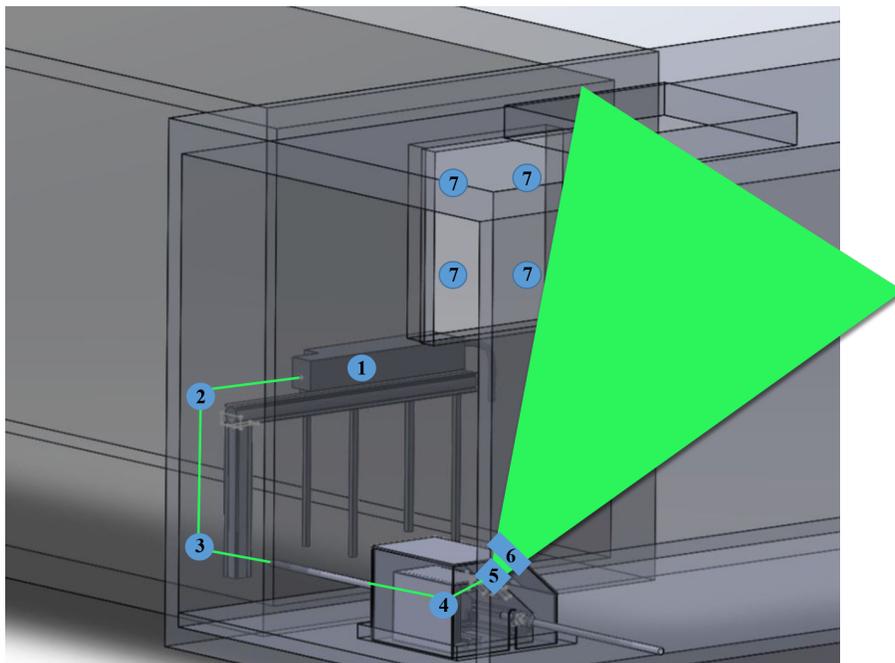


FIGURE 2.18: Vue du cheminement laser

Sur cette image, il est possible d'observer le départ du faisceau laser dans la cellule mesures (noté 1). Il est orienté par un premier miroir de renvoi (noté 2) sur un deuxième miroir (noté 3) afin de passer dans un tube métallique faisant la liaison avec la cellule essais. Le faisceau arrive ensuite dans une boîte métallique fabriquée afin de protéger le système optique des suies. Un nouveau miroir de renvoi (noté 4) dirige le faisceau vers une lentille divergente -12.5 (notée 5) puis vers une lentille focale - 100 (notée 6). Ces deux lentilles permettent d'obtenir une nappe suffisamment grande pour effectuer des mesures PIV sur une surface d' $1 \text{ m}^2$ . Pour finir, les 4 caméras CCD sont disposées dans la cellule mesures (notées 7).

Une photo prise au cours d'un essai porte ouverte est disponible sur la figure 2.19. Cette dernière permet d'observer la taille de la nappe réalisée ainsi que sa position réelle dans la cellule essais.



FIGURE 2.19: Vue intérieure de la cellule essais

## 2.4 Contraintes expérimentales

Pour mener à bien ces travaux de recherches, l'installation et la mise en œuvre de la cellule expérimentale détaillée précédemment ont été une partie délicate du projet. En effet, de nombreuses contraintes expérimentales ont été rencontrées au fur et à mesure de l'avancée des travaux. Cette partie reprend l'ensemble des contraintes techniques auxquelles il a fallu faire face et présente les solutions, plus ou moins complexes, qui ont été mises place pour y remédier.

La première contrainte fut la localisation de l'installation. En effet, en raison de la taille mais aussi des suites données au projet (agrandissement grâce à l'ajout de caissons supplémentaires, outil de formation à disposition des sapeurs-pompiers...), la cellule expérimentale a été installée sur le site de formation incendie des sapeurs-pompiers de Seine Maritime, en extérieur. La principale contrainte qui découle de ce constat est liée aux conditions climatiques de la région normande. En effet, les fortes variations de températures, les importantes chutes de pluies ou encore les violentes rafales de vent ont été les conséquences directes auxquelles il a été nécessaire de s'adapter. Pour pallier cette problématique, différentes solutions ont été mises en place :

- Pour remédier aux variations de températures ressenties à l'intérieur du caisson mesures nuisibles aux personnels mais aussi aux matériels, notamment aux lasers et accentuées par le matériau de construction (caisson en métal), celui-ci a été entièrement isolé. Pour cela, 20 cm de laine de roche et des plaques de plâtres ont été mises en place sur les parois et le plafond du caisson.
- En région Normandie, de forts vents se font ressentir. En effectuant des mesures dans une configuration exutoire ouvert ou porte ouverte, ceux-ci peuvent avoir une influence directe sur les résultats enregistrés.
  1. Un coffrage a été installé sur l'exutoire afin d'éviter l'introduction intempestive d'air frais qui pourrait modifier l'écoulement de fumées chaudes. Ce coffrage, d'une longueur de 2.50 m, d'une largeur de 1.85 m et d'une hauteur de 1.50 m, est

assemblé de tôles métalliques. La partie supérieure est constituée de trois tôles percées de différents diamètres, permettant les sorties de fumées chaudes et les entrées d'air frais nécessaires au bon développement de l'incendie, tout en limitant les perturbations liées aux rafales de vent. Ce montage est représenté sur les figures 2.20 et 2.21.



FIGURE 2.20: Vue de face de la modification de l'exutoire



FIGURE 2.21: Vue de profil de la modification de l'exutoire

2. La mise à disposition de la station météo des sapeurs-pompiers a été nécessaire afin

de ne pas effectuer d'essais lors de vents forts, notamment pour la configuration en porte ouverte.

Par ailleurs, un des point clé de ces travaux de thèse était de réussir à ensemercer correctement le volume (environ  $35 \text{ m}^3$ ). Pour cela, un ensemenceur a été fabriqué en utilisant un tamis et un moteur à vibration, alimenté avec de l'alumine. Ce montage, traversé par un flux d'air sous pression (7 bars) a permis d'ensemencer le container. Pour cela, un compresseur et une ligne d'air ont été installés afin d'avoir la pression suffisante pour ensemercer efficacement le volume.

Pour répartir correctement l'alumine, une couronne en cuivre a été fabriquée et placée sur un support sous le brûleur, permettant ainsi aux particules solides de se mélanger aux fumées chaudes sans perturber la dynamique de l'écoulement. Cet ensemenceur est visible sur la photo [2.22](#).



FIGURE 2.22: Ensemenceur utilisé pour les essais PIV

Lors de l'installation de la PIV, un cheminement optique avec plusieurs miroirs de renvoi a été créé. Afin de protéger de la chaleur et des dépôts de suies les optiques installées dans la

cellule essais, une petite boîte de protection munie d'un accès optique en vitrocéramique a été fabriquée.

Un des défis majeurs de ces travaux était d'obtenir des résultats de PIV grand champs, en milieu confiné et sous-ventilé, ce qui inclut automatiquement une forte présence de particules de suies. L'accès optique étant de grande taille, le possible dépôt de suies sur cette surface vitrée était un paramètre à prendre en compte pour que les caméras puissent recevoir un signal correct. Pour éviter ce dépôt, l'accès optique a été ventilé avec un petit filet d'air frais, réparti sur l'ensemble de la vitre. Pour cela, un cadre en cuivre a été mis en place autour de la surface vitrée. Des trous de 3 mm de diamètre, espacés de 8 cm permettent le passage de l'air. Afin d'obtenir un apport d'air correctement réparti, six arrivées ont été prévues. Ce premier montage est visible sur la figure 2.23. Afin de ne pas modifier la dynamique de l'incendie, l'apport d'air devait être maîtrisé. Un débitmètre présent en amont du montage a permis de réguler le débit d'air.

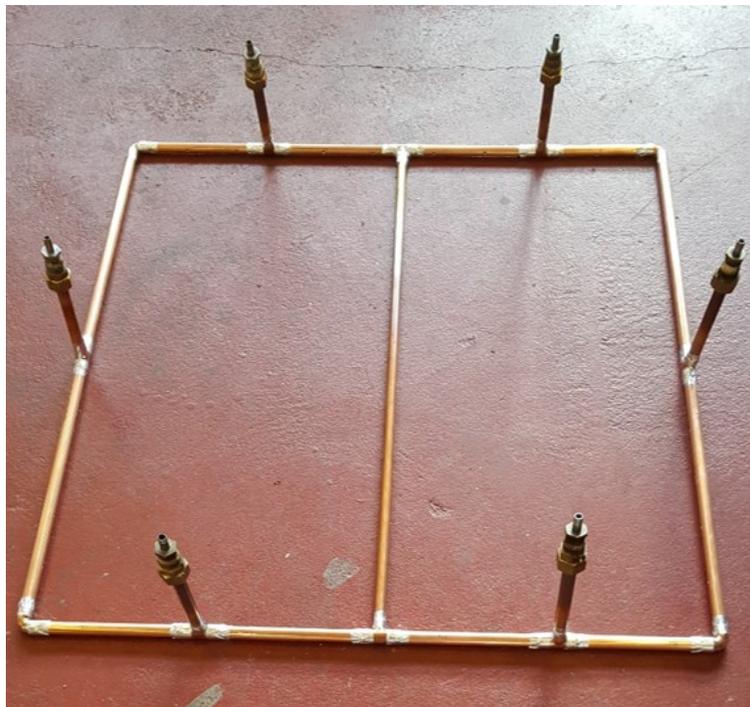


FIGURE 2.23: Montage provisoire

Ce montage ne s'avérant pas suffisant, certaines modifications ont été effectuées. Les trous

présents dans le cadre en cuivre ont été orientés vers l'extérieur et une gouttière en inox a été ajoutée afin de renvoyer l'air sous la forme d'un filet. Le montage définitif est présenté sur la photo 2.24.



FIGURE 2.24: Montage définitif

## 2.5 Conclusion du chapitre 2

Ce chapitre avait pour objectif de présenter l'ensemble des éléments constitutifs de la cellule expérimentale. En introduction du chapitre résultats, les différentes techniques de mesures utilisées pour caractériser le foyer ainsi que son environnement proche ont été détaillées. Pour chacune d'entre elle, qu'il s'agisse des mesures de température, de chimiluminescence ou de PIV, le principe général et l'installation expérimentale ont été expliqués. Les trois configurations étudiées à savoir, avec la porte ouverte, l'exutoire ouvert ou l'utilisation d'une ventilation mécanique ont été détaillées. Dans ces travaux de thèse, la présence de ces trois configurations a permis d'étudier l'incendie dans des conditions ventilées, sous-ventilées ou

en ventilation forcée. Pour conclure ce chapitre, de nombreuses contraintes expérimentales, rencontrées au cours de l'installation de la cellule mais aussi lors de son exploitation ont été listées. Les différentes solutions mises en place pour pallier ces problèmes ont été présentées. Cette liste n'a pas pour vocation d'être exhaustive mais a pour but de situer la complexité du projet mais aussi de faciliter la tâche à de futurs expérimentateurs qui souhaiteraient effectuer ce type d'essais.

# Chapitre 3

## Outil numérique

De nos jours, de nombreuses recherches sont effectuées dans le domaine de la science du feu. Les travaux expérimentaux, bien qu'indispensables, sont souvent très coûteux et difficiles à mettre en œuvre. En effet, ils demandent des ressources humaines et matérielles importantes, notamment pour les essais à taille réelle. Pour ces derniers, il faut pouvoir disposer d'un bâtiment à brûler (anciennes constructions mises à disposition par la mairie avant destruction...) ou d'un site relativement grand pour y installer une structure d'essais sans déranger le voisinage. Les équipements nécessaires pour effectuer une bonne analyse des phénomènes observés (techniques de mesures, matériels de protection...) ainsi que le personnel qualifié pour mener à bien les campagnes de mesures et exploiter les résultats obtenus représentent un coût non négligeable. C'est dans ce contexte économique que les outils de simulations numériques prennent tout leur sens. Un code de calcul performant permet de tester de nombreuses configurations d'incendie, en changeant à volonté les données d'entrée mais aussi les conditions limites. Cependant, en fonction du maillage utilisé et de la géométrie modélisée, les temps de calculs peuvent être non négligeables. Ce paramètre est donc à prendre en compte pour optimiser le temps de travail.

C'est ce constat qui a conduit à l'utilisation du code de calcul Fire Dynamics Simulator (FDS). La cellule expérimentale détaillée dans le chapitre 3 nécessitant des moyens importants, il était nécessaire d'utiliser l'outil numérique pour sélectionner les scénarii qu'il était intéressant

d'étudier expérimentalement. Le chapitre suivant va présenter les écoulements à faible nombre de Mach, caractéristiques des simulations d'incendie.

### 3.1 Simulation des écoulements à faible nombre de Mach

Comme précisé dans le chapitre précédent, les flammes de diffusion sont prédominantes lors de situations d'incendie. Au sein de celles-ci, les vitesses sont bien inférieures à la vitesse du son [28]. C'est pour cette raison que les écoulements étudiés lors de ces recherches sont à faible nombre de Mach.

$$M = |u| / c \quad (3.1)$$

Avec :

$M$  = Nombre de Mach ;

$|u|$  = Vitesse caractéristique de l'écoulement ;

$c$  = Vitesse du son dans les conditions de l'écoulement étudié.

Dans ce type de simulation, les équations utilisées sont celles de Navier Stokes. Cependant, le caractère multi échelle de ces dernières entraîne des difficultés de résolution, notamment en raison de la raideur en temps et en espace de celles-ci [92].

**La raideur en temps :** Le temps nécessaire à la propagation d'une onde acoustique est bien inférieur à celui d'un mouvement convectif de fluide. Ceci entraîne donc une raideur qui impacte la résolution des équations.

Pour un écoulement compressible, la condition de stabilité du schéma numérique est définie par le nombre de Courant-Friedrich-Levy (CFL), qui s'écrit :

$$CFL = \frac{(|u| + c) \delta t}{\Delta} \leq 1 \quad \text{d'où} \quad \delta t \leq \frac{\Delta}{|u| + c} \quad (3.2)$$

Avec :

$c$  = Vitesse du son ;

$|u|$  = Borne supérieure des vitesses de l'écoulement hors phénomènes acoustiques ;

$\delta t$  = Pas de temps ;

$\Delta$  = Taille caractéristique des mailles.

La condition de CFL impose une contrainte non négligeable au pas de temps. Pour répondre à ce critère, l'onde acoustique la plus rapide ne doit pas parcourir plus d'une maille de calcul sur le pas de temps en question.

**La raideur en espace :** Elle s'explique par la grandeur du domaine de calcul comparée à l'épaisseur du front de flamme. Lors des simulations numériques d'incendie, la taille du domaine peut varier de quelques mètres (simple appartement) à plusieurs centaines de mètres (usine, habitations collectives, gares...). Cependant, l'épaisseur du front de flamme reste quant à elle de l'ordre du millimètre.

### 3.1.1 Approximation des équations de Navier Stokes

Pour pallier la raideur en temps décrite précédemment, il est possible d'obtenir, grâce à une étude asymptotique, une forme approximative des équations de Navier Stokes. Pour cela, seuls les termes significatifs des équations sont conservés. D'après la synthèse de Müller [79] effectuée grâce aux travaux réalisés précédemment [67] [96], une forme adimensionnelle des équations a été proposée. Le code de calcul utilisé pour les travaux de recherches présentés dans ce manuscrit se base sur celle-ci.

Afin de différencier les formes adimensionnelles des formes standards, ces dernières sont notées avec exposant \*. Un indice  $\infty$  est ajouté sur les grandeurs stationnaires ou éloignées de l'écoulement étudié. Par ailleurs, les quantités thermodynamiques de référence doivent être en accord avec la loi des gaz parfaits.

Les valeurs adimensionnelles sont représentées comme suit :

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\rho^*}{\rho_\infty^*}, \quad u = \frac{u^*}{u_\infty^*}, \quad p = \frac{p^*}{p_\infty^*}, \quad \mu = \frac{\mu^*}{\mu_\infty^*}, \\ T &= \frac{T^*}{T_\infty^*}, \quad x = \frac{x^*}{L^*}, \quad \lambda = \frac{\lambda^*}{\lambda_\infty^*}, \\ e &= \frac{e^*}{p_\infty^*/\rho_\infty^*}, \quad t = \frac{t^*}{L^*/u_\infty^*} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Avec :

$\rho$  = Masse volumique ( $\text{kg.m}^{-3}$ );

$u$  = Vitesse (m/s);

$p$  = Pression (Pa);

$\mu$  = Viscosité dynamique (Pa.s);

$T$  = Température ( $^\circ\text{C}$ );

$x$  = Espace (m);

$\lambda$  = Conductivité ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ );

$e$  = Énergie interne (J/kg);

$t$  = Temps (s).

Les grandeurs présentées ci-dessus sont choisies pour que les valeurs adimensionnelles soient de 1 par rapport au nombre de Mach de référence :

$$M_\infty = \frac{u_\infty^*}{\sqrt{\gamma p_\infty^* / \rho_\infty^*}} \quad (3.4)$$

Afin de simplifier les équations,  $M_\infty$  est remplacé par le terme  $\widetilde{M}$ . Il s'écrit alors [17] :

$$\widetilde{M} = \sqrt{\gamma} M_\infty \quad (3.5)$$

Si l'on intègre les grandeurs adimensionnelles (2.3) dans les équations de continuité, de conservation de la quantité de mouvement et de transport de l'énergie totale, on obtient alors :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) + \frac{1}{\widetilde{M}^2} \nabla p = G \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho H \mathbf{u}) = Q \quad (3.8)$$

Avec :

$$G = \frac{1}{Re_\infty} \nabla \cdot \tau - \frac{1}{Fr_\infty^2} \rho \mathbf{e}_r \quad (3.9)$$

$$Q = \frac{\widetilde{M}^2}{Re_\infty} \nabla \cdot (\tau \cdot \mathbf{u}) - \frac{\widetilde{M}}{Fr_\infty^2} \rho \mathbf{e}_r \cdot \mathbf{u} + \frac{\gamma}{(\gamma - 1) Re_\infty Pr_\infty} \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \widetilde{Q} \quad (3.10)$$

De ces équations découlent les nombres suivants :

**Le nombre de Reynolds :** Rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité. Il

s'écrit :

$$Re_{\infty} = \frac{\rho_{\infty}^* u_{\infty}^* L^*}{\mu_{\infty}^*} \quad (3.11)$$

**Le nombre de Froude :** Rapport entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle. Il s'écrit :

$$Fr_{\infty} = \frac{u_{\infty}^*}{\sqrt{g^* L^*}} \quad (3.12)$$

**Le nombre de Prandtl :** Rapport entre la dissipation thermique et la conduction thermique. Il s'écrit :

$$Pr_{\infty} = \frac{c_p^* \mu_{\infty}^*}{k_{\infty}^*} \quad (3.13)$$

On peut également écrire les valeurs adimensionnelles suivantes :

**L'énergie totale par unité de masse :**

$$E = e + \tilde{M}^2 \frac{1}{2} |u|^2 \quad (3.14)$$

**L'enthalpie totale :**

$$H = E + \frac{p}{\rho} \quad (3.15)$$

En ajoutant les équations suivantes :

$$p = \rho r T \quad (3.16)$$

Et,

$$e = \frac{1}{\gamma - 1} T \quad (3.17)$$

On observe que lorsqu'on les ajoute aux équations (2.14) et (2.15), le terme de pression peut être exprimé par :

$$p = (\gamma - 1) \left( \rho E - \widetilde{M}^2 \frac{1}{2} \frac{|\rho \mathbf{u}|^2}{\rho} \right) \quad (3.18)$$

### 3.1.2 Analyse asymptotique

Afin de simplifier les équations (2.6), (2.7) et (2.8), il est nécessaire de réaliser une étude asymptotique lorsque  $\widetilde{M}$  tend vers zéro et ce, dans le cas d'un écoulement à faible nombre de Mach, caractéristique des incendies. Si les variables ne dépendent que du temps  $t$  et des variables d'espaces adimensionnées  $x$ , on peut écrire pour tout champ  $\Phi$ , un développement à l'ordre 3 :

$$\Phi(x, t, \widetilde{M}) = \Phi_0(x, t) + \Phi_1(x, t) \widetilde{M} + \Phi_2(x, t) \widetilde{M}^2 + O(\widetilde{M}^3) \quad (3.19)$$

$$= \Phi_0 + \Phi_1 \widetilde{M} + \Phi_2 \widetilde{M}^2 + O(\widetilde{M}^3) \quad (3.20)$$

Comme ces égalités sont vérifiées pour toute valeur de  $\widetilde{M}$  proche de zéro, alors les coefficients des polynômes correspondants sont également nuls.

L'analyse asymptotique permet également d'obtenir une approximation des équations de Navier Stokes à l'ordre 0 :

$$\frac{\partial \rho_0}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 \mathbf{u}_0) = 0 \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial \rho_0 u_0}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 u_0 u_0) + \nabla p_2 = G_0 \quad (3.22)$$

$$\frac{\gamma}{\gamma-1}\rho_0 \left[ \frac{\partial T_0}{\partial t} + u_0 \cdot \nabla T_0 \right] - \frac{dp_0}{dt} = Q_0 \quad (3.23)$$

$$\rho_0(x, t) r T_0(x, t) = p_0(t) \quad (3.24)$$

$$Q_0 = \frac{\gamma}{(\gamma-1)Re_\infty Pr_\infty} \nabla \cdot (\lambda \nabla T)_0 + \tilde{Q}_0 \quad (3.25)$$

L'approximation Faible Nombre de Mach repose sur un développement asymptotique des variables de l'écoulement. Pour la pression, on obtient :

$$p(x, t, \tilde{M}) = p_0(t) + p_2(x, t)\tilde{M}^2 + O(\tilde{M}^3) \quad (3.26)$$

On peut également écrire :

$$\nabla \cdot u_0 = \frac{\gamma-1}{\gamma p_0} Q_0 - \frac{1}{\gamma p_0} \frac{dp_0}{dt} = \frac{-1}{\rho_0} \frac{D\rho_0}{Dt} \quad (3.27)$$

On observe que le terme  $Q_0$  et la variation de pression  $p_0$  modifient la divergence du champ de vitesse  $u_0$ .

Afin de filtrer les ondes acoustiques dans le modèle à faible nombre de Mach, la pression dynamique ( $p_2$ ) est séparée des fluctuations de la masse volumique mais aussi de la température.

### 3.1.3 Richesse et fraction de mélange

Dans la littérature, le rapport massique  $s$  est défini selon l'équation suivante [92] :

$$s = \left( \frac{Y_O}{Y_F} \right)_{st} = \frac{\nu_O W_O}{\nu_F W_F} \quad (3.28)$$

Avec :

$Y$  : Fraction massique locale

$\nu$  : Coefficient molaire stoechiométrique

Dans un mélange comburant / combustible, la richesse de la flamme est notée  $\phi$ . Ce nombre adimensionnel va permettre de quantifier la quantité de combustible dont dispose le mélange par rapport à la quantité qui serait nécessaire pour obtenir une combustion dans les conditions stoechiométriques. La richesse se définit comme suit :

$$\phi = s \frac{Y_F}{Y_O} = \left( \frac{Y_F}{Y_O} \right) / \left( \frac{Y_F}{Y_O} \right)_{st} \quad (3.29)$$

Cette équation permet de déduire que :

- Lorsque la richesse est égale à 1, le mélange est à la stoechiométrie ;
- Lorsque la richesse est supérieure à 1, le mélange est dit riche ;
- Lorsque la richesse est inférieure à 1, le mélange est considéré comme pauvre.

Afin d'obtenir des informations sur la fraction de mélange, la grandeur  $Z$  est introduite. Dans le cas d'une réaction chimique à une étape où le nombre de Lewis est unitaire, elle s'écrit comme suit :

$$Z = \frac{\phi \frac{Y_F}{Y_{F,O}} - \frac{Y_O}{Y_{O,0}} + 1}{\phi + 1} \quad (3.30)$$

Le domaine est borné entre 0 et 1.

- 1 lorsque le combustible est pur ;
- 0 lorsque l'oxydant (oxygène de l'air en incendie), est pur.

Dans cette équation, l'ensemble des espèces présentes diffusent à vitesse égale. D'autre part,  $Z$  est un scalaire passif. Ceci signifie qu'il n'y a pas de terme source dans l'équation de transport du scalaire.

Lorsque plusieurs espèces interviennent dans les réactions,  $Z$  n'est plus considéré comme un scalaire passif. Il est donc nécessaire d'intégrer et de calculer un terme correctif [80].

D'autre part, lors de la présence de plusieurs espèces, il est possible d'obtenir une fraction de mélange ou une richesse passive en utilisant la conservation des atomes. Pendant la combustion, les fractions massiques des différentes espèces qui interviennent dans les réactions sont amenées à évoluer au fil du temps mais la masse des éléments atomiques est conservée. Il est alors possible d'obtenir certaines variables en utilisant la conservation des atomes. Il est possible d'utiliser cette méthode lors de la combustion d'un hydrocarbure avec de l'air.

Pour un hydrocarbure standard noté  $C_mH_n$ , les fractions massiques correspondantes seraient  $Z_C$  pour le carbone,  $Z_O$  pour l'oxygène et  $Z_H$  pour l'hydrogène. Pour un atome noté  $j$ , la fraction massique  $Z_j$  s'écrit :

$$Z_j = \sum_{k=1}^{N_{sp}} \frac{\alpha_{jk} w_j}{W_k} Y_k \quad (3.31)$$

Avec :

$\alpha_{jk}$  : Nombre d'atome de l'élément  $j$  dans une espèce  $k$  ;

$w_j$  : Masse molaire de l'atome  $j$  ;

$W_k$  : Masse molaire de l'espèce  $k$ .

Il est alors possible d'obtenir l'équation de la fraction de mélange définie par Bilger [14] qui s'écrit :

$$Z = \frac{Z_C/(mW_C) + Z_H/(nW_H) + 2(Y_{O_{2,2}} - Z_O) / (\nu_O W_{O_2})}{Z_{c,0}/(mW_C) + Z_{H,0}/(\nu W_H) + 2Y_{O_{2,2}}/(\nu_O W_{O_2})} \quad (3.32)$$

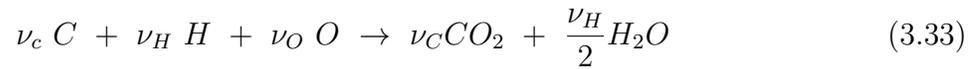
Avec :

$Y_{O_{2,2}}$  : Fraction massique d'oxygène contenue dans le jet d'oxydant ;

$n$  : Composition atomique en carbone d'un hydrocarbure  $C_mH_n$  ;

$m$  : Composition atomique en hydrogène d'un hydrocarbure  $C_mH_n$ .

Il est également possible de définir une richesse de mélange grâce à la fraction massique d'un atome. A la stœchiométrie, cette équation s'écrirait :



On déduit alors :

$$\nu_O = \left( 2\nu_C + \frac{\nu_H}{2} \right) \times \phi \quad (3.34)$$

L'équation de la richesse basée sur la conservation des atomes s'écrit alors :

$$\phi = \frac{2 \frac{Z_C}{W_C} + \frac{1}{2} \frac{Z_H}{W_H}}{\frac{Z_O}{W_O}} \quad (3.35)$$

## 3.2 Logiciel Fire Dynamics Simulator (FDS)

Pour réaliser la partie numérique de ces travaux de recherche, le logiciel qui a été utilisé est Fire Dynamics Simulator (FDS). C'est un code de Computational fluid dynamics (CFD) tri-dimensionnel qui est développé par le National Institute of Standards and Technology (NIST) aux Etats-Unis. FDS résout numériquement une forme des équations de Navier-Stokes appropriées pour de faibles vitesses en mettant l'accent sur le déplacement des fumées et le transport de chaleur issus des incendies. Il est possible de retrouver l'historique de son développement dans la référence [25]. Afin d'être toujours plus précis, le code est régulièrement mis à jour et des modifications sont apportées, notamment au niveau des sous modèles. Il a été utilisé dans le cadre de cette thèse pour les raisons suivantes :

- C'est un code de calcul gratuit qui permet de simuler le développement de l'incendie, le cheminement des fumées produites mais aussi les effets de ceux-ci (température, vitesse, simulation de propagation...);
- Dans une simulation, il est possible de placer de nombreux capteurs (température, pression, vitesse, opacité et concentration des gaz...). Ceux-ci peuvent-êtres semblables à ceux utilisés lors des essais expérimentaux, favorisant ainsi les comparaisons numérique / expérimentale;

- Grâce à un script simplifié accessible avec un éditeur de texte, FDS est relativement simple d'utilisation ;
- Il est fortement utilisé dans l'ingénierie de sécurité incendie et donc, largement validé. Il est possible de trouver de nombreuses études sur le site du NIST [86] ;
- Ses sources sont disponibles ;
- Il est complété par Smokeview. Ce logiciel permet d'obtenir la visualisation de la géométrie mais également le développement du feu et des fumées dans le volume [38] ;
- On trouve également le module Evac qui permet quant à lui de simuler le comportement d'une foule lors d'une évacuation. Ces options sont très appréciées lors de présentations en ingénierie de la sécurité incendie car elles permettent aux non-initiés d'apprécier le risque incendie ;
- FDS est très bien documenté ce qui permet un support de qualité pendant l'utilisation [71], [72], [73], [75]. De plus, un forum en ligne est accessible afin d'échanger sur le code.

Le principal concurrent du code FDS en terme de modélisation incendie est le logiciel Fire Foam [85]. Dans le cadre de ces travaux et en raison des avantages cités précédemment, l'utilisation du logiciel FDS a été préférée malgré la simplicité de certains de ses modèles, notamment celui de combustion.

Comme tout modèle, FDS a ses propres limitations. On peut notamment citer :

- L'utilisation de FDS est limitée aux faibles vitesses d'écoulement ;
- L'utilisation d'une géométrie cartésienne et d'un solveur rapide et direct pour le champ de pression. Certaines géométries sont donc difficilement réalisables ;
- Le modèle de combustion utilisé peut être limité, notamment lors de conditions sous ventilées [66] ;
- Le transfert par rayonnement est inclus dans le modèle. Cependant, la teneur en suie peut affecter à la fois l'absorption et l'émission du rayonnement thermique et donc, fausser cette valeur.

Les principales caractéristiques de la version 5 de FDS sont regroupées dans le tableau 3.1.

Solveur des équations de Navier stokes	Écoulements à faible nombre de Mach Précision du second ordre en temps et en espace Discrétisation par différences finies Méthode prédicteur/correcteur Solveur de Poisson explicite Simulation aux grandes échelles (LES) Modèle de Smagorinsky
Modèle de combustion	Flamme de diffusion Concept de fraction de mélange Combustion contrôlée par le mélange Équation de réaction chimique globale unique Modèle de réactions chimiques "Turbulent Batch Reactor" Chimie infiniment rapide Consommation basée sur le gradient de fraction de mélange
Modèle de rayonnement	Équation de transfert radiatif Rayonnement diffus Gaz gris non dispersif Résolution numérique par volumes finis Utilisation d'une centaine d'angles solides
Conditions aux limites	Transfert thermique 1D au niveau de chaque maille Propriétés thermiques dépendant de la température Transferts d'énergie basés sur des corrélations empiriques

FIGURE 3.1: Principales caractéristiques du code de calcul FDS

### 3.2.1 Turbulence : Modèle de Smagorinsky

En 1963, Smagorinsky proposa le premier modèle de sous mailles appliqué aux simulations des grandes échelles [105]. Dans ce modèle, la viscosité de sous maille est définie par la relation suivante :

$$\mu_t = \tilde{\rho} l_s^2 \tilde{S} \quad (3.36)$$

Avec :

$l_s$  : Échelle de longueur de Smagorinsky ;

$\tilde{S}$  : Norme du tenseur du gradient de vitesse résolu défini ci-dessous :

$$\tilde{S} = \sqrt{2\widetilde{s_{ij}}\widetilde{s_{ij}}} \quad (3.37)$$

Pour obtenir une longueur  $l_s$  proportionnelle au filtre, la constante  $C_s$  du modèle de Smagorinsky est définie comme suit :

$$l_s = C_s \Delta \quad (3.38)$$

La présence du terme  $\mu_t$  en fonction des grandeurs résolues induit que seul le transfert d'énergie venant des échelles résolues en direction des échelles de sous-maille est calculé. Dans ce cas, aucune autre valeur d'énergie provenant des petites structures ne sera prise en compte par la modélisation.

Cependant, le modèle de Smagorinsky présente certaines faiblesses :

- La constante  $C_s$  est basée sur une valeur théorique en turbulence homogène isotrope ;
- Les zones de cisaillement à proximité des parois présentent une viscosité de sous-maille surestimé ce qui rend le modèle trop dissipatif.

Pour obtenir une valeur correcte de  $\mu_t$  à proximité des parois, il est possible d'ajouter des fonctions d'amortissement lors de la définition de la viscosité de sous-maille.

Dans sa version 5, FDS ne propose pas de méthode moderne de modélisation de sous maille, en particulier des procédures de calcul dynamique de la constante de Smagorinsky, type modèle de Germano. Le coût computationnel de ce type de modèle est trop grand pour répondre à l'ambition de FDS jusqu'à la version 5, c'est à dire envisager de résoudre des cas pratiques sur un simple ordinateur de bureau.

### 3.2.2 Équations utilisées

Ce sous chapitre présente les différentes équations utilisées dans le code FDS et détaillées dans la documentation technique de FDS [71]. Elles seront présentées sous forme d'un ensemble d'équations différentielles partielles, notées avec des simplifications et des approxima-

tions.

### 3.2.2.1 Modèle hydrodynamique

Dans ce modèle, une forme approximative des équations de Navier-Stokes adaptée pour les écoulements à faible nombre de Mach, présentée précédemment, est utilisée. Cette approximation entraîne un filtrage des ondes acoustiques mais permet de fortes variations de température et de densité [96]. Ceci donne aux équations un caractère elliptique, compatible avec de faibles vitesses mais aussi avec des processus de convection thermique. La résolution sera effectuée par Direct Numerical Simulation (DNS). Cependant, les termes de dissipation seront calculés par Large Eddy Simulation (LES). L'algorithme numérique est conçu pour que la LES devienne DNS si la grille est raffinée. Cependant, la plupart des applications de FDS sont résolues par LES.

## 3.3 Hypothèses de calcul

Dans la partie suivante, les hypothèses formulées pour définir les conditions limites des différents calculs réalisés vont être présentées.

### 3.3.1 Étude de maillage

Afin d'utiliser un maillage avec un rapport optimal entre le degré de précision souhaité et le temps de calcul idéal pour simuler la cellule expérimentale, une étude préalable a été réalisée. Pour cela, plusieurs tailles de mailles ont été simulées. Par ailleurs, un pas de temps de 0,8 secondes maximum est imposé par FDS. Les solutions numériques seront enregistrées toutes les dix secondes.

Tout d'abord, une taille de mailles de 20 cm a été testée. Cette dernière a été choisie car c'est la taille généralement utilisée dans les études d'ingénierie de sécurité incendie. Par la suite, le maillage a été raffiné et des mailles de 2.5 cm, 5 cm et 10 cm ont été testées afin de comparer la précision des résultats, tout en essayant de conserver un temps de calcul raisonnable. Le

détail de chaque maillage est le suivant :

- 20 cm, soit 5 712 mailles ;
- 10 cm, soit 45 696 mailles ;
- 5 cm, soit 365 568 mailles ;
- 2.5 cm, soit 2 924 544 mailles.

Pour réaliser cette étude, une simulation en grand volume a été réalisée. L'exutoire opposé au foyer est ouvert et une puissance de foyer de 500 kW est imposée. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 3.2.

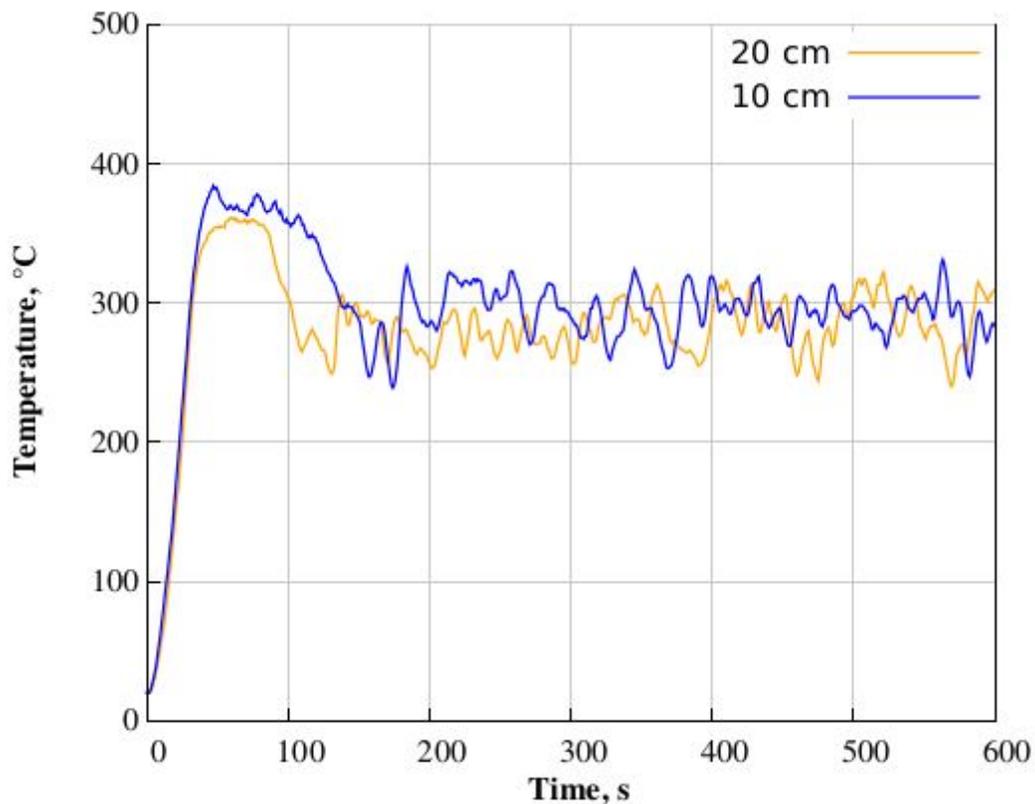


FIGURE 3.2: Comparaison entre des mailles de 10 et 20 cm

Sur ce graphique, on observe une évolution de la température en fonction du temps. La courbe bleue représente les résultats du maillage 10 cm alors que la courbe jaune correspond à ceux obtenus avec le maillage 20 cm. La phase de montée en température est similaire. La principale différence se trouve juste après, lorsque la température diminue. En effet, on observe une baisse plus rapide sur le maillage 20 cm. A l'état stationnaire, les profils sont

décalés mais assez similaires.

La figure 3.3 compare les profils de température pour des tailles de mailles de 5 cm et 20 cm.

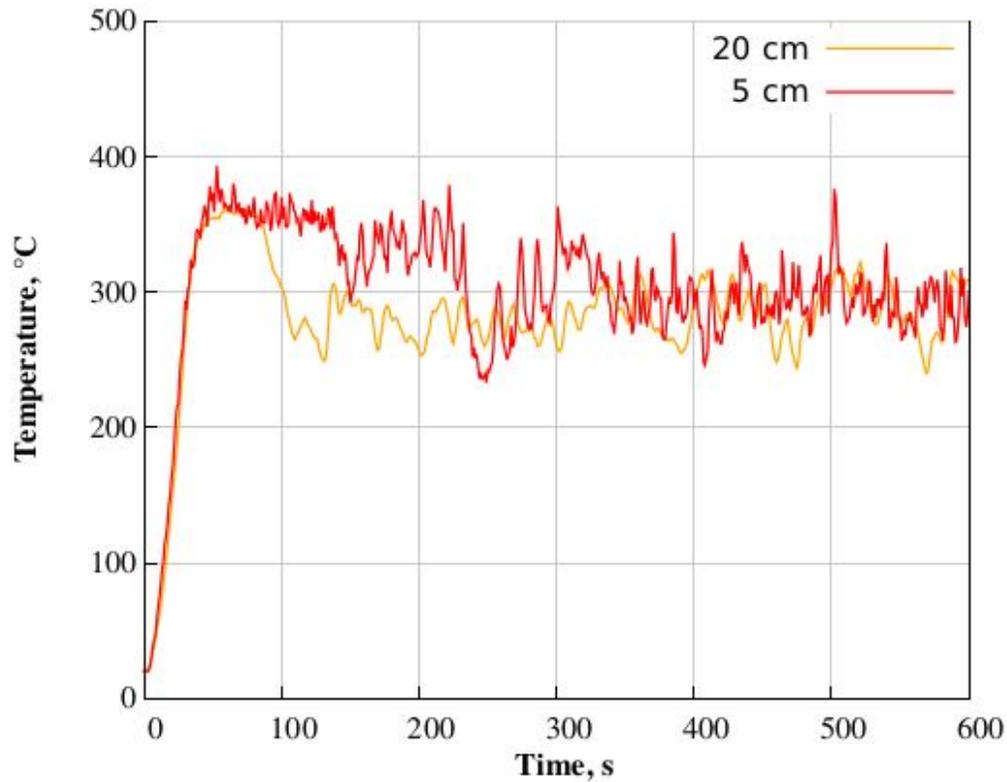


FIGURE 3.3: Comparaison entre des mailles de 5 et 20 cm

La courbe jaune représente à nouveau l'évolution de la température en fonction du temps pour des mailles de 20 cm. La courbe rouge trace la même évolution pour des mailles de 5 cm. Comme pour le graphique précédent, la montée en température est similaire mais une différence de comportement est observable juste après cette phase de montée en température. Sur cette figure, la différence est plus marquée que sur la précédente. De plus, sur la courbe rouge, il est possible d'observer une chute brutale de température qui n'est pas visible sur la courbe 20 cm. Vers 350 s, les profils se rejoignent et redeviennent à nouveau assez proches.

