



Caractérisation et Compréhension des phénomènes de Stratification en Situation de Feu Confiné

Romain Morlon

► To cite this version:

Romain Morlon. Caractérisation et Compréhension des phénomènes de Stratification en Situation de Feu Confiné. Génie des procédés. 2012. hal-02093647

HAL Id: hal-02093647

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-02093647>

Submitted on 9 Apr 2019

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

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



AVERTISSEMENT

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

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

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

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

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

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

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

MÉMOIRE

Caractérisation et Compréhension des phénomènes de Stratification en Situation de Feu Confiné

en vue de l'obtention du titre de Master Mécanique Energétique

à l'Université de Lorraine Henri Poincaré

Nancy-Université



par

Romain MORLON

Soutenance présentée le 4 septembre 2012

ENCADRANTS :

Sullivan	LECHENE	Docteur	CSTB
Elizabeth	BLANCHARD	Docteur	CSTB
Pascal	BOULET	Professeur	Université de Lorraine - LEMTA

Remerciements

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire de stage a été effectué au sein du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et du Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA).

Je tiens tout d'abord à remercier mes encadrants, Messieurs Pascal BOULET (LEMTA) et Sullivan LECHÊNE (CSTB) de m'avoir soutenu dans ce travail de recherche. Merci à eux pour leur confiance et leur encadrement de qualité.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers Elizabeth BLANCHARD et Philippe FROMY qui ont suivi de près mon travail de recherche et mon étude bibliographique. Ils ont su me conseiller et m'éclaircir pour faire évoluer mon travail.

Je souhaite également adresser ma reconnaissance aux équipes du LEMTA et du CSTB qui m'ont accueilli et conseillé. Merci à Anthony COLLIN, Zoubir ACEM, Irène LEONARD pour leur accueil au sein du LEMTA et merci à Anthony MALARA et Karine JACQUEMET de m'avoir ouvert leur bureau et pour leur bonne humeur quotidienne.

J'aimerais aussi témoigner toute ma sympathie à Benoît FOREST qui m'a accompagné tout au long de l'agencement de la campagne d'essais au CSTB. Merci à lui pour son humour, sa gaieté et sa patience qui ont su nous guider lors de la mise en place de la campagne.

Enfin, merci à tous ceux qui ont participé, de près ou de loin, au bon déroulement de ce stage.

Nancy - le 22 août 2012

Romain MORLON

Table des matières

Introduction générale	1
I Contexte de la recherche	5
I.1 Sécurité contre l'incendie en bâtiment	6
I.1.1 Aspects phénoménologiques liés au feu en milieu confiné	6
I.1.2 Dangers liés à un incendie en bâtiment	6
I.1.3 Mesures de sécurité contre l'incendie dans le cas d'un ERP	8
I.2 Moyens de lutte active contre l'incendie de types brouillard d'eau et sprinkler	9
I.2.1 Caractéristiques d'une aspersion	9
I.2.2 Aspects phénoménologiques liés à une aspersion en cas de feu	10
II Outil Numérique	15
II.1 Ecoulements	16
II.2 Rayonnement	16
II.3 Conduction de la chaleur	18
II.4 Combustion	18
II.5 Aspersion	18
II.5.1 Définition au point d'injection	19
II.5.2 Transport des gouttes	20
II.5.3 Transferts de masse et d'énergie	20
III Mise en place de la campagne d'essais	23
III.1 Choix du foyer	25
III.2 Configuration géométrique du couloir	29
III.3 Ouverture dans la pièce contenant le foyer	31
III.4 Positionnement d'un linteau à l'extrémité ouverte du couloir	36
III.5 Définition de la métrologie à mettre en œuvre	39
III.5.1 Mesure de la puissance du feu	39
III.5.2 Stratification thermique	39
III.5.3 Stratification optique	43
III.6 Conclusion du chapitre	45

IV Campagne d’essais expérimentaux	49
IV.1 Rappel de la configuration pièce-couloir	50
IV.1.1 Configuration géométrique de la pièce-couloir	50
IV.1.2 Foyer mis en jeu	50
IV.1.3 Instrumentation	52
IV.2 Premiers résultats expérimentaux	53
IV.2.1 Essais	53
IV.2.2 Simulation des essais	61
IV.3 Perspectives	63
IV.4 Conclusion du chapitre	65
Conclusion générale et perspectives	69
Bibliographie	73

Liste des symboles

INDICES

λ	Grandeur spectrale
air	Grandeur relative à l'air
eau	Grandeur relative à l'eau
g	Grandeur relative à la phase gazeuse
n	Grandeur relative à une bande spectrale
p	Grandeur relative à une particule
s	Grandeur relative à un solide

LETTRES ROMAINES

ΔH_c	Chaleur de combustion, [J/kg]
$\dot{m}$	Débit massique, [kg/s]
$\dot{Q}$	Énergie générée par la combustion, [W]
$\dot{Q}_{eau}$	Énergie relative à l'absorption de la chaleur par l'eau, [W]
$\dot{Q}_r$	Énergie relative à l'absorption de chaleur rayonnée par les gouttes, [W]
$\dot{Q}_{vap}$	Énergie relative à l'évaporation des gouttes, [W]
A	Surface, [m ²]
C_{corr}	Facteur correctif de la masse simulée par rapport au débit massique réel, [-]
C_f	Coefficient de traînée, [-]
C_p	Chaleur spécifique, [J/kg/K]
d	Diamètre, [m]
d_{32}	Diamètre de Sauter, [m]
d_m	Diamètre moyen, [m]

h	Coefficient de transfert de chaleur convectif, $[\text{W}/\text{m}^2/\text{K}]$
h_m	Coefficient de transfert de masse, $[\text{m}/\text{s}]$
K	« Coefficient K » ou nombre de débit, $[\text{kg}/\text{s}/\text{Pa}^{0,5}]$
L	Longueur caractéristique, $[\text{m}]$
L	Luminance, $[\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}]$
L_v	Chaleur latente de vaporisation, $[\text{J}/\text{kg}]$
m	masse, $[\text{kg}]$
p	Pression, $[\text{N}/\text{m}^2]$
r	Rayon, $[\text{m}]$
T	Température, $[\text{°C}]$
t	Temps, $[\text{s}]$
x	Paramètre de taille, $[-]$
Y	Fraction massique, $[-]$
v	Volume spécifique, $[\text{m}^3/\text{kg}]$

LETTRES GRECQUES

κ	Coefficient d'absorption, $[\text{m}]$
Λ	Conductivité thermique, $[\text{W}/\text{m}/\text{K}]$
λ	Longueur d'onde, $[\text{m}]$
ρ	Masse volumique, $[\text{kg}/\text{m}^3]$
σ	Coefficient de diffusion, $[\text{m}]$
σ_b	Constante de STEFAN-BOLTZMANN, $[\sigma_b = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2/\text{K}^4]$

NOMBRES SANS DIMENSION

Nu	Nombre de Nusselt, $[-]$, $\text{Nu} = hL/\Lambda$
Pr	Nombre de Prandtl, $[-]$, $\text{Pr} = \mu C_p L/\Lambda$
Re	Nombre de Reynolds, $[-]$, $\text{Re} = \rho V L/\mu$

VECTEURS

$\mathbf{f}_p$	Terme source modélisant la contribution des particules, $[\text{N}/\text{m}^3]$
$\mathbf{g}$	Gravité, $[\text{m}/\text{s}^2]$

u Vecteur vitesse, [m/s]

ABBREVIATIONS

CCS Commission Centrale de Sécurité

CFD Computational Fluid Dynamics

CNRS Centre National de la Recherche Scientifique

CSTB Centre Scientifique et Techniques du Bâtiment

DSC Direction de la Sécurité Civile

ERP Établissement Recevant du Public

ETR Équation de Transfert Radiatif

FDS Fire Dynamics Simulator

IGH Immeuble de Grande Hauteur

LEMTA Laboratoire d'Énergétique Théorique et Appliquée

NIST National Institute of Standards and Technology

Introduction

Ce travail de recherche concerne le domaine de la sécurité contre l'incendie en Etablissement Recevant du Public (ERP). Le stage fait partie du programme de recherche s'inscrivant dans la maîtrise des risques, concernant la stratification de l'environnement dans un incendie en milieu confiné et plus particulièrement la compréhension et la caractérisation de ces phénomènes. Il vise également à évaluer l'influence de l'aspersion par brouillard d'eau sur un milieu enfumé tel qu'une circulation ERP. Pour ce faire, la Centre Scientifique et Techniques du Bâtiment (CSTB) a mis en place une configuration pièce-couloir échelle réelle représentant une chambre donnant sur une circulation. L'objectif premier de la recherche vise une meilleure compréhension des phénomènes mis en jeu lors d'une aspersion d'eau en situation de feu à l'intérieur d'un bâtiment. Un second objectif vise à fournir aux autorités en charge d'écrire la réglementation (DSCGC) et d'appliquer la réglementation (SDIS) des informations permettant aux premières de définir une "doctrine" d'utilisation de dispositifs d'aspersion d'eau en ERP et IGH et aux secondes d'être en capacité de fonder une décision sur la mise en œuvre d'un système d'aspersion d'eau dans un ERP ou IGH donné.

Les mesures visant à étudier et caractériser la stratification seront complétées par une étude numérique qui amènera à :

- Définir la configuration expérimentale ainsi que les protocoles expérimentaux (caractéristiques géométriques, dimensionnement des foyers, positionnement de la métrologie) ;
- Caractériser l'environnement, définir des grandeurs physiques mesurables et calculables pour caractériser l'environnement feu sous l'angle de la visibilité ;
- Etudier différentes technologies d'aspersion d'eau, notamment le brouillard d'eau et le sprinkler ;
- Développer des modèles de simulation, codes à zones (CFAST, CIFI) dans le but de rendre des simulations numériques plus rapides que les codes à champs (tel que FDS) dans le cadre de la Thèse.

Contexte lié à l'utilisation de brouillard d'eau en France

En France, la stratégie de sécurité varie selon le type de bâtiment et d'ouvrage (habitation, ERP, tunnel...). En ERP, le principe de base est donné par le CCH (Code de la Construction et de l'Habitation) : les bâtiments et locaux où sont installées les ERP doivent être construits de manière à permettre l'évacuation rapide et en bon ordre de la totalité des occupants ou leur évacuation différée

si celle-ci est rendue nécessaire. Le règlement définit les moyens à mettre en œuvre. Le maintien d'un espace libre de fumée près du sol est un objectif d'un moyen (le désenfumage) parmi l'ensemble des moyens requis. L'utilisation d'un système d'extinction automatique de type sprinkler est envisagée.

En France, la stratégie de sécurité dans les ERP se fonde sur des principes dont le premier indique : « Les bâtiments et locaux où sont installées les ERP doivent être construits de manière à permettre l'évacuation rapide et en bon ordre de la totalité des occupants ou leur évacuation différée si celle-ci est rendue nécessaire ». Réglementairement, un moyen d'extinction par système d'extinction automatique du type sprinkler peut être exigé dans tout ou partie d'un établissement. Il n'est pas fait mention de la possibilité d'utiliser un système automatique de type brouillard d'eau.

En France, la stratégie en cas d'incendie dans un ouvrage consiste à conserver le plus longtemps possible un espace libre de fumée près du sol par le biais notamment de systèmes de ventilation. Dans un premier temps, cette stratégie vise à favoriser l'auto-évacuation des usagers et, dans un second temps, elle a pour objectif de faciliter l'intervention des services de secours et de lutte contre l'incendie. Bien que l'utilisation de systèmes de lutte active contre l'incendie puisse remettre en question cette stratégie, des systèmes de type sprinkler peuvent être installés en ERP et en IGH pour permettre l'augmentation de la charge calorifique en limitant l'extension d'un incendie, voire en l'éteignant. L'utilisation de tels systèmes peut en revanche induire des dommages collatéraux liés à la quantité importante d'eau utilisée. Les coûts directs et indirects d'un incendie ne sont donc pas forcément réduits lorsqu'un système sprinkleur est installé.