La figure 3.4 illustre les résultats obtenus en traçant l'évolution de la température en fonction du temps avec des mailles de 5 cm pour la courbe rouge et 10 cm pour la courbe bleue. En

comparant ces deux maillages, on observe que la phase de montée en température est toujours très similaire. La chute brutale de température après cette phase de montée observée avec le maillage 20 cm n'est plus présente. Ce dernier point constituait une faiblesse pour le maillage 20 cm.

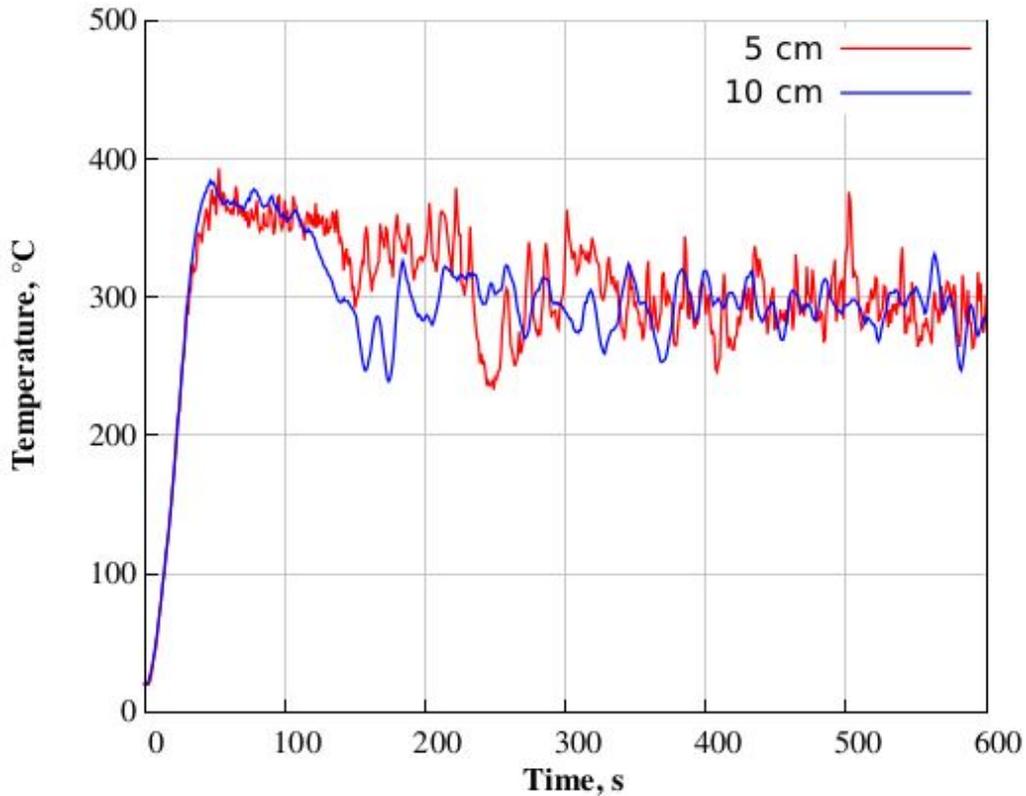


FIGURE 3.4: Comparaison entre des mailles de 5 et 10 cm

Entre 110 secondes et 350 secondes, les deux maillages divergent avant de revenir vers un profil assez proche l'un de l'autre. Il est possible d'observer une descente brutale de température, décalée dans le temps, en fonction du maillage. Ceci peut s'expliquer par l'influence du compartiment et donc, un début de conditions sous ventilées.

Afin de raffiner le maillage au maximum, des tailles de mailles de 2.5 cm ont été testées et comparées aux mailles de 5 cm. Les résultats sont tracés sur la figure 3.5. Les deux profils sont assez similaires. Cependant, à la fin de la phase de montée en puissance, on remarque une légère différence. En effet, la simulation effectuée avec les mailles de 2.5 cm montre une

température légèrement supérieure ainsi qu'une chute brutale juste avant la phase de plein développement. Par ailleurs, aux alentours de 250 secondes, une forte baisse de température est observée pour le maillage 5 cm, mais n'est pas visible avec celui de 2.5 cm.

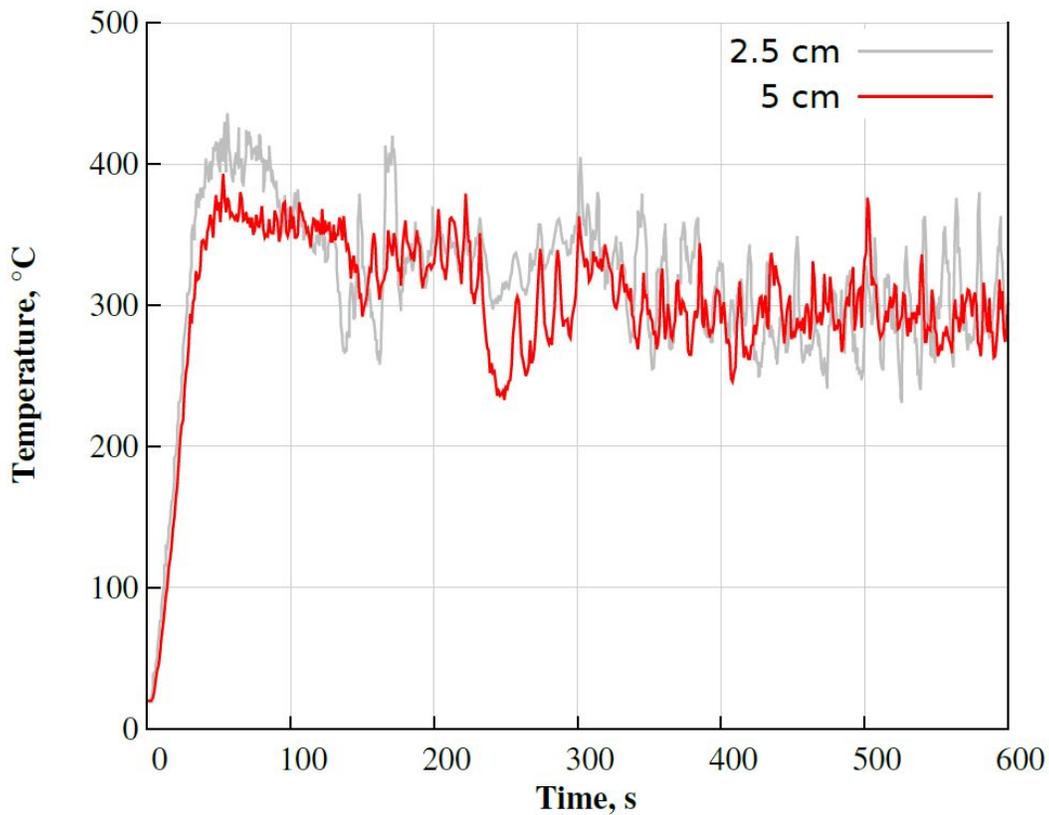


FIGURE 3.5: Comparaison entre des mailles de 5 et 2.5 cm

La dernière figure de cette étude de maillage reprend l'ensemble des maillages testés avec des tailles de mailles de 2.5 cm pour la courbe grise, 5 cm pour la courbe rouge, 10 cm pour la courbe bleue et 20 cm la courbe jaune orangée. La comparaison de ces quatre maillages reprend les conclusions des précédents graphiques mais, bien que moins lisible, cette figure permet de bien observer les différences entre les différents maillages testés.

Le maillage 20 cm se différencie des trois autres avec une chute brutale de température juste après la phase de montée en puissance et ce, sans phase de plein développement. Comme cité précédemment, cette chute apparaît plus tardivement pour les maillages 10 et 5 cm. Pour finir, les quatre maillages se rejoignent à l'état stationnaire. Par ailleurs, sur les maillages 2.5

et 5 cm, il est possible d'observer des pics de températures plus importants que sur les deux autres maillages. Ces pics sont typiques des feux pulsés que l'on retrouve dans des milieux confinés. L'influence du compartiment prend alors tout son sens et permet d'expliquer ces phénomènes. En observant ces variations, on peut supposer que les maillages 2.5 cm et 5 cm permettent une simulation plus proche de ce qui est physiquement attendu que les deux autres maillages étudiés.

D'après la figure 3.6, les maillages les plus fiables semblent être ceux avec des mailles de 2.5 cm et 5 cm.

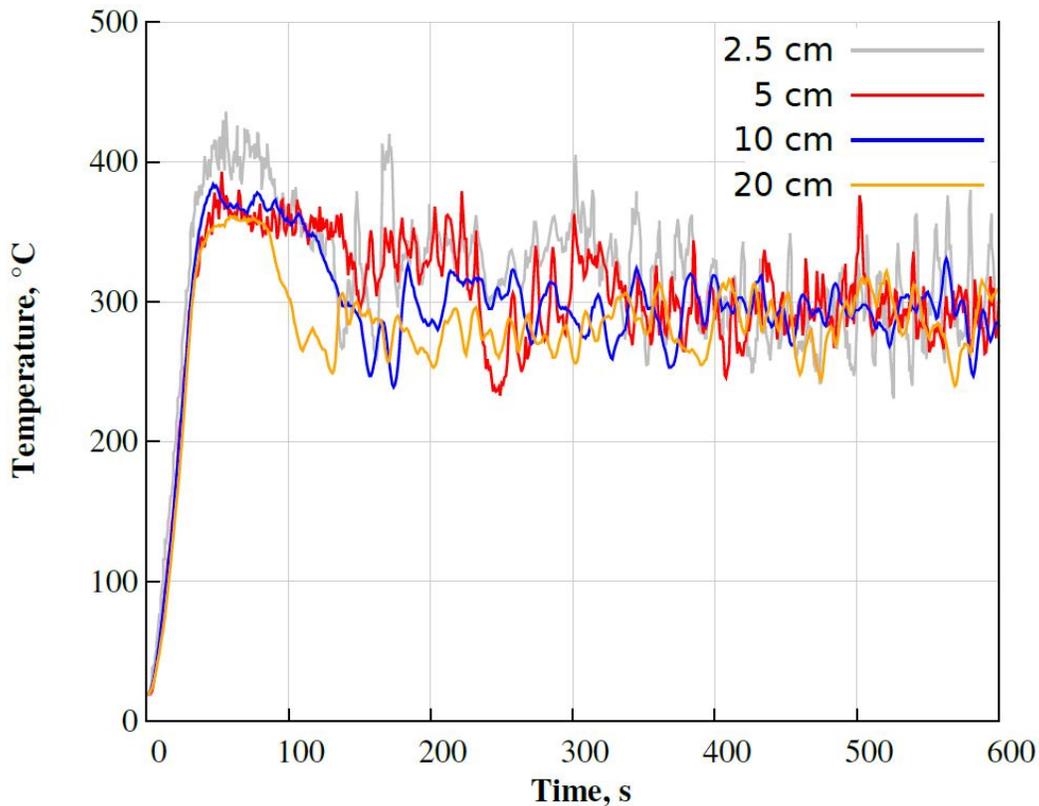


FIGURE 3.6: Comparaison entre des mailles de 2.5, 5, 10 et 20 cm

Cependant, un paramètre non négligeable à prendre en compte est le temps de calcul. Le tableau ci-dessous 3.7 indique pour les différents maillages, le temps nécessaire pour effectuer la même simulation. Pour rappel, le scénario étudié correspond à la cellule expérimentale (détaillée dans le chapitre 3) dans sa configuration grand volume, exutoire opposé au foyer ouvert, avec une puissance de 500 kW.

Tailles des mailles (en cm)	Temps de simulation
Maillage 2.5 cm	9 Jr 7h43min
Maillage 5 cm	17h02min
Maillage 10 cm	1h34min
Maillage 20 cm	7min

FIGURE 3.7: Récapitulatif des temps de simulation, cellule expérimentale 38 m<sup>3</sup>

On observe une différence très importante au niveau des durées de simulation. En raison de son "imprécision", le maillage 20 cm, bien qu'intéressant de par son temps de calcul, ne sera pas utilisé pour ces travaux mais peut généralement être utilisé en Ingénierie de la Sécurité Incendie du fait des très grands volumes à modéliser (>50 000 m<sup>3</sup>). Les maillages 5 cm et 10 cm ont des profils assez similaires mais comme démontré précédemment, certaines différences sont visibles. Avec ses 9 jours de temps de calcul, le maillage 2.5 cm ne peut être retenu.

La figure 3.8 représente la cellule avec un maillage de 5 cm.

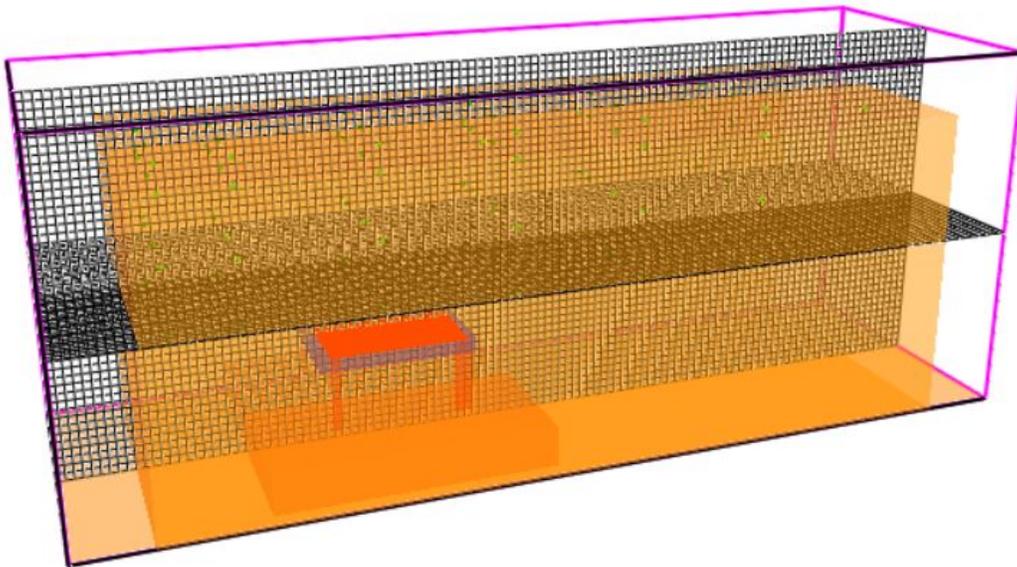


FIGURE 3.8: Vue FDS du maillage de la cellule

Le CORIA disposant d'un accès aux ressources informatiques du Centre Régional Informatique et d'Applications Numériques de Normandie (CRIANN) mettant le super calculateur

Myria à disposition des utilisateurs, les temps de calculs peuvent être réduits. Myria dispose d'environ 10000 cœurs de calcul Intel Broadwell et intègre des accélérateurs GPU Nvidia de dernière génération ainsi que des nœuds hybrides Intel Phi. D'autre part, ce super calculateur permet de lancer plusieurs calculs simultanément sans ralentir les performances de la machine. De plus, il est possible de lancer la simulation sur plusieurs processeurs afin de limiter le temps de calcul.

Pour ces différentes raisons et dans l'optique d'être au plus proche des conditions expérimentales tout en respectant un temps de calcul acceptable, le maillage 5 cm a été retenu pour ces travaux de recherche. En comparant avec les valeurs existantes dans la littérature, on s'aperçoit que la valeur de maillage de 5 cm ressort comme la plus fiable [74].

Afin de vérifier que la simulation est réalisable avec la taille de maille de 5 cm retenue, il est nécessaire de vérifier deux critères importants :

- La condition de Courant–Friedrichs–Lewy (détaillée précédemment) ;
- Le rapport  $D^* / \delta x$ .

La valeur de  $CFL_{max}$  va dépendre du solveur utilisé. Pour un solveur explicite comme celui utilisé dans le logiciel FDS, la valeur retenue sera de 1.

### **Le rapport $D^* / \delta x$ :**

Il s'agit d'un critère spécifique au code de calcul FDS qui permet de vérifier qu'une surface de foyer d'incendie est suffisamment maillée pour être précise. Comme indiqué précédemment, ce critère s'écrit :

$$\frac{D^*}{\delta x} \tag{3.39}$$

Avec :

$D^*$  : Diamètre caractéristique du feu (en m) ;

$\delta x$  : Taille d'une maille (en cm).

Des études réalisées démontrent que pour une valeur comprise entre 4 et 16, la surface de feu est bien couverte [74]. Pour cette étude, la valeur est de 20 en raison de la petite taille de maille utilisée. Au vue de cette valeur, il est supposé que la surface de feu est suffisamment et efficacement couverte.

### 3.3.2 Conditions limites

Afin de simuler au mieux l'expérimental, plusieurs hypothèses de départ ont été formulées. Par la suite, elles ont été ajustées avec les premiers résultats expérimentaux jusqu'à obtenir deux profils de température, numérique et expérimental, assez similaires. La suite de ce chapitre présente les hypothèses testées et ajustées en s'intéressant aux profils de température dans la configuration petit volume, exutoire ouvert ou fermé, à une puissance de 500 kW.

Les résultats numériques et expérimentaux en configuration grand volume pour différentes puissances de feu et différentes grandeurs physiques seront quant à eux présentés dans le chapitre résultats.

La cellule expérimentale utilisée pour les mesures est constituée de deux caissons maritimes dont l'un d'entre eux est totalement dédié aux essais. Pour cela, il est isolé sur le même principe qu'un four industriel (détails dans le chapitre 3). Pour cette raison, la première hypothèse de départ a été de considérer le caisson essais comme étant dans des conditions adiabatiques. Dans le cas d'une simulation en configuration petit volume, exutoire ouvert, avec une puissance de 500 kW, la température en conditions adiabatiques a pu être tracé et est représentée en rouge sur la figure 3.9.

Sur ce graphique, il est possible d'observer un profil de température cohérent ainsi qu'un état stationnaire assez perturbé. Cette observation peut être la conséquence directe de l'influence

du compartiment et donc, de la sous ventilation.

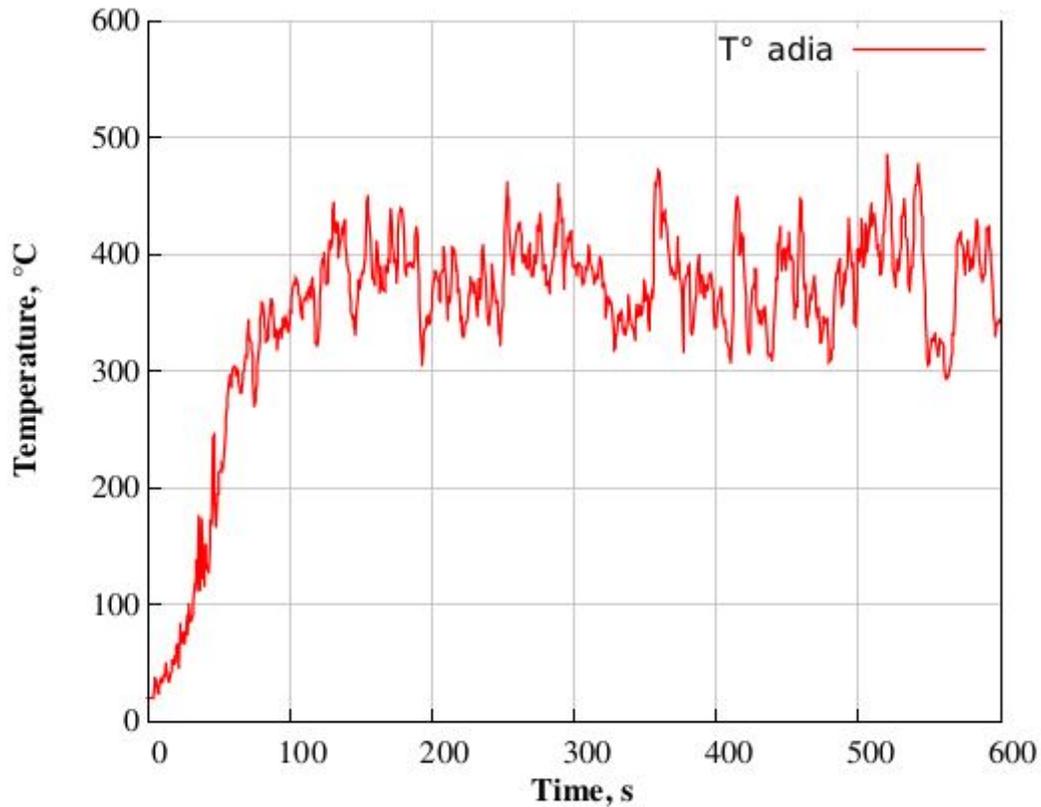


FIGURE 3.9: Profil de température adiabatique

Les conditions adiabatiques étant des conditions de laboratoire, difficilement réalisables à échelle 1, il a été choisi de tester les conditions isothermes aux parois proposées par FDS. Ces dernières sont considérées comme constantes à 20 °C. Les effets de l'isolation ne seront donc pas du tout observables dans ce cas. La courbe orange de la figure 3.10 permet d'observer l'évolution de la température en fonction du temps selon ce critère.

Le profil de température obtenu semble également cohérent, avec un état stationnaire moins perturbé, des températures plus faibles et une phase de plein développement obtenue plus directement après la phase de montée en puissance.

Ces deux courbes, bien qu'assez proches l'une de l'autre, présentent certaines différences. Afin de les analyser, elles sont représentées sur le graphique 3.11. Comme observé précédemment, la courbe aux conditions isothermes FDS, tracée en orange, atteint des températures moins

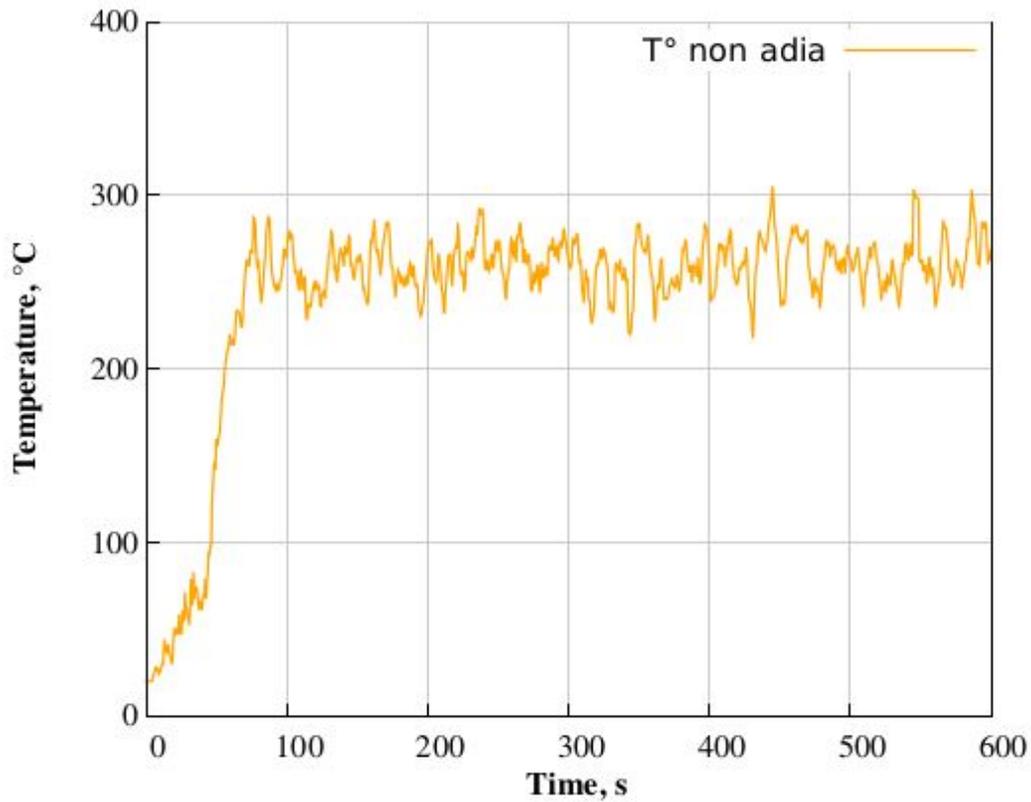


FIGURE 3.10: Profil de température non adiabatique

élevées et arrive à l'état stationnaire rapidement après sa phase de montée en température. Ceci est lié aux échanges entre les parois froides et la couche de fumées chaudes qui conduisent à une baisse de température. D'autre part, son profil est bien moins perturbé que la courbe tracée en rouge, obtenue dans des conditions adiabatiques. Cependant, il est important de noter que les phases de montée en température sont assez proches l'une de l'autre et que les profils de température, bien que différents de par la valeur des températures atteintes, sont plutôt similaires. L'effet du compartiment est plus marqué dans les conditions adiabatiques, d'où le profil plus perturbé et les valeurs de températures plus élevées. Le compartiment et les conditions adiabatiques expliquent également qu'après la phase de montée en puissance, le profil adiabatique continue de monter légèrement. En effet, ceci peut correspondre au flux rayonné par les parois, ce qui sera moins observable avec les conditions isothermes où les parois restent à une température constante de 20 °C.

Dans les mêmes conditions que celles définies précédemment, un essai expérimental a été réalisé.

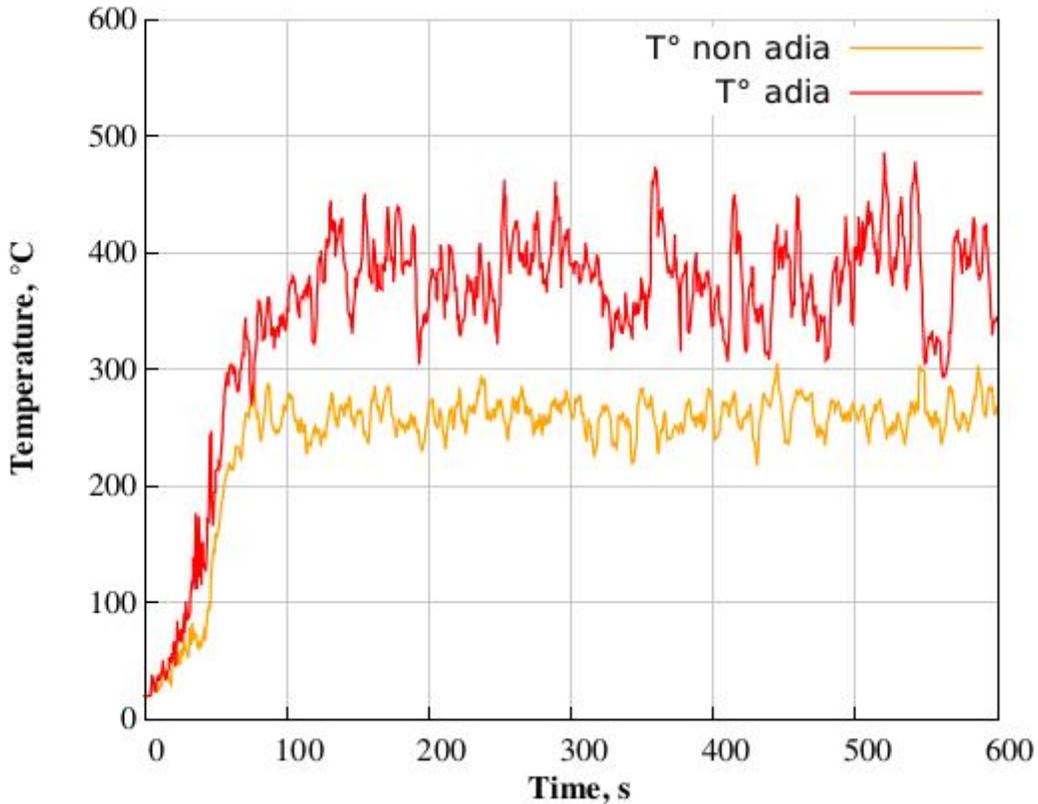


FIGURE 3.11: Comparaison des profils de températures adiabatique et non adiabatique

Ce dernier avait pour but de comparer le profil expérimental obtenu aux profils numériques présentés ci-dessus. La courbe expérimentale est tracée en bleue. Les résultats sont visibles sur la figure 3.12.

Sur ce graphique, plusieurs différences sont observables :

- La phase de montée en puissance apparaît plus tôt en expérimental ;
- Le profil expérimental est bien moins perturbé ;
- Le profil de température expérimental n'atteint pas l'état stationnaire ;
- La température obtenue se situe entre le profil adiabatique et le profil aux conditions isothermes FDS.

Avec ces axes d'amélioration, les profils obtenus numériquement et expérimentalement sont

assez proches. Pour améliorer les simulations numériques, certaines modifications ont été effectuées :

- Modification de la rampe incendie utilisée dans FDS ;
- Prise en compte des différentes couches d'isolants en ajoutant les caractéristiques thermiques exactes dans le code numérique ;
- Ajout de fuites.

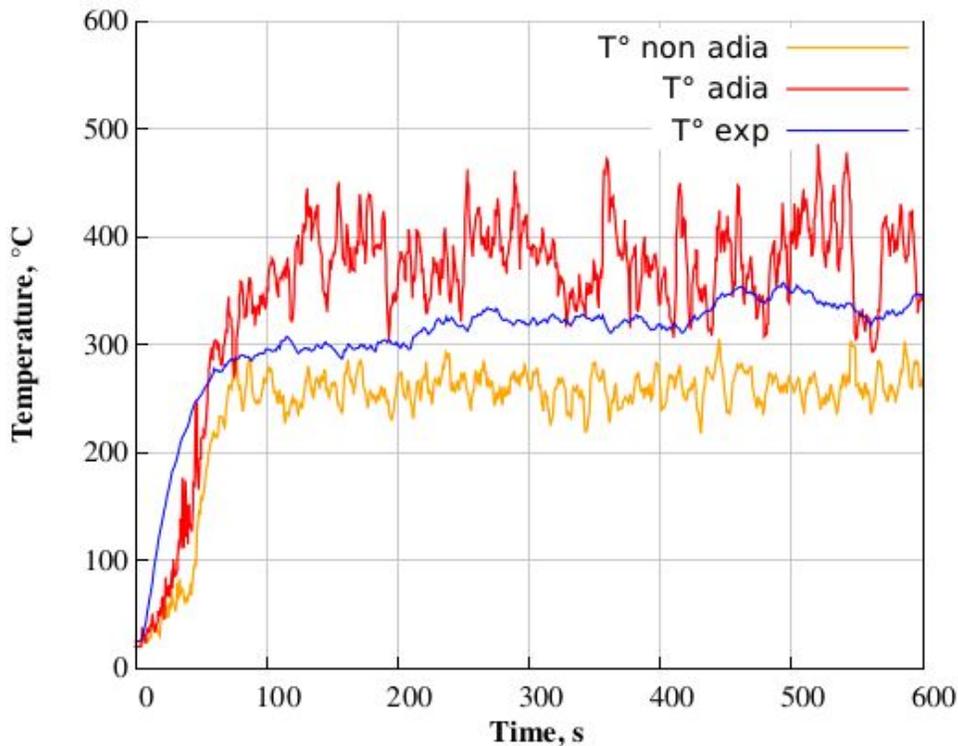


FIGURE 3.12: Comparaison des profils de températures expérimentales et numériques

L'ajout de fuites intervient suite à la comparaison numérique / expérimentale de cette simulation en milieu clos (exutoire fermé, 500 kW, petit volume). En effet, numériquement, la simulation ne produit plus de flammes à partir de quelques secondes. En expérimental, les flammes sont toujours présentes. Il a été conclu qu'un apport d'air se faisait malgré l'isolation et qu'il n'était pas pris en compte dans les modélisations initiales (étanchéité parfaitement modélisée). Le caisson expérimental n'est donc pas complètement hermétique. C'est ce constat qui est à l'origine de l'ajout de fuites dans le scénario numérique.

La courbe numérique obtenue suite à ces modifications est à nouveau tracée et comparée à la courbe expérimentale. Les résultats sont visibles sur la figure 3.13.

Grâce à ces modifications, de nombreuses améliorations sont visibles :

- La phase de montée en puissance est similaire ;
- Le profil de température numérique est moins perturbé que précédemment ;
- L'écart de température, bien que toujours présent, est réduit ;
- L'état stationnaire n'est pas atteint dans les deux cas.

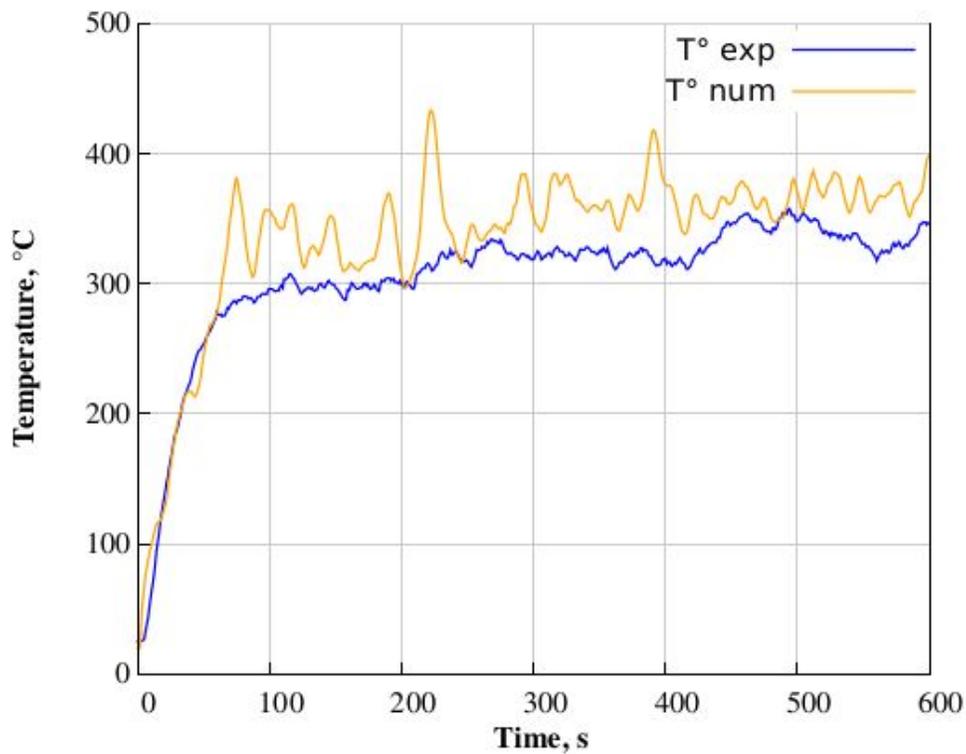


FIGURE 3.13: Comparaison des profils de températures expérimentales et numériques modifiés

Bien que moins perturbé que précédemment, le profil numérique reste moins linéaire que le profil expérimental avec par endroit, de fortes variations de températures. Ceci peut s'expliquer par le temps de réponse des thermocouples qui ne permet pas d'observer le phénomène d'intermittence entrée d'air frais / sortie de fumées chaudes. Ce phénomène, typique des feux pulsés, sera largement détaillé dans le chapitre résultats.

## 3.4 Conclusion du chapitre 3

Ce chapitre avait deux objectifs principaux. Tout d'abord, présenter les équations de base utilisées dans le cas d'un écoulement à faible nombre de Mach. Par la suite, une présentation du code de calcul FDS utilisé pour ces travaux de recherche a été effectuée. Sans aller trop profondément dans les détails du code, une bonne compréhension des principes généraux ainsi que des équations de base permet d'analyser les résultats obtenus avec un œil critique. En effet, connaître les capacités du code, ses points forts comme ses faiblesses, permet d'adapter les hypothèses de départ et ainsi améliorer la qualité des simulations numériques obtenues. La deuxième partie de ce chapitre visait à détailler les hypothèses qui ont été formulées pour réaliser les simulations numériques et ainsi comprendre le raisonnement qui a mené jusqu'à la formulation de celles-ci. La comparaison numérique / expérimentale a permis d'adapter les hypothèses de départ et ainsi, d'obtenir des simulations proches des résultats expérimentaux. Les comparaisons ont été réalisées à partir de mesures de température. Ces premières analyses simplifiées permettront d'étudier des valeurs de température plus complexes ainsi que des champs de vitesses.



# Chapitre 4

## Résultats

Afin d'analyser la dynamique des fumées d'incendie, plusieurs techniques de mesures ont été mises en place. La chimiluminescence permet dans un premier temps de caractériser le brûleur. Dans un second temps, les mesures de températures et la PIV ont permis une analyse plus fine des fumées d'incendie, permettant ainsi d'améliorer la compréhension de la dynamique des gaz chauds lors d'un feu de compartiment.

### 4.1 Chimiluminescence

Pour débiter l'analyse des fumées produites par le brûleur, il a tout d'abord fallu caractériser la structure de la flamme. Pour cela, les signaux de chimiluminescence émis naturellement par le radical  $\text{OH}^*$  ont été mesurés dans la configuration petit volume exutoire ouvert. Ces derniers présentent l'avantage d'être présents uniquement dans la zone de flamme, ce qui permet donc de la caractériser efficacement [45], [68].

Les essais de chimiluminescence ont été réalisés avec un gain de 100 et une ouverture de  $50\mu\text{s}$  et ce, pour une puissance de 500 kW obtenue à partir de propane. 2000 images ont été enregistrées afin d'obtenir une image moyenne fiable. Pour rappel, le montage utilisait une caméra PIMAX 4. Le détail de l'installation est disponible sur la figure 2.12 du chapitre 2. La figure 4.1 présente l'image moyenne de l'émission du radical  $\text{OH}^*$  dans les flammes du brûleur

Firediag. Sur cette dernière, il est possible d'observer des flammes moyennes présentes dans le brûleur sur une largeur de 750 mm et présentant une hauteur comprise entre 500 et 550 mm.

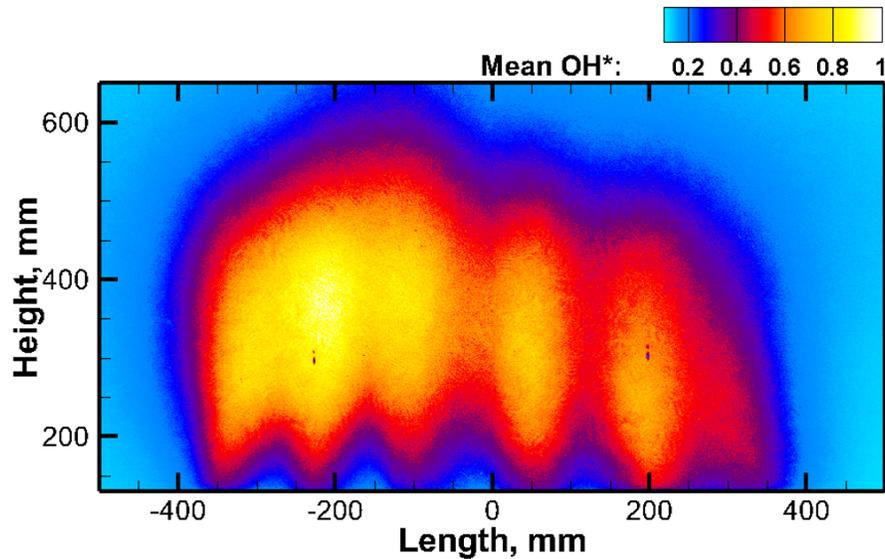


FIGURE 4.1: Moyenne de l'émission  $\text{OH}^*$

Cette image met en évidence la répartition inégale de la zone de flamme au sein même du brûleur. En effet, l'émission du radical  $\text{OH}^*$  est bien plus forte sur la partie gauche de l'image, indiquant alors une zone de réaction plus importante dans cette partie de la flamme. Par conséquent, les flammes du brûleur ne sont pas symétriques. La partie droite présente une intensité mais aussi une hauteur de flamme bien plus faible.

Ce constat peut être dû à un défaut de réglage des cols soniques, entraînant alors une répartition inégale des pertes de charges dans les buses du brûleur.

La figure 4.2 présente quant à elle, la Root Mean Square (RMS) de présence de l'espèce  $\text{OH}^*$ . Sur cette dernière, les disparités observées précédemment sont toujours présentes mais moins marquées.