À l'origine installée dans le domaine maritime, la technologie du brouillard d'eau apparaît aujourd'hui comme une alternative au système traditionnel sprinkleur dans la protection des bâtiments (par exemple Archives Nationales situées à Pierrefitte-sur-Seine, tour Radio-France à Paris). En effet, cette technologie produit des gouttes beaucoup plus petites (pulvérisation où 99 % du volume d'eau est constitué par des gouttes d'un diamètre inférieur à 1 mm) et implique des quantités d'eau moindres (facteur 10 au moins selon les industriels) que les systèmes sprinkleur. En ce sens, la technologie du brouillard d'eau s'inscrit en cohérence avec les conclusions du Grenelle de l'environnement dans la préservation de l'environnement et des milieux naturels. Elle permet de préserver la ressource eau et de limiter le ruissellement des eaux d'extinction, potentiellement chargées en substances toxiques, qui nécessiteraient un traitement après l'incendie.

Néanmoins, la technologie du brouillard d'eau soulève de nouvelles questions concernant l'effet d'une aspersion sur l'activité du foyer, la visibilité et donc le brassage de la fumée et le refroidissement des gaz. Ces questions préoccupent à l'heure actuelle les autorités françaises et les préventionnistes. À titre d'illustration, la récente instruction technique introduite par la sous-commission ERP de la Commission Centrale de Sécurité du 2 décembre 2010 impose d'évaluer la distance de visibilité dans un environnement enfumé comprenant des gouttes en suspension. Il apparaît dès lors que les concepts de stratification, déstratification, opacité des fumées et visibilité en environnement

enfumé avec ou sans aspersion doivent être revisités pour les aspersions de type brouillard d'eau mais également de type sprinkleur.

Contexte du stage

Le stage faisant l'objet de ce rapport et la thèse de doctorat qui suivra s'inscrivent dans un projet plus large mené au CSTB en partenariat avec le CNRS (LEMTA de Nancy). Ce projet s'inscrit dans le domaine de la sécurité contre l'incendie en bâtiment (ERP, IGH). Il porte sur l'effet de l'utilisation de systèmes de lutte active contre l'incendie de types brouillard d'eau et sprinkleur, sur la sécurité des personnes et des biens. Il a pour objet les **mécanismes d'interaction entre la fumée et l'eau pulvérisée (sous forme de fines ou grosses gouttes)**. Les phénomènes physiques impliqués dans l'action de l'eau sont connus :

- refroidissement par puits de chaleur : les gouttes, au contact de la phase gazeuse et des surfaces liquides ou solides, absorbent de l'énergie en s'échauffant et en s'évaporant ;
- inertage ou effet de dilution : la génération de vapeur d'eau diminue localement la concentration en dioxygène et altère au droit du foyer la mise en présence des réactifs de combustion ;
- atténuation des transferts de chaleur rayonnée au travers du milieu diphasique par les phénomènes d'absorption et de diffusion par les gouttelettes d'eau, voire par le mélange eau-fumée ;
- échange de quantité de mouvement entre les phases gazeuse et liquide qui a pour effet d'entraîner de la fumée vers le sol lorsque l'aspersion est, de façon classique, située en partie haute d'un local et orientée vers le bas.

L'objectif du projet est de **mieux comprendre et de caractériser les stratifications « thermique et optique » d'un environnement enfumé en milieu confiné pouvant comprendre des gouttes en suspension**. Le verrou scientifique principal que ce projet a pour ambition de lever est l'estimation de la visibilité dans un environnement enfumé pouvant comprendre des gouttes d'eau en suspension. Une application pratique de ce projet pourrait donc être de revoir les corrélations usuelles où la visibilité est basée sur l'inverse du coefficient d'extinction, corrélations établies en milieu purement absorbant (alors que les gouttes mélangées aux fumées produisent un milieu absorbant-diffusant).

Ce projet, débuté en 2012 et s'étendant jusqu'en 2015, s'appuiera sur une campagne d'essais menée dans la configuration « pièce-couloir » implantée sur le site de Champs sur Marne du CSTB. L'étude complète des phénomènes ne pouvant s'effectuer sur le seul plan expérimental, ce projet sera mené parallèlement à d'autres actions de recherche basées sur le développement et l'utilisation d'outils de simulation numérique.

Objectif du stage et démarche adoptée

Le stage faisant l'objet du présent rapport a pour objectif principal de mettre en place la campagne d'essais qui débutera en octobre 2012. De plus, il permet de mettre en place le contexte et de proposer quelques protocoles d'essais pour la thèse. Un outil numérique est utilisé pour l'étude préliminaire du comportement de la fumée en situation de feu confiné et visant à favoriser la stratification de l'environnement enfumé. Durant ce stage, quelques essais de feu ont été faits pour valider la configuration de la pièce-couloir et l'observation de la stratification.

Dans un premier temps, il s'agit de comprendre les phénomènes liés au feu en milieu confiné. Dans un deuxième temps, des modifications de la configuration d'essais sont faites pour observer la stratification de l'environnement du couloir, et ce à l'aide d'études numériques par FDS. Pour finir, des essais de tests sont faits dans la pièce-couloir.

Contexte de la recherche



Le confinement des bâtiments, leur ventilation ainsi que leur exploitation conditionnent les moyens mis en oeuvre pour minimiser l'impact d'un incendie sur les biens et les personnes. Ils conditionnent à la fois les caractéristiques d'un incendie (nature, géométrie et puissance) qui peut s'y dérouler et également les moyens mis en œuvre pour minimiser l'impact d'un incendie sur les biens et les personnes. Ce chapitre est une synthèse bibliographique réalisée tout au long de ce stage et vise à définir le cadre du projet de recherche de ce stage.

Ce chapitre se découpe en deux sections : la sécurité contre l'incendie en bâtiment et les moyens de lutte active contre l'incendie de type brouillard d'eau et sprinkler.

Dans la première section, sont abordés les aspects phénoménologiques liés au feu dans un local. La géométrie d'un bâtiment joue un rôle essentiel dans l'activité d'un feu et dans sa propagation. Ensuite, les dangers liés à un incendie en bâtiment sont décrits. Quelques exemples de sinistres viennent illustrer l'enjeux de la sécurité incendie. Enfin, le dernier point décrit les moyens de lutte contre l'incendie mis en place dans le cas d'un ERP.

Dans la seconde section, sont abordés deux moyens de lutte active contre l'incendie. Il s'agit de l'aspersion de type brouillard d'eau et sprinkler. Une aspersion (par brouillard d'eau ou par sprinkler) est caractérisée par plusieurs paramètres. Cette caractérisation fait l'objet de la première sous-section. Pour finir, sont vus les aspects phénoménologiques liés à une aspersion en cas de feu. L'aspersion interagit avec son environnement lorsqu'elle est pulvérisée.

I.1 Sécurité contre l'incendie en bâtiment

I.1.1 Aspects phénoménologiques liés au feu en milieu confiné

En cas de feu, des gaz de combustion sont produits, en s'élevant, ils se mélangent à de l'air. Contrairement à ce qui peut être observé en milieu ouvert, la fumée s'accumule sous le plafond, provoquant la création d'une couche de fumée (cf. figure I.1). L'épaisseur de la couche de fumée varie relativement au volume du local impliqué (pièce, couloir, ...), aux ouvertures (fenêtres, portes, ...) et au système de ventilation (naturel ou mécanique).

La fumée accumulée sous plafond et les parois chauffées au contact de la fumée et par rayonnement des flammes imposent tous deux une sollicitation thermique sur le foyer, sur le contenu combustible du local (meuble, matériel électronique, ...) et sur les personnes (public, pompiers).

La sollicitation thermique sur le foyer peut conduire à un accroissement du débit de pyrolyse (pour un combustible solide) ou de vaporisation (pour un combustible liquide) par rapport à ce qui serait observé en milieu ouvert. Cette augmentation de l'activité du foyer conduit à une augmentation de la puissance du feu.

La sollicitation thermique reçue par le contenu combustible du local peut entraîner une extension de la zone de feu, voire une propagation du feu à tout le bâtiment.

La sollicitation thermique appliquée aux personnes peut les mettre en danger.

Dans ce contexte, la sécurité contre l'incendie vise à minimiser l'impact d'un incendie en agissant à la fois sur la propagation du feu, les conditions d'évacuation des personnes, l'intégrité des structures et la protection des biens.

I.1.2 Dangers liés à un incendie en bâtiment

Un incendie en bâtiment présente des risques pour les personnes, la structure et son environnement. Quelques ordres de grandeurs [7] :

- un foyer impliquant une corbeille de papier peut atteindre une puissance de quelques kilowatts, voire d'une dizaine de kilowatts. Ce sont des foyers faciles à éteindre.
- un foyer impliquant de la literie ou un canapé est plus puissant - plus d'un mégawatt - pendant une dizaine de minutes, il peut dégager beaucoup de chaleur et de fumée toxique à température élevée.

Ces ordres de grandeur correspondent uniquement à un objet donné. En cas d'incendie, plusieurs objets sont impliqués, ce qui peut conduire à des puissances de feu très importantes. Par exemple,

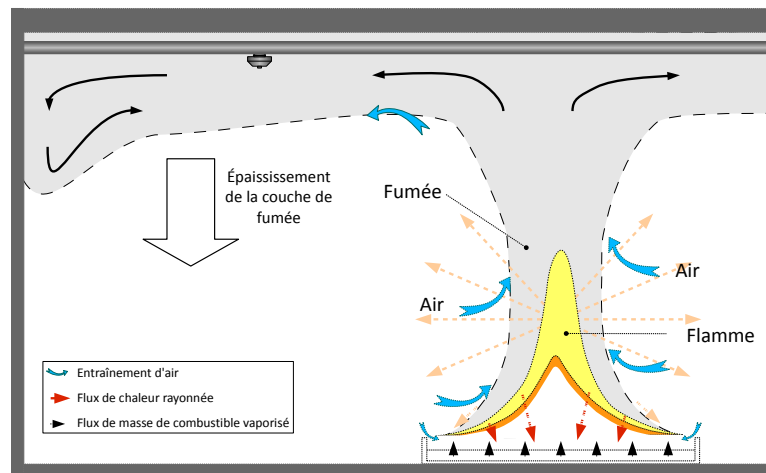


Fig. I.1 — Représentation des flux de matière et d'énergie au droit du foyer dans une pièce

un incendie dans un ERP peut concerner des centaines de mètres carrés, enfumer plusieurs niveaux, nécessiter des moyens de lutte importants et causer des victimes. Le tableau I.1 montrent quelques exemples de sinistres s'étant déroulés lors de ces 40 dernières années.

Année	Sinistre	Nombre de victimes
1971	Hôtel Tal Yon Kek, Séoul (Corée)	154
1974	Tour Joelma, Sao Paulo (Brésil)	292
1980	Hôtel MGM, Las Vegas (EU)	86
1986	Hôtel Dupont-Plaza, Porto Rico	97
1993	World Trad Center, New York (EU)	7

Tab. I.1 — Exemples de sinistres importants des 4 dernières décennies, essentiellement en ERP [7]

La figure I.2 présente quelques chiffres sur la répartition d'incendie ayant eu lieu en France. Cela montre l'importance de la lutte contre l'incendie en France.

En cas de feu, le public peut être soumis à plusieurs agressions de natures thermique, toxique et/ou traumatique, ce qui peut rendre difficile leur évacuation en zone sûre et nuire à leur santé. Le manque de visibilité dû à la présence de fumée ne met pas la vie des personnes directement en danger mais augmente leur durée d'exposition aux agressions thermiques, toxiques et traumatiques. La visibilité constitue de ce fait un facteur important pour l'évacuation des personnes.