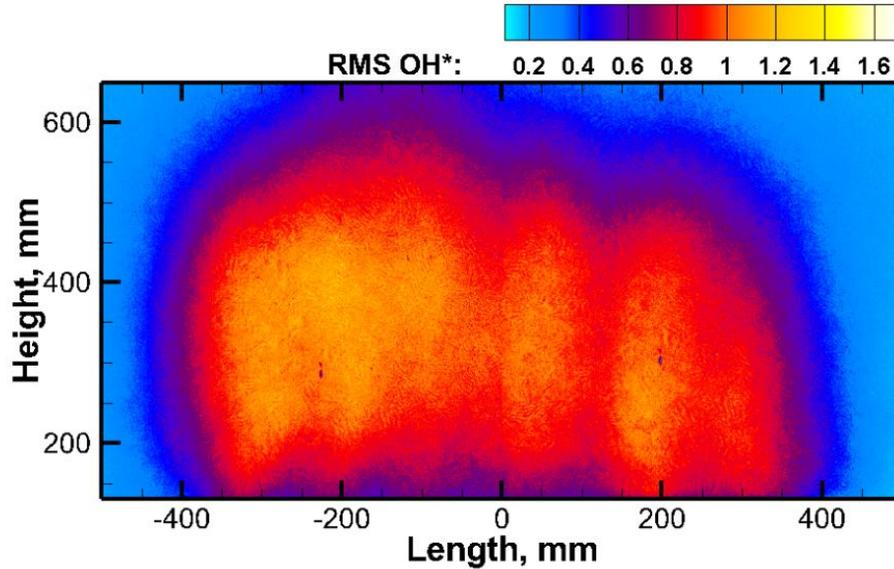


FIGURE 4.2: RMS de l'espèce OH\*

## 4.2 Champs de températures instantanées

Lors d'un feu de compartiment, la température des fumées est un paramètre important à prendre en compte car il est en parti à l'origine du risque de phénomène thermique. Afin de débiter l'étude des fumées produites par le brûleur, l'évolution de la température a été mesurée. Ces mesures ont été faites en partie haute de la cellule, comme présenté sur la figure 2.14 du chapitre 2. Les valeurs ont été moyennées sur l'ensemble des dix thermocouples composant l'arbre de mesures avant d'être tracées pour observer leur évolution. Afin de comparer les valeurs obtenues expérimentalement avec celles simulées numériquement grâce au code de calcul FDS, les données numériques obtenues pour les mêmes emplacements que les thermocouples expérimentaux ont été extraites. Les résultats présentés ci-dessous comparent les profils de températures numériques et expérimentaux et apportent des éléments de réponse sur les différences observées lorsque cela est le cas. Ces essais ont été réalisés pour des puissances de 200 kW, 500 kW et 800 kW afin de représenter des cas de foyers dans des conditions ventilées, sous ventilées et largement sous ventilées.

Ces essais ont été réalisés dans la configuration grand volume avec exutoire ouvert. Pour rappel, le détail de cette configuration est disponible sur la figure 2.8 du chapitre 2.

### 4.2.1 Essais à 200 kW

Pour débiter ces essais, la puissance de 200 kW a été choisie car elle correspond, théoriquement, au cas d'étude optimal pour observer le développement du feu dans des conditions de ventilations idéales. Pour cela, la comparaison des courbes numériques et expérimentales est tracée et observable sur la figure 4.3.

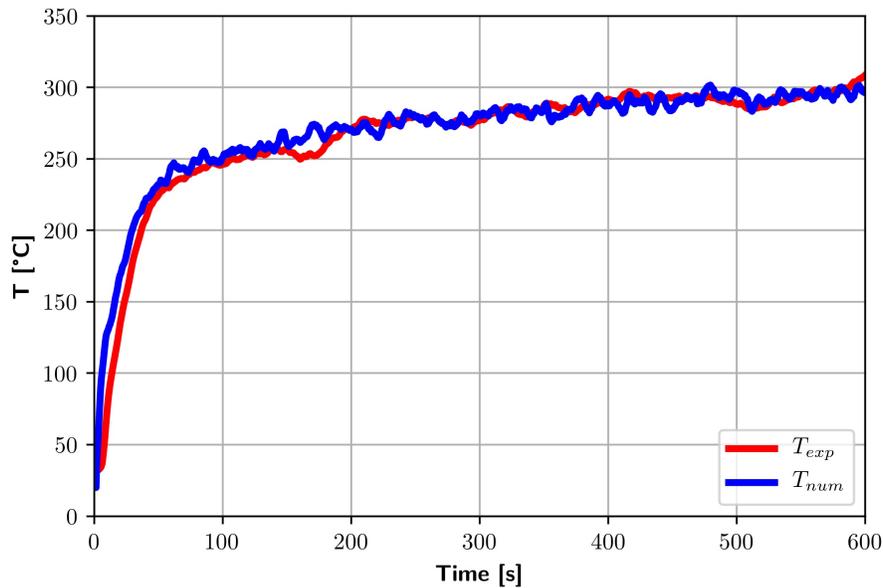


FIGURE 4.3: Comparaison des profils de température numérique / expérimentale à 200 kW

La courbe bleue représente les valeurs numériques alors que la rouge correspond à celles obtenues expérimentalement. Sur ce graphique, les deux profils de températures sont relativement proches l'un de l'autre. En effet, une très légère différence est observable lors de la phase de montée en puissance mais la dynamique globale ainsi que la phase de plein développement sont relativement similaires. De plus, en expérimental comme en numérique, l'état stationnaire n'est pas complètement atteint.

Dans cette configuration, il est important de noter la présence de phénomène d'intermittence au niveau des exutoires qui ne sont que peu visibles sur les courbes. En effet, dans la configuration étudiée actuellement (grand volume, exutoire ouvert), l'exutoire est l'unique ouverture vers l'extérieur. C'est à la fois le lieu d'évacuation des gaz chauds mais aussi l'entrée d'air frais nécessaire à l'alimentation du foyer en oxygène. Dans ce type de configuration, l'incendie

se développe de la manière suivante :

- Développement normal du feu, évacuation des fumées chaudes par l'exutoire. Foyer bien ventilé ;
- Manque d'oxygène, diminution de la puissance du feu. Ce constat entraîne une baisse de pression dans le volume ce qui permet à l'air frais d'entrer dans le compartiment, apportant ainsi de l'oxygène au foyer. Ceci engendre à nouveau le développement du feu, augmentation de la pression dans le volume et évacuation de fumées chaudes ;
- Ce phénomène d'intermittence se reproduit jusqu'à épuisement du combustible ou un événement extérieur tel que l'ouverture d'une porte, l'intervention des sapeurs-pompier.

Ce phénomène, connu sous le nom de "pulsating fires", est largement étudié dans la littérature [12], [76], [94], [107]. Dans le cas étudié, ce phénomène reste assez limité en raison des conditions de ventilation correctes qui permettent un bon développement du feu.

La figure 4.4 représente le développement du feu à 300 secondes.

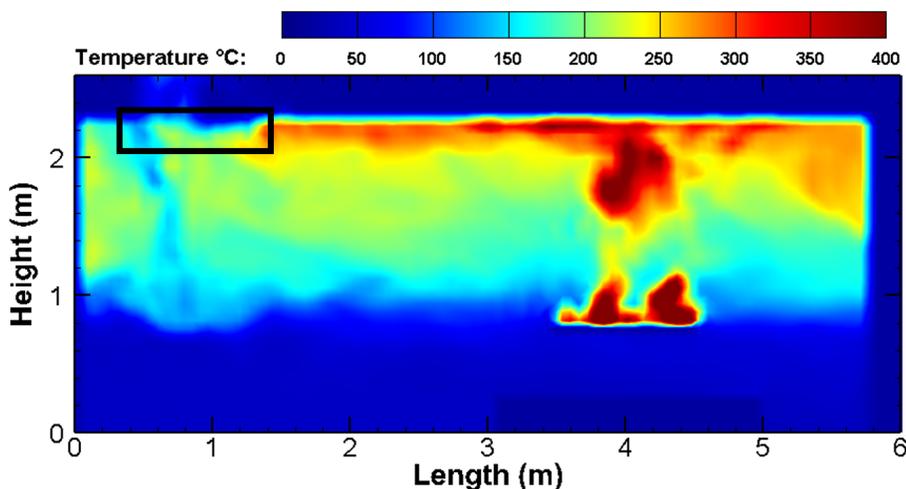


FIGURE 4.4: Champs de température instantanée à 200 kW, 300 s, simulation FDS

Cette vue numérique d'un champ de température instantané permet d'apprécier la répartition des gaz ainsi que des températures dans la cellule essais pour une puissance de foyer de 200kW. Sur cette figure, il est notamment possible d'observer l'entrée d'air frais (en bleu) par l'exutoire. Le foyer étant à une puissance modérée, l'entrée d'air frais et l'évacuation des fumées chaudes peuvent se faire en même temps, par la même ouverture (ici l'exutoire en

partie haute du volume).

### 4.2.2 Essais à 500 kW

La suite de ces essais de mesure de température a été effectuée à une puissance de 500 kW. Cette puissance a permis d'étudier des températures de fumées chaudes dans le cas d'un feu rapidement sous ventilé. Comme pour l'essai à 200 kW, les profils de température expérimental en rouge et numérique en bleu, sont tracés et comparés en fonction du temps. Ils sont visibles sur la figure 4.5.

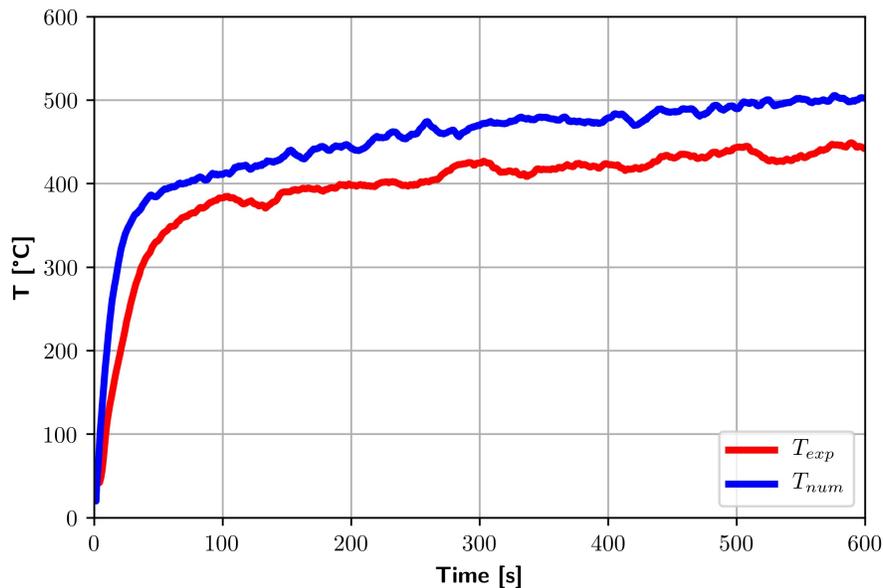


FIGURE 4.5: Comparaison des profils de température numérique / expérimentale à 500 kW

Sur ce graphique, il est possible d'observer une légère différence entre les deux courbes. Bien que le développement global de l'incendie soit bien modélisé avec un profil cohérent avec celui observé en expérimental, les valeurs numériques surestiment la température dans le local ainsi que la rapidité de la phase de montée en puissance.

Cette observation peut être expliquée par le fait que le logiciel FDS est connu pour légèrement surestimer la température en présence de conditions faiblement sous-ventilées [51], [66], ce qui est le cas pour la puissance de 500 kW.

Par ailleurs, la figure 4.5 permet d'observer à nouveau que l'état stationnaire n'est pas atteint. Ceci peut-être expliqué par l'importante isolation mise en place à l'intérieur du caisson essais qui pourrait fortement rayonner et donc, influencer l'obtention d'un état stationnaire stable.

La figure 4.6 représente le champ de température instantané obtenu numériquement à 300 secondes.

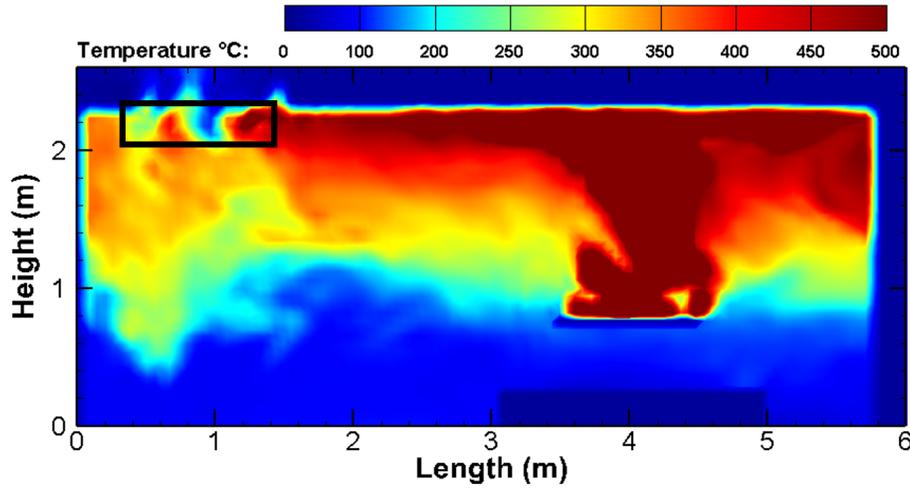


FIGURE 4.6: Champs de température instantané à 500 kW, 300 s, simulation FDS

Il est possible d'observer que la température des fumées est plus élevée que dans le cas d'une puissance de 200 kW. D'autre part, le volume occupé par les gaz chauds est important. Une entrée d'air frais et une sortie de fumées chaudes est cependant observée simultanément au niveau de l'exutoire. Les conditions commencent à être sous ventilées mais le développement du feu reste possible physiquement et encore correctement simulé numériquement.

### 4.2.3 Essais à 800 kW

Pour finir, la puissance de 800 kW a été testée. Lors de ce brûlage, les conditions étaient fortement sous ventilées, notamment pour observer la fiabilité du code de calcul numérique dans un cas extrême.

A nouveau, les profils de température en fonction du temps sont tracés. Sur la figure 4.7, on

observe que la courbe numérique, représentée en bleue, diffère fortement du profil attendu et obtenu expérimentalement, visible en rouge. En effet, la phase de montée en puissance est fortement altérée sur le profil numérique. A contrario, la phase de plein développement est plutôt bien simulée, notamment à partir de 300s. Comme cité précédemment, les profils de températures numériques obtenus avec le logiciel FDS peuvent être faussés lors de conditions fortement sous-ventilées. Dans ce cas-là, il est possible de coupler les simulations FDS à un modèle HVAC afin d'obtenir des résultats satisfaisants [66], [117], [37]. Ceci n'a pas été effectué lors de ces travaux.

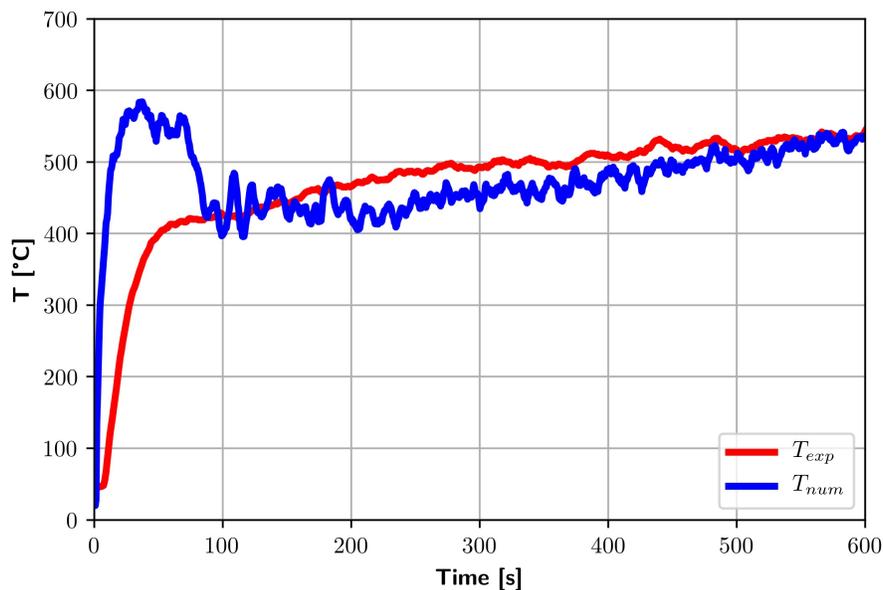


FIGURE 4.7: Comparaison des profils de température numérique / expérimentale à 800 kW

La vue numérique du champ de températures instantanées pour une puissance de 800 kW est représentée sur la figure 4.8. Comme pour les cas précédents, la vue est effectuée pour un temps simulé de 300 secondes. Sur cette figure, il est possible d'observer que les fumées remplissent complètement le volume. De plus, l'exutoire ne permet plus d'avoir simultanément une entrée d'air frais et une sortie de fumées chaudes. Dans ce cas de figure, le feu est fortement sous ventilé.

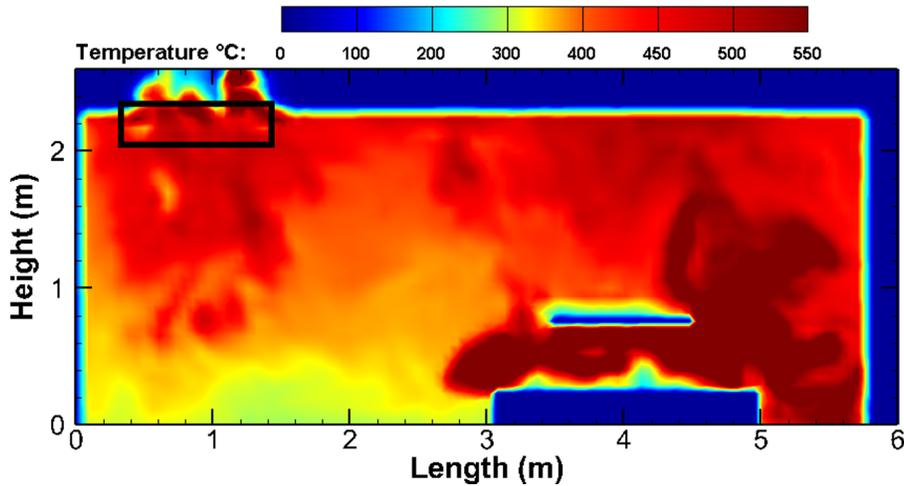


FIGURE 4.8: Champs de température instantanée à 800 kW, 300 s, simulation FDS

#### 4.2.4 Comparaison du Heat Release Rate (HRR)

Afin de confirmer les hypothèses précédentes sur les difficultés de modélisation numérique lors d'un cas fortement sous-ventilé, il est proposé d'étudier le HRR numérique des trois puissances présentées précédemment.

Pour cela, la figure 4.9 présente les HRR tracés pour des valeurs de 200 kW 4.9(a), 500 kW 4.9(b) et 800 kW 4.9(c).

Sur la figure 4.9(a), il est possible d'observer un HRR stable, sans fluctuations majeures, restant à la puissance indiquée de 200 kW tout le long de la simulation.

Sur la figure 4.9(b), on remarque que le HRR numérique est moins stable, avec un début de fluctuation. Cependant, les variations restent proches de la valeur de 500 kW initialement imposée.

Pour finir cette étude, la figure 4.9(c) présente la courbe obtenue lors d'un HRR numérique simulé à 800 kW. Sur ce graphique, on observe que le code ne calcul n'arrive pas à simuler un HRR stable dans des conditions aussi extrêmes, ce qui entraîne inévitablement un simulation peu fiable, ce qui est constaté sur la figure 4.7.

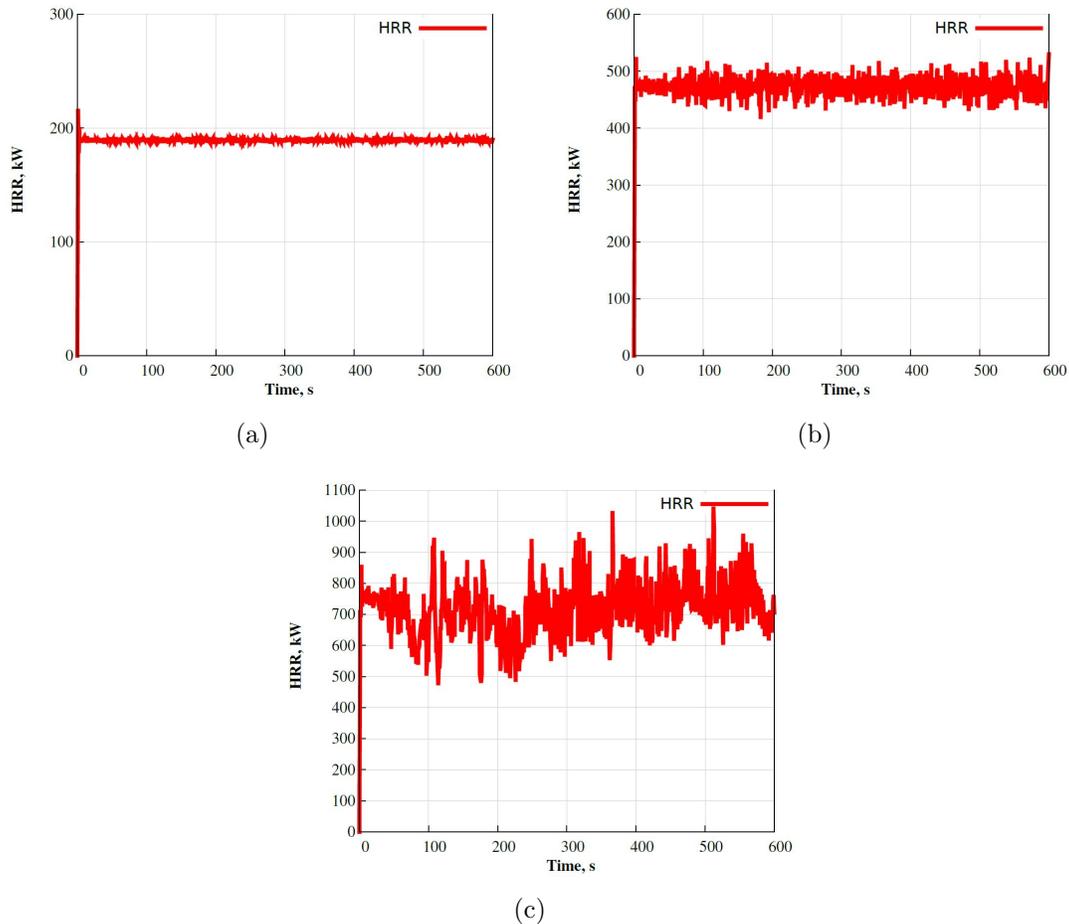


FIGURE 4.9: Courbes HRR à 200 kW (a), 500 kW (b), 800 kW (c)

### 4.3 Flux thermiques

Lors d'un feu de compartiment, le flux thermique généré par l'incendie peut être à l'origine d'une propagation du feu. Pour cela, il était important de quantifier les valeurs de flux thermiques présentes dans la cellule. Afin d'évaluer ces derniers au moment des essais, trois mesures ont été réalisées. Comme pour les essais de température, les puissances de 200 kW, 500 kW et 800 kW ont été utilisées. Ces mesures sont en réalité une moyenne effectuée à l'état stationnaire, sur 600 secondes. Pour rappel, la position du fluxmètre, à l'opposé du brûleur et proche du sol, est visible sur la figure 2.13 du chapitre 2. Les vues numériques présentées ci-dessous sont des valeurs de flux thermiques instantanés, permettant de comparer approximativement les résultats obtenus mais aussi d'illustrer les mesures expérimentales effectuées

lors des essais.

Lors de l'essai à 200 kW, le flux thermique mesuré était de 10 kW/m<sup>2</sup>. La figure 4.10 représente le flux thermique calculé numériquement dans la cellule pour cette même puissance, à un instant donné.

Cette figure permet de visualiser la répartition des flux pour cette puissance. Bien que la puissance soit faible, les flux présents dans la cellule pourraient dégrader une partie du matériel présent pour les mesures.

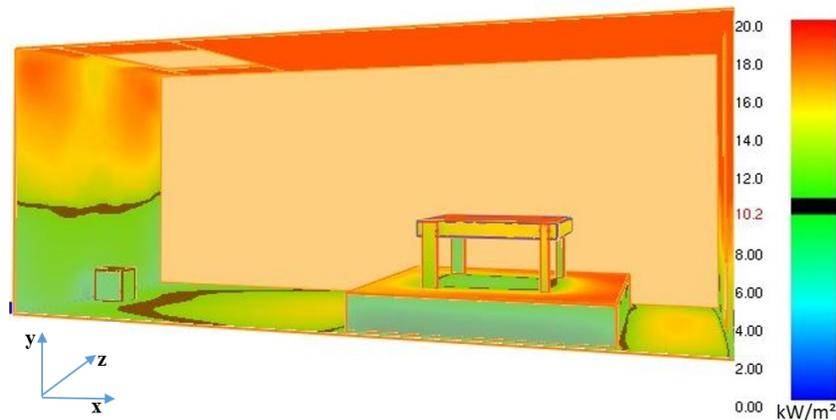


FIGURE 4.10: Représentation numérique du flux thermique reçu par les obstacles modélisés à 200 kW

Pour une puissance de 500 kW, le flux thermique relevé expérimentalement était de 17 kW/m<sup>2</sup>. Cette valeur s'approche de celle du flashover, très contraignante pour les appareils de mesure. La figure 4.11 illustre la répartition des flux thermiques obtenus grâce au logiciel FDS. Les résultats sont cohérents avec ceux mesurés expérimentalement.

Pour finir, les flux thermiques présents dans la cellule lors d'un essai à 800 kW sont représentés sur la figure 4.12. Lors de la campagne de mesures expérimentales, les valeurs obtenues étaient de l'ordre de 25 kW/m<sup>2</sup>. Cette valeur, supérieure à celle nécessaire pour obtenir un flashover, a été une véritable contrainte pour le matériel de mesure mais aussi pour l'ensemble des flexibles d'air présents dans la cellule. Il a par ailleurs été nécessaire d'être vigilant sur le refroidissement du volume entre deux essais du fait du rayonnement des parois post-

brûlage.



FIGURE 4.11: Représentation numérique du flux thermique reçu par les obstacles modélisés à 500 kW

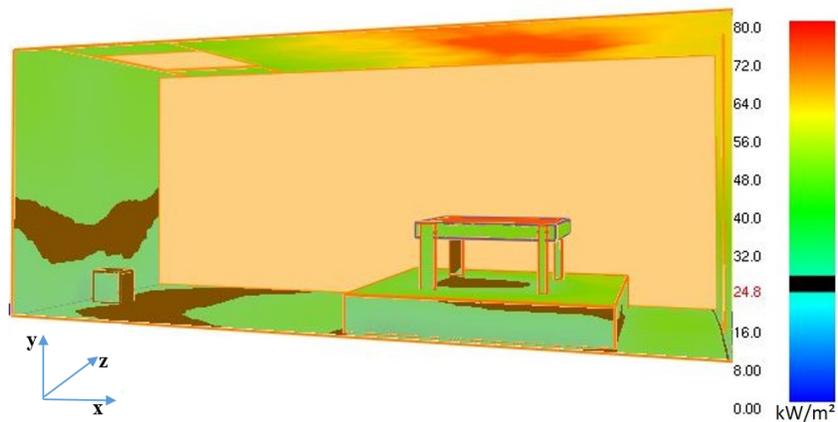


FIGURE 4.12: Représentation numérique du flux thermique reçu par les obstacles modélisés à 800 kW

#### 4.4 Champs de températures moyennes

Comme évoqué dans le chapitre 2, une partie de la cellule essais a été sondée à douze endroits différents grâce à un arbre de vingt thermocouples. Pour chaque position, la température expérimentale a été relevée pendant 600 secondes et comparée aux résultats numériques. Pour

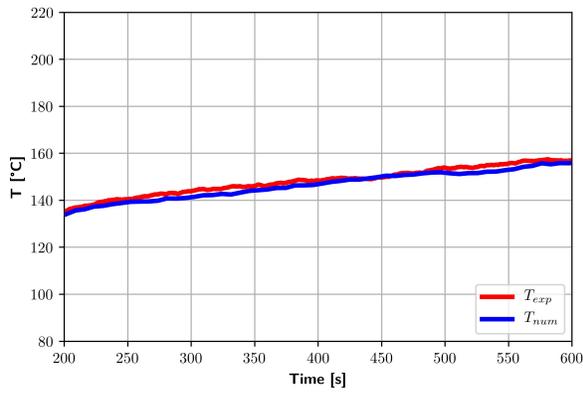
une seule et même puissance, le temps de mesure cumulé des douze positions était de 7200 secondes, soit deux heures. Ceci a permis d'observer le développement du feu ainsi que l'évolution des simulations numériques pour un temps donné relativement long. Pour la puissance de 800 kW, le temps de mesure a été réduit à 500 secondes par position afin de tenir compte des difficultés de brûlage. Pour n'étudier que la phase de plein développement, les résultats seront présentés de 200 à 600 secondes. Pour rappel, cette installation est visible sur la figure 2.15.

Pour chaque puissance de foyer, douze graphiques, correspondant à chaque position de l'arbre de thermocouples, ont été tracés. Ces derniers vont permettre de comparer les températures expérimentales et numériques obtenues pour une même position. Pour obtenir ces courbes, les valeurs des vingt thermocouples ont été moyennées afin d'obtenir un seul point de mesure. Afin de faciliter la lisibilité, ces graphiques ont été répartis sur deux figures. La première permet d'observer les courbes pour les positions 1 - 6 alors que la deuxième met en évidence les courbes pour les positions 7 - 12. Les valeurs expérimentales sont représentées en rouge alors que celles numériques le sont en bleue.

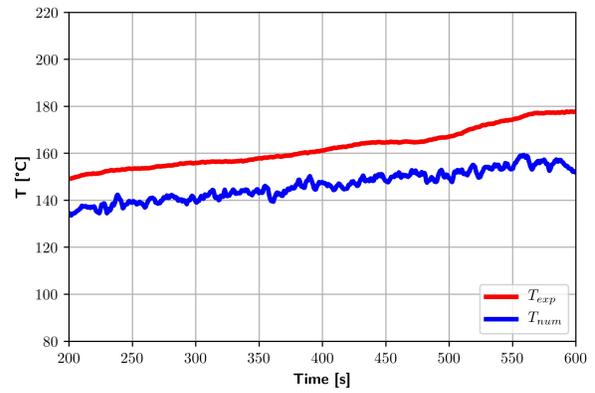
Pour finir, les valeurs de chaque position ont été moyennées en temps et en température afin d'obtenir une seule valeur. Ceci a permis de comparer la température moyenne sur l'ensemble de la position. Ces résultats seront présentés sous forme d'histogrammes.

#### 4.4.1 Essais à 200 kW

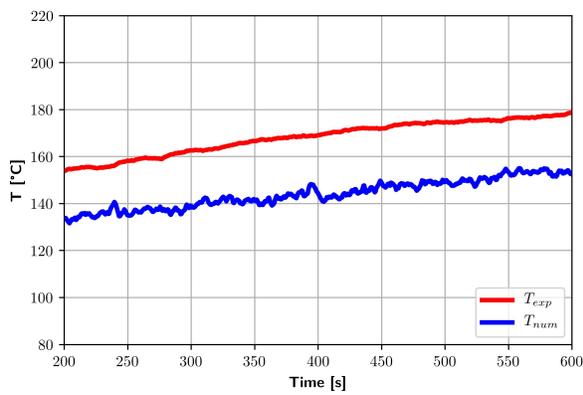
Pour les essais à 200 kW, les courbes comparatives des valeurs numériques et expérimentales sont tracées sur les figures 4.13 et 4.14. La couleur rouge représente les valeurs obtenues expérimentalement alors que celles obtenues numériquement sont tracées en bleue. Sur les graphiques 4.13(a) et 4.13(b), il est possible d'observer des profils très proches, que ce soit au niveau de la température ou de la phase de plein développement. De plus, l'état stationnaire n'est atteint dans aucun des cas. Cependant, au cours des essais, une différence de température va s'installer entre les courbes expérimentales et numériques. C'est ce qui est visible sur les figures 4.13(c), 4.13(d), 4.13(e) et 4.13(f).



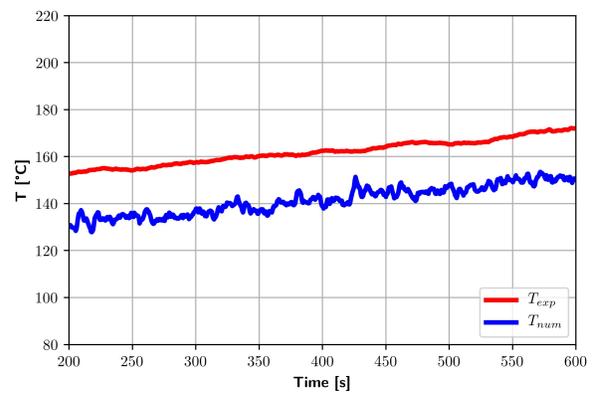
(a)



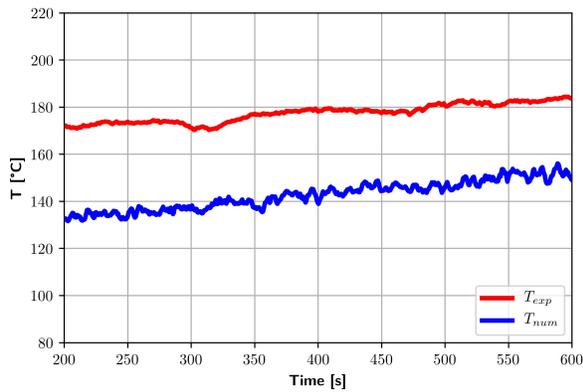
(b)



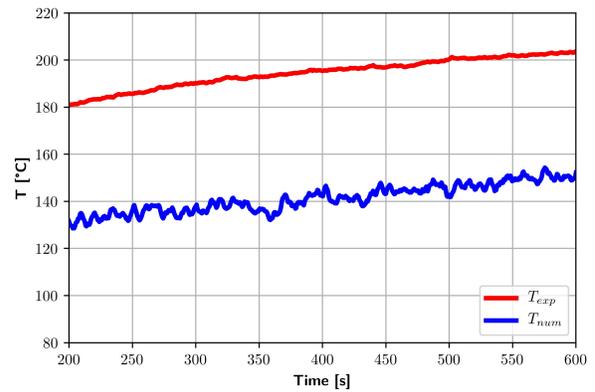
(c)



(d)



(e)

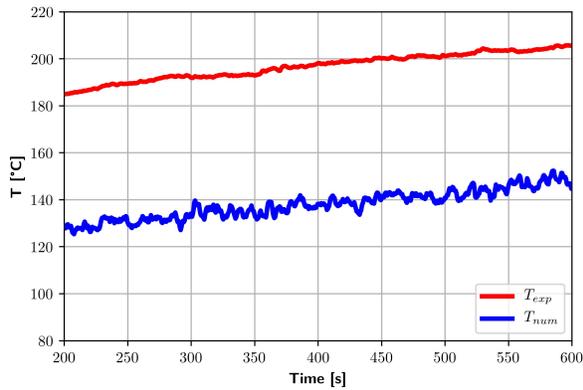


(f)

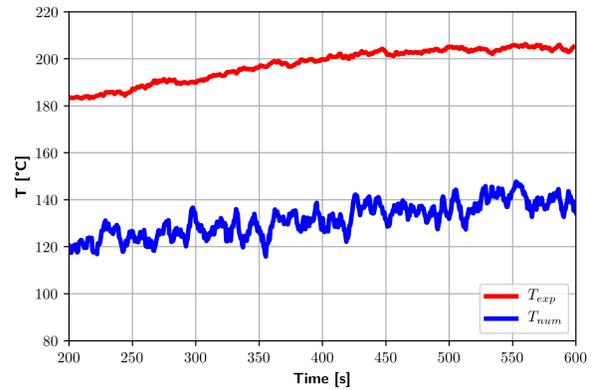
FIGURE 4.13: Températures numériques et expérimentales à 200 kW, Position 1 (a), Position 2 (b), Position 3 (c), Position 4 (d), Position 5 (e), Position 6 (f)

Cette différence d'environ  $20^{\circ}\text{C}$  sur la figure 4.13, va s'intensifier au fil des essais jusqu'à atteindre une différence de presque  $50^{\circ}\text{C}$ . C'est ce que montrent les figures 4.14(a), 4.14(b),

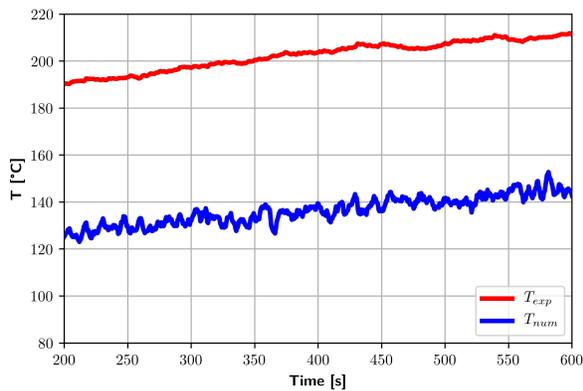
4.14(c), 4.14(d), 4.14(e) et 4.14(f).



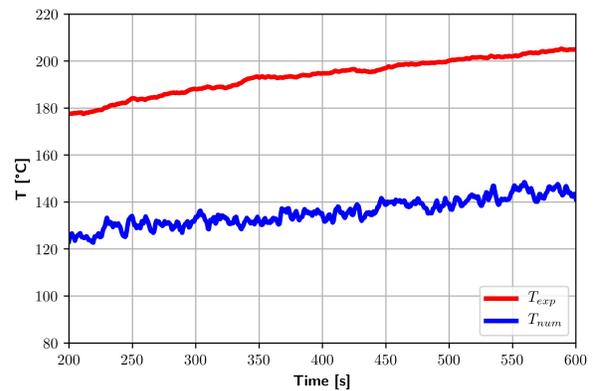
(a)



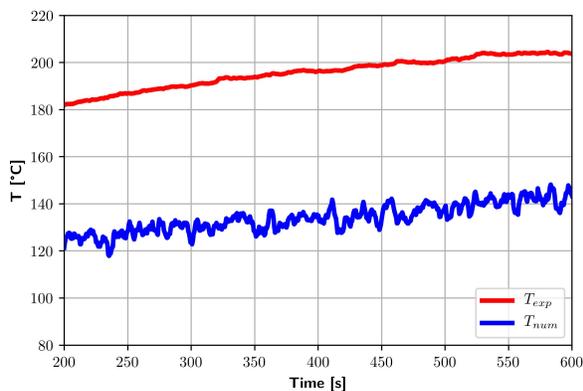
(b)



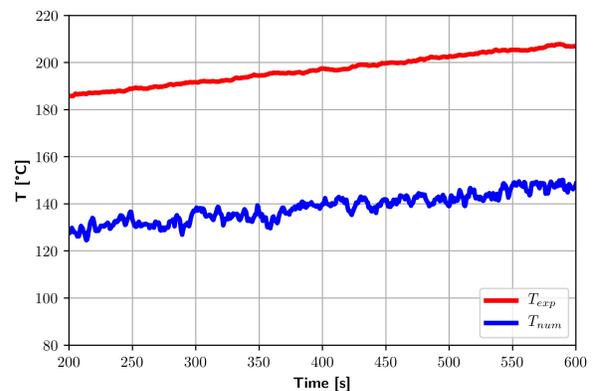
(c)



(d)



(e)



(f)

FIGURE 4.14: Températures numériques et expérimentales à 200kW (suite), Position 7 (a), Position 8 (b), Position 9 (c), Position 10 (d), Position 11 (e), Position 12 (f)

Afin de vérifier l'analyse réalisée à partir des courbes, l'histogramme représentant les valeurs

moyennes, en temps et en température, est tracé à la figure 4.15. Sur ce dernier, il est possible d’observer que les températures expérimentales deviennent de plus en plus importantes au cours de la première heure (1 position égale 10 min). Par la suite, elles semblent être stabilisées. A l’inverse, les températures numériques restent constantes tout au long des deux heures d’essais.