Deux zones de danger peuvent être distinguées pour le public :

- Loin du foyer, le public souffre plutôt d'agressions toxiques et ce, d'autant plus que la fumée présente peut altérer la visibilité et gêner l'individu dans son évacuation.
- Proche du foyer, le rayonnement thermique direct des flammes et de la couche de fumée ainsi que les niveaux de température de l'environnement peuvent mettre en danger le public. L'agression thermique due à la couche de fumée est d'autant plus importante si l'environnement n'est pas stratifié c'est-à-dire s'il n'existe pas un gradient vertical de température suffisamment important.

• Incendies : **336 867 (-2 %)**

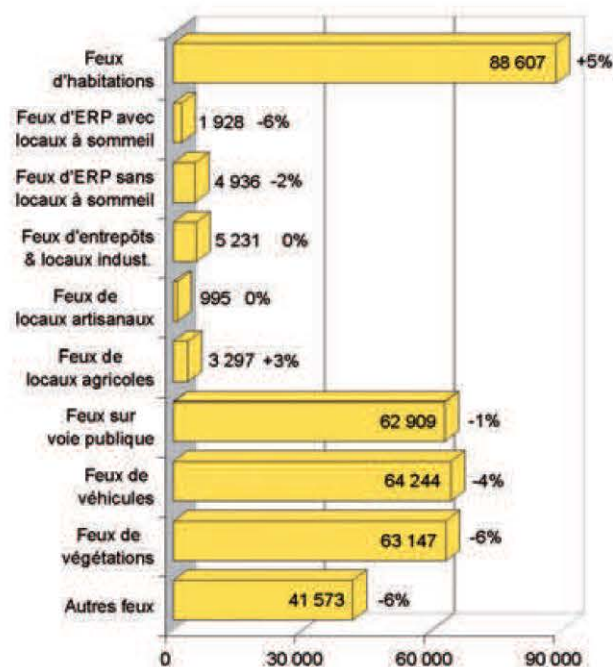


Fig. I.2 — Répartition des incendies ayant eu lieu en France en 2010 [8]

Les pompiers sont munis d'équipements de protection contre les agressions thermiques et toxiques. Cependant, il peut être difficile pour eux d'approcher le foyer du fait notamment du rayonnement thermique qui peut être important. Le manque de visibilité causé par l'altération de la stratification de l'environnement est un facteur qui influence leurs conditions d'opération.

En ce qui concerne l'infrastructure, en cas d'incendie, elle est soumise à des sollicitations thermiques pouvant être importantes. Les risques d'effondrement de la structure constituent ainsi un enjeu majeur dans la sécurité incendie. Au CSTB, deux divisions étudient en grande partie le comportement mécanique des éléments de structure soumis à de très hautes températures.

Pour finir, l'incendie a un impact sur l'environnement du fait de la production de gaz toxiques. Par ailleurs, la lutte contre le feu engendrent également des eaux d'extinction qui sont polluées. De plus, le sinistre peut avoir des conséquences sociétales dans la mesure où la perte d'un établissement engendre une modification temporaire du mode de vie des personnes touchées et une perte d'exploitation pour l'exploitant.

I.1.3 Mesures de sécurité contre l'incendie dans le cas d'un ERP

Dans la sécurité contre l'incendie, il existe de nombreux éléments visant à minimiser son impact. Ces éléments ont principalement trois objectifs :

- Détecter et éteindre rapidement les départs de feu afin de limiter leur développement et les

dommages générés ;

- Eviter voire limiter la propagation du feu afin de minimiser les conséquences ;
- Gérer les situations d'incendie n'ayant pas pu être maîtrisées de façon à limiter les conséquences pour les personnes, les biens et l'environnement.

En France, la stratégie actuelle consiste à conserver le plus longtemps possible un espace libre de fumée au voisinage du sol par le désenfumage. Le but de cette stratégie est de favoriser, dans un premier temps, l'auto-évacuation du public puis, dans un second temps, l'intervention des pompiers pour le secours aux personnes et la lutte contre l'incendie.

Cette stratégie repose notamment sur les systèmes de ventilation pouvant être mécanique ou naturelle. Elle repose également sur des mesures passives (flocage des structures métalliques, compartimentage du bâtiment par exemple). Bien que l'utilisation de systèmes de lutte active puisse remettre en question cette stratégie, des systèmes d'aspersion d'eau (sprinkler pour l'instant) peuvent être installés pour contribuer à minimiser l'impact d'un incendie.

I.2 Moyens de lutte active contre l'incendie de types brouillard d'eau et sprinkler

Cette section se concentre sur les moyens de lutte active contre l'incendie de types brouillard d'eau et sprinkler. Ces technologies sont tout d'abord définies. Ensuite, les phénomènes mis en jeu lors d'une aspersion d'eau pendant un feu sont décrits, l'accent étant mis sur l'interaction eau/fumée.

I.2.1 Caractéristiques d'une aspersion

Un système de lutte active de types brouillard d'eau et sprinkler est constitué de buses/têtes/tuyères raccordées à un réseau d'eau. On distingue les systèmes pouvant être activés automatiquement ou manuellement. Les systèmes automatiques peuvent être ouverts ou équipés d'ampoules thermosensibles qui se déclenchent individuellement dans les zones où les sollicitations thermiques sont importantes. Les systèmes manuels sont généralement ouverts. Pour caractériser le spray, il existe trois paramètres clés :

- l'empreinte du spray. L'empreinte peut être pleine, creuse et sa forme peut varier en fonction de son utilisation. On définit l'empreinte par l'angle de projection du cône. Dans le cadre de la présente étude nous travaillons avec un spray plein de type circulaire,
- le débit d'eau pulvérisé. Généralement, les fabricants fournissent un coefficient K , ou nombre de débit, qui relie le débit d'aspersion à la pression d'alimentation : $\dot{m} = K\sqrt{p}$,
- la granulométrie des gouttes pulvérisées. Une aspersion est constituée de gouttes de tailles différentes, on parle de « spray polydisperse ». Pour caractériser un spray polydisperse, on peut utiliser un diamètre moyen d_{50} ou d'autres diamètres caractéristiques tel que le diamètre de Sauter d_{32} .

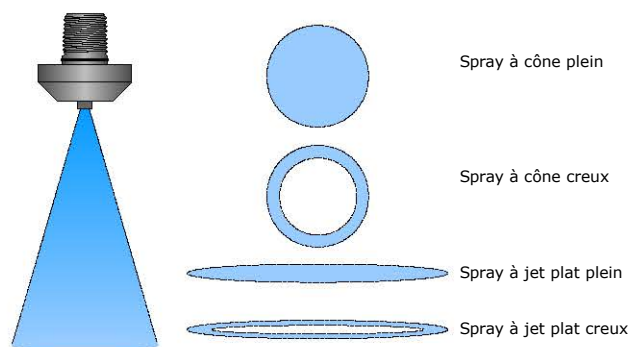


Fig. I.3 — Exemples d’empreintes décrites par une pulvérisation

Par rapport à un sprinkler, un brouillard d’eau est une pulvérisation comprenant des gouttes plus petites. Les normes Européenne NFPA 750 de 2003 et Américaine XP CEN/TS 14972 de 2008 définissent une aspersion par brouillard d’eau de la même manière. Il s’agit d’une pulvérisation où 90% du volume d’eau est constitué par des gouttes d’un diamètre inférieur à 1 mm, à 1 m de la buse opérant à pression minimale.

I.2.2 Aspects phénoménologiques liés à une aspersion en cas de feu

En cas de feu, lorsqu’un système de lutte active est déclenché, quatre phénomènes sont mis en jeu :

- Le refroidissement par puits de chaleur au contact de la phase gazeuse et des surfaces liquides ou solides,
- L’inertage ou effet de dilution, par la génération de vapeur d’eau,
- L’atténuation des transferts de chaleur rayonnée,
- L’interaction avec la fumée.

Le refroidissement par puits de chaleur au contact de la phase gazeuse et des surfaces liquides ou solides

Ce que l’on appelle refroidissement par puits de chaleur est l’énergie absorbée par chaque goutte d’eau liquide au contact des parois (solides ou liquides) et de la phase gazeuse. Il s’agit d’un pompage d’énergie sur le foyer, sur la fumée, les parois du local et sur les combustibles du local. La chaleur latente et la chaleur spécifique importantes de l’eau pulvérisée jouent un rôle essentiel dans l’échange de chaleur entre les gouttes et son environnement.

La chaleur spécifique est l’énergie qu’il faut apporter à un kilogramme d’eau pour la chauffer d’un degré celsius (ou kelvin) sans changement d’état. Par exemple, pour chauffer un kilogramme d’eau liquide de 20 °C à 100 °C il faut lui apporter : $\dot{Q}_{eau} = m_{eau} \times c_{eau} \times \Delta T = 1 \times 4,180 \times (100 - 20) = 334,4 \text{ kJ}$.

La chaleur latente est l’énergie à apporter à un kilogramme d’eau liquide pour la vaporiser, à

température et à pression constantes. Le changement d'état de l'eau demande une quantité d'énergie plus importante que la simple élévation de sa température à l'état liquide. La vaporisation de l'eau liquide à 100 °C et à 101325 Pa nécessite 2257 kJ. Pour récapituler, lorsque de l'eau à 20 °C est vaporisée, l'énergie requise correspondante est de l'ordre de 2600 kJ (en supposant que l'évaporation ne se produit seulement que lorsque l'eau est portée à 100 °C).

Le transfert d'énergie se passant dans la phase gazeuse, notamment dans la fumée, est d'autant plus important que la taille des gouttes est faible. En effet, l'échange entre les gouttes et la phase gazeuse se fait par convection. Or, pour un même volume d'eau, la pulvérisation de gouttes de diamètres inférieurs induit une surface d'échange plus grande.

Pour un ensemble de gouttes de même diamètre et représentant un volume total de 1 m³ deau, on a :

$$\begin{aligned}
 S_{\text{échange}} &= N_{\text{gouttes}} \cdot \pi d_{\text{gouttes}}^2 \\
 &= \left(\frac{6}{\pi d_{\text{gouttes}}^3} \right) \cdot \pi d_{\text{gouttes}}^2 \\
 &= \frac{6}{d_{\text{gouttes}}}
 \end{aligned} \tag{I.1}$$

À volume égal, un ensemble de gouttes de 100 µm bénéficie d'une surface d'échange 10 fois plus importante que des gouttes d'un diamètre de 1000 µm. Les échanges entre une goutte et le milieu gazeux s'en trouvent ainsi accélérés. Pour une même durée d'exposition des gouttes au milieu gazeux et pour une quantité d'eau identique, les fines gouttes absorbent une quantité d'énergie plus importante que pour les plus grosses gouttes [3].

La description des interactions gouttes-parois comprend trois phénomènes : le dépôt, le rebond et le régime dit de " splashing " correspondant à l'éclatement de la goutte. Les échanges thermiques entre les parois et les gouttes impactant dépendent des caractéristiques des gouttes (vitesse, taille, température, propriétés physiques du liquide), de celles de la paroi (température, rugosité) et de l'angle d'incidence entre la goutte et la surface. L'eau déposée sur la paroi agit comme un film protecteur pour les échanges thermiques convectifs et radiatifs avec le milieu extérieur.

L'inertage ou effet de dilution, par la génération de vapeur d'eau

Précédemment, il a été vu que la pulvérisation de l'eau initialement à 20 °C et s'échauffant jusqu'à 100 °C se vaporisait. Or, en comparant les volumes spécifiques de l'eau liquide à 100 °C et la vapeur d'eau à 100 °C, on constate que pour un kilogramme d'eau le volume occupé par la vapeur est $F = \frac{v_{\text{vap}}}{v_{\text{liq}}} = \frac{1.673}{0.0010435} = 1603$ fois supérieur par rapport à la même quantité d'eau à l'état liquide. La vapeur d'eau est inerte pour les réactions de combustion, et sa présence dans l'environnement gazeux diminue la concentration en dioxygène.

Le phénomène d'inertage consiste à augmenter la concentration d'un gaz inerte pour la combustion, ici la vapeur d'eau, et donc à étouffer le feu par une diminution de la concentration de comburant tel que le dioxygène. Ce phénomène d'inertage est d'autant plus fort que le milieu est confiné et que la puissance du feu est importante, la concentration en oxygène diminuant rapidement par consommation et par dilution.

L'atténuation des transferts de chaleur rayonnée

La présence d'eau dans un environnement enfumé crée un bouclier radiatif. Dans un environnement enfumé, deux phénomènes se produisent :

- la présence d'eau liquide atténue la chaleur rayonnée au travers de l'environnement par effet de diffusion et d'absorption des gouttelettes. L'atténuation du rayonnement par les gouttes d'eau liquide en suspension dépend de plusieurs critères comme la densité du spray pulvérisé, la taille des gouttes ou la longueur d'onde du rayonnement émis par la source. Cet effet a fait l'objet de nombreuses études lors de ces dix dernières années comme l'étude de Coppalle [6], ou celles plus récentes de Collin [4] et Lechêne [10].
- la phase gazeuse chargée en gaz de combustion et en vapeur d'eau absorbe le rayonnement thermique.

La thèse de LECHENE [10] sur l'étude des rideaux d'eau pour la protection contre le rayonnement thermique détaille très bien ce phénomène. Au niveau de la sécurité incendie, ce phénomène contribue à diminuer les sollicitations thermiques sur les occupants, les pompiers et l'infrastructure, limiter l'extension du feu à d'autres foyers et diminuer la puissance du feu.

L'interaction avec la fumée

Lorsqu'un spray est pulvérisé sur un environnement enfumé, il interagit avec ce milieu par échange de chaleur mais aussi par échange de quantité de mouvement.

Premièrement, une aspersion entraîne le milieu gazeux autour des gouttes, la quantité de mouvement se conservant et se transmettant entre les deux phases. Dans un milieu enfumé et stratifié, ce transfert peut perturber la nappe de fumée se situant en partie haute dans le milieu confiné en lui transmettant une composante de vitesse verticale. La phase liquide est soumise aux forces de gravité et à sa vitesse de pulvérisation l'entraînant vers le sol tandis que le gaz chaud subit, en plus de la gravité, une "force" de flottabilité. Cette flottabilité est due à la différence de masse volumique (dépendante de la température) entre l'air frais et la fumée à l'origine de la formation d'une nappe de fumée en partie haute. Lors de la chute des gouttes vers le sol, une force de frottement, appelée traînée, s'exerce entre le gaz environnant et la goutte. La traînée transmet la quantité de mouvement de la goutte au gaz. Plus précisément, concernant le spray, cette interaction dépend essentiellement de la taille des gouttes, de la vitesse et de la densité du spray. [9]

Deuxièmement, l'échauffement et la vaporisation des gouttes induisent un refroidissement de la

phase gazeuse. La fumée est, à même température, plus dense que l'air et a donc tendance à tomber en se refroidissant.

Comme le note Cooper [5], l'activation d'un système d'aspersion peut induire une destratification de l'environnement, c'est-à-dire un brassage de la fumée par combinaison des deux phénomènes d'interactions thermiques et dynamiques. Néanmoins, la littérature scientifique fait état de cas où le milieu reste stratifié en dépit de l'aspersion. En particulier, Li et coll. [11] ont observé que pour une pression de pulvérisation relativement faible, le caractère stratifié du milieu pouvait être conservé.

Outil Numérique II

Il existe plusieurs types de modèles permettant de simuler numériquement la propagation et l'évolution d'un feu. Il y a les codes à champs ou CFD (Computational Fluid Dynamics) qui traitent l'environnement enfumé de manière tridimensionnelle, en découpant l'espace en milliers, voire millions de mailles. Il existe également des codes à zones qui traitent l'environnement en zones distinctes. Dans le cas particulier des codes à deux zones, les zones se distinguent par leur niveau de température et leur composition en gaz. Dans la zone haute, couche de fumée généralement, on observe les gaz de combustion riches en CO_2 et en suies. Tandis que dans la zone basse, couche d'air frais, on observe une plus forte concentration en O_2 à température ambiante. Dans le travail du stage, seul un code à champs est utilisé, il s'agit du code FDS (Fire Dynamics Simulator [12]). L'utilisation de code à zones, CFAST [14] et CIFI, fait partie des attendus de la thèse qui suivra le stage.

Le code FDS permet de simuler des écoulements, la combustion, les échanges thermiques (radiatifs, conductifs et convectifs), et les sprays.

Ce logiciel de calcul est développé par le National Institute of Standard and Technology (NIST) et bénéficie d'un large retour sur expérience dans le domaine de la recherche scientifique et de l'ingénierie. De nombreuses personnes participent à l'amélioration des modèles de calculs utilisés par FDS. FDS est gratuit et ses sources sont librement disponibles depuis 2000.

Le présent chapitre décrit les modèles de calcul implémentés dans FDS version 5 [13]. La modélisation du rayonnement et de l'aspersion seront traités avec une attention plus détaillée. Ces deux sujets feront partis des objectifs de la thèse, le rayonnement pour la notion de visibilité très importante dans la fumée et l'aspersion pour l'interaction entre le brouillard d'eau pulvérisé et le milieu stratifié.

II.1 Ecoulements

Un modèle hydrodynamique, pour les faibles vitesses, est basé sur la résolution numérique des équations de Navier-Stokes. La turbulence est traitée au moyen de la " simulation des grandes échelles " (LES : Large Eddy Simulation) avec le modèle de sous-maille de Smagorinsky. Il est possible d'utiliser un modèle de simulation numérique directe (DNS : Direct numerical Simulation) si le maillage est suffisamment affiné pour considérer les plus petites échelles de la turbulence. Notons tout de même que c'est un modèle de calcul précis mais long.

II.2 Rayonnement

Un modèle de transfert de chaleur par rayonnement est inclus dans FDS via la solution de l'équation de transfert radiatif pour un gaz gris, et dans certains cas, à l'aide d'un modèle à large bande spectrale. L'équation est résolue par la méthode des volumes finis (FVM : Finite Volume Method). En utilisant une distribution angulaire selon 100 angles solides, le solveur aux volumes finis requiert environ 20% du temps de calcul CPU, ce qui est relativement modeste étant donné la complexité du transfert de chaleur radiatif. Les coefficients d'absorption et de diffusion sont calculés avec la théorie de Mie pour les gouttes et le modèle RADCAL pour les gaz.

L'équation de transfert radiatif (ETR) pour un milieu semi-transparent (absorbant, émettant et diffusant) s'écrit

$$s \cdot \nabla I_\lambda(\mathbf{x}, s) = -[\kappa(\mathbf{x}, \lambda) + \sigma_s(\mathbf{x}, \lambda)]I_\lambda(\mathbf{x}, s) + B(\mathbf{x}, \lambda) + \frac{\sigma_s(\mathbf{x}, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s, s') I_\lambda(\mathbf{x}, s') ds' \quad (\text{II.1})$$

où $I_\lambda(\mathbf{x}, s)$ est la luminance à la longueur d'onde λ , s est le vecteur directeur de la luminance, $\kappa(\mathbf{x}, \lambda)$ et $\sigma_s(\mathbf{x}, \lambda)$ sont, respectivement, les coefficients locaux d'absorption et de diffusion, et $B(\mathbf{x}, \lambda)$ est le terme source d'émission. L'intégrale de la partie de droite de l'égalité décrit la diffusion provenant d'autres directions.

Dans le cas où la diffusion des gouttes est négligeable, l'ETR devient

$$s \cdot \nabla I_\lambda(\mathbf{x}, s) = \kappa(\mathbf{x}, s)[I_b(\mathbf{x}) - I_\lambda(\mathbf{x}, s)] \quad (\text{II.2})$$

où $I_b(\mathbf{x})$ est le terme source donné par la loi de Planck (voir ci-dessous).

En pratique, la dépendance spectrale (λ) ne peut être résolue précisément. Pour résoudre ce problème, le spectre du rayonnement est divisé en bandes relativement petites et l'ETR est dérivée pour chaque bande. L'équation sur les bandes est

$$s \cdot \nabla I_n(\mathbf{x}, s) = \kappa_n(\mathbf{x})[I_{b,n}(\mathbf{x}) - I_n(\mathbf{x}, s)], \quad n = 1 \dots N \quad (\text{II.3})$$

où I_n est la luminance intégrée sur toute la bande n , et κ_n est le coefficient d'absorption local

moyenné sur la bande spectrale. Le terme source peut être écrit comme une fraction du rayonnement du corps noir

$$I_{b,n} = F_n(\lambda_{min}, \lambda_{max}) \cdot \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad (\text{II.4})$$

où σ est la constante de STEFAN-BOLTZMANN. La détermination du facteur F_n est détaillé dans le livre de R. SIEGEL et J.R. HOWELL [15]. Lorsque les luminances correspondant aux bandes sont connues, la luminance totale est calculée en sommant sur toutes les bandes

$$I(\mathbf{x}, s) = \sum_{n=1}^N I_n(\mathbf{x}, s) \quad (\text{II.5})$$

Même avec un nombre restreint de bandes spectrales, le calcul de l'ETR reste lourd et coûteux en temps. Heureusement, dans la plupart des scénarios de feu, les suies sont les plus importants produits de combustion contrôlant à la fois le rayonnement thermique du feu et de la fumée chaude. Comme le spectre du rayonnement des suies est continu, il est possible d'assimiler le comportement des suies à celui d'un corps gris moyen. La dépendance spectrale du coefficient d'absorption ($N = 1$) est donc négligée et le terme source est donné par la luminance du corps noir

$$I_b(\mathbf{x}) = \frac{\sigma T(\mathbf{x})^4}{\pi} \quad (\text{II.6})$$

Il s'agit du mode par défaut de FDS et adapté pour la plupart des problèmes de feux en ingénierie. Dans les flammes optiquement minces, où la quantité de suies est petite devant la quantité de CO_2 et d'eau, l'hypothèse des gaz gris convient pour calculer le rayonnement émis. Les limites des bandes sont ajustées pour couvrir avec le plus de précision possible les bandes d'émission du CO_2 et de l'eau. Si l'absorption du combustible est connue et importante, des bandes distinctes peuvent être réservées au combustible, et le nombre total de bandes passe à neuf ($N = 9$). Pour simplifier, le combustible est assimilé à du CH_4 . Les limites des bandes sont détaillées dans le tableau II.2.

9 bandes		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Espèces		Soot	CO_2 H_2O , Soot	CH_4 Soot	Soot	CO_2 Soot	H_2O Soot	H_2O CH_4 , Soot	Soot	Soot
ν (1/cm)		10000	3800	3400	2800	2400	2174	1429	1160	1000 50
λ (μm)		1.00	2.63	2.94	3.57	4.17	4.70	7.00	8.62	10.0 200
6 bandes		1	2	3	4	5		6		
Espèces		Soot	CO_2 H_2O , Soot	CH_4 Soot	CO_2 Soot	H_2O , CH_4 , Soot		Soot		

Tab. II.1 — Limites des bandes spectrales dans le modèle FDS

Pour le calcul du coefficient d'absorption du gaz, un modèle à bandes étroites, RadCal, a été implémenté dans FDS. Au lancement de la simulation, les coefficients d'absorption sont tabulés en fonction de la température. Pendant la simulation, le coefficient d'absorption local est fixé à partir de cette table.

II.3 Conduction de la chaleur

Chaque réaction forme une combinaison de résidus solides, vapeur d'eau, et/ou vapeur combustible. La conduction de la chaleur est uniquement prise en compte dans la direction normale à la surface d'échange. Cette section ne décrit que les transferts thermiques pour un matériau solide.