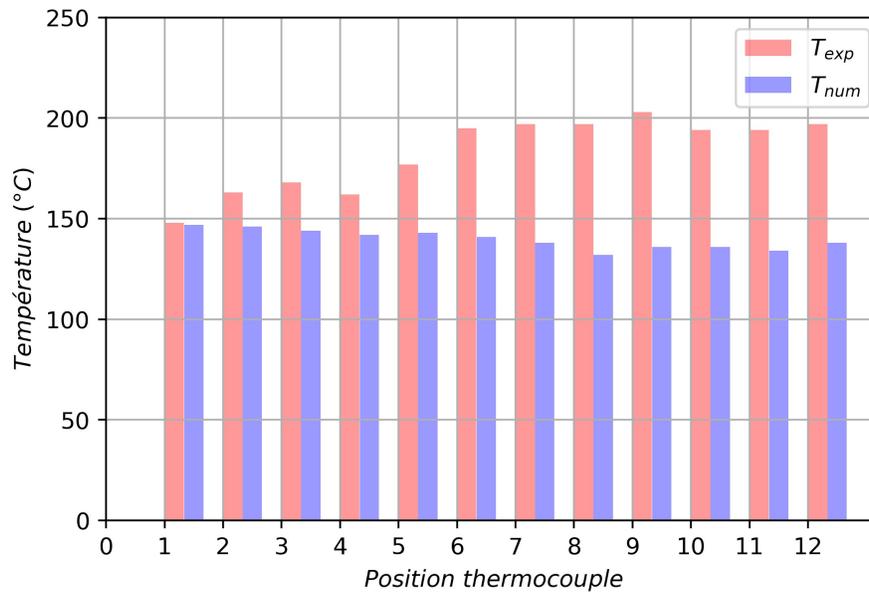


FIGURE 4.15: Comparaison de la température moyenne de l’ensemble des capteurs à différentes positions à 200 kW

Aucune forte fluctuation n’est observée. De ce constat découle l’hypothèse d’un éventuel problème avec la prise en compte de l’isolant lors de la simulation numérique. Il sera intéressant d’analyser et de comparer les autres puissances afin de voir si un problème identique est observé.

Malgré cette variation de température, la globalité de l’incendie reste bien modélisée. En effet, les premières courbes sont très similaires et les différences observées sont de l’ordre de quelques dizaines de degrés. De plus, les profils de plein développement sont assez proches et dans chaque cas, l’état stationnaire n’est pas atteint.

Ce constat permet de penser que les simulations numériques obtenues pour une puissance de 200 kW sont assez fiables. La figure 4.16 représente les champs de température numériques présents dans la cellule pour une puissance de foyer de 200 kW et ce, moyennés entre 200

secondes et 600 secondes. On observe que la cellule essais semble bien ventilée, avec une zone chaude principalement localisée au niveau du panache mais aussi sous le plafond, en amont de l'exutoire. Le fait que le reste des gaz présents dans le volume soient moins chauds laisse supposer que l'échange avec l'air frais du milieu extérieur se fait correctement et donc, que le système feu est bien ventilé.

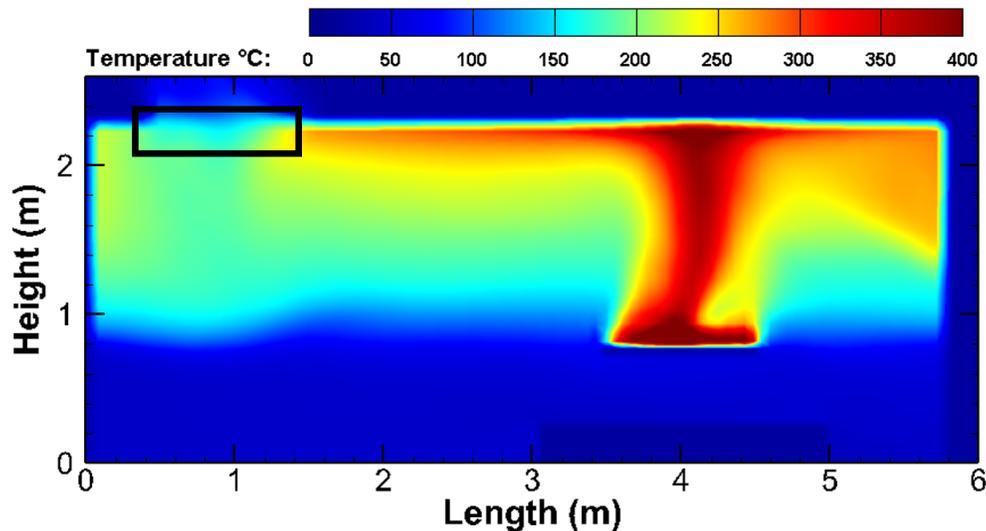


FIGURE 4.16: Champ des températures moyennes à 200 kW

#### 4.4.2 Essais à 500 kW

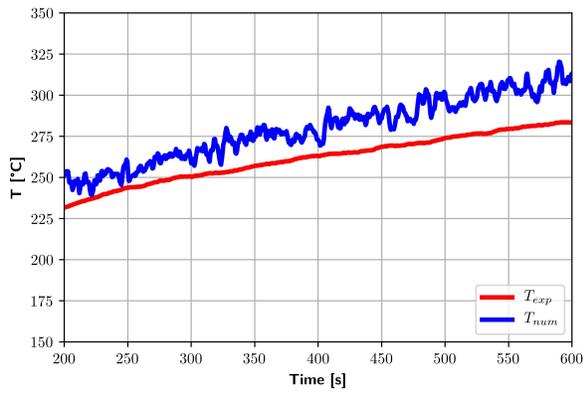
Les courbes de température présentant la comparaison numérique / expérimentale pour une puissance de foyer de 500 kW sont tracées sur les figures 4.17 et 4.18.

Pour les graphiques 4.17(a) et 4.17(b), les données numériques et expérimentales présentées sont relativement proches. En effet, les valeurs de température ainsi que le profil de développement du feu obtenus expérimentalement sont bien modélisés par le code de calcul. Dans les deux cas, l'état stationnaire n'est pas atteint.

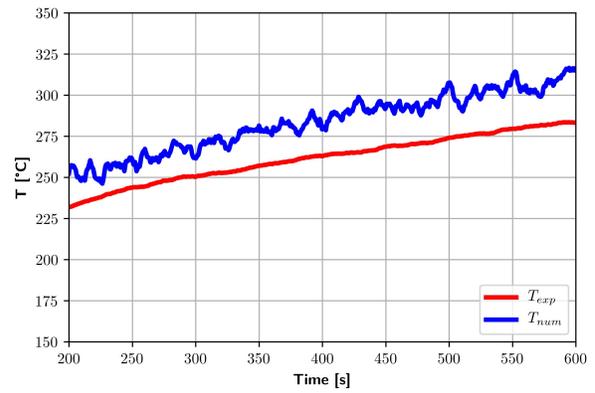
Les courbes présentées sur les images 4.17(c), 4.17(d), 4.17(e) et 4.17(f) montrent un écart progressif entre les résultats expérimentaux et numériques. Cependant, la dynamique de plein développement est correctement simulée.

Les figures 4.18(a), 4.18(b), 4.18(c) et 4.18(d) vont confirmer cette tendance et vont permettre d'observer un écart de température de plus en plus important, approchant alors les 100 °C

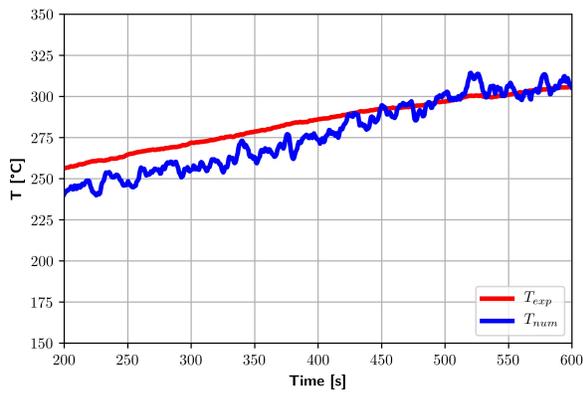
de différence.



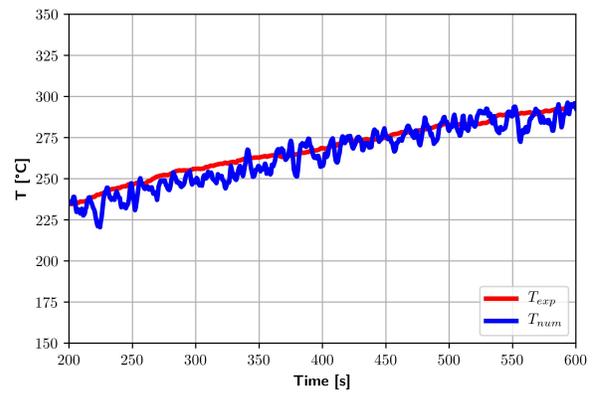
(a)



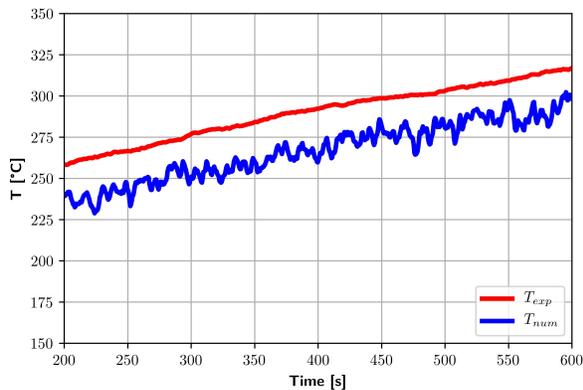
(b)



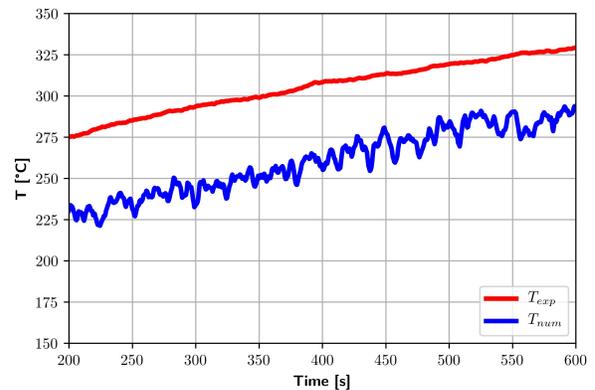
(c)



(d)



(e)



(f)

FIGURE 4.17: Températures numériques et expérimentales à 500 kW, Position 1 (a), Position 2 (b), Position 3 (c), Position 4 (d), Position 5 (e), Position 6 (f)

A contrario, cet écart semble se réduire sur les courbes 4.18(e) et 4.18(f).

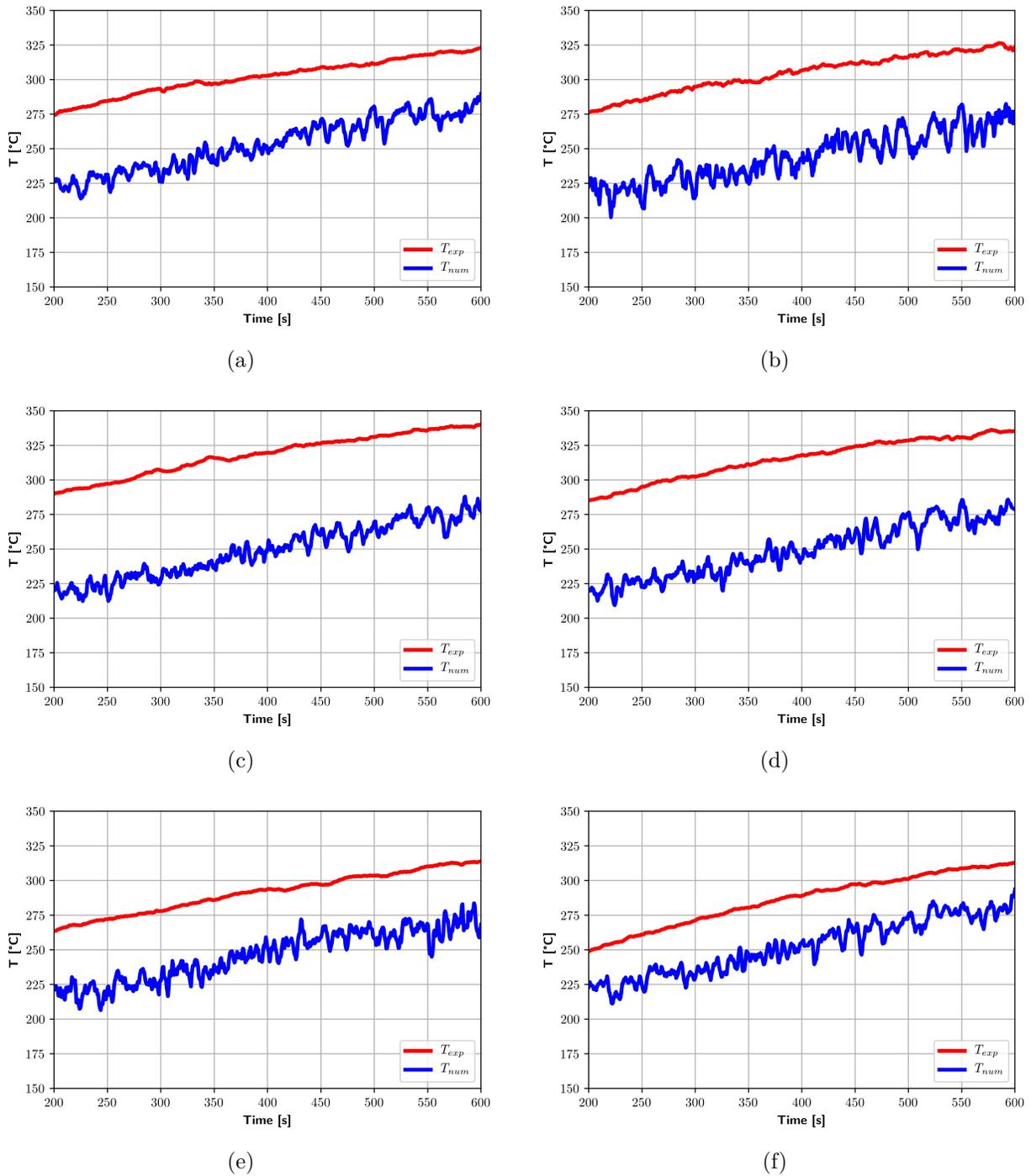


FIGURE 4.18: Températures numériques et expérimentales à 500kW (suite), Position 7 (a), Position 8 (b), Position 9 (c), Position 10 (d), Position 11 (e), Position 12 (f)

Pour confirmer l'analyse effectuée à partir de l'observation des courbes numériques et expérimentales, les données de chaque arbre de thermocouples sont moyennées en temps et en

température afin d'obtenir une seule et unique valeur par position. Les résultats sont visibles sur l'histogramme 4.19. Ce dernier confirme l'analyse précédente, à savoir, des températures expérimentales et numériques proches l'une de l'autre sur la première partie des essais suivies d'une hausse des températures expérimentales qui se traduit par un écart de plus de  $50^{\circ}\text{C}$ . Pour finir, les valeurs se rapprochent diminuant ainsi cette différence sur les deux dernières positions.

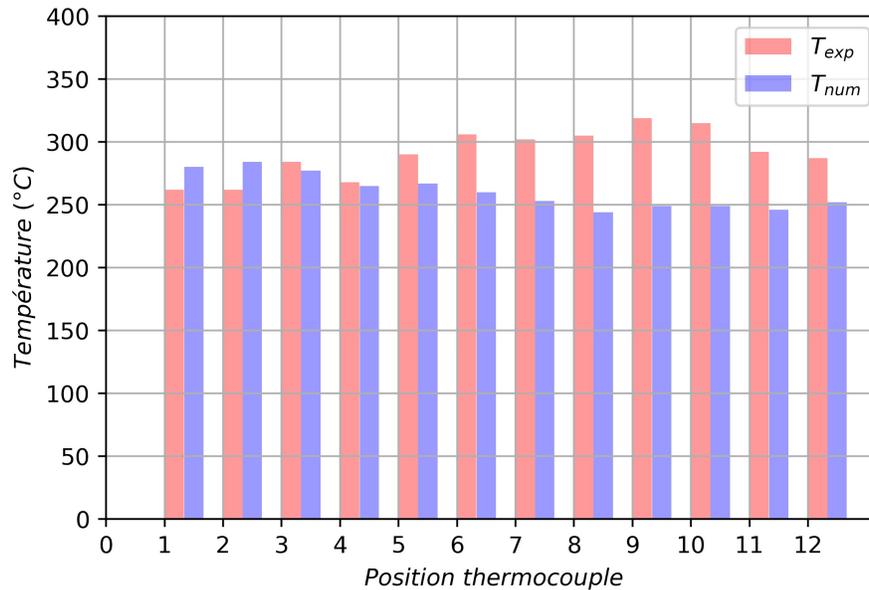


FIGURE 4.19: Comparaison de la température moyenne de l'ensemble des capteurs à différentes positions à 500 kW

Comme pour la puissance de 200 kW, les valeurs expérimentales augmentent pendant la première heure alors que la température obtenue par simulation numérique reste constante.

Suite à l'observation de ces variations, différentes hypothèses peuvent être formulées sur l'évolution de l'écart entre les courbes. Dans un premier temps, il est raisonnable de penser que le code de calcul peut avoir des difficultés de simulation à partir d'un certain temps et ce, en raison des conditions légèrement sous ventilées qui sont peu favorables au calcul numérique. De plus, il est possible que l'isolation thermique ne soit pas bien modélisée sur la durée. Dans un second temps, les mesures expérimentales réalisées sont relativement dépendantes du protocole de mesure utilisé. En effet, la température extérieure, le temps de préchauffage des parois, les essais réalisés plus tôt dans la journée auront un impact sur l'isolation et donc,

sur l'évolution des températures au sein de la cellule. Afin d'écartier certaines hypothèses, il aurait été pertinent de refaire une campagne de mesure et de comparer aux résultats obtenus. Ceci ne sera pas fait dans ces travaux.

Cependant, les courbes et histogrammes précédents montrent une certaine fiabilité des simulations numériques, notamment au début des essais. Pour cette raison, le champ moyen de température, moyenné de 200 secondes à 600 secondes, a été réalisé numériquement sur l'ensemble du volume. Bien que certaines différences soient envisageables, la répartition globale des gaz devrait être assez similaire à ce qui pourrait être observable en expérimental. Ce champ de température moyen est visible sur la figure 4.20. Sur cette dernière, il est possible d'apprécier la forme du panache mais aussi les différentes couches de gaz, notamment à l'exutoire. Ces différentes températures sont liées à l'échange avec l'extérieur qui permet notamment l'entrée d'air frais nécessaire au bon fonctionnement du brûleur.

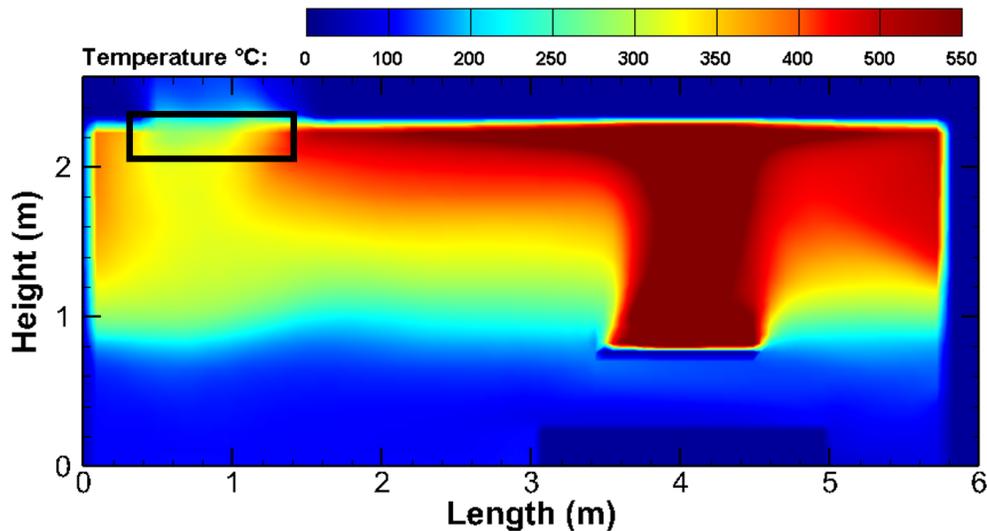
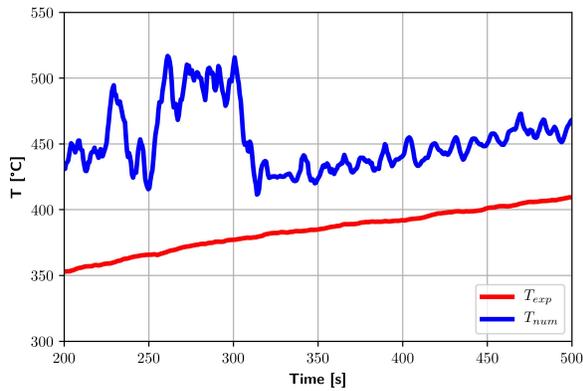


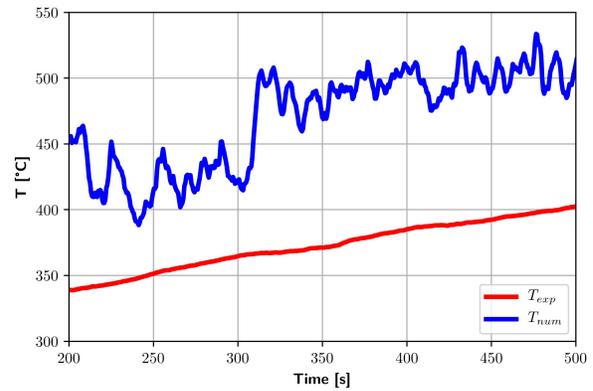
FIGURE 4.20: Champ des températures moyennes à 500 kW

#### 4.4.3 Essais à 800 kW

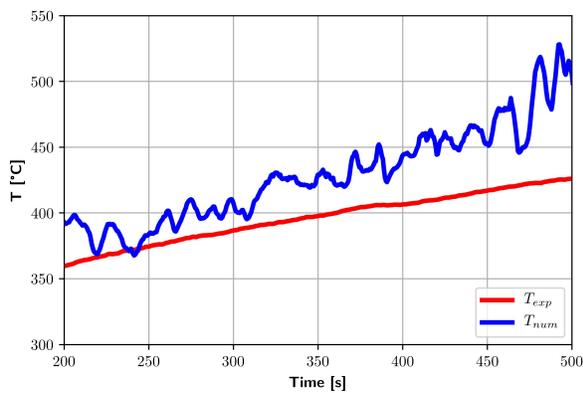
Sur les figures 4.21 et 4.22, il est possible d'observer l'évolution des températures, numériques et expérimentales, en fonction du temps. Comme pour les cas précédents, les douze positions sont présentées afin de pouvoir analyser deux heures d'essai.



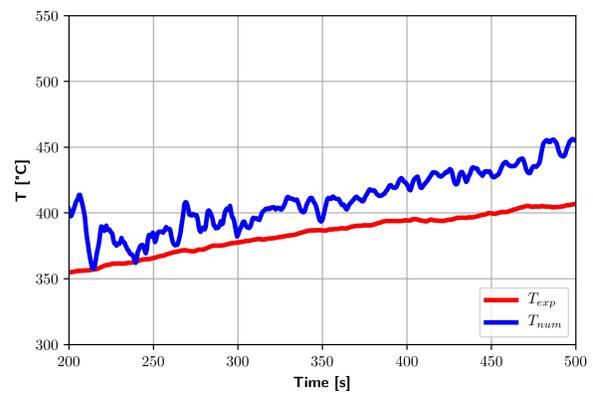
(a)



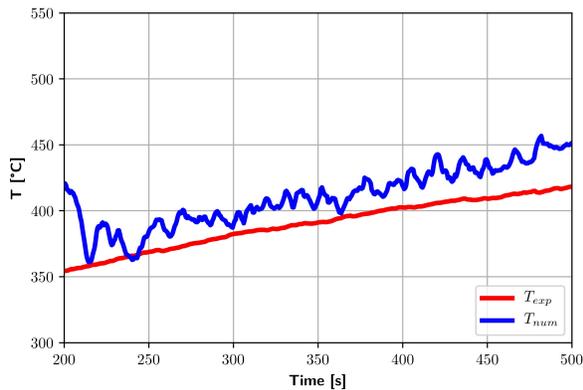
(b)



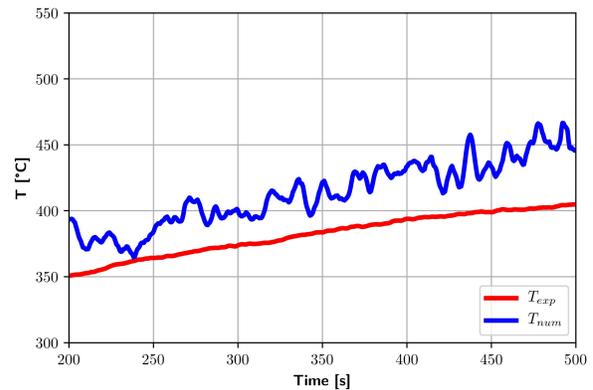
(c)



(d)



(e)



(f)

FIGURE 4.21: Températures numériques et expérimentales à 800 kW, Position 1 (a), Position 2 (b), Position 3 (c), Position 4 (d), Position 5 (e), Position 6 (f)

Contrairement aux cas étudiés précédemment, les figures 4.21(a) et 4.21(b) montrent que les premières mesures numériques sont légèrement éloignées des résultats expérimentaux.

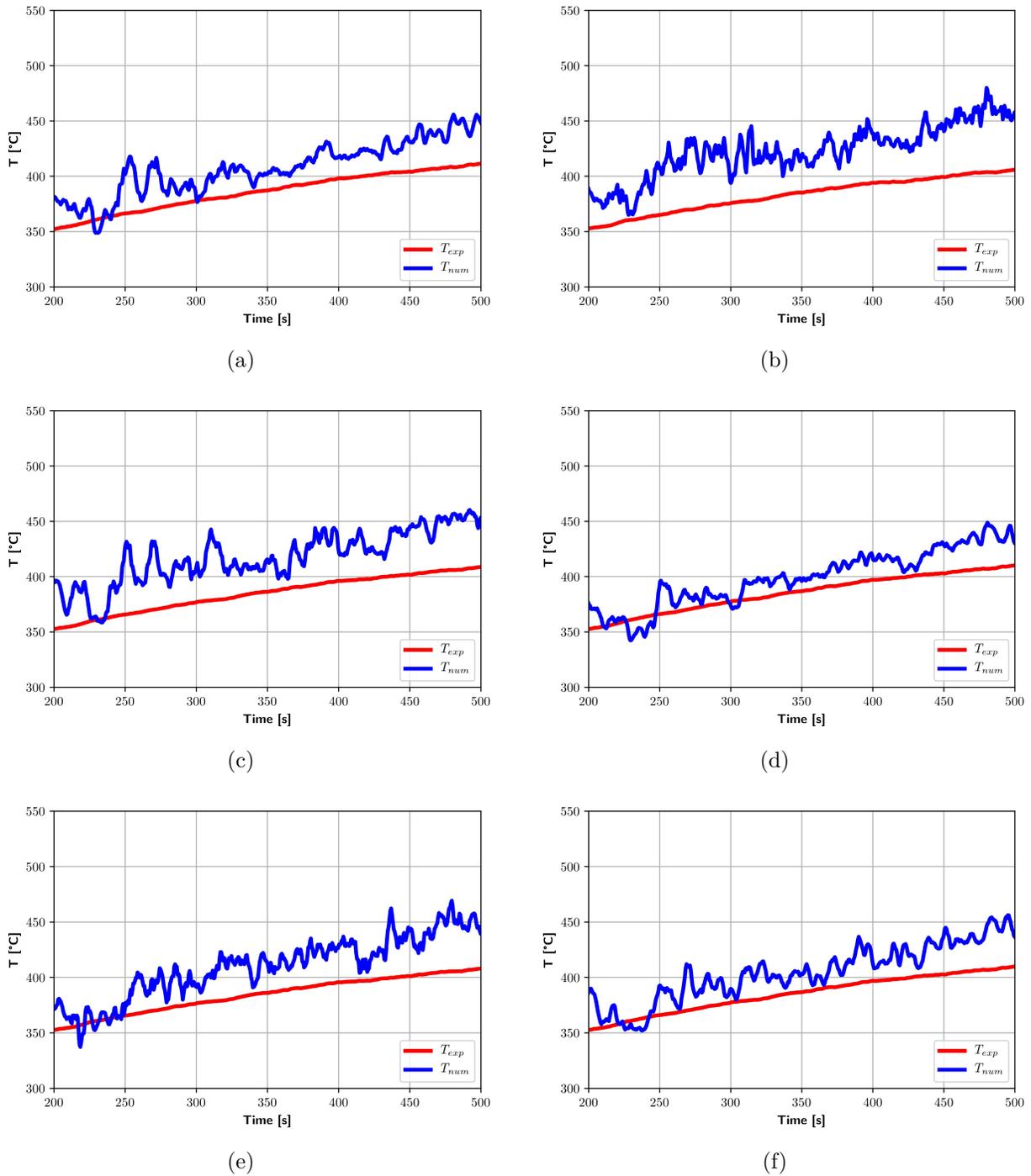


FIGURE 4.22: Températures numériques et expérimentales à 800 kW (suite), Position 7 (a), Position 8 (b), Position 9 (c), Position 10 (d), Position 11 (e), Position 12 (f)

Cependant, la suite des mesures représentées de la figure 4.21(c) à la figure 4.22(f), permettent d'observer des profils numériques très bien simulés, étant ainsi très proches des

valeurs obtenues expérimentalement.

La première partie, moins fiable, peut s'expliquer par le fait que le logiciel FDS avait du mal à représenter le début de l'incendie, notamment la phase de montée en puissance, avant de retrouver des valeurs cohérentes lors du plein développement du feu. C'est une des conclusions qui résultait de l'analyse de la figure 4.7 présentée dans la partie précédente.

Afin d'approfondir les observations effectuées à partir de la comparaison des courbes de température numériques et expérimentales, l'histogramme correspondant est tracé. Il est visible sur la figure 4.23.

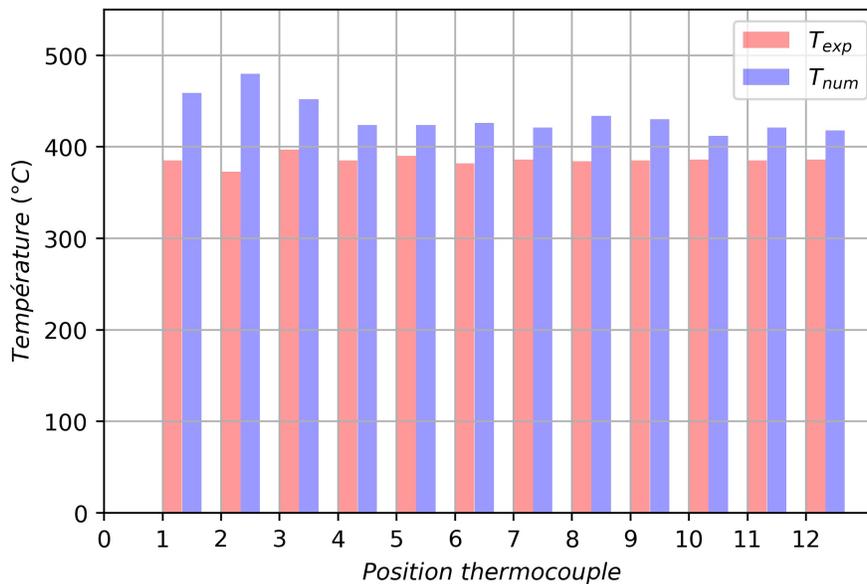


FIGURE 4.23: Comparaison de la température moyenne de l'ensemble des capteurs à différentes positions à 800 kW

Ce dernier confirme les analyses réalisées précédemment. En effet, une différence d'environ 100 °C est observée entre les températures numériques et expérimentales pour les deux premières mesures. Par la suite, bien que les valeurs numériques restent plus importantes, cet écart est réduit à moins de 50 °C.

Par ailleurs, il est possible d'observer que les températures obtenues expérimentalement restent constantes. En effet, pour les cas à 200 kW et 500 kW, l'analyse des résultats avait mis

en avant le fait que les températures expérimentales évoluaient sur la première heure, avant de se stabiliser. Ceci avait été attribué aux conditions d'isolation du volume. Dans le cas étudié, seules les valeurs numériques semblent évoluer au cours du temps.

A partir de ce constat, plusieurs hypothèses peuvent être formulées. Tout d'abord, comme abordé précédemment, il avait été démontré que le logiciel FDS avait des difficultés de simulation lors de la phase d'allumage, probablement en raison des fortes conditions de sous ventilation présentes dans le volume. D'autre part, à cette puissance les températures et les flux thermiques sont très élevés. Il est possible que les parois mettent moins de temps à accumuler l'énergie produite, stabilisant alors plus rapidement la température au sein du caisson. Ceci expliquerait le décalage des deux premiers essais, soit vingt minutes, puis la régularité observée les cent minutes restantes.

Les conclusions précédentes laissent à penser que les simulations numériques donnent des valeurs simulées proches de ce qui pourrait être attendu expérimentalement. Par conséquent, la figure 4.24 est tracée.

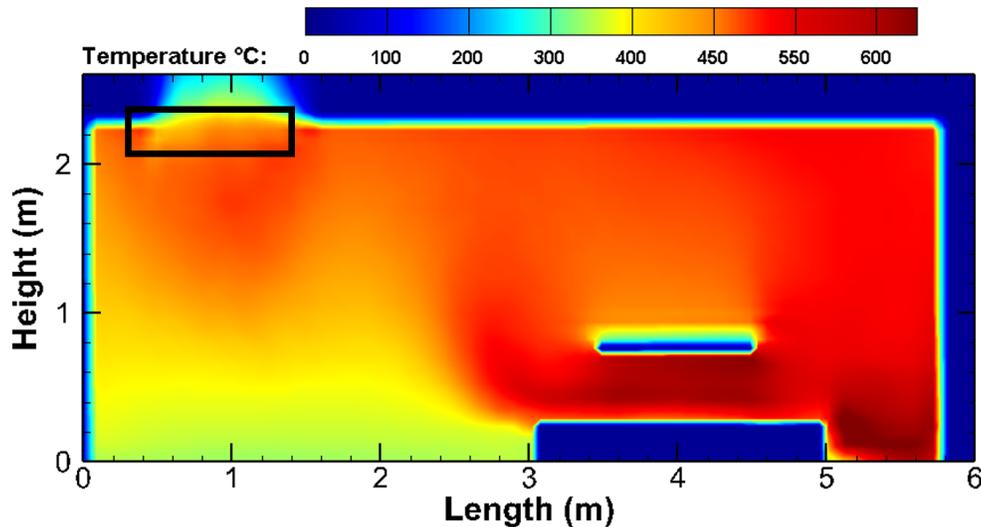


FIGURE 4.24: Champ des températures moyennes à 800 kW

Cette dernière représente le champ de température moyen, obtenu numériquement, au sein de la cellule. Il est possible d'observer des champs de températures plus élevées que dans

les cas précédents. Par ailleurs, l'absence d'air frais pouvant alimenter le foyer permet de confirmer les conditions fortement sous-ventilées. D'autre part, il semblerait que la flamme ne soit plus localisée sur le brûleur mais un peu en dessous, au niveau des potentielles fuites ajoutées numériquement. Ceci peut s'expliquer par l'apparition de flammes fantômes, souvent prédites par le logiciel FDS lors de cas sous ventilés. Ce type de flamme a été rencontré occasionnellement lors des essais.

## 4.5 Champs de vitesses

La partie suivante présente les mesures de vitesses effectuées par PIV. Les résultats obtenus selon  $x$  et  $y$  dans les différentes configurations, détaillées dans le chapitre 2, vont être présentés. Ces trois configurations en grand volume porte ouverte, exutoire ouvert et ventilation mécanique permettent d'observer le comportement de l'incendie dans différentes conditions de ventilation.

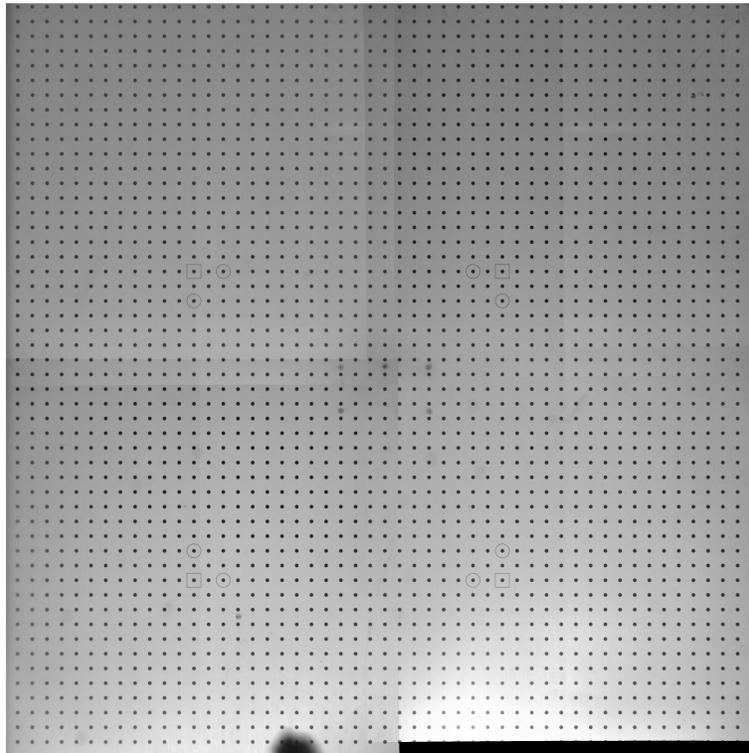


FIGURE 4.25: Mire reconstituée

Pour rappel, la chaîne d'acquisition utilisait quatre caméras, nécessaires pour réaliser les

mesures PIV sur le champ souhaité d'1 m<sup>2</sup>. Pour reconstituer l'image complète à partir des quatre images de caméra, un logiciel développé en interne au CORIA par le Dr Bertrand Lecordier a été utilisé. La figure 4.25 permet d'apprécier l'image reconstituée de la mire, utilisée lors des calculs PIV.

Par ailleurs, il était important de s'assurer que lors des calculs PIV, les vecteurs vitesses seraient calculés sur les particules d'alumine présentes dans l'écoulement et non sur les suies, fortement présentes dans le cas d'un feu sous ventilé. En effet, ces dernières pourraient fausser les valeurs obtenues. Pour cela, des mesures ont été réalisées avec et sans ensemencement.

La figure 4.26 représente une image complète obtenue avec utilisation de l'ensemencement alors que la figure 4.27 permet d'observer l'image d'un essai au cours duquel aucune particule d'alumine n'a été ajoutée.



FIGURE 4.26: Image complète avec laser et particules d'alumine

Sur cette dernière, aucun pic de corrélation ne sera obtenu. Grâce à l'observation de ces deux images, il peut donc être conclu que le calcul des vecteurs vitesses se fait bien sur les

particules d'alumine.

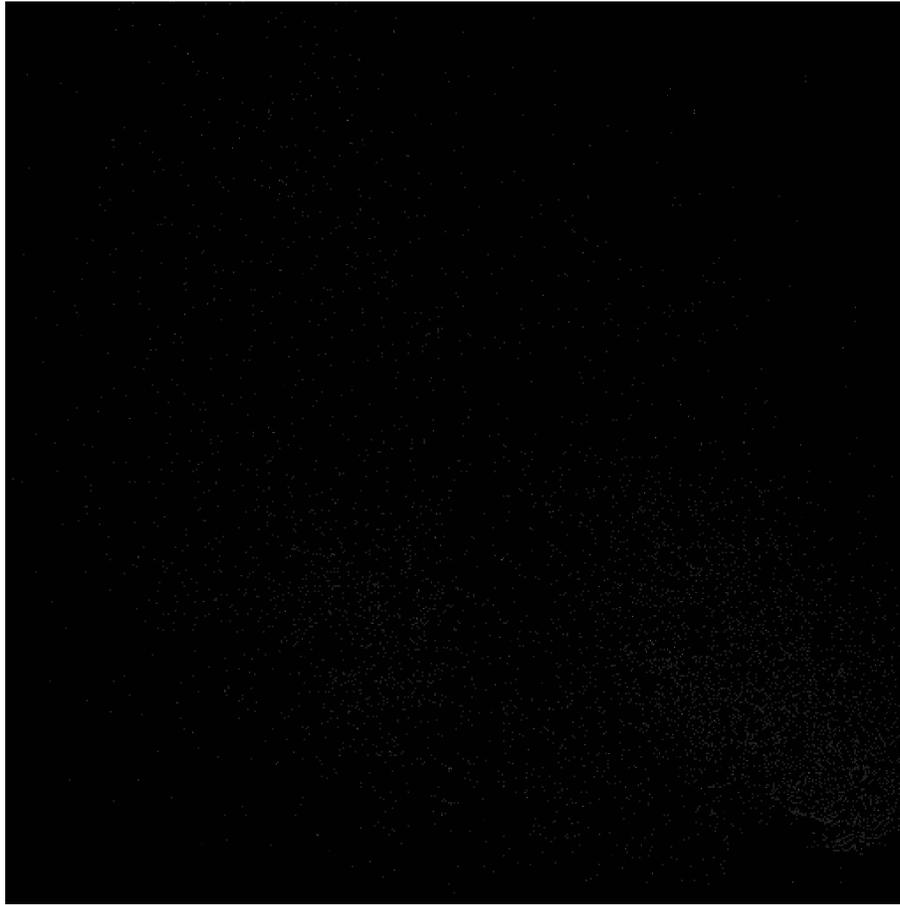


FIGURE 4.27: Image complète avec laser et sans particules d'alumine

### 4.5.1 Configuration porte ouverte

La première configuration étudiée correspond au cas largement ventilé, dite configuration grand volume porte ouverte. Le détail de celle-ci est disponible sur la figure 2.9 du chapitre 2. Les essais présentés ci-dessous ont été réalisés pour des HRR de 100 kW à 900 kW. Pour chaque acquisition, 600 couples d'images PIV ont été enregistrés puis post traités grâce au logiciel Tecplot.