L'équation de transfert de chaleur conductif unidirectionnel pour un solide à la température $T_s(x, t)$ est appliquée dans la direction x pointant vers le solide

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} + \dot{q}_s''' \quad (\text{II.7})$$

Le terme source, $\dot{q}_s'''$, est la somme des contributions de réaction chimique et de l'absorption du rayonnement :

$$\dot{q}_s''' = \dot{q}_{s,c}''' + \dot{q}_{s,r}''' \quad (\text{II.8})$$

II.4 Combustion

Le modèle de combustion repose sur l'hypothèse d'une cinétique chimique irréversible et infiniment rapide. La combustion est régie par une équation dont l'inconnue est la fraction de mélange. Il existe néanmoins une variante à ce modèle pour des cas où comburant et combustible sont en présence mais ne brûlent pas. La combustion est alors régie par deux (ou trois en cas de production de monoxyde de carbone) équations de convection-diffusion dont les inconnues sont des composantes de la fraction de mélange.

II.5 Aspersions

Le modèle d'aspersion se base sur la dynamique lagrangienne d'un ensemble de particules fluides dans un espace eulérien. Cette représentation eulérienne/lagrangienne permet de suivre les particules individuellement et d'enregistrer leurs caractéristiques (position, taille, température) au cours de leur mouvement. Ces particules sont supposées sphériques et indéformables. Leur taille varie uniquement du fait de leur évaporation. L'interaction interparticulaire¹ en terme de coalescence, de collision ou d'effet de sillage n'est à l'heure actuelle pas traitée.

L'aspersion est traitée principalement en trois endroits du code (cf. Figure II.1). Elle est tout d'abord définie au point d'injection. À chaque goutte sont alors attribués un diamètre, une probabilité d'occurrence, une vitesse, une trajectoire et une température. Ensuite, à chaque pas de temps, chaque goutte est d'abord transportée puis est mise en équilibre avec le milieu. Le modèle d'évaporation permet alors d'évaluer la perte de masse de chaque goutte puis un bilan d'énergie est effectué sur

1. La modélisation de l'interaction interparticulaire n'est pas nécessaire lorsque la fraction volumique est faible [1]

chacune afin de déterminer sa température au pas de temps suivant. La température de la phase gazeuse est alors mise à jour.

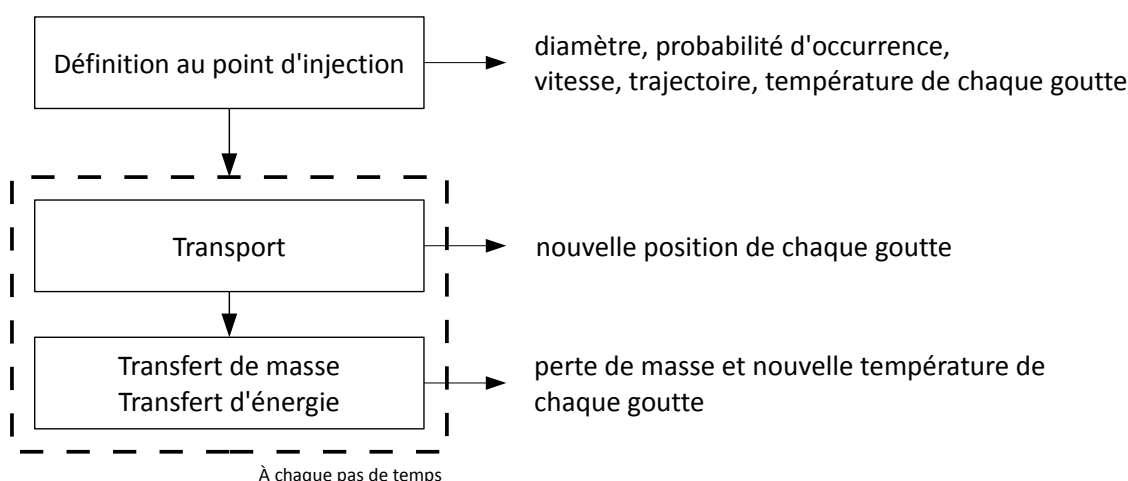


Fig. II.1 — Structure du modèle d'aspersion

II.5.1 Définition au point d'injection

Tout d'abord, la taille des gouttes est définie au point d'injection à l'aide d'une fonction de distribution en nombre. Cette fonction de distribution en nombre repose sur une loi statistique hybride de type log-normal/Rosin-Rammler. La fonction cumulative en volume représentant l'échantillon de gouttes est liée à la loi cumulative en nombre par un facteur correctif.

Le code ne simule pas l'ensemble des gouttes constituant un spray. Il considère un échantillon² de gouttes N dans la simulation, qui représente le spray de manière statistique. La masse totale du liquide est récupérée via un coefficient correctif.

Lorsque le code FDS génère une population de gouttes au point d'injection, il attribue à chacune d'elles :

- une taille. Elle est prise de manière uniforme sur un intervalle $[d_{\min} ; d_{\max}]$ défini en entrée de la simulation ;
- une probabilité d'occurrence. Elle provient de la fonction cumulative en nombre mais également du coefficient correctif C_{cor} ;
- une température et une vitesse, leur valeur étant définie en entrée de la simulation ;
- une trajectoire prise aléatoirement au sein du spray conique caractérisé par un angle de pulvérisation défini en entrée de la simulation.

2. Le nombre de gouttes pulvérisées par seconde est une grandeur d'entrée de la simulation

II.5.2 Transport des gouttes

Chaque goutte est suivie à partir du point d'injection pendant toute sa durée de vie dans la mesure où son diamètre reste dans l'intervalle $[d_{\min} ; d_{\max}]$. Son mouvement est régi par l'équation de conservation de la quantité de mouvement dans laquelle plusieurs forces sont négligées. Il s'agit des forces de masse ajoutée, historique, liée au gradient de pression et d'Archimède (dans l'expression de la force de masse apparente) [4]. Ainsi, chaque goutte n'est soumise qu'à deux forces, son propre poids et une force de traînée. On obtient alors l'équation de transport suivante :

$$\frac{d}{dt} (m_p \mathbf{u}_p) = m_p \mathbf{g} - \frac{1}{2} \rho_g C_f \pi r_p^2 (\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_g) \|\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_g\| \quad (\text{II.9})$$

Le coefficient de traînée C_f d'une goutte est déterminé par plusieurs modèles basés sur le calcul du nombre de Reynolds particulaire. Les corrélations utilisées par FDS sont celles de Stokes, pour les petits nombres de Reynolds et celle de Schiller et Naumann pour les nombres de Reynolds supérieurs à 1.

Dans le cas où la goutte suivie tombe sur une paroi solide, elle reste en contact avec cette paroi avec une vitesse constante. Si la surface est horizontale, sa vitesse de déplacement est attribuée aléatoirement. Si cette surface est verticale, seule une composante de vitesse est non nulle et égale, par défaut à 0,5 m/s.

Échange de quantité de mouvement avec la phase gazeuse

Lorsqu'une goutte chute dans l'environnement gazeux, elle entraîne par échange de quantité de mouvement le gaz qui l'entoure. L'échange de quantité de mouvement entre la goutte et le gaz est régi par l'équation de Navier-Stokes indiquant que la variation de quantité de mouvement de la phase gazeuse est égale à la somme des forces extérieures appliquées à ce volume (forces de surfaces et forces de volume). L'équation de Navier-Stokes sous sa forme non-conservative s'exprime :

$$\frac{\partial \rho_g \mathbf{u}_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g (\mathbf{u}_g \otimes \mathbf{u}_g)) + \nabla p = \underbrace{\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij}}_{\text{forces de contraintes}} + \underbrace{\rho_g \mathbf{g} + \mathbf{f}_p}_{\text{forces de volume}} \quad (\text{II.10})$$

Le terme source $\mathbf{f}_p$ en particulier représente le terme source dû à la traînée des gouttes. Il est obtenu en sommant la contribution de chaque goutte contenue dans une maille.

II.5.3 Transferts de masse et d'énergie

La température à l'intérieur de chaque goutte est supposée homogène (modèle de conduction infinie). La variation de cette température est due principalement à trois, voire quatre, modes de transfert de chaleur :

- l'évaporation de la goutte,
- la convection avec la phase gazeuse avoisinant la goutte,

- la convection avec l'éventuel solide en contact avec la goutte,
- le rayonnement incident sur la goutte.

L'équilibre thermique de chaque goutte avec le milieu est ainsi régi par l'équation de la chaleur :

$$m_p C_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = \underbrace{\dot{Q}_{vap}}_{\text{évaporation}} + \underbrace{A_p h_{p,g} (T_g - T_p) + A_p h_{p,s} (T_s - T_p)}_{\text{convection}} + \underbrace{\dot{Q}_r}_{\text{rayonnement}} \quad (\text{II.11})$$

où $C_{p,p}$ représente la capacité calorifique de la goutte. Lorsque la goutte n'est pas en contact avec une paroi, la surface d'échange A_p correspond à la surface de la goutte. Lorsque la goutte d'eau est en contact avec une paroi, elle figure ainsi à l'interface entre le solide et la phase gazeuse. De la sorte, elle échange de l'énergie avec ceux-ci, par convection et par rayonnement. En réponse à cet échange, elle s'échauffe (ou se refroidit) et s'évapore. Le volume total des gouttes en contact avec une maille solide rapporté à la surface de cette maille permet de définir une grandeur, l'épaisseur de film notée FTh . La surface d'échange de chaque goutte A_p avec la maille solide et la phase gazeuse est alors égale au rapport de son volume V_p par cette épaisseur de film. Une goutte est ainsi assimilée à un cylindre de section V_p/FTh et de hauteur FTh .

Terme d'évaporation

Le modèle d'évaporation des gouttes associe à chaque pas de temps, pour chaque goutte, un taux d'évaporation à un gradient local d'humidité et ce, avec une seule équation :

$$\dot{Q}_{vap} = \frac{dm_p}{dt} L_v = -A_p h_m \rho_g (Y_p - Y_g) L_v \quad (\text{II.12})$$

où h_m est le coefficient de transfert de masse en m/s.

Terme de convection

La quantité d'énergie échangée entre une goutte et la phase gazeuse ou un solide est proportionnelle à la surface d'échange, au coefficient de transfert convectif $h_{p,g}$ avec la phase gazeuse (ou au coefficient d'échange équivalent $h_{p,s}$ avec le solide), et à leur différence de température. Le coefficient de transfert thermique convectif $h_{p,g}$ entre la phase gazeuse et la goutte est calculé à partir du nombre de Nusselt :

$$h_{p,g} = \frac{\text{Nu } \Lambda_g}{L} \quad ; \quad \text{Nu} = \begin{cases} 2 + 0.6 \text{Re}^{\frac{1}{2}} \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \\ 0.037 \text{Re}^{\frac{4}{5}} \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \end{cases} \quad \text{si la goutte est en contact avec une paroi} \quad (\text{II.13})$$

où Λ_g désigne la conductivité thermique de l'air déduite de sa viscosité dynamique et Pr est le nombre de Prandtl supposé égal à 0,7. Le coefficient d'échange équivalent $h_{p,s}$ est quant à lui supposé constant et égal à 300 W/m²/K.

Pour calculer le gradient de température entre la goutte et la phase gazeuse ou le solide, la température de la phase gazeuse correspond à celle de la maille qui, soit contient la goutte, soit est adjacente au solide en contact avec la goutte.

Terme de rayonnement

Si la goutte est en contact avec une paroi, le rayonnement absorbé Q_r est approché par le produit du rayonnement surfacique incident à la paroi et la surface d'échange de la goutte. Sinon, le terme Q_r correspond à la différence entre le rayonnement absorbé par cette goutte et son émission propre. En pratique, il est alors approché par le produit de la surface de la goutte et du bilan radiatif à l'échelle de la maille s , rapporté à la surface d'échange totale comme suit :

$$\dot{Q}_r = \frac{\pi r_p^2}{\sum_{i=1}^N \pi r_{p,i}^2(s)} \underbrace{\kappa_{\lambda,g}(s) \left[\int_{4\pi} L(s, \vec{\Omega}') d\Omega' - 4\pi \cdot L^0(T_p(s)) \right]}_{\text{flux net absorbé par l'ensemble des N gouttes de la maille } s} \quad (\text{II.14})$$

III

Mise en place de la campagne d'essais

Ce chapitre porte sur la mise en place de la campagne d'essais. Il met en lumière le travail préliminaire mené dans le cadre de ce stage pour définir le dispositif expérimental, à savoir la configuration géométrique de la « pièce-couloir », les ouvertures de cette configuration, l'instrumentation mise en œuvre, ... Ce travail préliminaire a été conduit en utilisant l'outil numérique FDS présenté précédemment.