La figure 4.28 permet de situer l'emplacement des mesures PIV. Ces dernières sont représentées par le cadre bleu. La flèche permet quant à elle d'indiquer le sens de l'écoulement du foyer vers la porte.

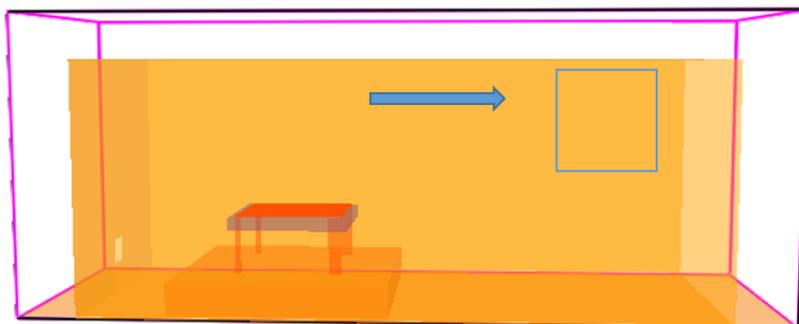


FIGURE 4.28: Emplacement des mesures PIV

#### 4.5.1.1 Champs instantanés

La figure 4.29 permet d'observer un champ de vitesse instantané obtenu pour une puissance de 100 kW.

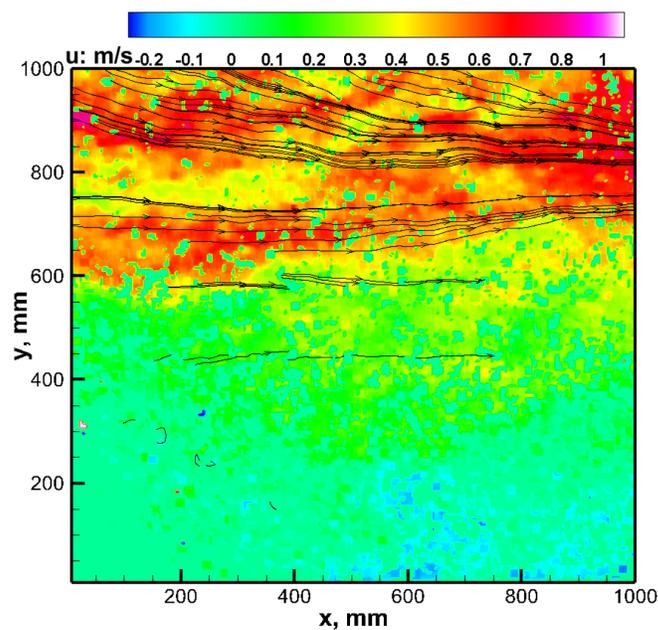


FIGURE 4.29: Champs de vitesse instantané configuration porte ouverte, 100kW

Sur cette dernière, une distribution de vitesse est facilement observable. En effet, la majeure partie des vitesses observées en partie haute avoisinent les 0,6 m/s jusqu'à atteindre 0,1 m/s en partie basse. Les valeurs négatives, représentées en bleue, correspondent à l'air frais

extérieur qui vient alimenter le foyer en dioxygène.

Les champs instantanés pour les puissances de 200 kW à 500 kW sont représentés sur la figure 4.30.

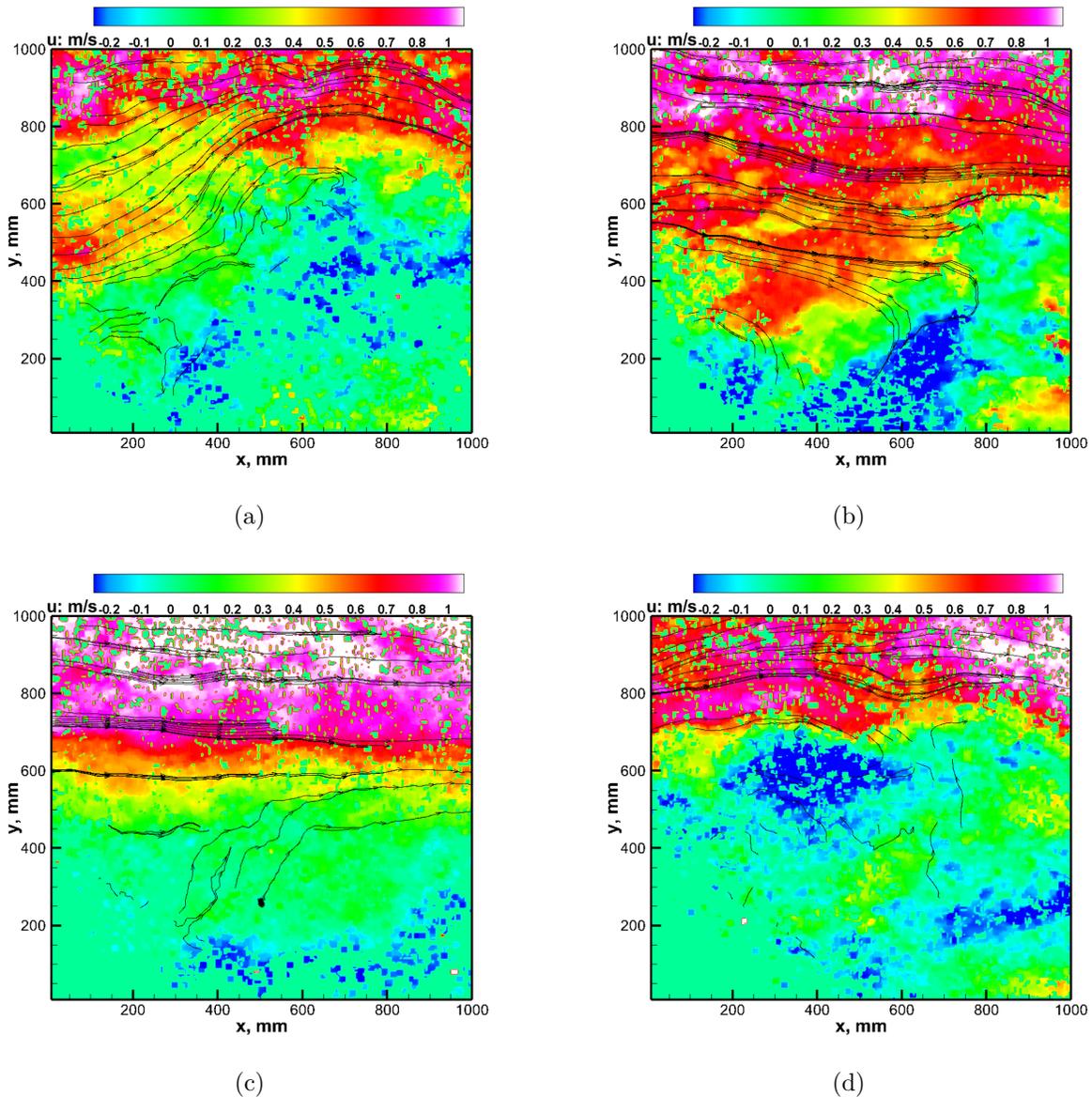


FIGURE 4.30: Vitesses expérimentales instantanées en configuration porte ouverte, 200kW (a), 300kW (b), 400kW (c), 500kW (d)

Sur celle-ci, il est possible d'observer l'augmentation de vitesse avec l'augmentation du HRR. Les vitesses moyennes mesurées dépassent 1 m/s et le gradient observé sur la figure 4.29 est de plus en plus important. En effet, sur la figure 4.30(c) ou un HRR de 400 kW est

représenté, on s'aperçoit que le quart de la figure présente une vitesse supérieure 0,8 m/s contre seulement  $1/8^{\text{ème}}$  pour la puissance de 200 kW, 4.30(a). D'autre part, les vitesses de 0,4 à 0,5 m/s qui représentaient un tiers de l'image pour la puissance de 100 kW dépassent la moitié de l'image pour une puissance de 400 kW, 4.30(c).

La figure 4.31 qui trace les vitesses à des puissances de 600 à 900 kW, confirme cette tendance.

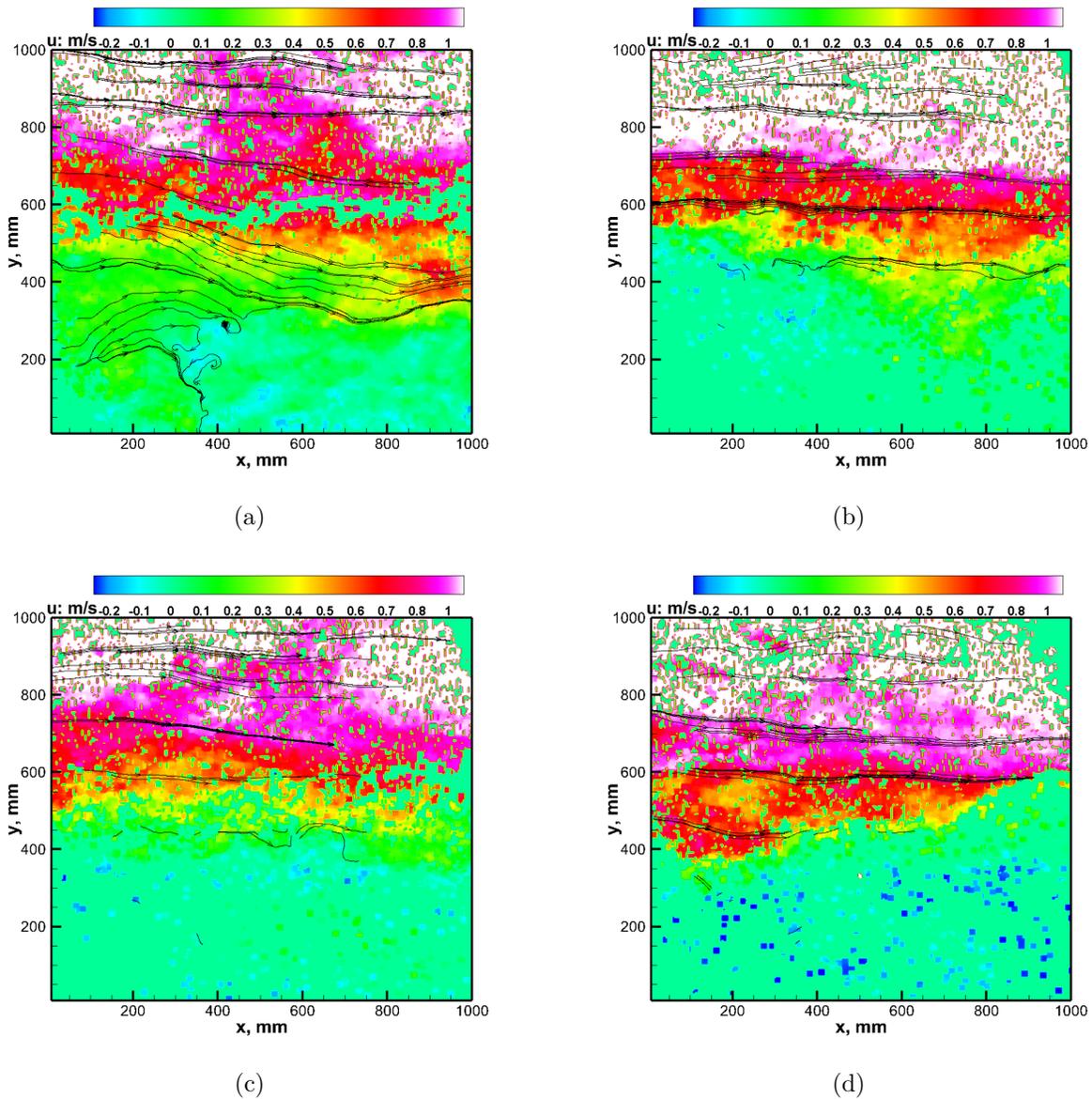


FIGURE 4.31: Vitesses expérimentales instantanées en configuration porte ouverte, 600kW (a), 700kW (b), 800kW (c), 900kW (d)

Ceci correspond au plafond de fumées, de plus en plus important, qui s'accumule et descend au fur et à mesure de l'augmentation de la puissance.

#### 4.5.1.2 Champs moyens

Afin de confirmer les observations réalisées précédemment, les champs de vitesses moyens sont tracés pour les mêmes HRR. La figure 4.32 représente le champ de vitesses moyennes pour une puissance de 100 kW. Comme observé sur le champ instantané, les distributions de vitesse sont assez bien réparties. Les vitesses les plus importantes ont une valeur d'environ 0,7 m/s, localisées sur la partie haute de l'image.

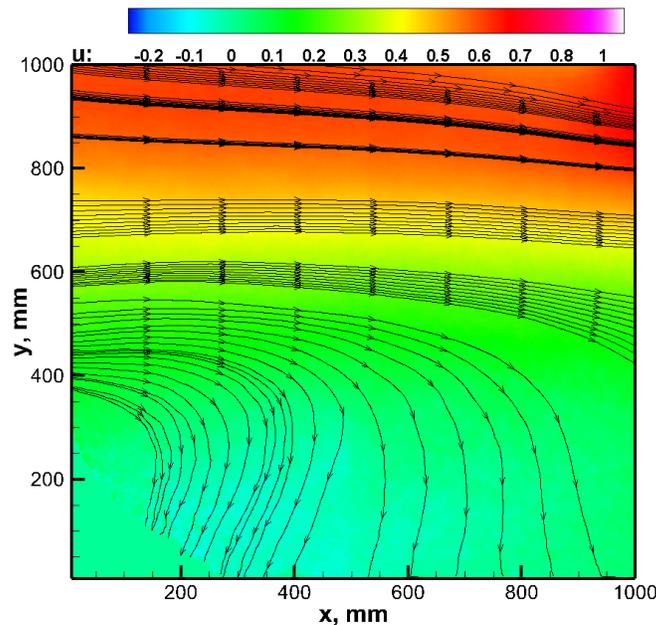


FIGURE 4.32: Champs de vitesse moyenne configuration porte ouverte, 100kW

Les champs de vitesses moyens pour les puissances de foyer allant de 200 kW à 500 kW sont représentés sur la figure 4.33. La stratification des fumées est à nouveau bien observable avec une couche de fumées se déplaçant à forte vitesse, de plus en plus importante, comme le montrent les figures 4.33(a), 4.33(b), 4.33(c) et 4.33(d).

Par ailleurs, certains retours d'air frais sont également observables sur ces images, notamment sur la figure 4.33(c). Cependant, malgré la précision des vecteurs vitesses, il est difficile

d'identifier clairement le plan neutre pour ces puissances. En effet, même bien stratifiée, la partie basse du plafond de fumées présentant de faibles vitesses semble se mélanger à l'entraînement d'air frais qui vient alimenter le brûleur, il s'agit de la zone de mélange.

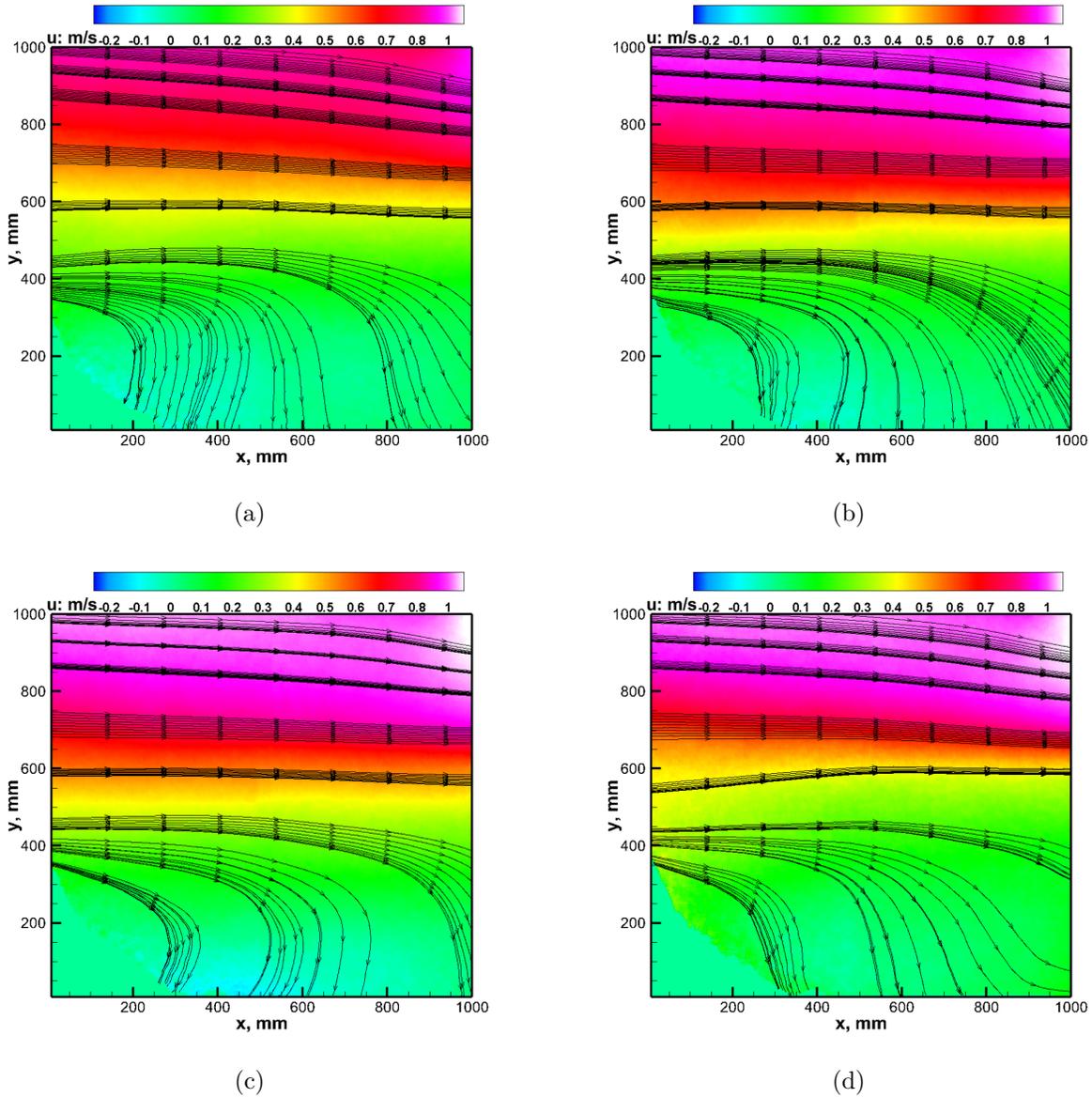


FIGURE 4.33: Vitesses expérimentales moyennes en configuration porte ouverte, 200kW (a), 300kW (b), 400kW (c), 500kW (d)

La figure 4.34 représente les champs de vitesses moyens pour des HRR allant de 600 kW à 900 kW.

Sur la figure 4.34(a), l'analyse concernant le plan neutre effectuée précédemment est confir-

mée.

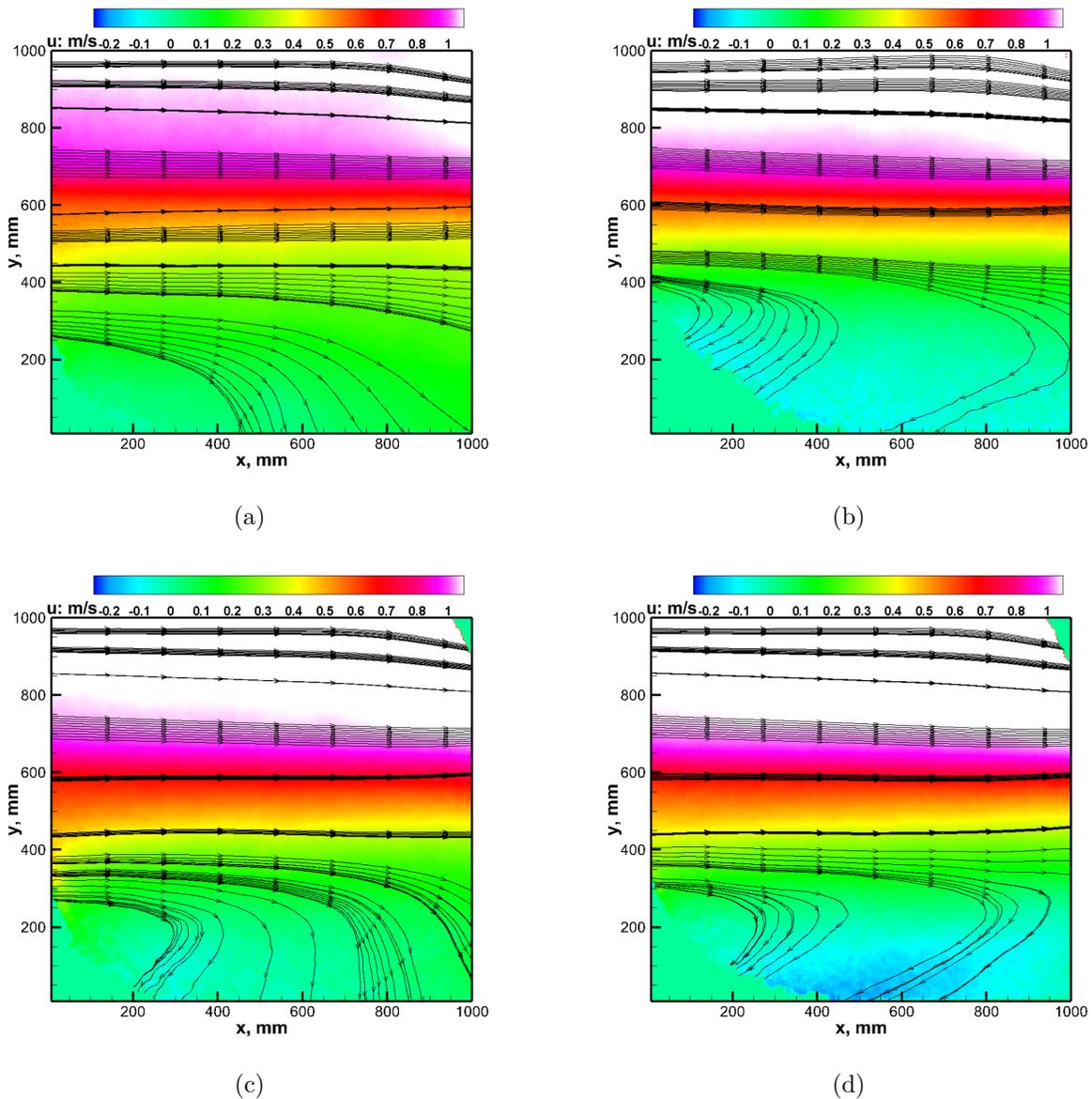


FIGURE 4.34: Vitesses expérimentales moyennes en configuration porte ouverte, 600kW (a), 700kW (b), 800kW (c), 900kW (d)

Cependant, pour des puissances de foyer de 900 kW, 4.34(d), il est possible d'observer un changement. En effet, le plan neutre semble bien visible, séparant ainsi la couche de fumées stratifiées de l'air frais extérieur, entrant dans le volume, nécessaire au bon fonctionnement du brûleur. Ceci peut-être dû à l'augmentation de la couche de fumées présentant des vitesses supérieures à 1,5 m/s, limitant ainsi les faibles vitesses dans les fumées stratifiées et rendant

alors la zone mélange plus marquée.

Afin de relier l'augmentation des vitesses des gaz chauds à la puissance du brûleur, le graphique 4.35 est présenté. Le HRR utilisé est noté en abscisse alors que la vitesse moyenne maximum (en m/s) observée dans la cellule est tracée en ordonnée. Sur cette figure, il est possible d'observer une augmentation de type linéaire. Afin d'approfondir ces hypothèses, il serait nécessaire d'augmenter le nombre de points de mesure expérimentaux pour ainsi en déduire une loi mathématique.

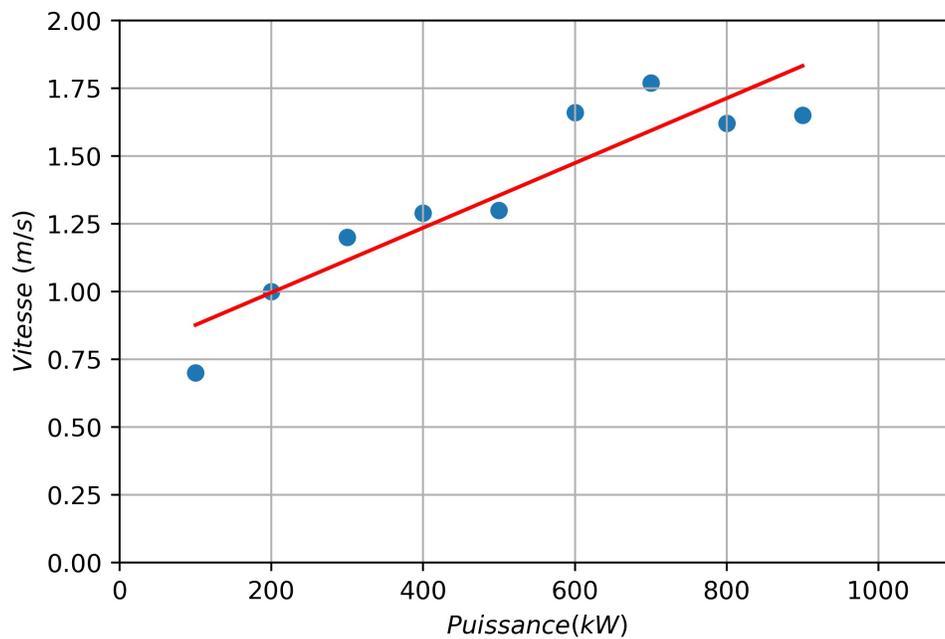


FIGURE 4.35: Évolution de la vitesse moyenne maximale en fonction de la puissance, porte ouverte

### 4.5.2 Configuration exutoire ouvert

Afin d'étudier la dynamique des fumées lors d'un feu de compartiment en condition de sous-ventilation, la configuration grand volume exutoire ouvert a été mise en place. Le descriptif de cette installation est détaillé dans le chapitre 2, notamment à la figure 2.8. La figure 4.36 permet de situer l'emplacement des mesures PIV. Ces dernières sont représentées par le cadre bleu.



FIGURE 4.36: Emplacement des mesures PIV

Les puissances étudiées vont de 100 kW à 1 MW. De 100 kW à 400 kW, 600 couples d'images ont été réalisés. Pour les puissances de brûleur plus importantes, seulement 300 ont pu être enregistrés. Ceci est principalement dû à la forte concentration de suies, ne permettant plus d'avoir une acquisition correcte. A nouveau, les champs instantanés et moyens seront présentés.

#### 4.5.2.1 Champs instantanés

La figure 4.37 permet d'observer les champs de vitesses instantanés pour des HRR de 100 kW à 400 kW.

La dynamique des fumées est bien différente de celle observée en configuration porte ouverte. En effet, les figures 4.37(a), 4.37(b), 4.37(c) et 4.37(d) montrent une sortie des gaz chauds par l'exutoire (4.37(a)) ainsi qu'une entrée d'air frais par cette même ouverture (4.37(b)). De plus, un volume important de gaz, visible en bleu, semble retourner vers le foyer.

Les champs instantanés pour des puissances de 500 kW à 800 kW sont visibles sur la figure 4.38 alors que ceux des HRR de 900 kW et 1 MW sont disponibles sur la figure 4.39.

Ceux-ci confirment les observations réalisées sur les champs précédents. Sur les champs à 600 kW, 4.38(b) et 700 kW, 4.38(c), il est possible d'observer le phénomène d'intermittence sortie de fumées chaudes / entrée d'air frais. En effet, les vitesses négatives proches de l'exutoire,

représentées en bleu, correspondent à l'air entrant, nécessaire pour alimenter le brûleur.

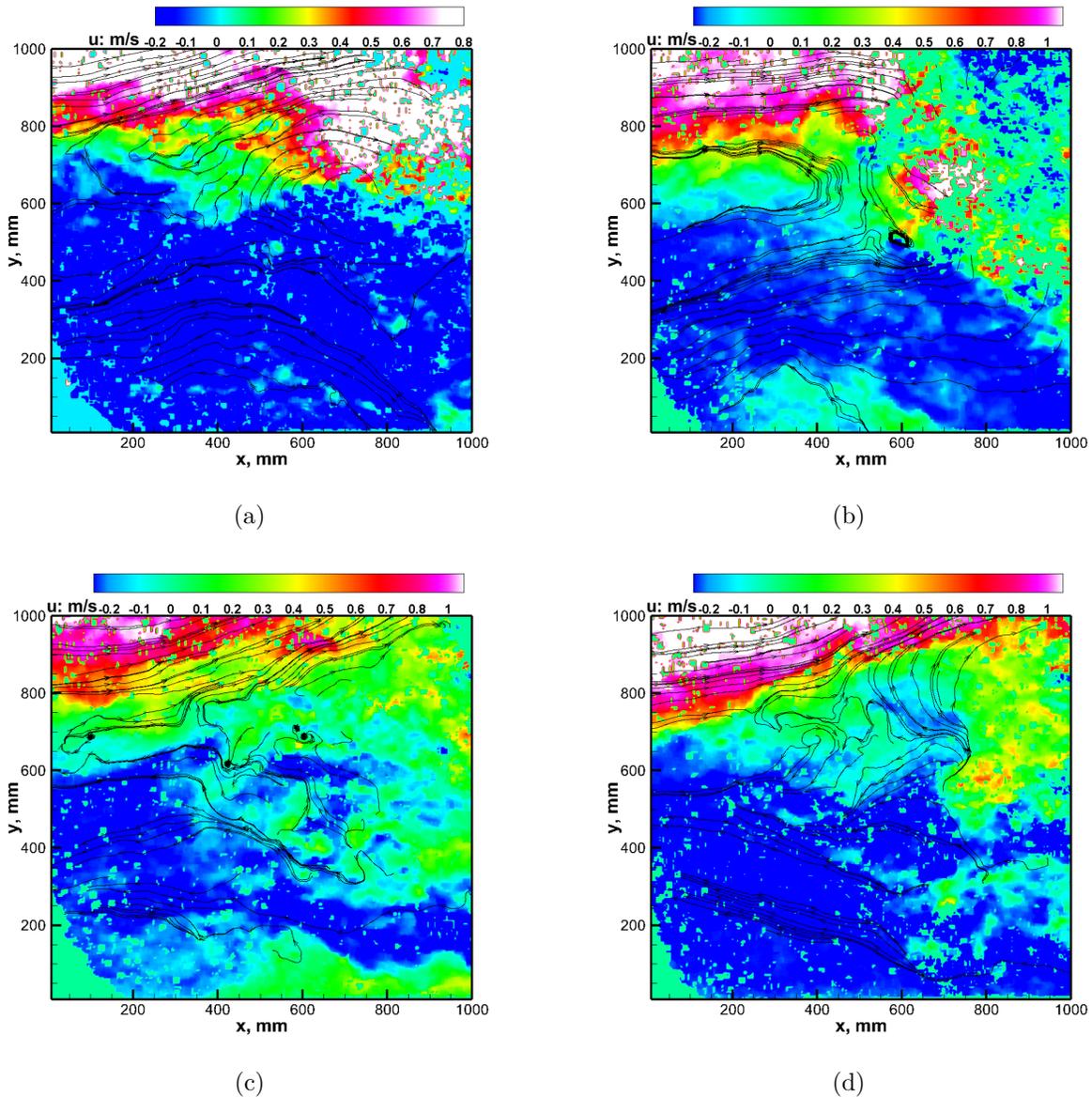


FIGURE 4.37: Vitesses expérimentales instantanées en configuration exutoire ouvert, 100kW (a), 200kW (b), 300kW (c), 400kW (d)

La phénoménologie des phénomènes d'intermittence est due à la présence du compartiment qui entraîne une situation de sous ventilation et donc, de manque de comburant.

Ces phénomènes, bien connus dans la littérature [95], [76], [12], peuvent être détaillés comme suit :

- Développement normal du feu, augmentation de la pression dans le volume, sortie des

fumées chaudes par l'exutoire ;

- Manque de comburant pour le développement du feu. L'intensité de ce dernier décroît, entraînant alors une diminution de la pression dans le volume. Ceci permet à l'air frais d'entrer dans le compartiment afin d'alimenter le foyer en dioxygène ;
- L'air frais va permettre au foyer de retrouver à nouveau sa puissance, entraînant à nouveau une augmentation de pression dans le volume, et donc, une sortie des fumées chaudes.

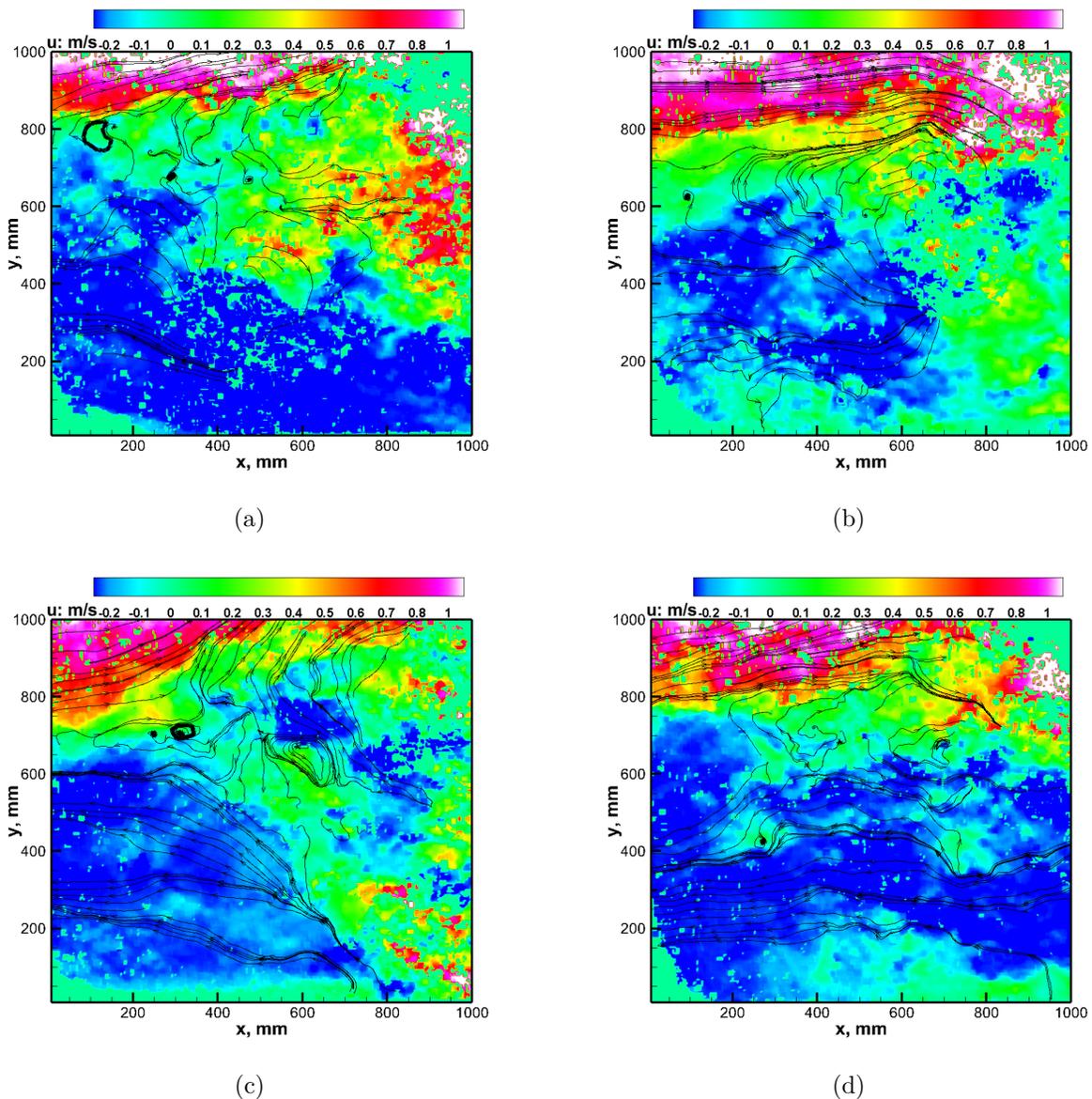


FIGURE 4.38: Vitesses expérimentales instantanées en configuration exutoire ouvert, 500kW (a), 600kW (b), 700kW (c), 800kW (d)

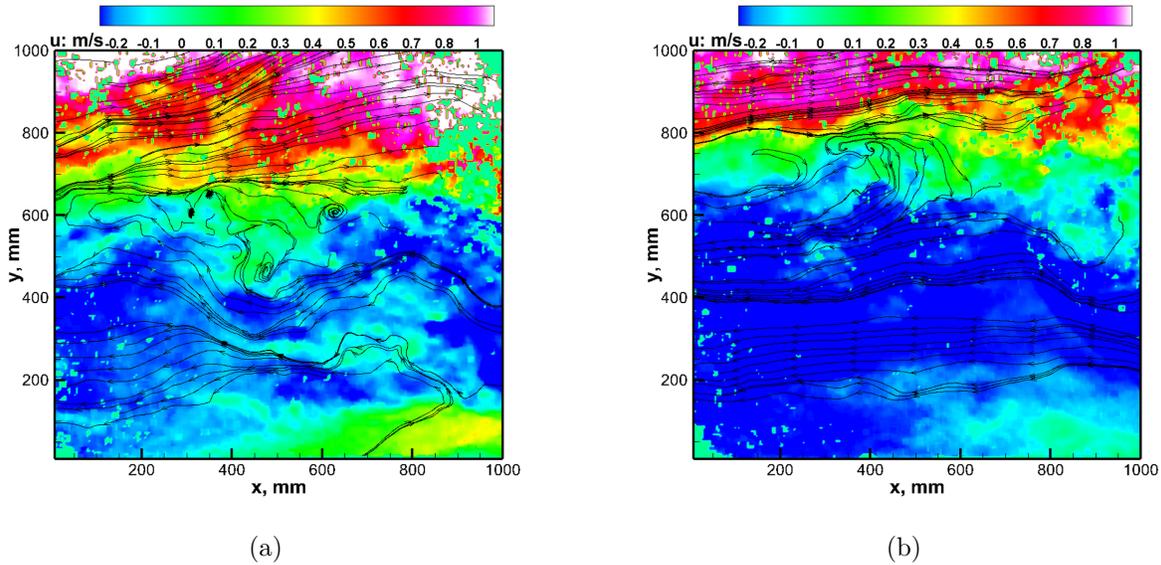


FIGURE 4.39: Vitesses expérimentales instantanées en configuration exutoire ouvert, 900kW (a), 1000kW (b)

Ces phénomènes se reproduisent jusqu'à épuisement du combustible, intervention des secours ou autre évènement pouvant perturber cette dynamique (rupture d'un ouvrant, ouverture de porte, effet du vent...).

#### 4.5.2.2 Champs moyens

Pour approfondir les observations effectuées grâce aux champs instantanés, les champs de vitesses moyens sont tracés.

Les HRR de 100 kW à 400 kW sont représentés sur la figure 4.40. Sur cette dernière, il est possible d'observer que les gaz chauds provenant du brûleur (en partie haute du volume) sont évacués par l'exutoire. D'autre part, les vecteurs vitesses indiquent un retour d'air frais, nécessaire au bon fonctionnement du foyer.

Le plafond de fumée est bien visible. Pour une puissance de 100 kW, 4.40(a), il est relativement haut. Avec l'augmentation de la puissance, il remplit le volume et donc, est de plus en plus bas. La position de la zone de turbulence, représentant le principal lieu de mélange, semble moins sensible à cette évolution de puissance. Cependant, il semblerait qu'elle s'intensifie avec l'augmentation du HRR. La figure 4.41 trace les HRR de 500 kW à 800 kW.