Ce chapitre est découpé en plusieurs parties retraçant tout le travail préliminaire à la mise en place de la campagne et expliquant l'évolution de la configuration pièce-couloir. Dans la première partie, différentes simulations permettent de définir le foyer (nature du combustible, dimensions, durée, ...) à mettre en place dans la pièce. Plusieurs puissances de feu sont testées et on observe la concentration de suies et la température de la fumée. Le foyer défini dans la première partie sert aux simulations visant à adapter la configuration géométrique à l'étude de la stratification thermique et optique. Dans la seconde partie, l'influence de l'asymétrie du couloir sur les écoulements de la fumée est représentée grâce à des simulations sur un couloir obstrué. Peuvent être comparés : les mouvements de fumée et les gradients de concentrations en suies. En troisième partie, une ouverture en partie basse de la pièce est créée. L'influence de la surface de cette ouverture sur la ventilation du foyer et sur les écoulements de la fumée est étudiée. Ensuite, une étude sur les dimensions d'un linteau en sortie de couloir est réalisée afin d'observer son influence sur la stratification de l'environnement enfumé. La dernière partie propose de mettre en place la métrologie dans le couloir pour observer les phénomènes de stratification optique et thermique de l'environnement.

Configuration pièce-couloir

L'installation pièce-couloir est constituée d'une pièce d'environ 12 m^2 ouverte sur une circulation de 16 m de long s'étendant de part et d'autre d'un sas de circulation. La hauteur sous-plafond de la pièce est de 2,14 m, celle du couloir est de 2,35 m, la hauteur de passage sous le linteau est de 1,95 m. Ce linteau d'une vingtaine de centimètres permet un remplissage par la fumée en partie haute dans la pièce avant de se propager dans le couloir (cf figure III.2). L'installation est également munie d'un système de ventilation mécanique respectant les normes en vigueur dans ce type de bâtiment (IT 246). Dans le cadre de la recherche, ce système de ventilation est obstrué afin de favoriser une stratification de l'environnement. La figure III.1 est une vue en plan de la pièce-couloir.

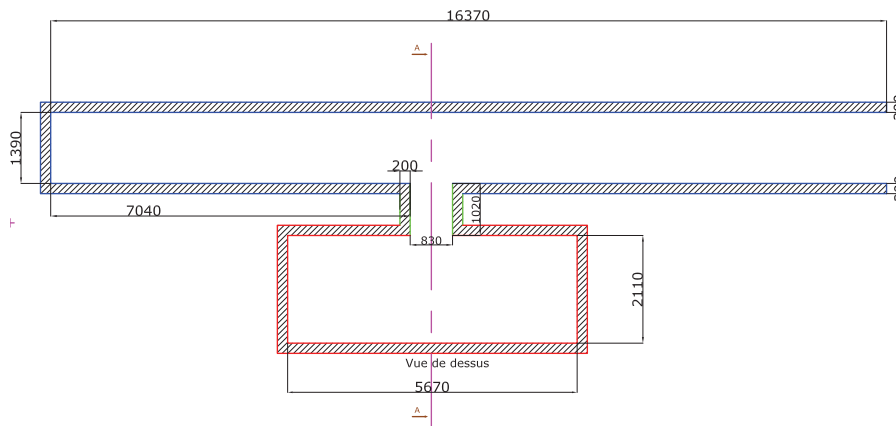


Fig. III.1 — Vue en plan de la configuration pièce-couloir - vue du dessus

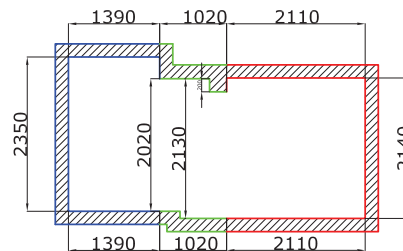


Fig. III.2 — Vue en profil de la configuration pièce-couloir - vue de gauche

Positions dans la pièce-couloir retenues pour le calcul des différents profils

Afin de caractériser au mieux les résultats des simulations de la configuration pièce-couloir présentée dans cette partie, différentes sorties de calculs ont été faites. La figure III.3 fournit les positions dans la pièce-couloir retenues pour les différents profils de températures et de fractions volumiques des suies extraites de FDS. Dans la totalité du couloir, les calculs de températures, de fractions volumiques et de débits de gaz sont effectués aux coordonnées indiquées sur les figures III.3 et III.4. Sur la figure III.3, les positions des échelles de mesures sont indiquées (X ; Y ; $Z=[z_1 \text{ à } z_n]$).

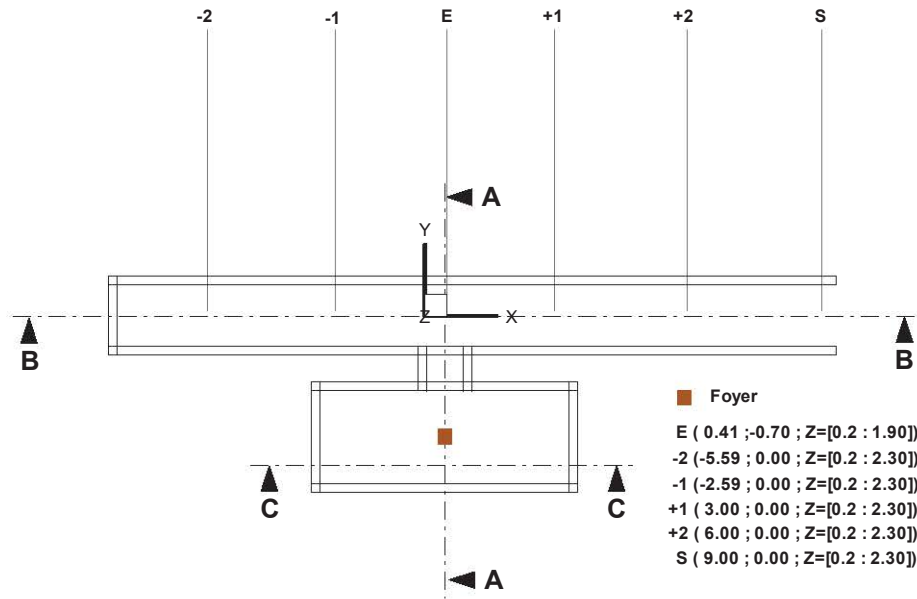


Fig. III.3 — Positions pour le calcul des différents profils dans le plan vu du dessus

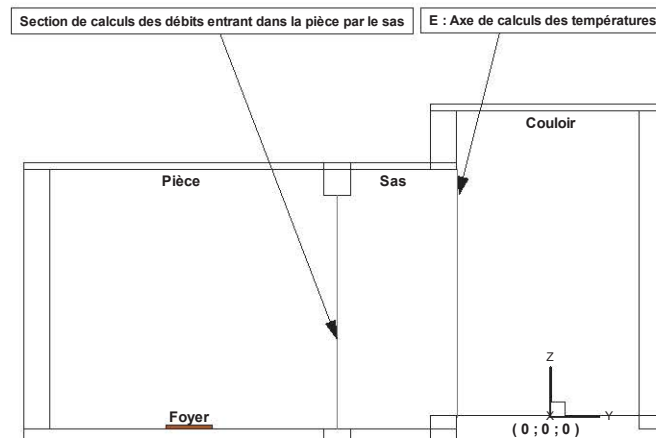


Fig. III.4 — Positions des calculs dans le plan de la coupe AA

Domaine de calcul

Le domaine de calcul est défini en entrée de FDS. La taille de maille ainsi que le pas de temps sont également défini en entrée. Ils résultent d'une étude de sensibilité menée par BLANCHARD [3] durant sa Thèse. Le pas de temps est de 1 s, les tailles de maille en X et Y sont de 10 cm et celle en Z est de 5 cm. Le maillage en Z est affiné afin de rendre compte au mieux de la stratification.

III.1 Choix du foyer

Un foyer est caractérisé par la nature et la quantité du combustible, sa puissance, sa géométrie. Le foyer mis en place lors de la campagne d'essais détermine, lors de la combustion, la production de gaz de combustion (suies, CO_2 , CO , H_2O ...) et les niveaux de température atteints. Il est donc déterminant pour l'étude expérimentale de choisir un foyer permettant une observation de la visibilité

grâce à des opacimètres laser et des niveaux de température significatifs pour observer une stratification thermique et optique de l'environnement. Cette section décrit plusieurs types de combustibles, envisagés pour la campagne d'essais de la thèse (brûleur à gaz, bûcher bois) qui ne sont pas testés dans le cadre de ce stage. Chacun de ces combustibles présentent des avantages et des inconvénients très brièvement listés ci-après.

Le brûleur à gaz

L'avantage principal du brûleur à gaz est la répétabilité de la combustion. En effet, la puissance ainsi que la durée et l'évolution du débit calorifique du brûleur à gaz sont très facilement caractérisables et il est aisé de reproduire une combustion identique d'un essai à l'autre. De plus, la combustion nécessite un apport de comburant moins important que pour une combustion avec un bûcher bois car le gaz combustible et l'air sont mélangés. Par contre, le brûleur produit peu de suies et il est donc difficile d'observer le comportement des fumées autrement que thermiquement. Il existe une solution qui consiste à introduire un fumigène dans le panache de gaz chauds. Mais le comportement de ce mélange est particulier et n'est pas représentatif de la réalité d'un incendie en bâtiment.

Le bac d'heptane

L'heptane est un combustible liquide disponible aisément et caractérisable précisément dans les modèles de calculs. Effectivement, il existe de nombreuses abaques décrivant les données caractéristiques de la combustion avec l'heptane. En pratique, la combustion de l'heptane est facilement répétable. L'heptane produit une quantité de suies dans les fumées significative et observable visuellement ou grâce à des opacimètres. Le principal défaut de ce combustible est qu'il n'est pas courant dans les ERP et qu'il ne reflète donc pas la réalité d'un incendie.

Le bûcher bois

Les bûchers bois sont couramment testés dans les essais de feu et sont donc très bien répertoriés pour caractériser les données propres à la combustion du bois. Cependant, le bûcher bois souffre d'une importante sensibilité à son environnement dans sa combustion, et est difficilement répétable. Les conditions d'allumage et l'environnement d'un foyer type bûcher bois entraînent de fortes dispersions dans le comportement du feu, ce qui contraint l'évolution des fumées. Le bûcher est, en outre, représentatif du mobilier présent en ERP et permet donc d'avoir des essais réalistes d'un incendie.

Dans le cadre de ce stage, seul le bac d'heptane est envisagé pour des raisons de répétabilité et de facilité de mise en œuvre. Afin de déterminer les dimensions du bac, trois simulations pour trois puissances de feu différentes ont été lancées. La comparaison des profils de température ainsi que des concentrations en suies nous permet de déterminer la puissance du foyer à utiliser dans les essais. Les puissances testées sont 50 kW, puissance représentative d'un feu de corbeille à papier, 150 kW, puissance représentative d'un feu de chaise en bois, et 500 kW, puissance représentative d'un feu de

petit meuble de salon (fauteuil, chaise capitonnée).