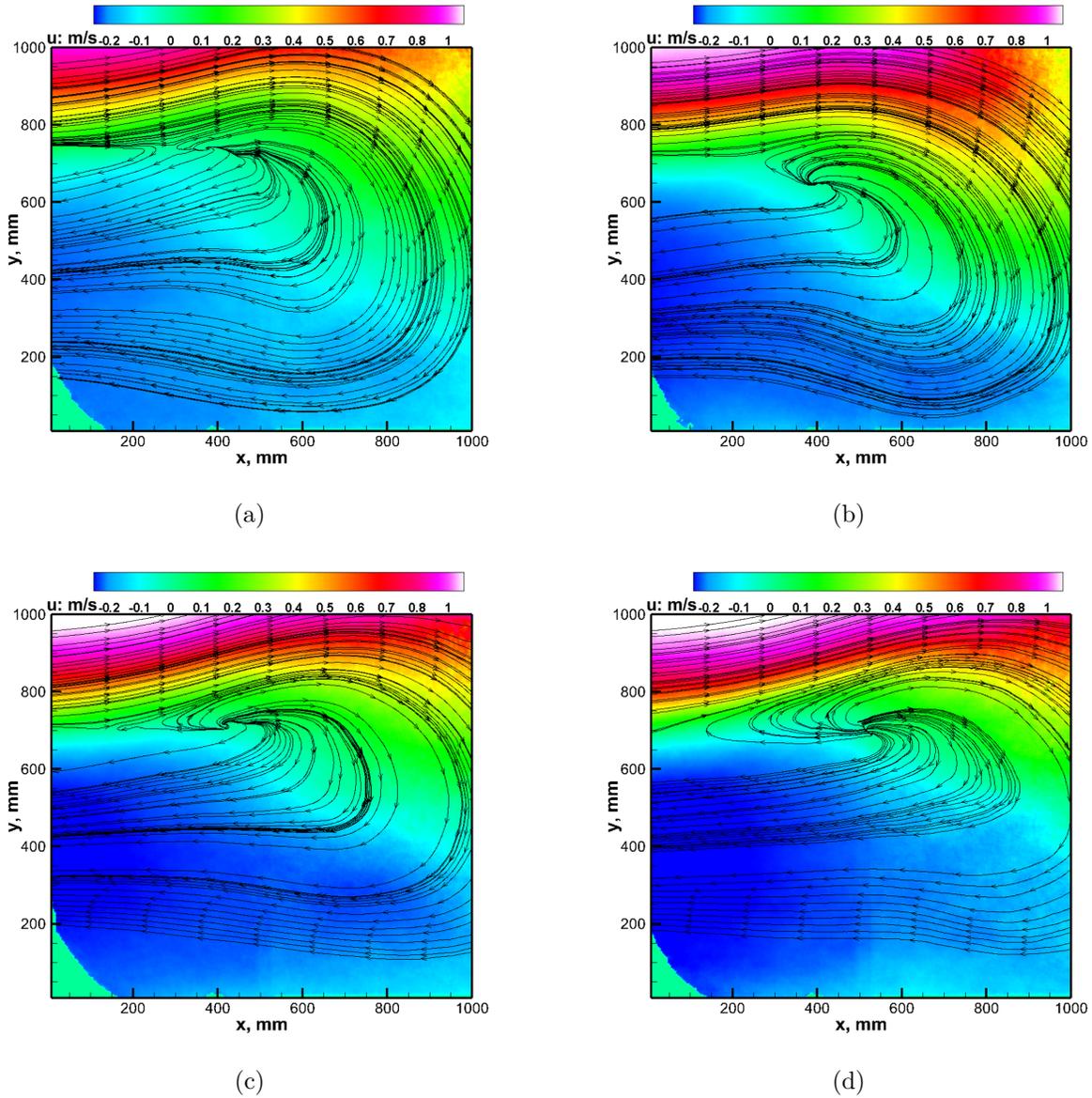


FIGURE 4.40: Vitesses expérimentales moyennes en configuration exutoire ouvert, 100kW (a), 200kW (b), 300kW (c), 400kW (d)

Pour ces différentes puissances, le plafond de fumée semble descendre légèrement puis se stabiliser. Par ailleurs, la zone de mélange s'intensifie, notamment à 700 kW, 4.41(c). Ceci se confirme pour les puissances de 900 kW et 1 MW, représentées par les figures 4.42(a) et 4.42(b).

Pour les puissances de foyer de 800 kW, 4.41(d), 900 kW, 4.42(a) et 1 MW, 4.42(b), une

perte de signal PIV est observée en haut à droite de l'image. Ceci peut être lié aux forts échanges avec l'extérieur, notamment en raison des besoins élevés en air frais. Cet apport d'air entraînant un fort brassage, il est possible que l'ensemencement soit dilué à cet endroit, ne permettant pas le calcul des vecteurs vitesses.

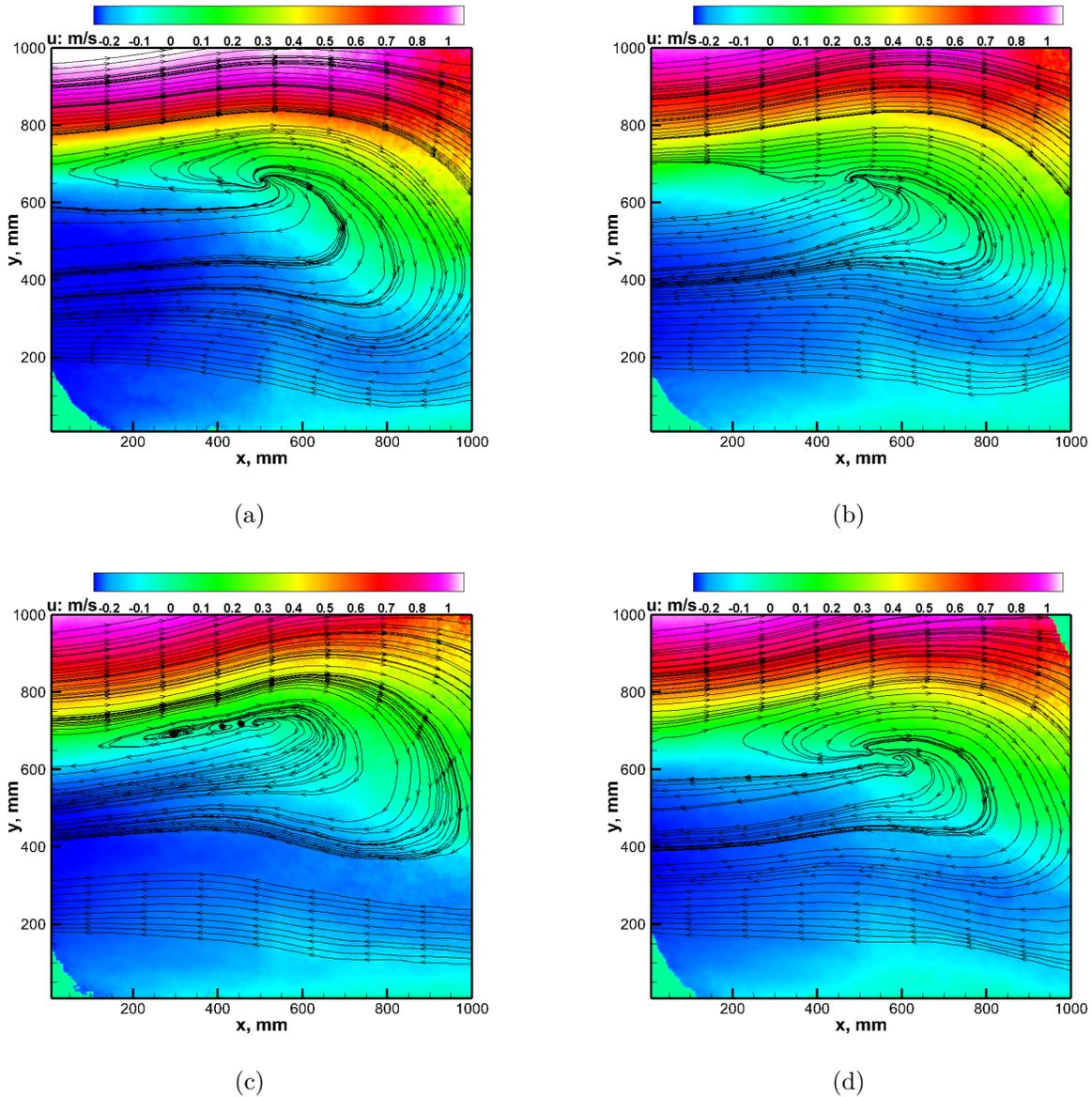


FIGURE 4.41: Vitesses expérimentales moyennes en configuration exutoire ouvert, 600kW (a), 700kW (b), 800kW (c), 900kW (d)

Par ailleurs, la vitesse des gaz chauds augmente pour les puissances de 100 kW à 500 kW mais semble diminuer par la suite. Afin de confirmer cette hypothèse, le graphique 4.43 est

tracé.

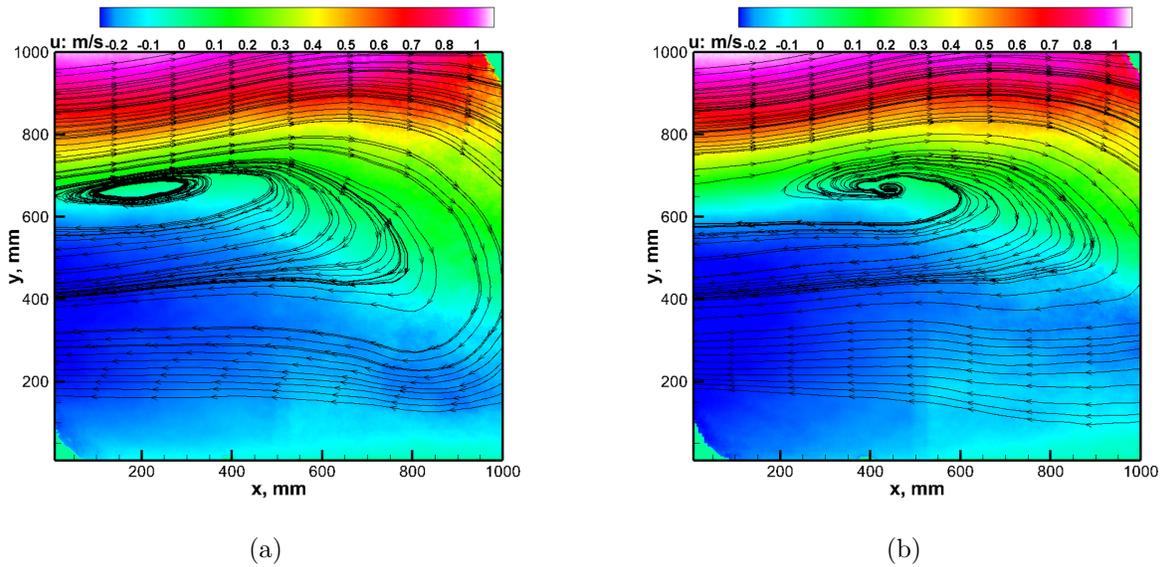


FIGURE 4.42: Vitesses expérimentales moyennes en configuration exutoire ouvert, 900kW (a), 1000kW (b)

Ce dernier représente l'évolution des vitesses moyennes maximum présentes dans le volume et ce, en fonction de la puissance.

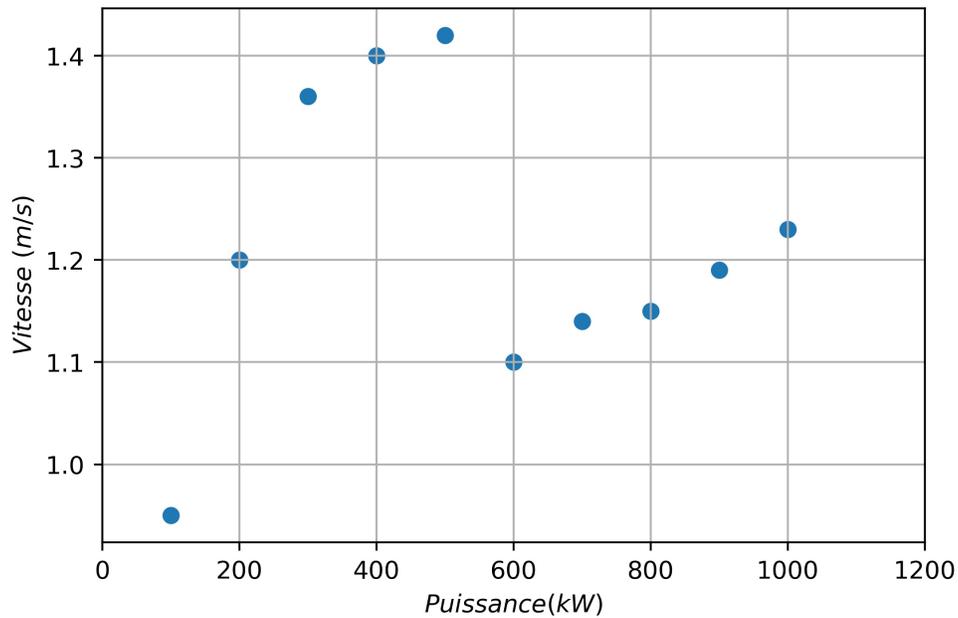


FIGURE 4.43: Évolution de la vitesse moyenne maximale en fonction de la puissance, exutoire ouvert

Sur cette figure, il est possible d'observer une évolution linéaire des vitesses pour des puissances allant de 100 kW à 300 kW. Pour les HRR de 400 kW et 500 kW, l'évolution est très faible, presque stagnante. À partir de 600 kW, la vitesse maximale présente dans le caisson chute fortement, avant de remonter légèrement. Ceci peut s'expliquer par la forte sous ventilation. Ceci est directement relié à la présence du compartiment. En effet, le manque de comburant limite le développement du foyer et donc, la dynamique des fumées.

### 4.5.3 Configuration ventilation mécanique

Pour la dernière configuration dite "ventilation mécanique", un ventilateur permettant un apport d'air de 200 m<sup>3</sup>/h (environ 5 à 6 volume/h) a été ajouté en partie basse de la cellule essais. En théorie, cette ventilation permet un apport d'air suffisant pour alimenter un feu jusqu'à 1 MW. L'ajout de ce ventilateur avait pour objectif d'étudier l'impact d'un tel apport de comburant sur le foyer. En effet, ce type de technique peut être utilisé lors de l'intervention des secours (ventilation opérationnelle), d'où l'intérêt dans cette étude.

Pour ces essais, seulement trois puissances ont été réalisées. Pour rester cohérent avec les essais de températures, les HRR de 200 kW, 500 kW et 800 kW ont été testés. Les images PIV réalisées sont au nombre de 600 pour 200 kW et de 300 pour les puissances de 500 kW et 800 kW. Pour rappel, la description de cette configuration est disponible sur la figure 2.10 du chapitre 2. La zone de mesure est identique à celle présente sur la figure 4.36.

#### 4.5.3.1 Champs instantanés

Les figures 4.44 et 4.45 représentent les champs de vitesses instantanées pour les puissances de 200 kW, 4.44(a), 500 kW, 4.44(c) et 800 kW, 4.45(a).

Pour les puissances de 200 kW et 500 kW, les profils de vitesses observés semblent assez similaires à ceux présentés précédemment pour la configuration grand volume exutoire ouvert, respectivement visibles sur les figures 4.44(b) et 4.44(d). Pour la figure représentant le HRR de 800 kW, 4.45(a) les vitesses sont plus élevées. Cependant, il est difficile de faire des

hypothèses à partir de champs instantanés.

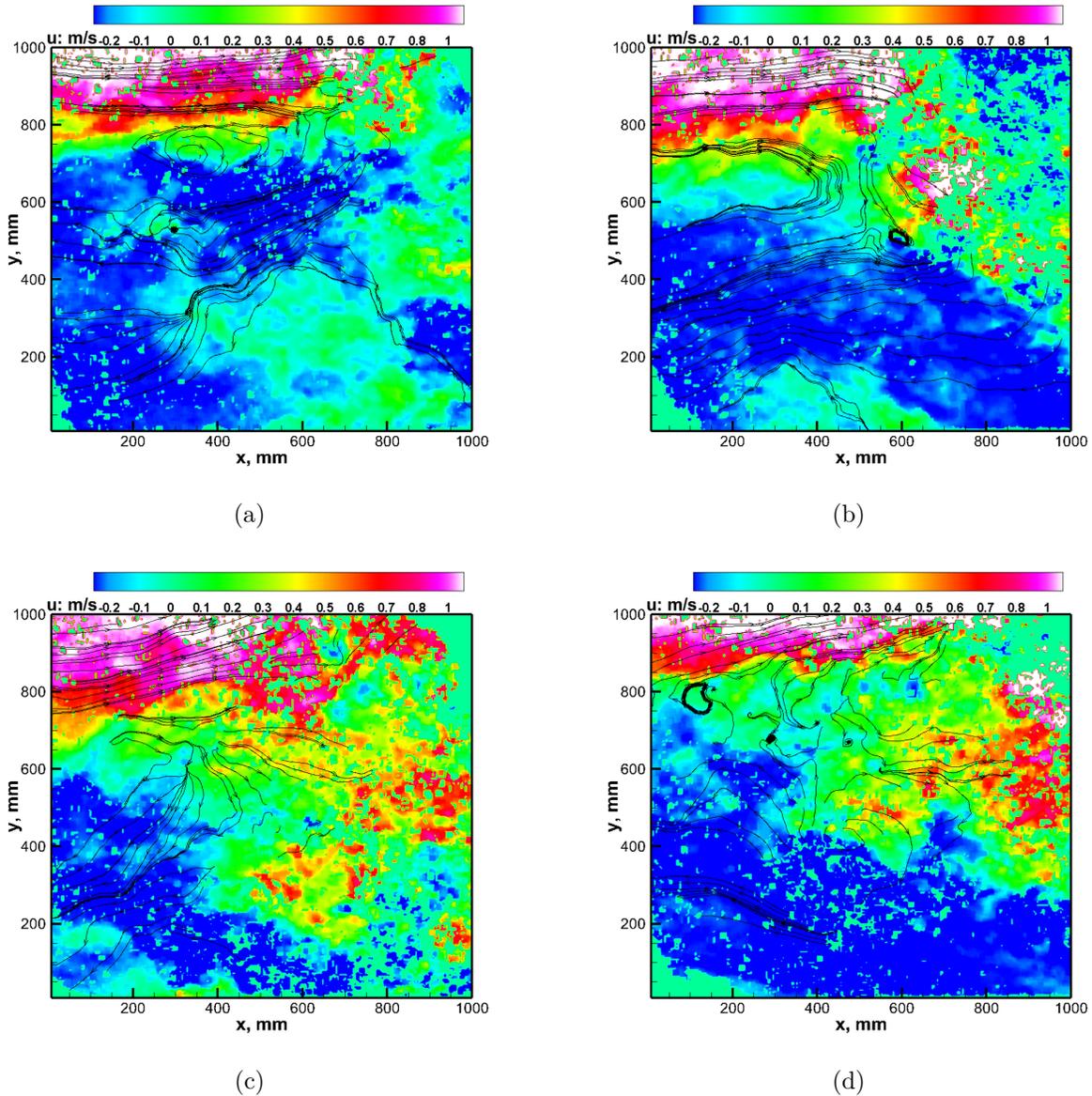


FIGURE 4.44: Vitesses expérimentales instantanées en configuration ventilation mécanique / exutoire ouvert, VM200kW (a), EXU200kW (b), VM500kW (c), EXU500kW (c)

Pour cette raison, les figures 4.46 et 4.47 tracent les vitesses moyennes obtenues dans la cellule essais et ce, pour les mêmes puissances.

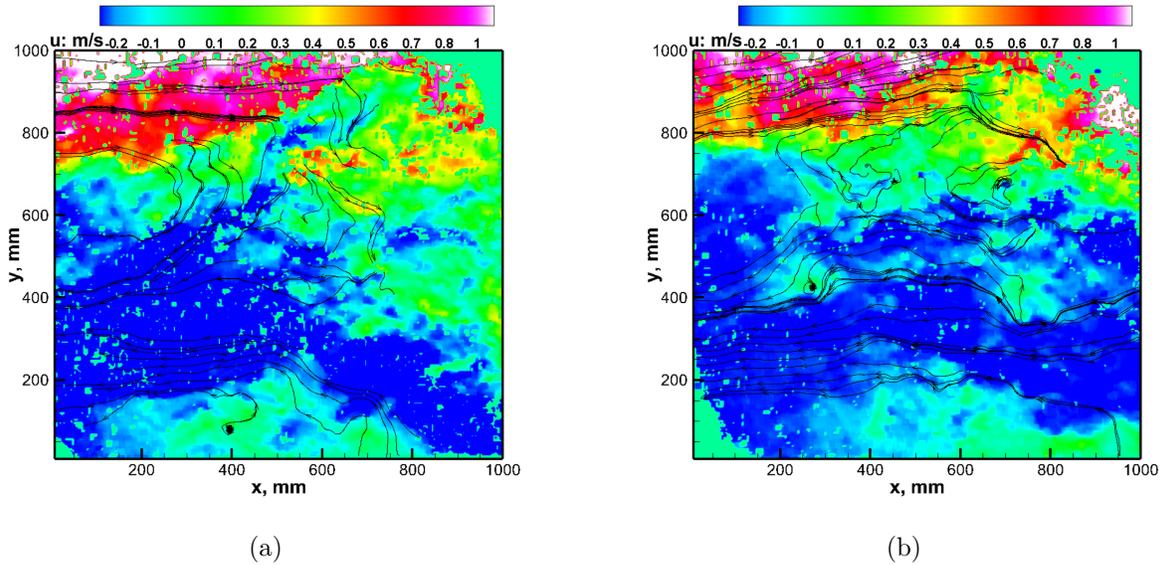


FIGURE 4.45: Vitesses expérimentales instantanées en configuration ventilation mécanique / exutoire ouvert, VM800kW (a), EXU800kW (b)

### 4.5.3.2 Champs moyens

Les champs moyens semblent confirmer la tendance observée à partir des champs instantanés. En effet, sur la figure 4.47(a), les vitesses moyennes à 800 kW sont plus importantes que sur la figure 4.46(c) représentant la puissance de 500 kW. Ceci laisse penser que la présence du ventilateur permet d'améliorer la combustion ainsi que l'évacuation des fumées.

Par ailleurs, il est important de noter l'absence de vecteurs vitesse en haut à droite de chaque image. En effet, pour la configuration exutoire ouvert sans ventilation, ce constat était réalisé uniquement pour des puissances à minima de 800 kW. De plus, cette absence de vecteurs était bien moins marquée. Ceci peut être dû à une difficulté d'ensemencement, possiblement liée au fait que les fuméesensemencées sont mieux évacuées grâce au ventilateur.

Pour confirmer les hypothèses précédentes, le graphique 4.48 est tracé. Ce dernier représente l'évolution de la vitesse en fonction de la puissance. Sur cette figure, les valeurs obtenues pour les configurations ventilation mécanique et exutoire ouvert sont présentées. Cette comparaison permet de statuer sur l'efficacité du ventilateur.

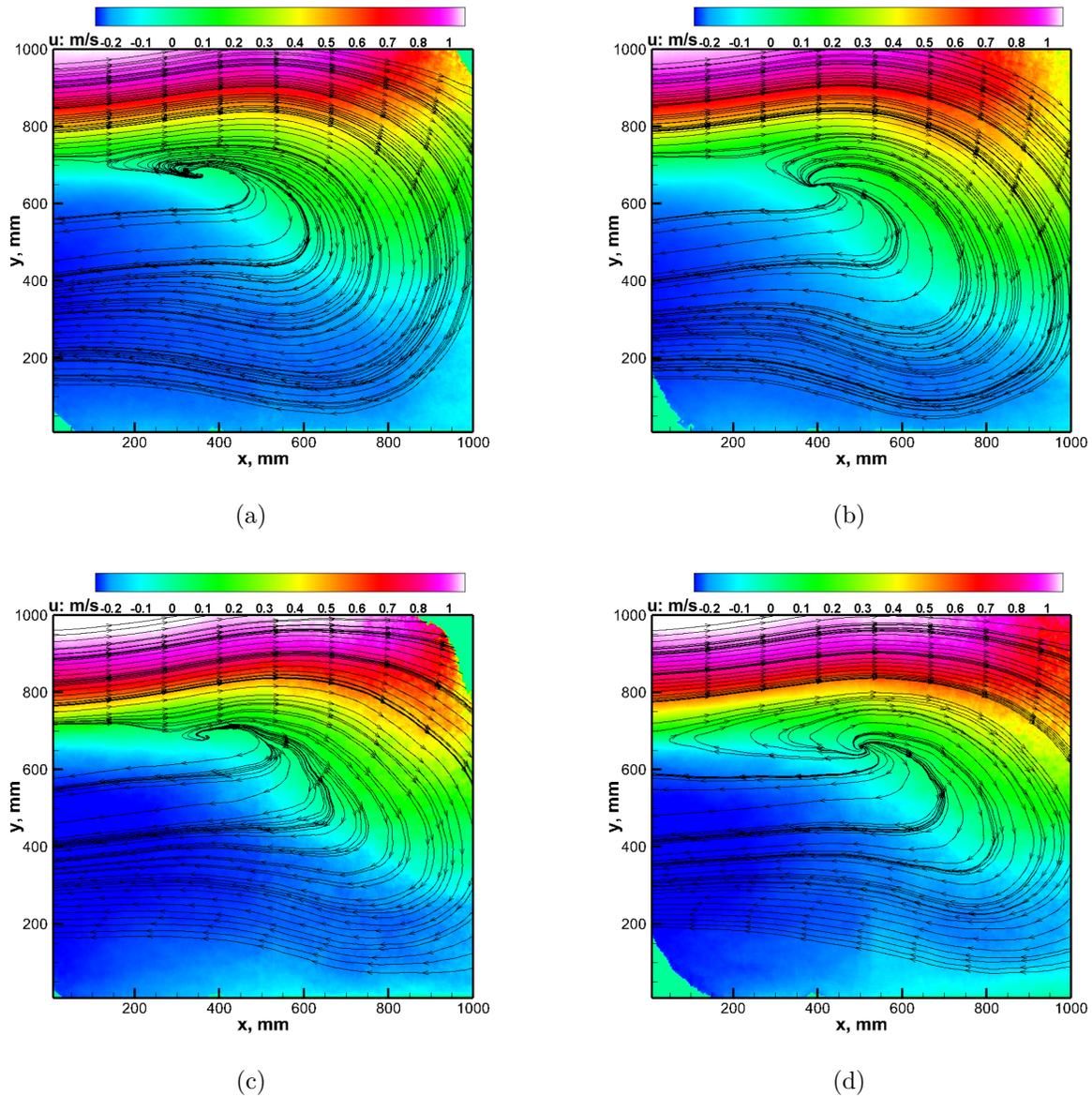


FIGURE 4.46: Vitesses expérimentales moyennes en configuration ventilation mécanique / exutoire ouvert, VM200kW (a), EXU200kW (b), VM500kW (c), EXU500kW (c)

Pour les puissances de 200 kW et de 500 kW, les valeurs de vitesses sont très proches pour les deux configurations. Par ailleurs, comme l'avait laissé penser l'analyse des champs moyens et instantanés, l'action du ventilateur mécanique semble augmenter la vitesse des gaz chauds et ce, même à forte puissance. Ceci pourrait permettre d'évacuer un volume de fumées plus important. Cependant, ces travaux de thèse ne permettent pas d'affirmer cette hypothèse avec certitude.

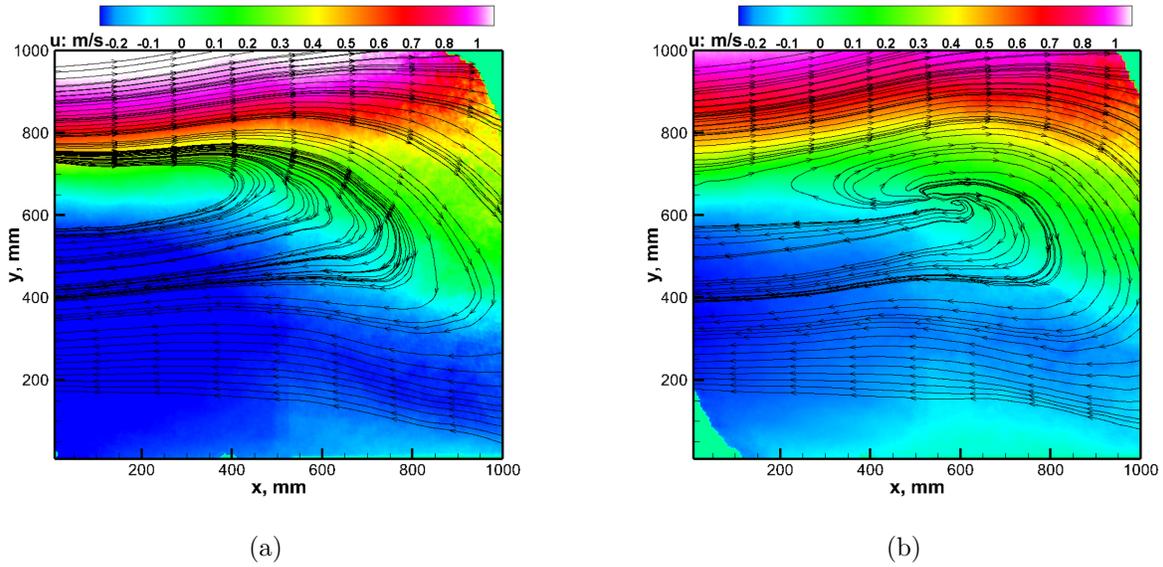


FIGURE 4.47: Vitesses expérimentales moyennes en configuration ventilation mécanique / exutoire ouvert, VM800kW (a), EXU800kW (b)

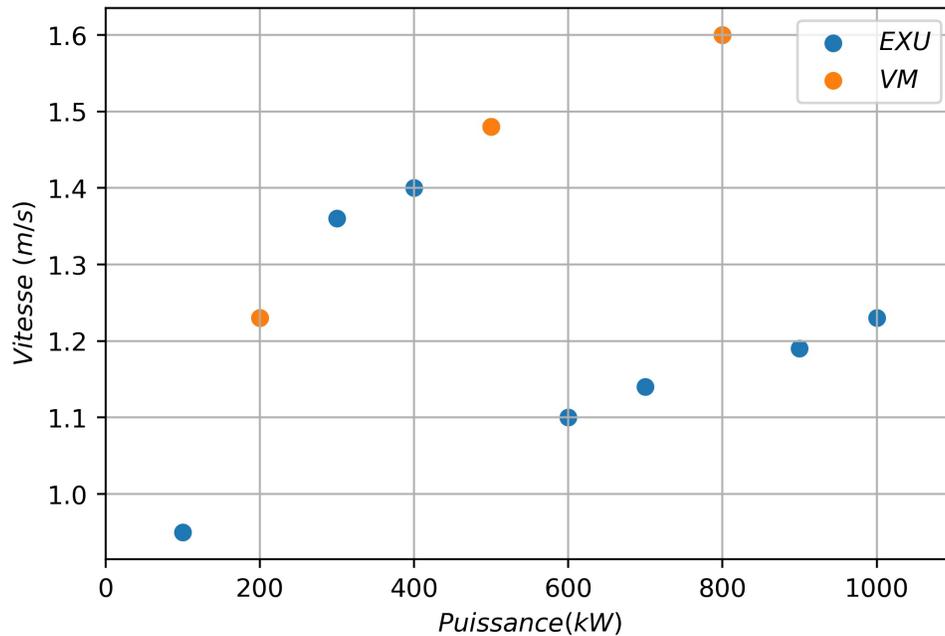


FIGURE 4.48: Evolution de la vitesse en fonction de la puissance, ventilation mécanique

Il serait nécessaire de refaire des essais avec plus de points de mesure et en quantifiant le volume de fumées extraites afin de se prononcer sur cette hypothèse.

## 4.6 Comparaison des champs de vitesses numériques et expérimentaux

Pour compléter l'analyse des champs de vitesses, les résultats obtenus numériquement et expérimentalement sont comparés. Pour cela, les champs moyens des trois configurations seront présentés. Afin d'étudier des cas dans des conditions bien ventilées, peu ventilées et largement sous ventilées, les puissances de 200 kW, 500 kW et 800 kW seront à nouveau utilisées. Pour chaque image présentée ci-dessous, le champ obtenu numériquement sera situé à gauche alors que celui mesuré expérimentalement sera placé à droite.

### 4.6.1 Comparaison des profils de vitesse en configuration porte ouverte

La figure 4.49 représente les champs pour une puissance de foyer de 200 kW.

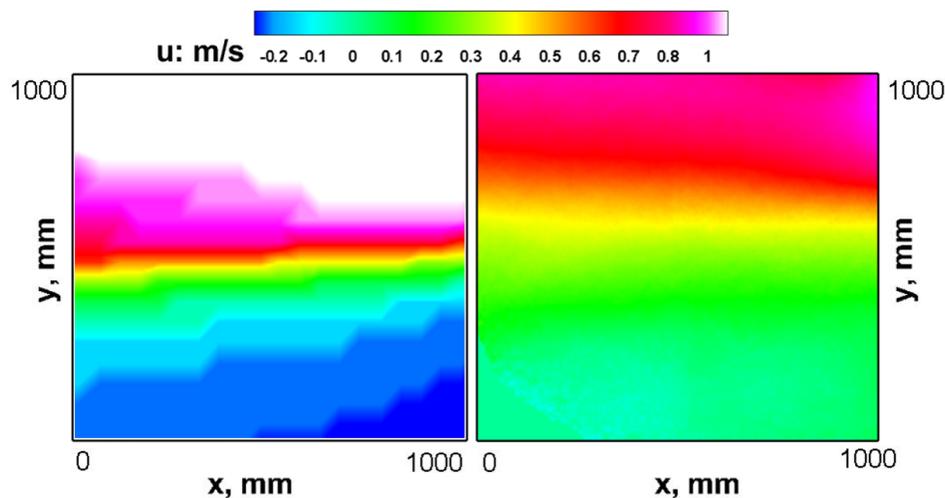


FIGURE 4.49: Comparaison vitesses numériques et expérimentales, porte ouverte, 200 kW

Sur ces deux images, il est possible d'observer que les vitesses numériques sont surestimées en partie haute de l'image. De plus, la couche de fumées chaudes est moins importante sur l'image numérique, ce qui permet une entrée d'air frais qui n'est pas observée aussi haut dans

le volume lors des essais. Cependant, les vitesses restent du même ordre de grandeur. De plus, la distribution de vitesse observée sur le champ expérimental est représentée sur le champ modélisé. Bien que surestimé, le comportement global semble donc cohérent.

La comparaison des résultats obtenus pour un HRR de 500 kW est présentée à la figure 4.50. Les observations effectuées précédemment sont également valables dans ce cas. En effet, les distributions de vitesse numérique sont plus importantes que ceux obtenus au cours des mesures PIV. D'autre part, la trop faible épaisseur du plafond de fumées permet une entrée d'air frais qui est en réalité obtenue un peu plus bas en cas réel.

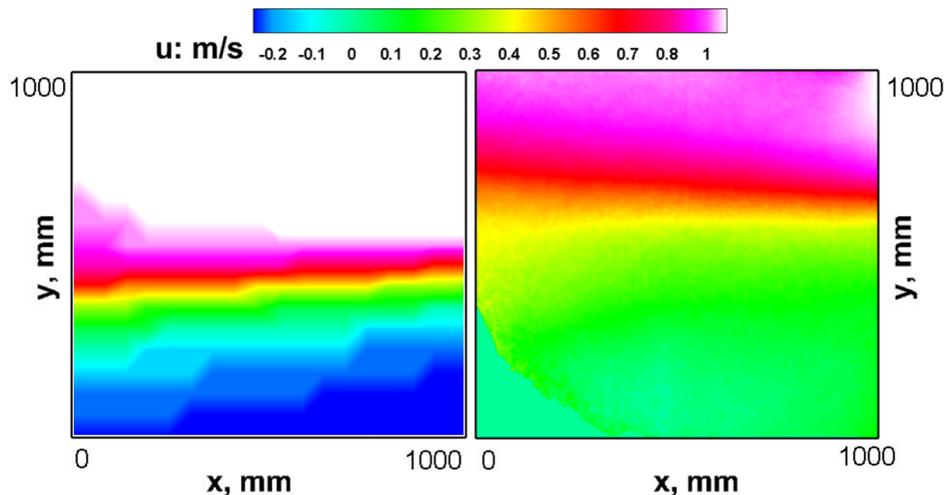


FIGURE 4.50: Comparaison vitesses numériques et expérimentales, porte ouverte, 500 kW

La figure 4.51 compare les résultats de la puissance de foyer de 800 kW. Sur ce dernier cas de la configuration grand volume porte ouverte, le plafond de fumée semble mieux pris en compte, laissant ainsi peu de place au retour d'air frais qui aura alors lieu en partie basse du volume et donc, peu représenté sur l'image.

Pour conclure sur cette configuration, les gradients de vitesse sont légèrement surestimés mais restent de l'ordre de 2 m/s au maximum contre 1,6 m/s mesurés par PIV. La principale faiblesse reste la faible épaisseur de la couche de fumée qui permet une entrée d'air frais plus importante que celle observée en expérimental. Afin de réduire les écarts entre les deux

mesures, plusieurs possibilités sont à étudier.

Dans un premier temps, il serait judicieux de suivre la même méthodologie que celle mise en place pour la configuration exutoire ouvert présentée précédemment à savoir, une comparaison des températures afin de régler plus précisément les paramètres numériques, notamment l'isolation thermique. Il serait également intéressant de refaire les essais expérimentaux afin de multiplier les points de mesures et donc, la répétabilité des essais. En effet, les résultats expérimentaux présentés sont moyennés sur 600 images, soit 60 secondes, contre 400 secondes en numérique. De plus, en configuration porte ouverte, les conditions climatiques sont moins maîtrisées que lors des autres essais. En effet, la taille de l'ouverture de la porte augmente la sensibilité au vent.

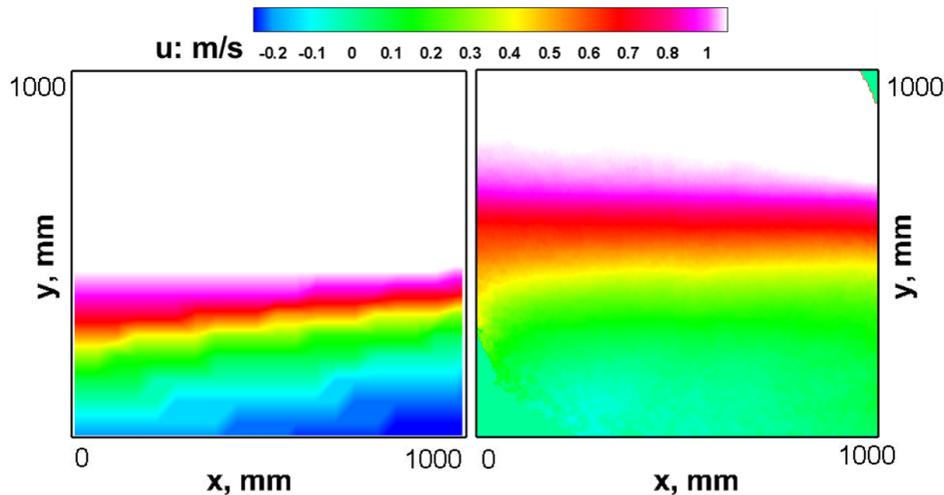


FIGURE 4.51: Comparaison vitesses numériques et expérimentales, porte ouverte, 800 kW

#### 4.6.2 Comparaison des profils de vitesses en configuration exutoire ouvert

Les résultats obtenus pour la puissance de 200 kW sont présentés sur la figure 4.52. Sur cette dernière, il est possible d'observer des champs numériques plutôt bien simulés, représentatifs des champs expérimentaux. Bien que le gradient de vitesse soit légèrement surestimé en numérique, les vitesses moyennes obtenues semblent cohérentes. Cependant, à l'inverse des

observations réalisées dans la configuration précédente, le plafond de fumées modélisé est plus important qu'en expérimental. Ceci entraîne une sous-estimation du retour d'air frais.