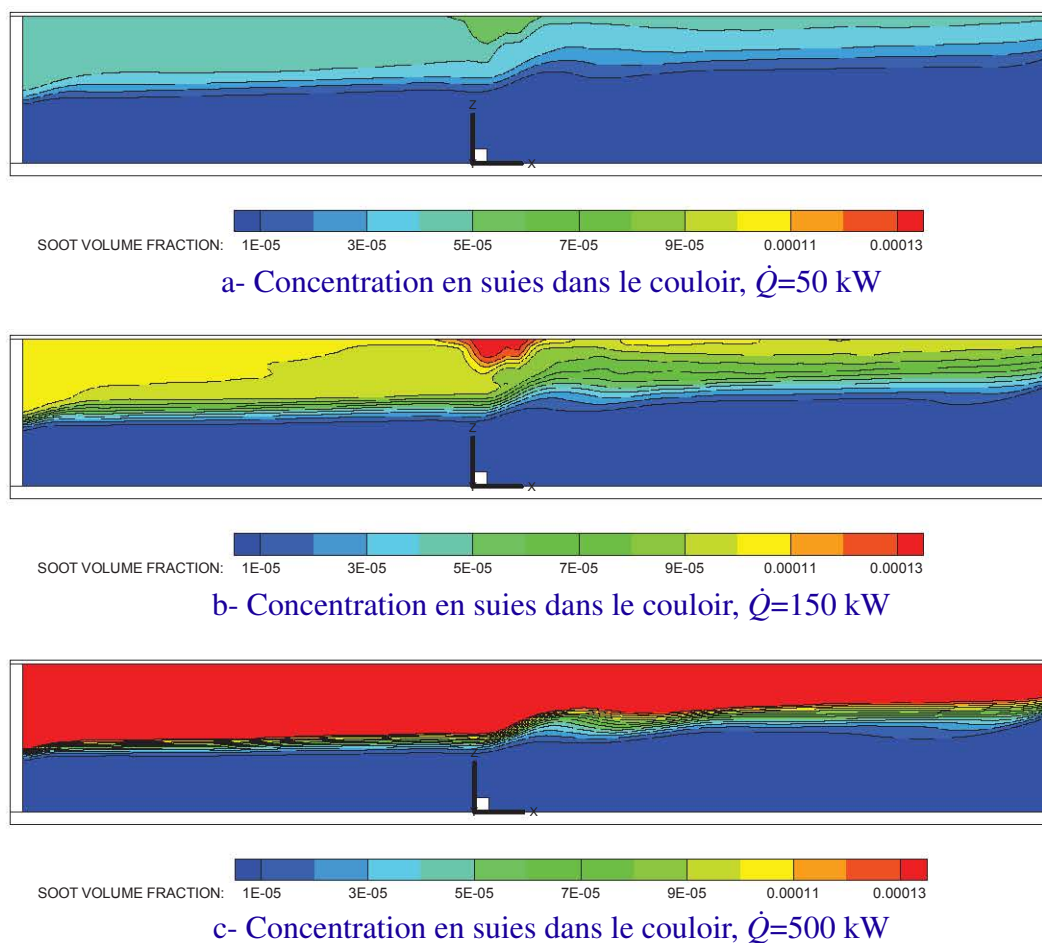


Fig. III.5 — Coupe longitudinale en $Y=0$ représentant la concentration en suies (en mol/mol) dans le couloir pour différentes puissances avec un foyer type bac heptane

La combustion de l’heptane produit une quantité de chaînes carbonées, appelées suies, liée à la puissance du feu et à la ventilation du foyer. Plus la puissance du feu est importante, plus la production en suies est importante comme le montrent les coupes III.5 extraites des calculs de FDS. C’est cette concentration en suies qui est responsable de la couleur de la flamme visible mais également de l’opacité de la fumée. L’opacité de la fumée est étudiée lors de la campagne d’essais et la caractérisation de la stratification optique du milieu repose sur ce phénomène d’absorption du rayonnement visible par les suies dans la fumée.

Pour un feu de faible puissance, 50 kW figure III.5 a-, la concentration en suies atteint 7×10^{-5} mol/mol en partie haute et permet d’observer une stratification de l’environnement. Le même phénomène de stratification est observé pour les simulations des deux feux plus puissants, respectivement figures III.5 b- et c-, avec des concentrations en suies atteignant 1.3×10^{-4} mol/mol pour 150 kW et supérieur à cette valeur pour 500 kW.

La puissance de 150 kW (cf figures III.5 b-) donne un gradient de concentration en suies marqué

par différentes couches.

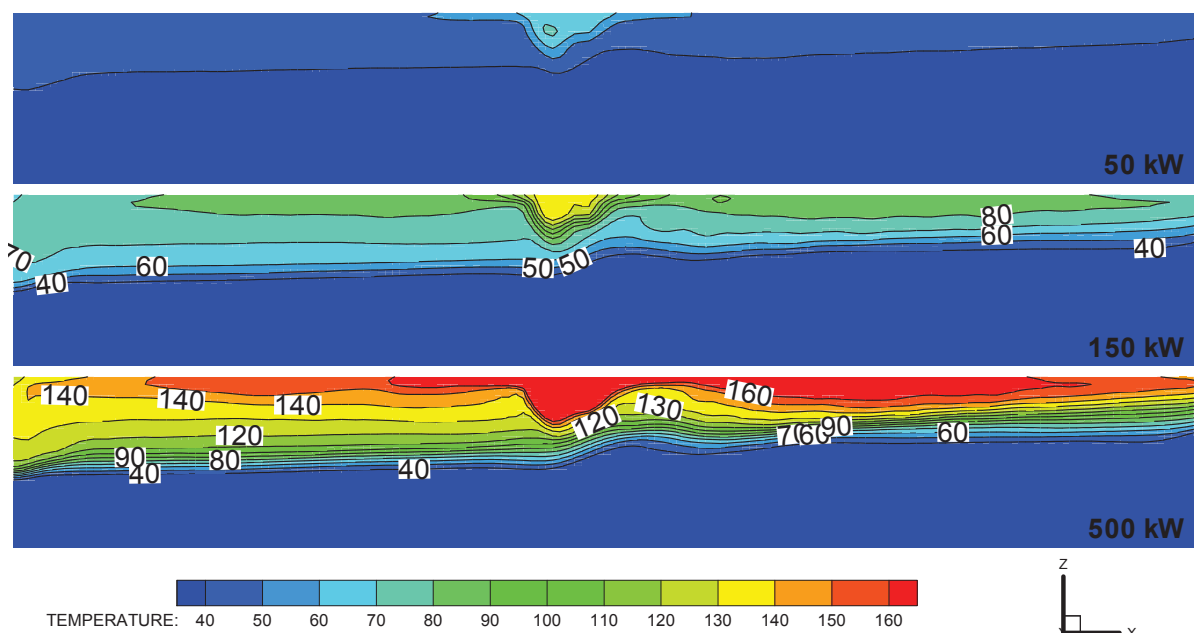


Fig. III.6 — Coupe longitudinale en $Y=0$ représentant les champs de température dans le couloir pour différentes puissances de foyer type bac heptane

Les niveaux de température varient en fonction de la puissance du feu. Des températures trop importantes dans le couloir peuvent endommager les opacimètres installés pour l'évaluation de la visibilité au travers de la fumée. La figure III.6 compare les niveaux de température dans le plan longitudinal du couloir pour les trois puissances calculées par FDS. Au droit de l'ouverture, les gradients de température s'échelonnent, sur la hauteur du couloir, de 20 à 60 °C pour le feu de 50 kW, de 20 à plus de 100 °C pour le feu de 150 kW et de 20 à plus de 160 °C pour le feu de 500 kW. Les gradients thermiques sont d'autant plus marqués que les puissances de feu sont élevées.

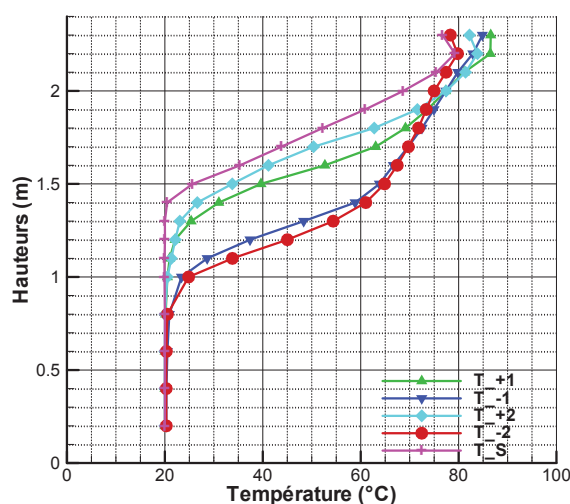


Fig. III.7 — Profils de température à différentes positions dans le couloir pour une puissance de feu de 150 kW

Les simulations sur les puissances permettent également de faire des profils de température pour

différentes positions dans le couloir. Ces positions présentées sur la figure III.8. La stratification de l'environnement (cf figure III.7) est plus marquée du côté du couloir fermé car la fumée est à une hauteur de 1,25 m contre 1,60 m en moyenne pour la partie du couloir ouverte vers l'extérieur. Les profils permettent de mettre en évidence la hauteur libre de fumée en comparant les points d'inflexion de chaque courbe. Le phénomène de remplissage du couloir fermé est à l'origine de l'augmentation de l'épaisseur de la couche de fumée. On remarque tout de même que les températures maximales dans les deux moitiés de couloir sont équivalentes malgré la couche de fumée plus faible vers la sortie du couloir.

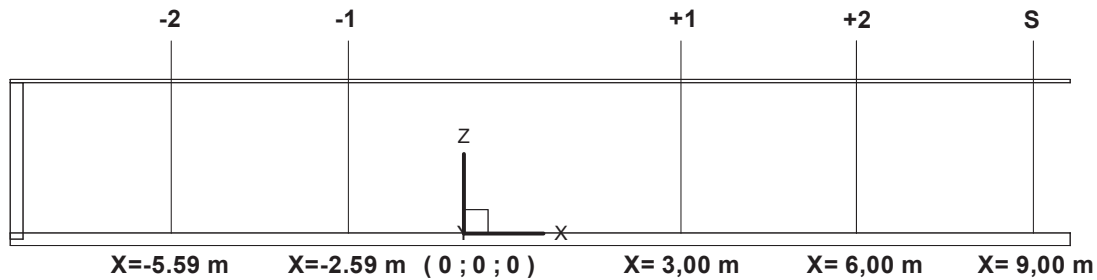


Fig. III.8 — Coupe longitudinale au centre de la circulation donnant les sections de calculs de températures dans FDS

Pour conclure, le foyer avec un combustible heptane pour une puissance de 150 kW semble être un bon compromis pour la production de suies et les niveaux de température. La quantité de suies produites est suffisamment importante pour l'observation d'une stratification optique de l'environnement et les températures ne sont pas trop élevées (hauteur de suies d'environ 80 cm) pour les appareils de mesures mis en place.

Cette puissance de 150 kW correspond, pour un combustible liquide de type heptane, à un bac de dimensions 45 cm de long sur 25 cm de large, une surface de $0,1125 \text{ m}^2$ et ce, d'après la relation de ZABETAKIS et BURGEN [2]. La hauteur d'heptane détermine la durée de combustion. Pour 0,03 m on a environ dix minutes de test. Ces caractéristiques sont données dans le tableau III.1.

Caractéristiques du bac pour les simulations de configuration	
Longueur	0,45 m
Largeur	0,25 m
Hauteur	0,03 m
Puissance foyer	150 kW

Tab. III.1 — Caractéristiques du bac pour les simulations de configuration

III.2 Configuration géométrique du couloir

La section précédente a permis de mettre en évidence la différence de hauteur de fumée dans les deux parties du couloir, celle proche de l'ouverture et celle du côté fermé. L'objectif de cette section

est de savoir s'il est possible d'obtenir une stratification homogène le long du couloir en obstruant la partie fermée. Deux simulations ont été faites afin de rendre compte de l'effet d'une paroi obstruant le couloir fermé sur l'écoulement de la fumée. La figure III.9 présente les résultats des simulations concernant le comportement de la fumée à l'aide de la concentration en suies du milieu. La simulation avec le couloir entier (cf figure III.9 a-) montre une accumulation de fumée dans la partie du couloir fermé. Cette accumulation de fumée n'est pas propice à la stratification. L'obstruction mise en place dans le couloir sur la partie ne débouchant pas vers l'extérieur n'a pas d'influence significative sur le gradient de concentration en suies durant le régime établi (cf figure III.9 b-).