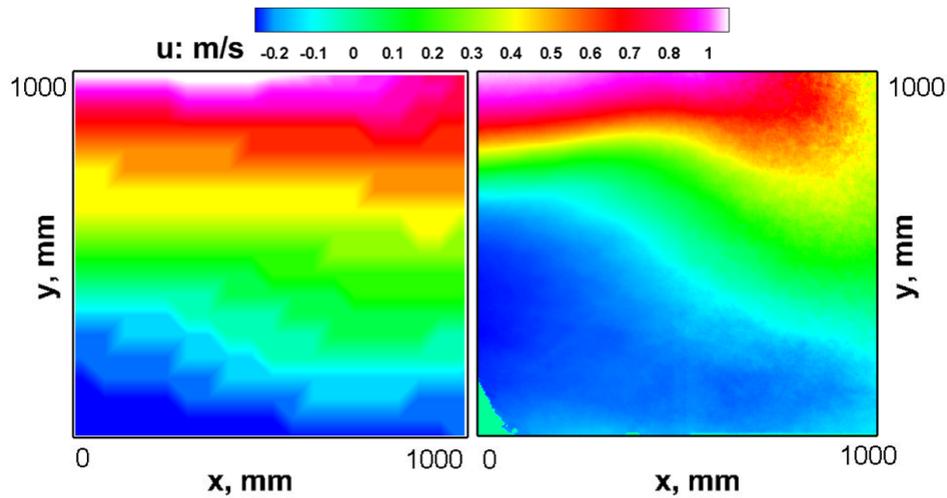


FIGURE 4.52: Comparaison vitesses numériques et expérimentales, exutoire ouvert, 200 kW

Le couple d'images obtenu pour un HRR de 500 kW est visible sur la figure 4.53.

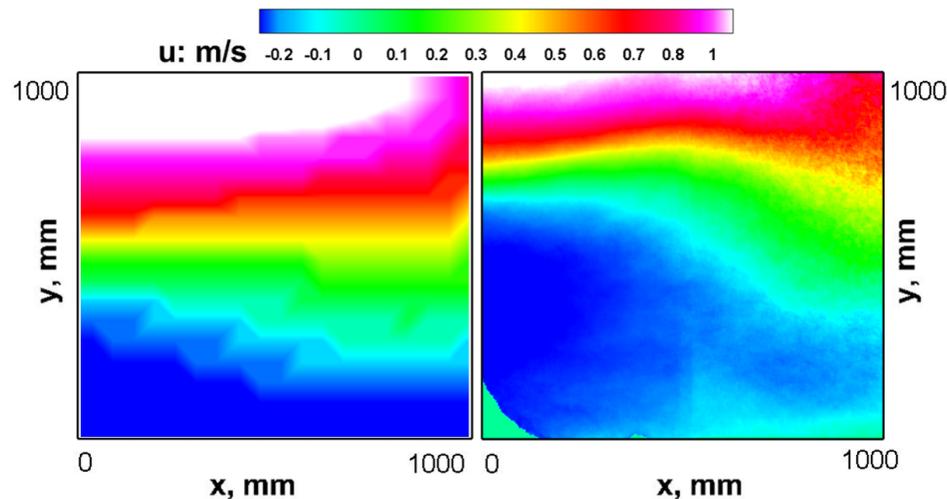


FIGURE 4.53: Comparaison vitesses numériques et expérimentales, exutoire ouvert, 500 kW

Comme pour les résultats de la puissance de 200 kW, le gradient de vitesse et la dynamique générale sont assez similaires. La répartition globale des gaz est assez bien simulée sur la partie

haute de l'image. Le retour des gaz frais en direction du brûleur est légèrement sous-estimé mais garde un aspect cohérent avec ce qui est observé expérimentalement par PIV.

Pour terminer l'analyse des vitesses numériques et expérimentales de la configuration exutoire ouvert, les résultats obtenus pour une puissance de foyer de 800 kW sont présentés à la figure 4.54. Sur la première partie de ces images, on observe une similitude dans le gradient de vitesse mais aussi dans la répartition des gaz chauds. Cependant, la deuxième partie de l'image numérique s'éloigne de ce qui est observé expérimentalement. En effet, aucun retour d'air frais n'est présent sur les résultats numériques. Ceci peut-être dû au fait que dans cette configuration, le cas à 800 kW subit des conditions fortement sous ventilées, ce qui rend la modélisation difficile. Ceci avait été observé précédemment dans ce chapitre, lors de l'étude des profils de températures.

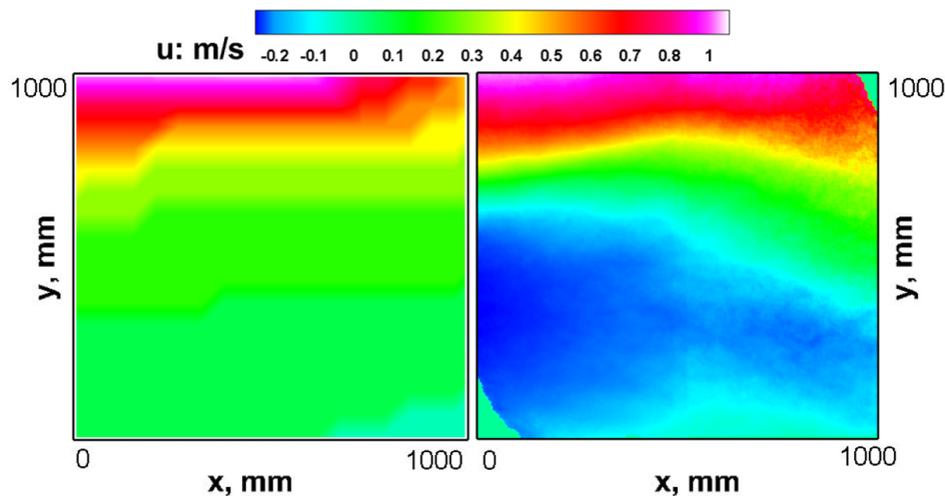


FIGURE 4.54: Comparaison vitesses numériques et expérimentales, exutoire ouvert, 800 kW

Dans cette configuration, les résultats obtenus numériquement sont assez proches de ceux mesurés expérimentalement. Les essais effectués en amont grâce aux profils de température avaient permis d'adapter les conditions limites des simulations. Ceci semble avoir permis de prendre en compte de nombreux paramètres nécessaires pour obtenir des résultats numériques fiables.

### 4.6.3 Comparaison des profils de vitesses en configuration ventilation mécanique

Les résultats présentés dans cette dernière partie ont pour but d'étudier l'amélioration des conditions de ventilation grâce à l'ajout de la ventilation mécanique. Pour cela, la figure 4.55 présente les résultats numériques et expérimentaux obtenus pour un HRR de 200 kW. Sur cette dernière, il est possible de voir que le gradient de vitesse est bien simulé. L'épaisseur de la couche de fumée semble cohérente avec celle observée sur le champ expérimental. Seule l'entrée d'air frais est légèrement sous-estimée.

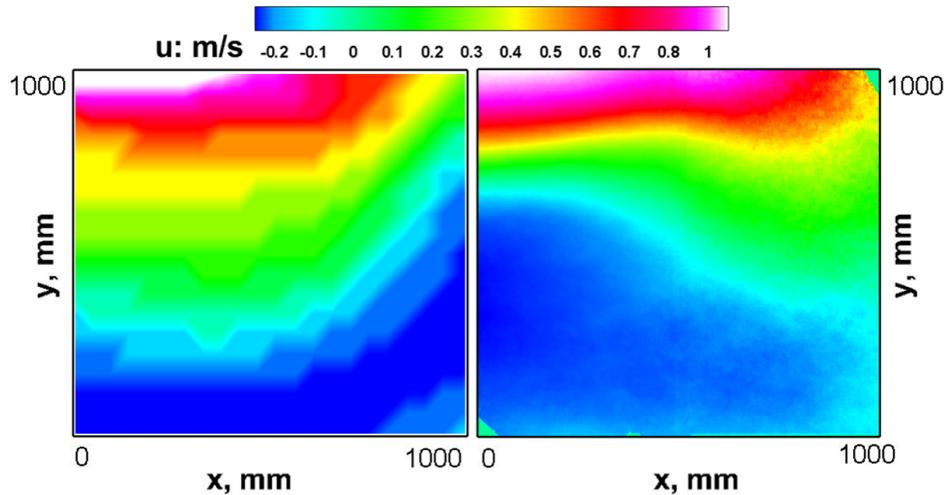


FIGURE 4.55: Comparaison vitesses numériques et expérimentales, ventilation mécanique, 200 kW

La figure 4.56 compare les profils de vitesse pour une puissance de foyer de 500 kW.

Cette dernière est très similaire à celle obtenue en configuration exutoire ouvert. Le gradient de vitesse et le comportement global semblent bien simulés. De plus, il est possible d'observer une légère amélioration sur la modélisation du retour d'air frais.

La figure 4.57 présente les résultats obtenus en configuration ventilation mécanique pour un HRR de 800 kW. Sur celle-ci, il est possible d'observer une nette amélioration des conditions de simulation que celles présentées à la figure 4.54 pour la configuration exutoire ouvert.

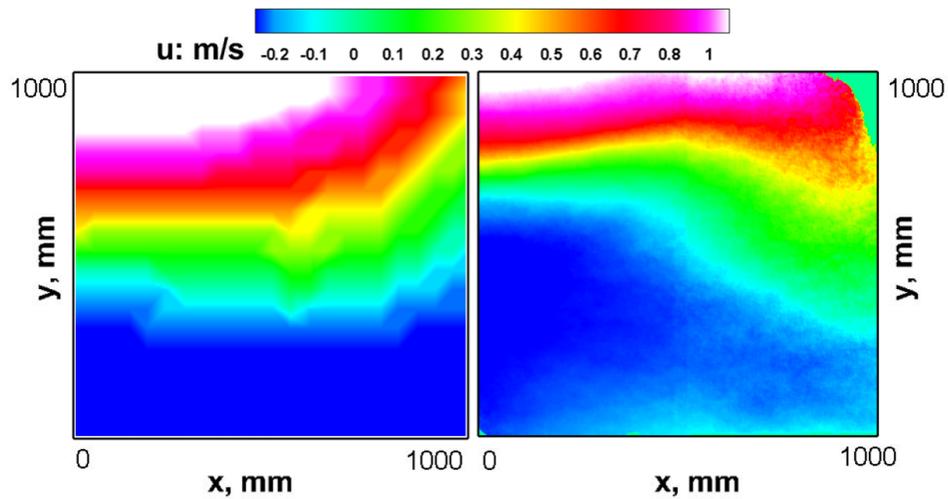


FIGURE 4.56: Comparaison vitesses numériques et expérimentales, ventilation mécanique, 500 kW

En effet, sur la figure 4.57, le gradient de vitesse, la dynamique globale ainsi que le retour d'air frais simulés sont assez proches de ce qui est mesuré expérimentalement. Ceci permet de penser que le logiciel FDS simule correctement la ventilation mécanique, même à forte puissance et ce, dans une configuration confinée.

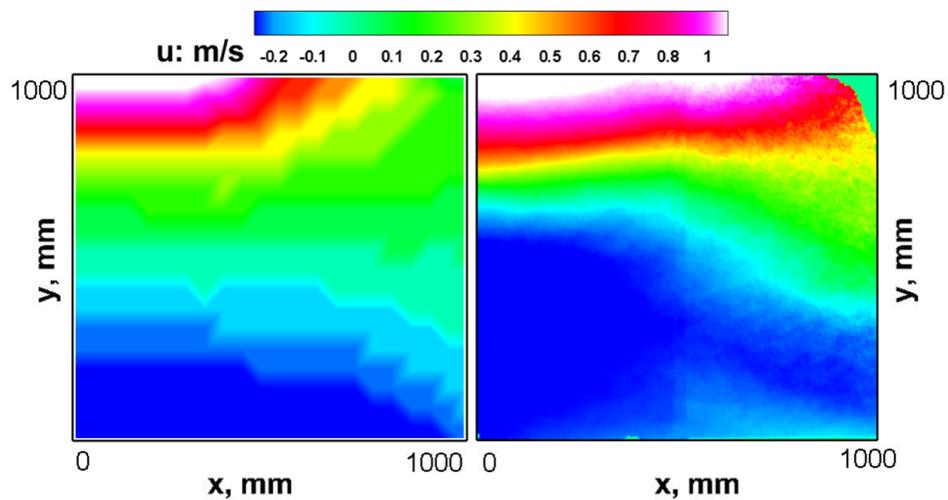


FIGURE 4.57: Comparaison vitesses numériques et expérimentales, ventilation mécanique, 800 kW

Pour finir la présentation et l'analyse de ces travaux de recherche, la figure 4.58 est tracée. Celle-ci présente les valeurs de vitesse maximales et minimales mesurées en numérique et en expérimental, pour les puissances de foyer de 200 kW, 500 kW et 800 kW et ce, dans les trois configurations présentées précédemment. Ce graphique permet d'analyser plus précisément les disparités obtenues entre les valeurs numériques et expérimentales.

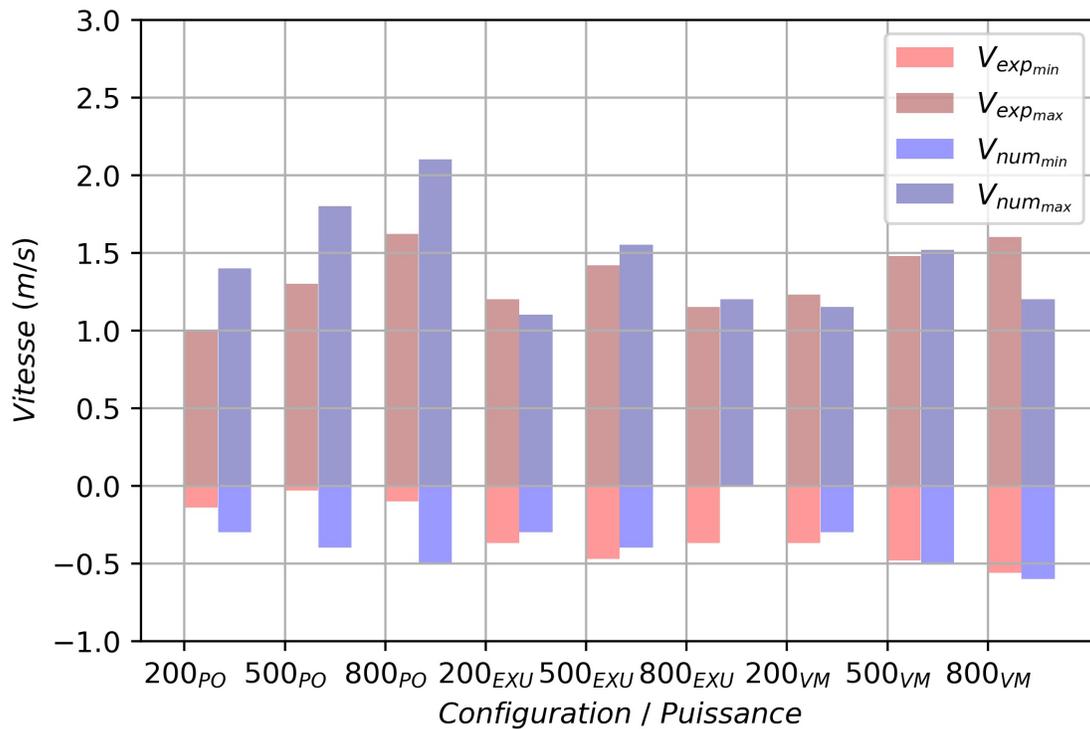


FIGURE 4.58: Comparaison vitesses numériques et expérimentales

Comme observé sur les comparaisons des champs moyens, les simulations numériques en configuration porte ouverte sont les plus éloignées des résultats expérimentaux.

Pour les configurations exutoire ouvert et ventilation mécanique, les valeurs obtenues sont assez similaires. Comme évoqué précédemment, ceci est probablement dû aux nombreux réglages effectués en amont sur les essais de températures. Afin d'améliorer les simulations porte ouverte, il serait nécessaire de faire de même.

## 4.7 Conclusion du chapitre 4

Les résultats des nombreux essais réalisés au cours de ces trois années de thèse ont été présentés dans ce chapitre. Les premiers essais de chimiluminescence ainsi que les profils de température ont permis de vérifier les hypothèses effectuées pour les calculs numériques. Le principal défi de ces travaux était de réaliser la mise en place de la PIV grand champs et ainsi d'obtenir des valeurs de vitesse de fumées par des mesures non intrusives. Pour couvrir plusieurs cas de feux de compartiments, trois configurations ont été testées : Porte ouverte, exutoire ouvert et ventilation mécanique. Ceci permet d'observer les vitesses de fumées produites lors d'essai en conditions ventilées ou sous ventilées, avec ou sans ventilation mécanique. Des puissances de 100 kW à 1 MW ont été testées. Pour les comparaisons numériques / expérimentales, seules trois puissances de foyers ont été retenues. En effet, ces dernières étaient représentatives des conditions de ventilation des principaux cas observés lors de feux de bâtiment.

Les premiers résultats semblent cohérents, autant dans les cas numériques qu'expérimentaux. Pour améliorer la fiabilité des résultats expérimentaux, d'autres points de mesures seraient nécessaires. L'ensemble de ces travaux apporte des informations supplémentaires sur le comportement des gaz chauds lors de feux de compartiment, notamment grâce à l'étude des vitesses de fumées. Ceci permettra par la suite d'apporter un outil d'aide à la décision pour les sapeurs-pompiers.

# Conclusion

Ces travaux de recherche ont permis d'étudier la dynamique des fumées d'incendie générées à partir d'un brûleur au propane et ce, dans le cas d'un feu de compartiments. Grâce à la modularité de la cellule expérimentale installée sur le site des sapeurs-pompiers de Seine-Maritime, différentes configurations ont été testées. La configuration petit volume exutoire ouvert a permis de comparer des profils de températures expérimentaux et numériques. Cette comparaison a rendu possible l'amélioration des simulations grâce à des modifications des conditions limites apportées suite à ces essais. Par la suite, les mêmes essais ont été réalisés en configuration grand volume exutoire ouvert. Ceux-ci ont permis d'affiner les hypothèses numériques et ainsi, d'améliorer à nouveau les simulations. Ces réglages effectués sur des profils de température introduisent les mesures des champs de vitesses réalisés par PIV. Cette configuration permet d'étudier des feux de compartiments dans des conditions ventilées et sous ventilées, mettant alors en évidence les phénomènes d'intermittences observés à l'exutoire. La configuration grand volume porte ouverte a quant à elle permis les mesures de vitesse dans un cas largement ventilé. Le manque d'essais précédent la mise en place de la PIV dans cette configuration peut expliquer les écarts observés avec les résultats numériques. La configuration ventilation mécanique, assez proche de la configuration exutoire ouvert avait pour objectif d'analyser l'impact d'un ajout d'air sur un foyer sous ventilé. D'autre part, la qualité du brûleur utilisé a rendu possible des essais allant jusqu'à 1 MW.

Lors des campagnes d'essais, de nombreuses contraintes expérimentales étaient présentes. Ce manuscrit de thèse reprend les solutions techniques mises en place afin d'obtenir des champs de vitesse sur une surface d'environ  $1\text{m}^2$ . Au final, 22 essais par PIV ont été réalisés. De ces

tests expérimentaux découlent plusieurs constats :

- Il a été possible de réaliser des mesures de PIV dans une enceinte confinée et sous ventilée, avec des puissances de foyer allant jusqu'à 1 MW ;
- La vitesse des gaz chauds augmente avec la puissance du foyer tant que la ventilation est suffisante pour garantir un apport de comburant nécessaire au bon développement du feu ;
- Les profils de vitesse et de température obtenus numériquement sont globalement assez proches de ce qui est mesuré expérimentalement ;
- Pour approfondir l'analyse expérimentale, il serait judicieux de faire des points de mesures expérimentaux supplémentaires, notamment en PIV ;
- En configuration porte ouverte, des essais de températures seraient nécessaires pour améliorer les hypothèses numériques et donc, les résultats ;
- La ventilation mécanique ajoutée en partie basse semblerait améliorer les conditions au sein de la cellule. Il serait intéressant de faire plus de points de mesures mais aussi de quantifier le volume de fumées extrait avec et sans ventilation. D'autre part, de nombreuses recherches existent sur la ventilation opérationnelle chez les sapeurs-pompier. Il peut être intéressant d'envisager des travaux futurs dans ce domaine ;
- Pour compléter les analyses effectuées sur les vitesses et températures de fumées, il serait envisageable d'analyser la composition chimique du fumées, notamment des imbrûlés.

Un étude complémentaire des fumées d'incendie permettra de confirmer et d'approfondir les hypothèses formulées au cours de ces travaux de recherche. Par la suite, ces dernières pourront donner lieux à des lois générales pouvant être utilisées lors des prises de décisions sur intervention pour feux.

# Annexe 1

# 1 Préambule

L'équipement est une cellule expérimentale de foyer principal instrumentée destiné à améliorer les connaissances sur la physique du feu et la propagation des fumées. Il ne doit en aucun cas être utilisé dans un cadre autre que celui qui en est raisonnablement attendu.

Le manuel d'exploitation :

- en aucun cas ne se substitue ou ne remet en cause les règlements en vigueur sur le site d'essais.
- doit être attentivement consulté avant l'installation ou utilisation de l'équipement.
- ne dégage en rien la responsabilité de l'utilisateur sur les solutions mises en œuvre, que les informations soient présentes ou absentes du document.
- sans caractère exhaustif, est conçu pour faciliter la compréhension du fonctionnement, servir de guide aux travaux de mise en service, aider à assurer une exploitation en toute sécurité et aider à la maintenance.

Les exploitants :

- prendront connaissances des informations données dans le manuel d'exploitation avant utilisation de l'équipement.
- engagent leur entière responsabilité s'ils modifient des équipements, les réglages des organes de sécurité ou s'ils ne respectent pas les consignes données par le manuel d'exploitation.

## 2 Précautions d'emploi

- ⓘ Ne pas faire fonctionner l'installation sans fermer totalement la cloison intermédiaire entre la cellule Essais et la cellule Mesure.
- ⓘ Ne pas obstruer l'aspiration et la sortie du ventilateur centrifuge en fonctionnement.
- ⓘ Ne pas toucher l'électrode d'allumage lors de la mise en marche de la cellule expérimentale.
- ⓘ Ne pas faire fonctionner le foyer avec des personnes dans la cellule Essais.
- ⓘ Ne pas faire fonctionner le brûleur sans la veilleuse.
- ⓘ Laisser la veilleuse en fonctionnement 30 secondes après un essai avant d'entrer dans la cellule Essais.
- ⓘ Ne pas faire fonctionner le ventilateur à plus de 50% de la puissance maximale avec les exutoires fermés.
- ⓘ Faire varier les différents débits fluidiques de façon progressive par pas de 10%
- ⓘ L'installation doit être branchée sur un réseau électrique équipé des sécurités nécessaires à la protection des personnes et des appareils, et d'une mise à la terre.

### 3 Principe

Pour générer une flamme d'une puissance maximale de 1 MW, le procédé consiste à faire débiter du combustible gazeux (propane) dans un foyer constitué de 36 brûleurs. Le débit de propane est régulé par un circuit fluide permettant d'alimenter les brûleurs ainsi qu'une veilleuse de sécurité. L'air servant de comburant à la combustion est généré par un ventilateur centrifuge à régime variable, alimentant le foyer par un plénum situé sous le brûleur.

Le foyer et le plénum sont installés dans la cellule Essais, cellule où la flamme est réalisée, dont le volume peut être modifié et étant équipée de 2 exutoires pour évacuer les fumées de combustion.

La cellule Mesure est juxtaposée à la cellule Essais pour réaliser les mesures de caractérisation de la combustion, contrôler l'interface IHM et protéger les organes de régulation fluide. La cellule Essais est équipée de hublots d'une surface de  $1m^2$  pour réaliser les mesures optiques.

Les figure 1 et 2 présentent des schémas de l'installation, et les figures 1 et 2 présentent des schémas de principe du fonctionnement de l'installation.

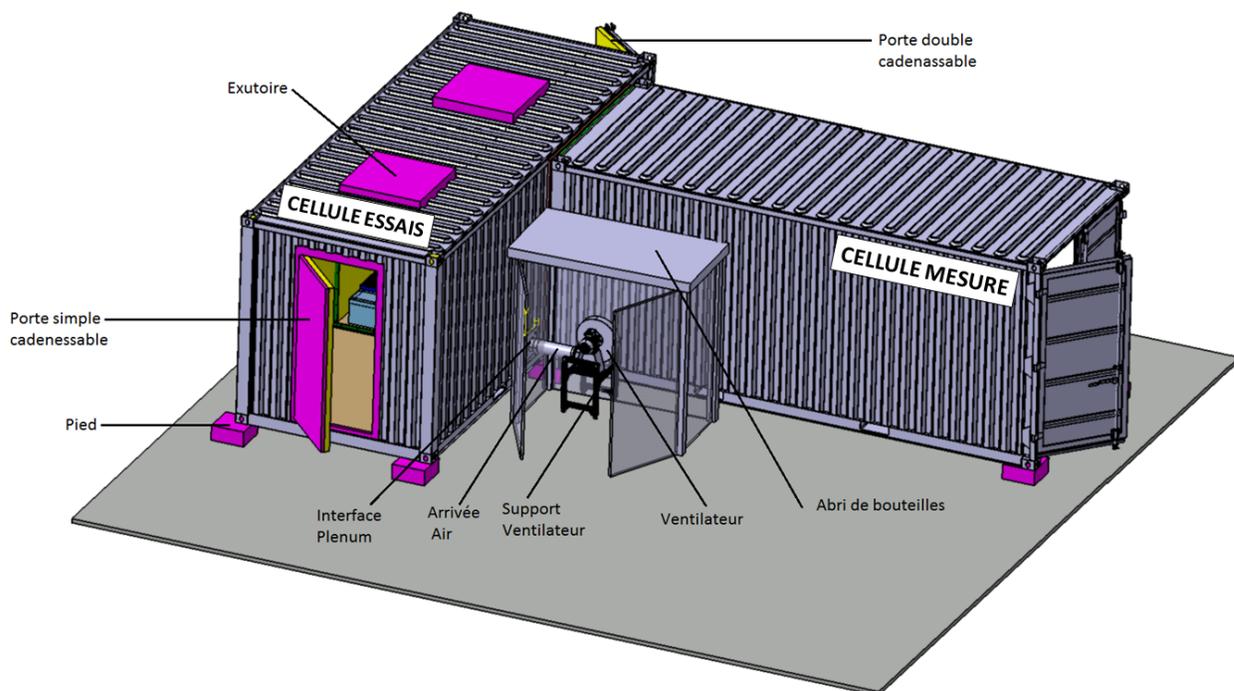


FIG. 1 – Schéma général de l'installation

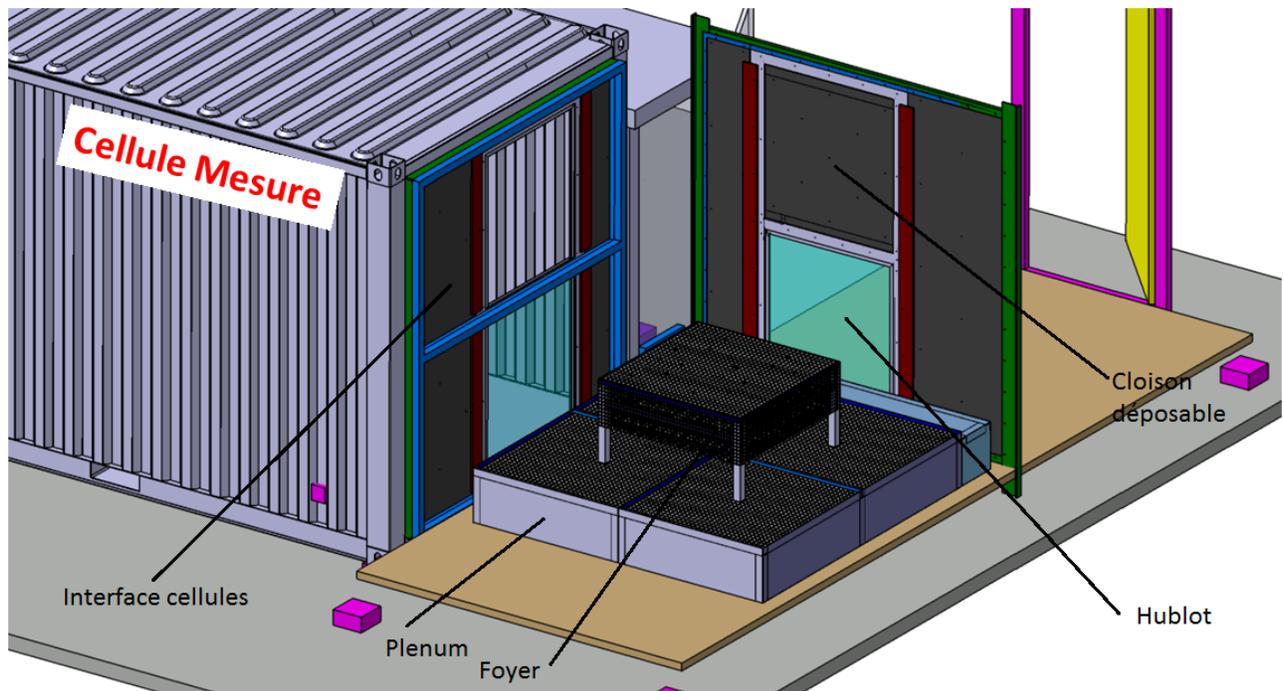


FIG. 2 – Schéma de l'intérieur de la cellule Essais

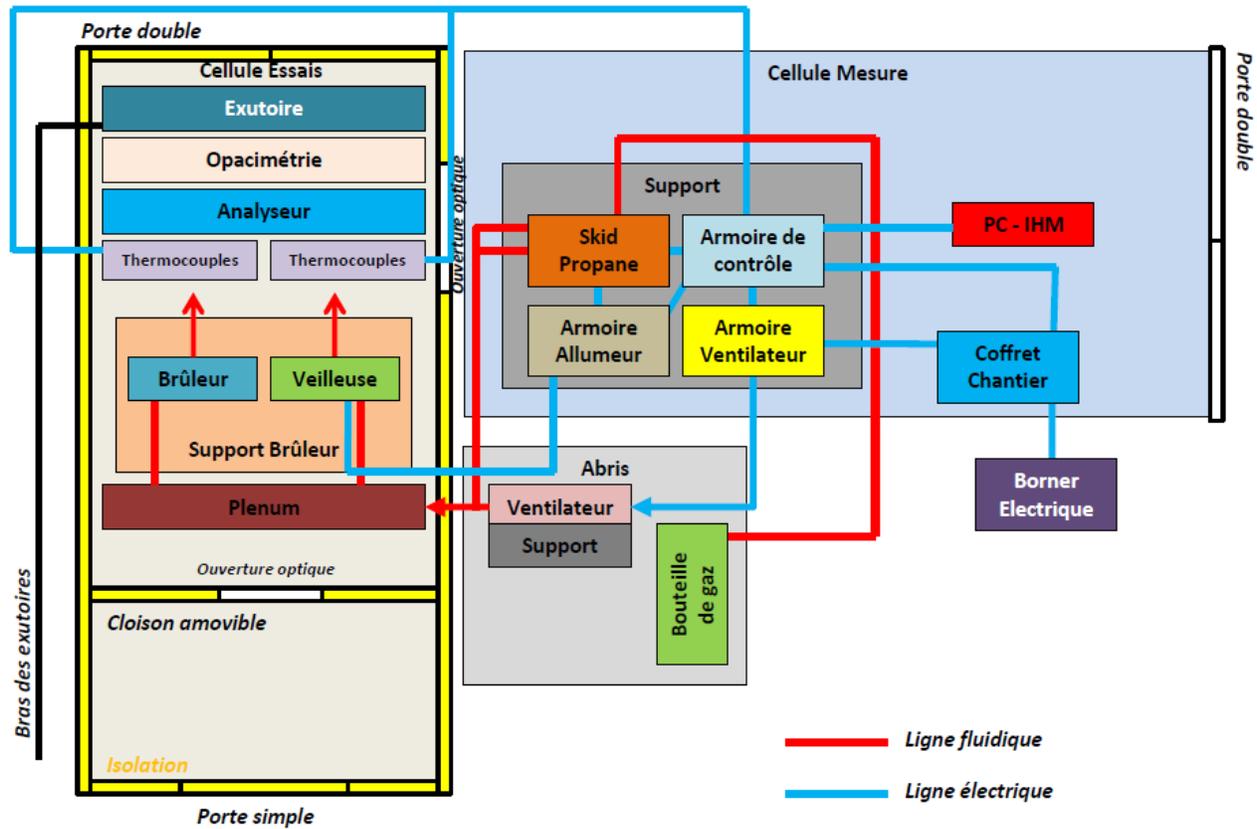


FIG. 3 – Schéma de principe général

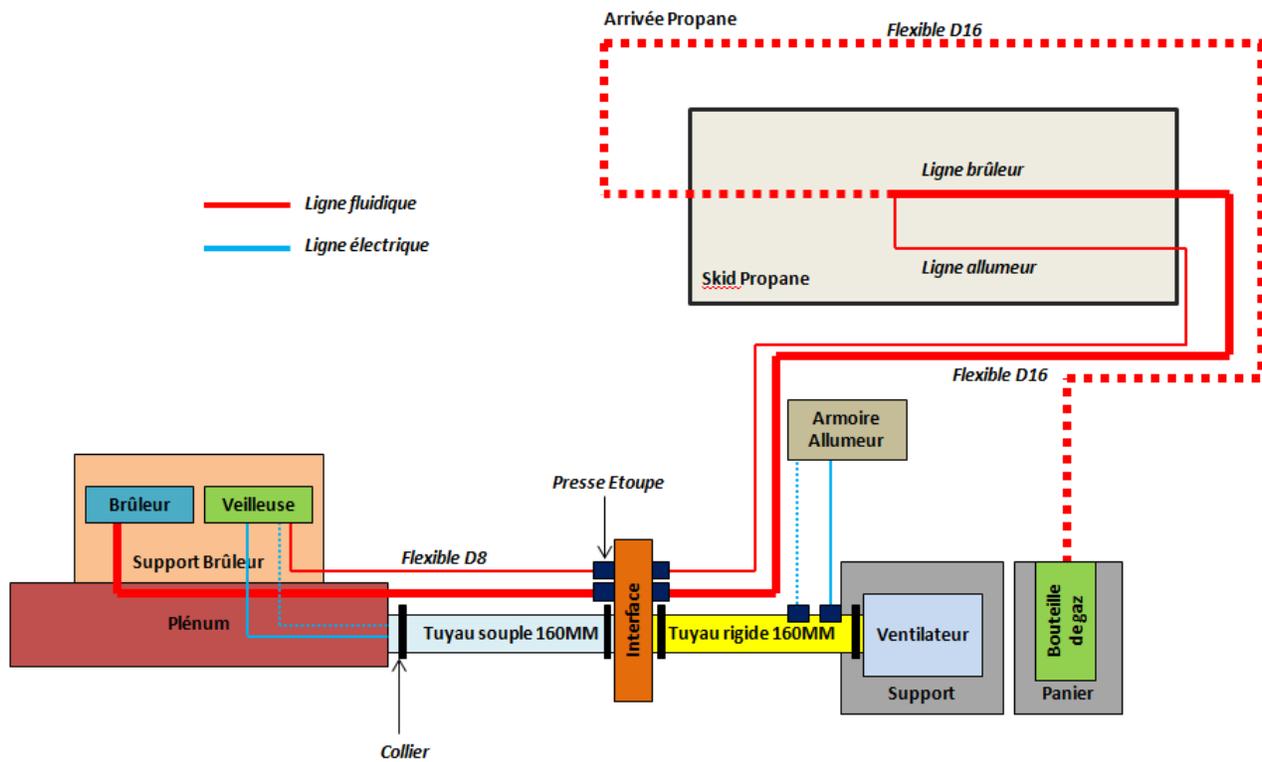


FIG. 4 – Schéma de principe fluide

## 4 Description des équipements

Cellule Essais		
Elément	Qté	Photographie
<p><b>Container Maritime pour réaliser les essais :</b> Renfort thermique pour 1100°C :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Laine de roche sur le plafond : Conductivité thermique 0.034 W/m.K</li> <li>■ Vermiculite sur parois latérales : densité 700 à 900 <math>kg/m^3</math>, taux de compression 6 <math>N/mm^2</math>, conductivité thermique à 600°C 0.21 W/m.K, expansion thermique 0.948%, épaisseur 30 mm.</li> <li>■ Laine minérale sur le plafond et les parois latérales</li> <li>■ Béton cellulaire de 70 mm d'épaisseur sur le sol</li> <li>■ Protection contre le ruissellement/stagnation de l'eau de pluie à l'intérieur</li> <li>■ Ouverture pour passage de câble et ventilateur (350 x 350 <math>mm^2</math>)</li> <li>■ Peinture Couleur Noire graphite (RAL 9011)</li> </ul>	1	
<p><b>Crochet de Maintient :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Maintient en position ouverte des portes à 180°</li> </ul>	2	
<p><b>Porte double cadenassable</b></p>	1	
<p><b>Porte simple cadenassable</b></p>	1	
<p><b>Cloison déposable :</b> Permettant de séparer le container en 1/3 - 2/3 avec étanchéité fumée, isolation et protection thermique (cloison sans porte). Cloison avec 2 ouvertures optiques de 1 <math>m^2</math></p>	1	
<p><b>Interface cellule Essais/cellule Mesure :</b> Vitre et montant de supportage de 2 vitres en vitrocéramiques 1 <math>m^2</math> démontables et remplaçables par des plaques opaques (isolées thermiquement)</p>	1	

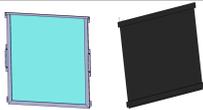
Elément	Qté	Photographie
<b>Ouverture Optique</b> : Vitres en vitrocéramique 1 m <sup>2</sup> démontables et remplaçables par des plaques opaques (isolées thermiquement)	4	
<b>Ouverture de 2.35 x 2.39 m</b> (Dimensions intérieurs) : Pour recevoir le container système de mesure	1	
<b>Pieds</b> : Bloc béton de 400x400 mm <sup>2</sup> sur 190 mm de hauteur	4	
<b>Exutoire sur le toit à commande manuelle externe</b> : 2 positions (ouverture ou fermeture) <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Surélévation maximum de l'ensemble à 3.30 m</li> <li>■ dimensions 1160x1160 mm<sup>2</sup></li> </ul>	2	

FIG. 5 – Tableau éléments de la cellule Essais

Métrologie		
Elément	Qté	Photographie
<b>Système analyseur de gaz</b> : Sonde pour au moins CO, O <sub>2</sub> et CO <sub>2</sub> et une connexion USB pour collecte des données + accessoires nécessaires au prélèvements	1	
<b>Opacimètre</b> (avec 5 cartouches d'étalonnage)	1	
<b>Arbres de 10 thermocouples</b> : Thermocouples isolés de type k	2	

FIG. 6 – Tableau éléments de la métrologie implantés dans la cellule Essais

Foyer		
Elément	Qté	Photographie
<b>Brûleur</b> : matrice 6x6 injecteurs en inox au propane avec possibilité de fermer chaque brûleur par un bouchon - Puissance maximale 1 MW - Diamètre intérieur injecteur : 6 mm	36	
<b>Ventilateur + variateur</b> : Débit volumique maximum de 857 Nm <sup>3</sup> /h d'air	1	
<b>Support brûleur</b> : Support caréné de 1 m <sup>2</sup> et 500 mm de hauteur	1	
<b>Plenum d'air</b> : Plenum de 4 m <sup>2</sup> et 300 mm de hauteur, divisible en 3 parties	1	
<b>Allumeur</b> : Transformateur de 300 Watts - Brûleur de 6 mm de diamètre intérieur - Electrode d'allumage	1	

FIG. 7 – Tableau des éléments du foyer implanté dans la cellule Essais

Cellule Mesure		
Elément	Qté	Photographie
<b>Container Maritime pour réaliser les mesures</b> : Pleine ouverture côté cellule Essais - Peinture Couleur Noire graphite (RAL 9011)	1	
<b>Crochet de Maintient</b> : Maintien en position ouverte des portes à 180°	2	
<b>Porte double cadenassable</b>	1	
<b>Pieds</b> Bloc béton de 400x400 m <sup>2</sup> sur 190 mm de hauteur	4	

FIG. 8 – Tableau des éléments de la cellule Mesure

Skid de contrôle		
Elément	Qté	Photographie
<b>Module d'acquisition et pilotage PC</b> : Pilotage de 3 vannes, 1 variateur et 2 vannes de régulation du débit, 1 centrale d'acquisition.	1	
<b>Skid de contrôle de propane</b> : Détendeur haute pression - vanne de régulation pilotée - vanne d'arrêt - capteur de pression	1	
<b>Abri bouteilles de combustible</b> : Cloisons grillagées, attaches bouteille, toit, porte	1	
<b>Armoire électrique d'alimentation</b> : Alimentation variateur/ventilateur, chaîne de mesure (triphasé)	4	
<b>Armoire électrique de contrôle d'acquisition</b> : Alimentation IHM, alimentation capteur, centrale d'acquisition (Basse Tension)	4	

FIG. 9 – Tableau des éléments du skid de contrôle

## 4.1 Interface de contrôle CIDONIE

Le banc d'essais possède un système d'acquisition National Instrument installé dans le coffret de commande. Ce système est géré par une interface Labview développée spécialement pour cette installation.

### 4.1.1 Installations

L'installation du logiciel et des drivers peut nécessiter des droits d'administrateur.

Système requis :

- Ordinateur équipé d'un port USB et d'un lecteur de DVD.
- Système d'exploitation MS Windows XP ou 7.

Installation des drivers NI-DAQ mx :

- Insérer le DVD NI-DAQ mx 9.6.1 fourni.
- Choisir "Installer NI-DAQmx" (Si le lancement automatique ne s'effectue pas : ouvrir le DVD puis exécuter "setup.exe").
- Se laisser guider par le programme d'installation (choisir l'installation standard).

Installation de l'interface Charline :

- Insérer le disque SDI-0715-01-M1 fourni.
- Ouvrir le dossier IHM/CIDONIE-Setup.
- Exécuter "setup.exe".
- Se laisser guider par le programme d'installation.

### 4.1.2 Principe de fonctionnement

L'interface est représentée par la figure 10. Elle comprend les fonctionnalités suivantes :

- Une barre de menu générique NI Labview (fichier, Edition,...) et trois boutons d'exécution : lancement coup par coup (par défaut), lancement de l'interface en continu (fonctionnement normal du logiciel), interruption du fonctionnement de l'interface.
- **Output** : chemin et nom de fichier générique des acquisitions. Utiliser le navigateur [M] (icône dossier) pour choisir le dossier de destination. Indiquer un nom de fichier avec son extension.
- Une sélection du nombre de brûleurs [A].
- 4 actionneurs :
  - Ouverture de l'électrovanne de ligne d'allumage [B].
  - Création de l'étincelle [C].
  - Allumage du ventilateur [D].
  - Ouverture de l'électrovanne de ligne brûleurs [F].
- Deux jauges de contrôles de débits :
  - Contrôle de débit d'air [E].
  - Contrôle de débit de propane [G].
- Retour d'information.
  - .[H] La température du propane dans la ligne brûleurs.
  - .[I] La pression du propane dans la ligne brûleur en aval de l'électrovanne.
  - .[J] Le débit de propane total en sortie des brûleurs.

- .[K] La puissance de combustion.
- .[L] Les températures sur les arbres de thermocouples dans le foyer principal.

Format des fichiers de mesures enregistrées :

- Nom générique dans **Output** : [Chemin][NomFichierGeneric].[extension] (ex : C:\NomFichierGeneric.txt).
- Nom des fichiers enregistrés NomFichierGeneric\_[date]\_[heure]\_[incrément].[extension]  
(ex : NomFichierGeneric\_13-04-03\_1902\_001.txt, NomFichierGeneric\_13-04-03\_1903\_001.txt, NomFichierGeneric\_13-04-03\_1903\_002.txt,...).
- Format des fichiers : ASCII
- Contenu des fichiers : données sous forme de colonnes : Temps(s), T1, Temps(s),T2....
- Nombre de ligne : temps d'acquisition.
- Temps entre les données : 1 Hz, origine des temps : 0 s.

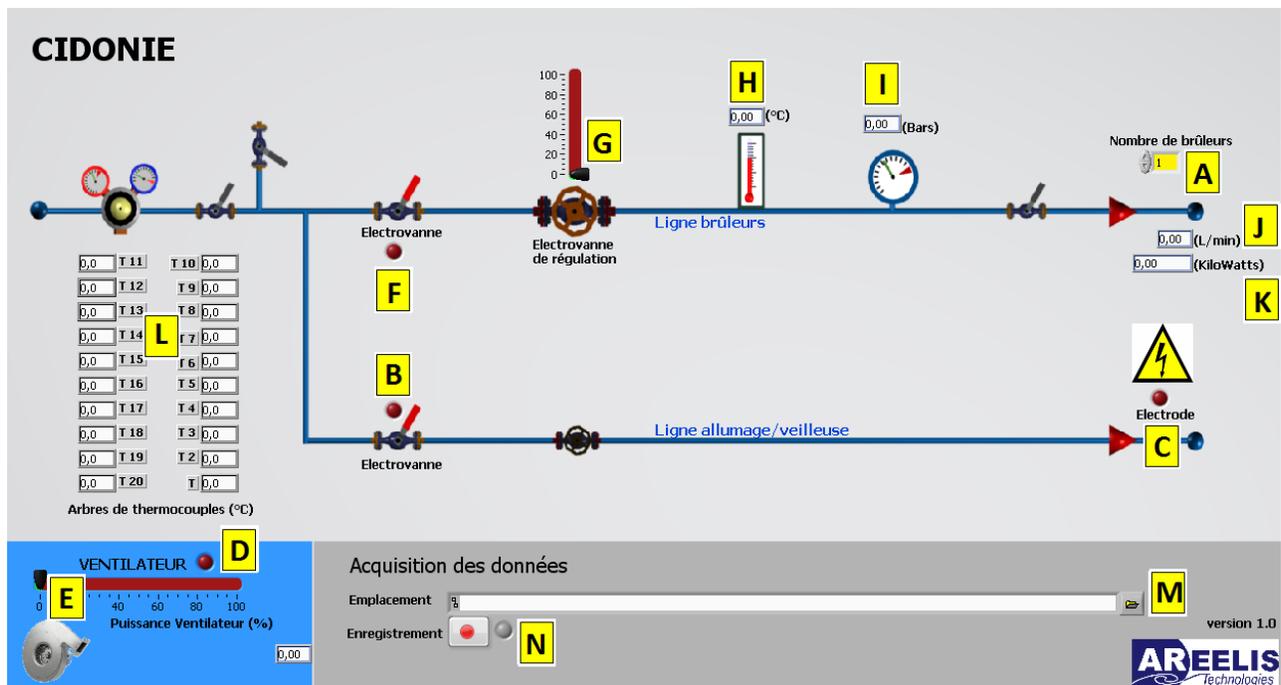


FIG. 10 – Interface de contrôle CIDONIE.

## 5 Mode d'emploi pour utilisation de la cellule expérimentale et interface CIDONIE

### 5.1 Allumage de la flamme du foyer

1. Retirer la grille au dessus du foyer si modification de la configuration du brûleur.
2. Sélectionner le nombre de brûleurs en obturant les brûleurs non-utilisés avec les bouchons dédiés. Visser les bouchons sur chaque embout de brûleur.
3. Remettre la grille en position initiale (attention à ne pas détériorer l'électrode d'allumage).
4. Vérifier si nécessaire la fermeture des portes de la cellule Essais et s'assurer de la non-présence de personne à l'intérieur de cette cellule.
5. Ouvrir l'exutoire au dessus du foyer.
6. Actionner l'armoire électrique d'alimentation.
7. Ouvrir les bouteilles de propane (pleine ouverture) dans l'abri grillagé.
8. Mettre le ventilateur en mode ON dans l'abri grillagé.
9. Ouvrir les vannes 1/4 de tours [1] et [2] sur le panneau de contrôle de propane.
10. Sélectionner le nombre de brûleur utilisés sur l'interface CIDONIE [A] (la figure 10).
11. Actionner l'électrovanne de la ligne de la veilleuse [3] : cliquer sur "ON Veilleuse" [B] sur interface CIDONIE.
12. Actionner l'étincelle l'allumage [4] : cliquer sur "Etincelle" sur interface CIDONIE [C] .
13. Dès la présence de flamme, actionner le ventilateur : cliquer sur "ON Ventilateur" [D] sur l'interface CIDONIE.
14. Régler PROGRESSIVEMENT la puissance du ventilateur sur le curseur [E] de l'interface CIDONIE.
15. Actionner l'électrovanne [5] et l'électrovanne proportionnelle [6] de la ligne brûleur : cliquer sur "ON Brûleur" [F] puis PROGRESSIVEMENT sur le curseur dédié à la variation de débit [G] sur interface CIDONIE.
16. Modifier le débit de propane en jouant PROGRESSIVEMENT sur le curseur de l'interface dédié à la variation de débit.
17. Sur l'interface CIDONIE, les informations suivantes sont indiquées :
  - .[H] La température du propane dans la ligne brûleurs.
  - .[I] La pression du propane dans la ligne brûleur en aval de l'électrovanne.
  - .[J] Le débit de propane total en sortie des brûleurs.
  - .[K] La puissance de combustion.
  - .[L] Les températures sur les arbres de thermocouples dans le foyer principal.

### 5.2 Acquisition des températures des arbres de thermocouples

1. Sélectionner "l'emplacement" de l'enregistrement du fichier de données sur l'interface CIDONIE [M].
2. Lancer l'acquisition en cliquant sur "Enregistrement" sur l'interface CIDONIE [N].
3. Arrêter l'acquisition en cliquant à nouveau "Enregistrement" sur l'interface CIDONIE [N].

### 5.3 Arrêt de la flamme du foyer

1. Mettre PROGRESSIVEMENT à “ZERO” sur l’interface CIDONIE la régulation du débit de propane avec l’électrovanne proportionnel [G].
2. Couper l’électrovanne de la ligne foyer principal : cliquer sur “OFF Electrovanne” [F] sur l’interface CIDONIE.
3. Attendre 30 secondes avec la veilleuse en marche.
4. Couper l’électrovanne de la ligne de la veilleuse cliquer sur “OFF veilleuse” [B] sur interface CIDONIE.
5. Fermer les vannes 1/4 de tours [1] et [2] sur le panneau de contrôle fluidique.
6. Mettre PROGRESSIVEMENT à “ZERO” sur l’interface CIDONIE la puissance du ventilateur [E]
7. Couper le ventilateur : cliquer sur “OFF ventilateur” [D] sur l’interface CIDONIE.
8. Fermer les exutoires.
9. Mettre le ventilateur en mode “OFF dans l’abri grillagé.
10. Fermer les bouteilles de propane dans l’abri grillagé.
11. Couper l’armoire électrique d’alimentation.

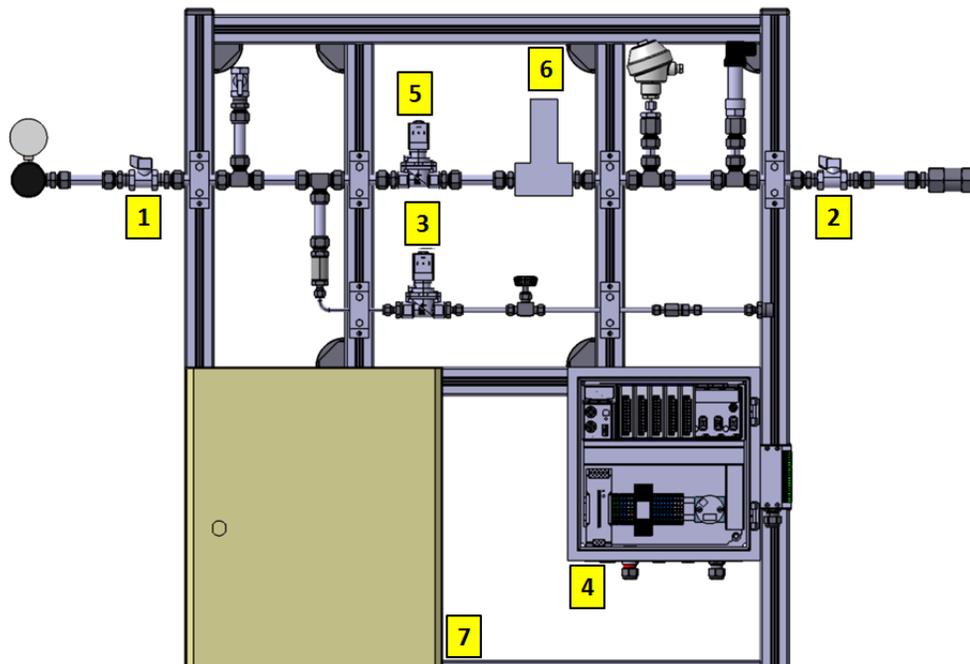


FIG. 11 – Panneau de contrôle de propane

## 5.4 Arrêt d'urgence

- Le bouton d'arrêt d'urgence de l'armoire de commande permet de couper électriquement :
  - les 3 électrovannes du circuit fluide (normalement ouvertes).
  - le ventilateur.
  - l'électrode d'allumage.
  - l'instrumentation de l'interface.
- Le bouton d'arrêt d'urgence de l'armoire électrique d'alimentation permet de couper électriquement l'ensemble des appareils électriques de la cellule expérimentale.

## 5.5 Démontage et remontage de la cloison de modularité

La cloison de modularité peut être démontée pour faire varier le volume d'essai. La figure 12 présente les différentes pièces de la cloison amovible :

- (a) La structure mécanique de la cloison amovible composée de 5 pièces :
  - (1) (2) (3) : Tôles amovibles
  - (4) Hublot en tôle
  - (5) Hublot en vitrocéramique
- (b) L'isolation de la cloison de modularité est composé de 8 pièces comprenant chacune de la vermiculite et de la laine de roche.

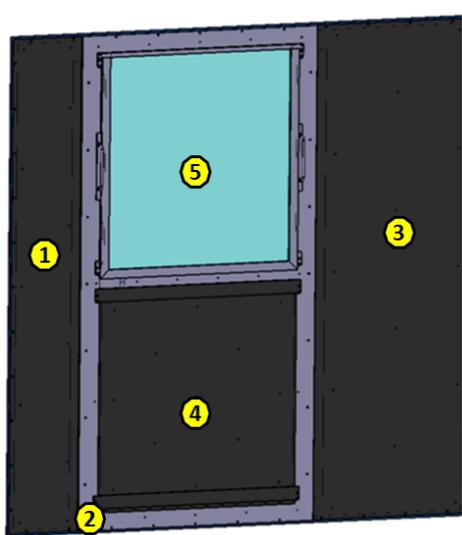
Ordre de démontage :

1. Démontez les hublots de la structure mécanique (12 (a)) sans enlever l'isolation : pièces (4) et (5).
2. Démontez les pièces d'isolations (1) à (7) (12 (b)) sans ordre particulier.
3. Démontez la pièce de structure mécanique (2).
4. Démontez les pièces de structure mécanique (1) et (3).

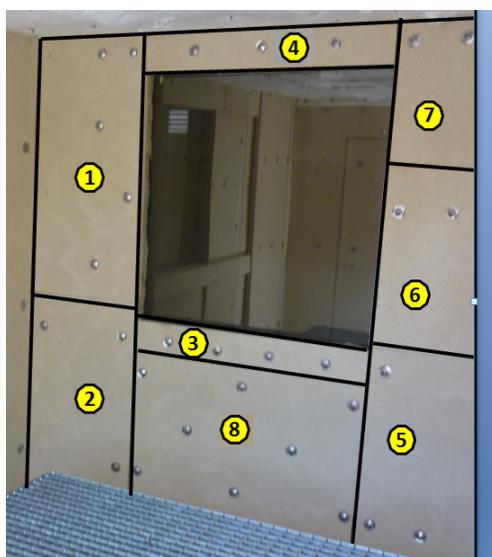
Ordre de montage :

1. Monter les pièces de structure mécanique (1) et (3).
2. Monter la pièce de structure mécanique (2).
3. Monter les pièces d'isolations (1) à (7) (12 (b)) sans ordre particulier.
4. Monter les hublots de la structure mécanique (12 (a)).

Remarque 1 Les hublots peuvent être démontés sans enlever leur isolation



(a) Cloison de modularité



(b) Isolation de la cloison de modularité

FIG. 12 – Démontage et remontage de la cloison de modularité

## **6 Plans de définition de la cellule expérimentale - voir TOME 2, 3 et 4**

L'ensemble des plans de définition de la cellule expérimentale listés ci-dessous sont transmis en annexe dans ce rapport.

- Définition Interface optique démontable
- Définition interface cellules Mesure/Essais
- Définition Cloison de modularité de volume d'essais
- Définition Interface en tôle démontable
- Définition Ensemble Foyer de 36 brûleurs
- Définition circuit électrique
- Définition circuit fluide
- Définition plénum
- Définition exutoire
- Définition container Essais
- Définition container Mesure

## **7 Documents des éléments de la cellule expérimentale - voir TOME 4**

L'ensemble des documents des éléments de la cellule expérimentale listés ci-dessous sont transmis en annexe dans ce rapport.

- Ventilateur centrifuge
- Electrovanne
- Electrovanne proportionnelles
- Armoire ventilateur



# Bibliographie

- [1] R. J. ADRIAN. Twenty years of particle image velocimetry. *Experiments in fluids*, 39(2) :159–169, 2005.
- [2] AFNOR. Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures. *Afnor Normalisation*, 2009.
- [3] AFNOR. Eurocode 3 : Calcul des structures en acier. *Afnor normalisation*, 2010.
- [4] AFNOR. Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton. *Afnor normalisation*, 2010.
- [5] AFNOR. Eurocode 6 : Calcul des ouvrages en maçonnerie. *Afnor normalisation*, 2010.
- [6] AFNOR. Eurocode 7 : Calcul géotechnique. *Afnor normalisation*, 2011.
- [7] AFNOR. Eurocode 2 : Calcul des structures en béton. *Afnor Normalisation*, 2013.
- [8] AFNOR. Eurocode 5 : Calcul des structures en bois. *Afnor normalisation*, 2013.
- [9] AFNOR. Eurocode 8 : Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes. *Afnor normalisation*, 2013.
- [10] AFNOR. Eurocode 9 : Calcul des structures en alliages d’aluminium. *Afnor normalisation*, 2014.
- [11] V. BABRAUSKAS. A closed-form approximation for post-flashover compartment fire temperatures. *Fire Safety Journal*, 4(1) :63–73, 1981.
- [12] L. BENGTTSSON. Enclosure fire. 2001.
- [13] P. BEPOIX. Les phénomènes thermiques. 2015.
- [14] R. BILGER. The structure of turbulent nonpremixed flames. In *Symposium (International) on Combustion*, volume 22, pages 475–488. Elsevier, 1989.

- [15] S. BISHOP, P. HOLBORN, A. N. BEARD, and D. DRYSDALE. Non linear dynamics of flashover in compartment fires. *Fire Safety Journal*, 21(1) :11–45, 1993.
- [16] R. BORGHI and M. DESTRIAU. La combustion et les flammes. 1995.
- [17] A. BOUTIER. Vélocimétrie laser pour la mécanique des fluides. *Hermes Science-Lavoisier*, 2012.
- [18] A. BOUTIER and M. LEFEBVRE. Métrologie laser pour la mécanique des fluides, 2012.
- [19] S. BRISEBOIS and M. FOURNELLE. *Les phénomènes thermiques de l'incendie de bâtiment*. Flash formation, 2015.
- [20] S. BRISEBOIS and M. FOURNELLE. *Analyse de la fumée et de l'incendie*. Flash formation, 2016.
- [21] R. A. BRYANT. The application of stereoscopic piv to measure the flow of air into an enclosure containing a fire. *Experiments in fluids*, 47(2) :295–308, 2009.
- [22] R. A. BRYANT. A comparison of gas velocity measurements in a full-scale enclosure fire. *Fire safety journal*, 44(5) :793–800, 2009.
- [23] R. A. BRYANT and G. W. MULHOLLAND. A guide to characterizing heat release rate measurement uncertainty for full-scale fire tests. *Fire and materials*, 32(3) :121–139, 2008.
- [24] M. BULLEN and P. THOMAS. Compartment fires with non-cellulosic fuels. In *Symposium (International) on Combustion*, volume 17, pages 1139–1148. Elsevier, 1979.
- [25] J. M. CLEMENT. Experimental verification of the fire dynamics simulator (fds) hydrodynamic model. 2000.
- [26] A. COLLIN, A. MARCHAND, A. KADI, Z. ACEM, P. BOULET, J. PAGEAUX, S. PINSON, M. LEPELLETIER, Y. VAN WAELFELGHEM, F. MAGNOLINI, et al. Study on visible–ir radiative properties of personal protective clothings for firefighting. *Fire Safety Journal*, 71 :9–19, 2015.
- [27] L. Y. COOPER. Fire-plume-generated ceiling jet characteristics and convective heat transfer to ceiling and wall surfaces in a two-layer fire environment : Uniform temperature ceiling and walls. *Fire Science and Technology*, 13(1+ 2) :1\_1–1\_17, 1993.

- [28] X. CORE. *Méthode adaptative de raffinement local multi-niveaux pour le calcul d'écoulements réactifs à faible nombre de Mach*. PhD thesis, Université de Provence-Aix-Marseille I, 2002.
- [29] A. V. CORREA. *Etude expérimentale des concentrations de suie et des vitesses dans une flamme de paroi verticale*. PhD thesis, Normandie Université, 2017.
- [30] P. DAHER, C. LACOUR, F. LEFEVBRE, E. DOMINGUES, A. CESSOU, and B. LECORDIER. Etude des variabilités cycliques dans le cylindre d'un moteur essence à injection directe par la piv haute cadence. *Congrès de Techniques Laser, CFTL 2016*.
- [31] E. DELANGLE. *Analyse expérimentale de combustion globalement pauvre : effet d'une stratification sur la propagation de flammes vers des mélanges ininflammables*. PhD thesis, 2015.
- [32] M. A. DELICHATSIOS and G. W. SILCOCK. Fully involved enclosure fires : effects of fuel type, fuel area and geometry. *Fire Safety Science*, 7 :59–73, 2003.
- [33] S. DESANGHERE. *Détermination des conditions d'échauffement de structure extérieure à un bâtiment en situation d'incendie*. PhD thesis, INSA de Rouen, 2006.
- [34] . Direction de la défense et de la sécurité civiles. Guide nationale de référence, explosion de fumées – embrasement gÉnÉralisÉ Éclair.
- [35] D. DRYSDALE. An introduction to fire dynamics. 1985.
- [36] M. FARADAY. The chemical history of a candle. 2012.
- [37] J. FLOYD. Coupling a network hvac model to a computational fluid dynamics model using large eddy simulation. *Fire Safety Science*, 10 :459–470, 2011.
- [38] G. P. FORNEY. Smokeview (version 5), a tool for visualizing fire dynamics simulation data, volume ii : Technical reference guide. *NIST Special Publication*, 1017 :2.
- [39] J. FRANCIS and A. CHEN. Observable characteristics of flashover. *Fire Safety Journal*, 2012.
- [40] K. P. GEIGLE, R. HADEF, M. STÖHR, and W. MEIER. Flow field characterization of pressurized sooting swirl flames and relation to soot distributions. *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(3) :3917–3924, 2017.

- [41] J. P. GORE, H. R. BAUM, et al. Measurements and prediction of air entrainment rates of pool fires. In *Symposium (International) on Combustion*, volume 26, pages 1453–1459. Elsevier, 1996.
- [42] K. GOSSE, P. PARANTHOËN, B. PATTE-ROULAND, and M. GONZALEZ. Dispersion in the near wake of idealized car model. *International journal of heat and mass transfer*, 49(9-10) :1747–1752, 2006.
- [43] K. GOSSE, B. PATTE-ROULAND, M. GONZALEZ, and P. PARANTHOËN. Scalar dispersion in the near wake of a simplified model car. *Experiments in fluids*, 40(1) :135–140, 2006.
- [44] D. T. GOTTUK, M. J. PEATROSS, J. P. FARLEY, and F. W. WILLIAMS. The development and mitigation of backdraft : a real-scale shipboard study. *Fire Safety Journal*, 33(4) :261–282, 1999.
- [45] D. GUYOT, F. GUETHE, B. SCHUERMANS, A. LACARELLE, and C. O. PASCHEREIT.  $\text{Ch}^*/\text{oh}^*$  chemiluminescence response of an atmospheric premixed flame under varying operating conditions. In *ASME Turbo Expo 2010 : Power for Land, Sea, and Air*, pages 933–944. American Society of Mechanical Engineers, 2010.
- [46] M. HAUDIQUERT, B. PATTE-ROULAND, A. BOUKHALFA, and A. COPPALLE. Measurements of soot particle flow rates in flame zone of turbulent diffusion flames. *Combustion science and technology*, 132(1-6) :391–397, 1998.
- [47] G. HESKESTAD. Dynamics of the fire plume. *The Royal Society*, 1998.
- [48] G. HESKESTAD. Sfp handbook of fire protection engineering, third edition, chapter fire plumes, flame height, and air entrainment. 2002.
- [49] I. HORVATH and J.-M. BUCHLIN. Extreme piv applications : simultaneous and instantaneous velocity and concentration measurements on model and real scale car park fire scenarios. 2012.
- [50] P. JOURDA and al. Simplified models of interactions of foam jets with hot smoke layers in under-ventilated fire conditions according to full-scale experiments. *Interflam 2010*, 2010.

- [51] G. KAGOU, B. KOLA, and R. MOUANGUE. Cfd studies of the propagation and extinction of flame in an under-ventilated and over-ventilated enclosure. *Journal of Taibah University for Science*, 10(3) :393–402, 2016.
- [52] B. KARLLSSON and J. QUINTIERE. Enclosure fire dynamics. 2000.
- [53] K. KAWAGOE. Fire behavior in rooms. 1958.
- [54] R. D. KEANE and R. J. ADRIAN. Theory of cross-correlation analysis of piv images. *Applied scientific research*, 49(3) :191–215, 1992.
- [55] M. KÖHLER, I. BOXX, K. GEIGLE, and W. MEIER. Simultaneous planar measurements of soot structure and velocity fields in a turbulent lifted jet flame at 3 khz. *Applied Physics B*, 103(2) :271, 2011.
- [56] J. KOJIMA, Y. IKEDA, and T. NAKAJIMA. Spatially resolved measurement of  $oh^*$ ,  $ch^*$ , and  $c2^*$  chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane/air premixed flames. *Proceedings of the Combustion institute*, 28(2) :1757–1764, 2000.
- [57] K. LAMBERT and S. BAALJ. *Progression du feu. Approche technique, application tactique*. Sdu UITGEVERS, 2013.
- [58] M. LAW. Fire safety of external building elements. the design approach. *Engineering Journal. American Institute of Steel Construction, 2n Quarter*, pages 59–74, 1978.
- [59] M. LAW. O. brien t. fire safety of bare external structural steel. the steel construction institute. *SCI Publication*, 9, 1989.
- [60] LCPP. Guide de bonnes pratiques pour les études d'ingénierie de désenfumage dans les établissements recevants du public. 2017.
- [61] B. LECORDIER. *Etude de l'interaction de la propagation d'une flamme prémélangée avec le champ aérodynamique, par association de la tomographie laser et de la vélocimétrie par images de particules*. PhD thesis, Université de Rouen, Mont-Saint-Aignan, FRANCE, 1997.
- [62] B. LECORDIER and M. TRINITE. Advanced piv algorithms with image distortion validation and comparison using synthetic images of turbulent flow. In *Particle Image Velocimetry : Recent Improvements*, pages 115–132. Springer, 2004.

- [63] J. LEMETAYER. *Etude par PIV par fluorescence de l'interaction d'un spray avec un écoulement gazeux en aérodynamique contrôlée : application à l'injection directe essence*. PhD thesis, Rouen, INSA, 2016.
- [64] D. MADRYKOWSKI and S. KERBER. Nist technical note 1618, fire fighting tactics under wind driven conditions : Laboratory experiments. National Institute of Standards and Technology, 2009.
- [65] D. MADRYKOWSKI and S. KERBER. Nist technical note 1629, fire fighting tactics under wind driven conditions : 7-story building experiments. National Institute of Standards and Technology, 2009.
- [66] B. A. MAGNOGNOU SAMBOUINI. *Etudes numériques et expérimentales sur le risque d'inflammation des gaz imbrûlés au cours d'un incendie en milieu sous-ventilé*. PhD thesis, 2016. Thèse de doctorat dirigée par Wang, Hui Ying et Garo, Jean-Pierre Energétique, thermique, combustion Chasseneuil-du-Poitou, Ecole nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique 2016.
- [67] A. MAJDA and J. SETHIAN. The derivation and numerical solution of the equations for zero mach number combustion. *Combustion science and technology*, 42(3-4) :185–205, 1985.
- [68] P. MALBOIS. *Analyse expérimentale par diagnostics lasers du mélange kérosène/air et de la combustion swirlée pauvre prémélangée, haute-pression issue d'un injecteur Low-NOx*. PhD thesis, Normandie, 2017.
- [69] M. MARIN and F. BAILLOT. Experimental study of the lifting characteristics of the leading-edge of an attached non-premixed jet-flame : Air-side or fuel-side dilution. *Combustion and Flame*, 171 :264–280, 2016.
- [70] B. MCCAFFREY, J. QUINTIERE, and M. HARKLEROAD. Estimating room temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations. *Fire Technology*, 17(2) :98–119, 1981.
- [71] R. MCDERMOTT, K. MCGRATTAN, and S. HOSTIKKA. Fire dynamics simulator (version 5) technical reference guide. *NIST Special Publication*, 1018(5), 2008.

- [72] R. MCDERMOTT, K. MCGRATTAN, and S. HOSTIKKA. Fire dynamics simulator (version 5) technical reference guide, validation. *NIST Special Publication*, (5), 2008.
- [73] R. MCDERMOTT, K. MCGRATTAN, and S. HOSTIKKA. Fire dynamics simulator (version 5) technical reference guide, verification. *NIST Special Publication*, (5), 2008.
- [74] K. MCGRATTAN. Verification and validation of selected fire models for nuclear power plant applications, volume 7 : Fire dynamics simulator (fds). *Final Report, NUREG-1824, EPRI*, 1011999, 2007.
- [75] K. MCGRATTAN, S. HOSTIKKA, R. MCDERMOTT, J. FLOYD, C. WEINSCHEK, and K. OVERHOLT. Fire dynamics simulator user's guide. *NIST special publication*, 1019 :6thEdition, 2013.
- [76] B. MERCI and T. BEJI. *Fluid mechanics aspects of fire and smoke dynamics in enclosures*. CRC Press, 2016.
- [77] F. MORANDINI. *Modelisation semi-physique de la propagation d'un feu de vegetation : contribution du rayonnement en presence de pente et de vent*. PhD thesis, Corte, 2000.
- [78] B. MORTON, G. TAYLOR, and J. TURNER. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. In *Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, physical and engineering sciences*, volume 234, pages 1–23. The Royal Society, 1956.
- [79] B. MÜLLER and B. MULLER. Low mach number asymptotics of the navier-stokes equations and numerical implications. 1999.
- [80] S. NAMBULLY, P. DOMINGO, V. MOUREAU, and L. VERVISCH. A filtered-laminar-flame pdf sub-grid scale closure for les of premixed turbulent flames. part i : Formalism and application to a bluff-body burner with differential diffusion. *Combustion and Flame*, 161(7) :1756–1774, 2014.
- [81] V. NARAYANASWAMY and N. CLEMENS. Simultaneous lii and piv measurements in the soot formation region of turbulent non-premixed jet flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 34(1) :1455–1463, 2013.
- [82] A. NGONDIEP, M. GONZALEZ, G. GODARD, C. Gobin, M. LEBEY, and P. PARANTHOËN. Champs dynamiques et thermiques dans une enceinte ventilée en ré-

- gimes naturel, intermédiaire et bloqué ; cas instationnaire. *20ème Congrès Français de Mécanique, 28 août/2 sept. 2011-25044 Besançon, France (FR)*, 2011.
- [83] A. NGONDIEP, M. GONZALEZ, M. LEBEY, and P. PARANTHOEN. Débits de ventilation créés par un panache forcé dans une enceinte ventilée. *21ème Congrès Français de Mécanique, 26 au 30 août 2013, Bordeaux, France (FR)*, 2013.
- [84] A. NGONDIEP, M. GONZALEZ, B. PATTE-ROULAND, and P. PARANTHOËN. Flows produced by a forced plume in a ventilated enclosure. In *Journal of Physics : Conference Series*, volume 395, page 012097. IOP Publishing, 2012.
- [85] NIST. <https://www.fmglobal.com/research-and-resources/research-and-testing/theoretical-computational-and-experimental-research/open-source-fire-modeling>.
- [86] NIST. <https://www.nist.gov/services-resources/software/fds-and-smokeview>.
- [87] T. J. OHLEMILLER. Sfp handbook of fire protection engineering, third edition, chapter smoldering combustion, pages 2–200, 2–210. 2002.
- [88] C. Panoutsos, Y. Hardalupas, and A. Taylor. Numerical evaluation of equivalence ratio measurement using  $oh^*$  and  $ch^*$  chemiluminescence in premixed and non-premixed methane-air flames. *Combustion and Flame*, 156(2) :273–291, 2009.
- [89] O. PARK, R. A. BURNS, O. R. BUXTON, and N. T. CLEMENS. Mixture fraction, soot volume fraction, and velocity imaging in the soot-inception region of a turbulent non-premixed jet flame. *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(1) :899–907, 2017.
- [90] B. PATTE-ROULAND, A. DANLOS, E. ROULAND, and P. PARANTHOEN. Aerodynamic study and control of instabilities of the initial zone of the annular jet by acoustic excitations or modification of the central obstacle. In *4th IASME/WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics*, pages 35–40, 2006.
- [91] B. PATTE-ROULAND, G. LALIZEL, J. MOREAU, and E. ROULAND. Flow analysis of an annular jet by particle image velocimetry and proper orthogonal decomposition. *Measurement Science and Technology*, 12(9) :1404, 2001.
- [92] T. POINSOT and D. VEYNANTE. *Theoretical and numerical combustion*. RT Edwards, Inc., 2005.

- [93] C. POURNY. Note de synthèse. *Rapport général de mission sur la sécurité des sapeurs-pompiers en intervention*, 2003.
- [94] H. PRETREL, W. Le SAUX, and L. AUDOUIN. Pressure variations induced by a pool fire in a well-confined and force-ventilated compartment. *Fire safety journal*, 52 :11–24, 2012.
- [95] H. PRETREL, W. LE SAUX, and L. AUDOUIN. Pressure variations induced by a pool fire in a well-confined and force-ventilated compartment. *Fire safety journal*, 52 :11–24, 2012.
- [96] R. REHM and K. MCGRATTAN. Baum, hr. *Journal of Research of the Nat. Bur. of Standards*, 83 :297–308, 1978.
- [97] M. RIETHMULLER. Vélocimétrie par images de particules ou piv : synthèse des travaux récents. *Actes du 5ème Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser*, pages 1–13, 1996.
- [98] C. ROTTIER. *Etude expérimentale de l'influence des mélanges gazeux sur la combustion sans flamme*. PhD thesis, INSA Rouen, 2010.
- [99] H. ROUSE, C. S. YIH, and H. HUMPHREYS. Gravitational convection from a boundary source. *Tellus*, 4(3) :201–210, 1952.
- [100] A. SANAD, S. LAMONT, A. USMANI, and J. ROTTER. Structural behaviour in fire compartment under different heating regimes—part 1 (slab thermal gradients). *Fire Safety Journal*, 35(2) :99–116, 2000.
- [101] W. SCHMIDT. Turbulente ausbreitung eines stromes erhitzter luft. *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 21(5) :265–278, 1941.
- [102] A. SCHROEDER and C. E. WILLERT. *Particle image velocimetry : new developments and recent applications*, volume 112. Springer Science & Business Media, 2008.
- [103] R. SIEGEL and J. HOWELL. Thermal radiation heat transfer. 1972.
- [104] X. SILVANI. *Metrology for fire experiments in outdoor conditions*. Springer, 2013.
- [105] J. SMAGORINSKY. General circulation experiments with the primitive equations : I. the basic experiment. *Monthly weather review*, 91(3) :99–164, 1963.

- [106] N. STRUSKI. Compréhension du système feu. 2014.
- [107] S. SUARD, A. KOCHED, H. PRETREL, and L. AUDOUIN. Numerical simulations of fire-induced doorway flows in a small scale enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 81 :578–590, 2015.
- [108] L. SUN, X. ZHOU, S. MAHALINGAM, and D. R. WEISE. Experimental investigation of the velocity field in buoyant diffusion flames using piv and tpiv algorithm. 2006.
- [109] J. TAINE and J. PETIT. Transferts thermiques. 1995.
- [110] J. TAYLOR. Smoke burns. 2007.
- [111] A. THOMAS, S. CHESS, H. G. BIRCH, M. E. HERTZIG, and S. KORN. Behavioral individuality in early childhood. 1963.
- [112] P. THOMAS, M. BULLEN, J. QUINTIERE, and B. MCCAFFREY. Flashover and instabilities in fire behavior. *Combustion and Flame*, 38 :159–171, 1980.
- [113] T. TIEN, K. LEE, and A. STRETTON. Sfp handbook of fire protection engineering, third edition, chapitre radiation heat transfer, pages 1–73, 1–89. 2002.
- [114] S. TIESZEN, T. O’HERN, R. SCHEFER, E. WECKMAN, and T. BLANCHAT. Experimental study of the flow field in and around a one meter diameter methane fire. *Combustion and Flame*, 129(4) :378–391, 2002.
- [115] T.ROGAUME. La formation incendie. 2016.
- [116] K. VARRALL. *Etude expérimentale de l’écoulement de convection mixte à travers un orifice horizontal reliant deux compartiments*. PhD thesis, Aix-Marseille, 2016.
- [117] J. WAHLQVIST and P. VAN HEES. Validation of fds for large-scale well-confined mechanically ventilated fire scenarios with emphasis on predicting ventilation system behavior. *Fire Safety Journal*, 62 :102–114, 2013.
- [118] B. WALKER. Fire dynamics for firefighters. 2016.
- [119] F. WILLIAMS. Combustion theory. 1985.
- [120] D. YOU and al. Study of the efficiency of the fire extinguishing systems used by fire fighters on the underventilated fires with 3d firefighting and other application techniques. *Interschultz 2010*, 2010.

- [121] R. ZEVOTEK, K. STAKES, and J. WILLI. Impact of fire attack utilizing, interior and exterior streams on firefighter safety and occupant survival : Full scale experiments. National Institute of Standards and Technology, 2018.

# Études expérimentales et lois prédictives des foyers d'incendie

## Résumé

Chaque année en France, les feux de compartiments donnent lieu à plus de 88 000 interventions impliquant plus de 15 000 personnes dont plusieurs centaines de décès et de blessés graves.

Aujourd'hui, lors de ces feux, les prises de décision et les délais d'intervention des équipes de secours sont principalement basés sur des décisions humaines, fruits de l'expérience. Une connaissance parfaite de la situation, de son évolution dans le temps et des dangers qui peuvent apparaître est impossible. C'est en partie la cause majeure des mauvais chiffres répertoriés ci-dessus. En effet, les processus physicochimiques qui régissent les feux de compartiments et les situations collatérales extrêmement réactives et dangereuses sont complexes.

La transition entre un feu localisé et un feu généralisé peut prendre plusieurs formes. L'un des vecteurs les plus importants dans la propagation de la combustion pour les feux de compartiments sont les fumées, du fait de leur température élevée (souvent supérieure à 600°C) et des quantités importantes d'énergie, sous forme de chaleur, qu'elles contiennent. Malgré leur extrême dangerosité, les fumées restent importantes à étudier car elles véhiculent de précieuses informations, notamment sur l'apparition de phénomènes thermiques redoutés par les pompiers.

Afin de mener cette étude, une cellule expérimentale composée de deux containers maritimes a été installée sur le site de formation incendie des sapeurs-pompiers de Seine-Maritime. Cette plateforme va permettre, grâce à un brûleur alimenté en propane, de produire des fumées chaudes dans une configuration dite « feu réel ». Elles seront analysées en partie grâce à une technique de mesure non intrusive, la PIV. Les mesures par PIV grands champs seront comparées à des simulations LES de l'expérience (FDS).

La double compétence (numérique / expérimentale) est essentielle dans ce type d'étude où les données expérimentales souffrent d'un manque de résolution (spatiale et temporelle) mais pour autant représentent des informations nécessaires à la validation des codes.

**Mots clés :** Feu de compartiments, dynamique de fumées, PIV grand champs, FDS.

## Experimental studies and predictive laws for fire sources

### Abstract

Each year in France, compartment fires result in more than 88,000 interventions involving more than 15,000 people, including several hundred deaths and serious injuries.

Today, during fire compartments, the decision-making of the rescue teams is mainly based on human decisions, as a result of the accumulated experience. However, a perfect knowledge of the situation, its evolution over time and the dangers that may appear is impossible. Therefore, studying the fumes is of major interest. Indeed, smoke remains important to study because it conveys valuable information, especially on the appearance of thermal phenomena feared by firemen.

In order to carry out this study, an experimental cell made up of two maritime containers was installed on the site of the Seine-Maritime fire brigade fire training. This platform will produce hot smokes in a configuration called "real fire" thanks to a propane burner. In this study, the smoke dynamics in a large scale experimental setup is analyzed using a non-intrusive measurement technique such as PIV (Particle Image Velocity). All the performed measurements are compared with LES (Large Eddy Simulation) simulations of the experiment using Fire Dynamics Simulator (FDS).

The double expertise (numerical / experimental) is essential in this type of study where the experimental data suffer from a lack of resolution (spatial and temporal) but nevertheless represents an important source of information necessary for the validation of the codes.

**Keywords :** Fire enclosure, Large scale PIV, Fire safety, smoke dynamics, FDS.