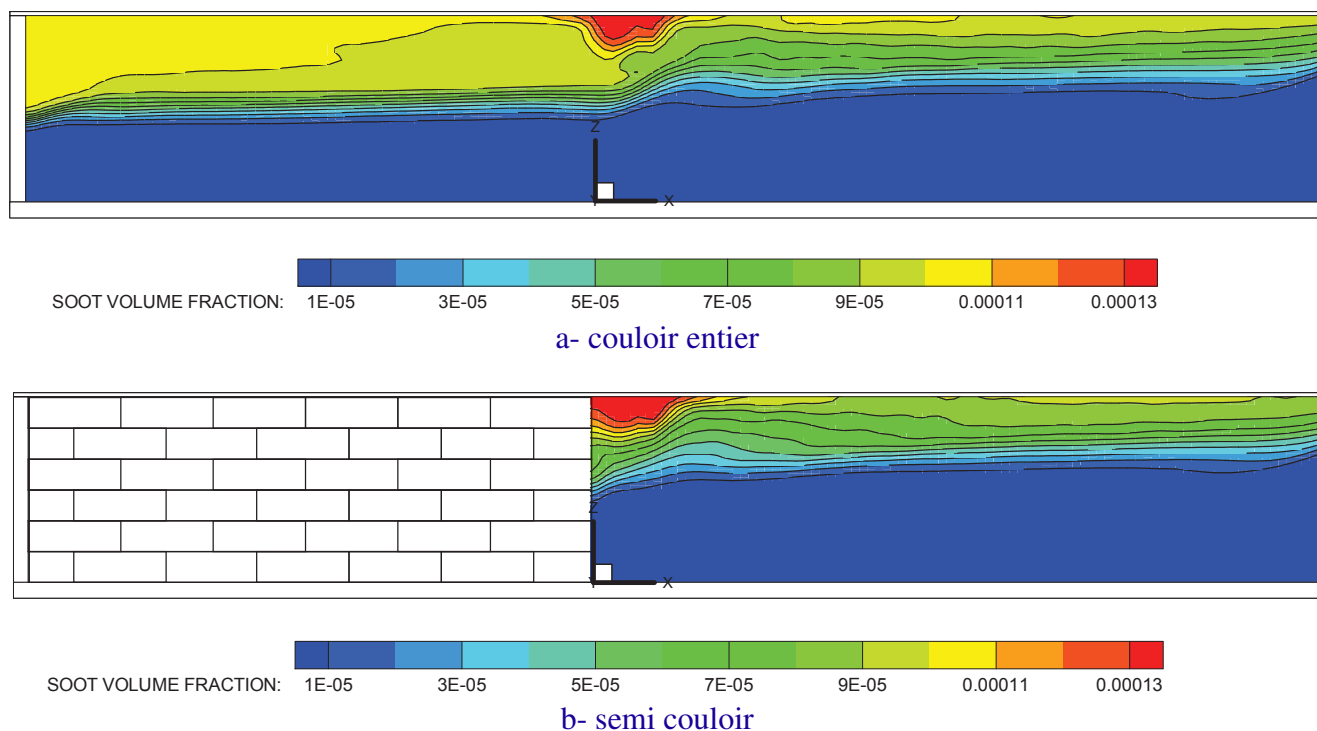


Fig. III.9 — Coupe transversale représentant la concentration en suies dans le couloir en régime établi, $Y=0.00$ m

Les écoulements de la fumée dans la circulation peuvent être comparés à l'aide du champ des vitesses dans la direction du couloir représenté par la figure III.10. On constate dans la partie fermée du couloir entier une recirculation de la fumée avec, à certains endroits, des vitesses nulles. Ce constat signifie qu'il y a un remplissage de cette partie du couloir par la fumée.

L'obstruction favorise la stratification de l'environnement enfumé, dans la mesure où l'on conserve un gradient de température dans la moitié ouverte. De plus, la zone morte de fumée est éliminée. La partie du couloir non utilisée peut permettre, en outre, durant les essais de recherche, l'installation d'une caméra d'observation du milieu enfumé pour rendre compte de la visibilité au travers de la fumée.

La partie obstruée du couloir pourra néanmoins être réouverte lors d'essais ultérieurs, par exemple

avec une ventilation mécanique.

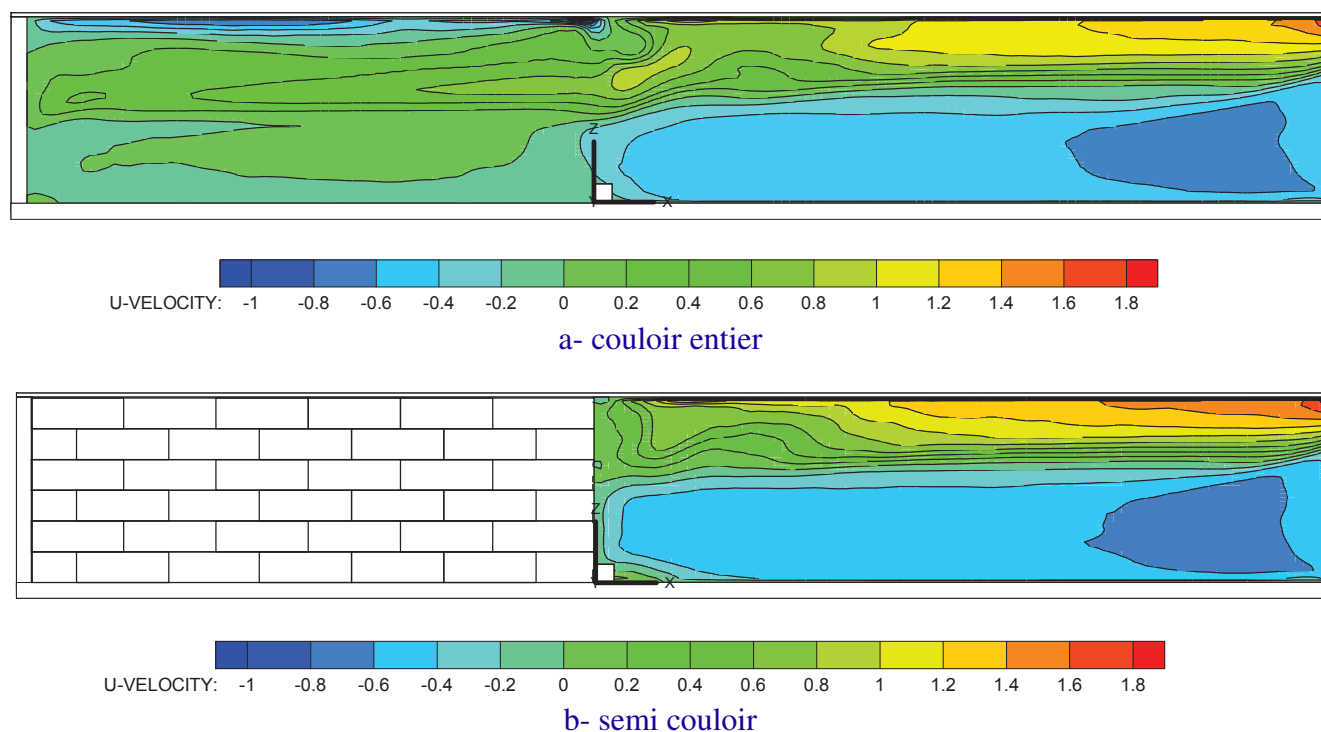


Fig. III.10 — Coupe transversale représentant le champ des vitesses dans le couloir en régime établi, $Y=0.00$ m

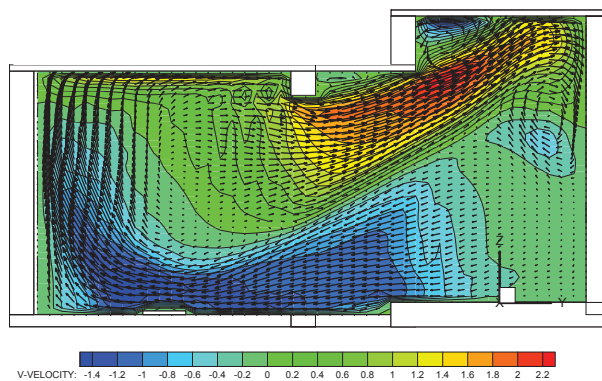
III.3 Ouverture dans la pièce contenant le foyer

Phénomène de circulation des gaz en situation de feu confiné

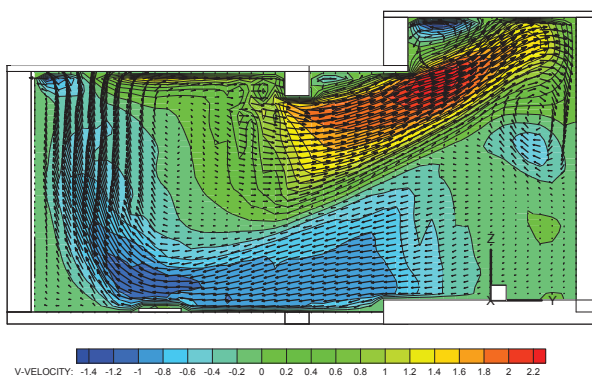
Lorsqu'un combustible brûle, il joue en quelque sorte le rôle de ventilateur avec la phase gazeuse environnante. En effet, pendant la combustion, le foyer, d'une part produit des gaz de combustion qui vont s'élever vers le plafond et d'autre part entraîne de l'air en partie basse nécessaire à l'entretien du feu et crée des mouvements de circulation d'air et de fumée dans le local où il se trouve. Ce phénomène est contraint en bâtiment à cause du confinement des locaux.

Dans notre configuration, le foyer en combustion consomme le dioxygène qui l'entoure créant ainsi une dépression en partie basse de la pièce. Cette dépression attire l'air se trouvant dans le couloir. Le foyer en combustion produit de la fumée, créant une surpression en partie haute de la pièce. Cette surpression évacue les gaz de combustion en partie haute de la pièce (cf figure III.11). La fumée s'échappant de la pièce en nappe en partie haute traverse tout le couloir jusqu'à l'extérieur. À la sortie du couloir, lorsque la fumée n'est plus retenue par le plafond et grâce aux forces de flottabilité, elle s'élève dans l'atmosphère.

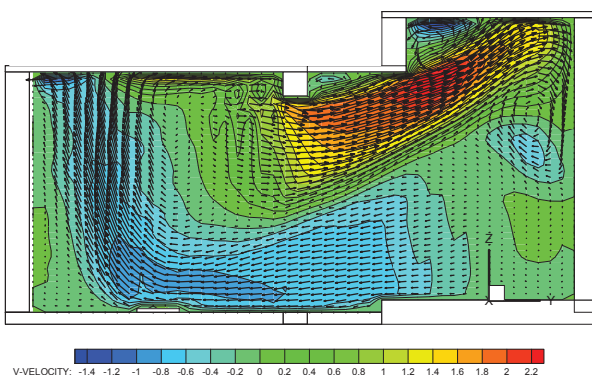
Dans le couloir, l'écoulement de l'air frais et de la fumée est à l'origine de la création d'un contre-courant : la fumée s'évacuant vers l'extérieur en partie haute du couloir et l'air alimentant



a- Pièce sans ouverture



b- Pièce ouverte en partie basse, 20 cm de hauteur et 90 cm de largeur



c- Pièce ouverte en partie basse, 40 cm de hauteur et 90 cm de largeur

Fig. III.11 — Coupe transversale montrant les vitesses de circulation des gaz au travers du sas, en $X=0,4$ m

le foyer en dioxygène circule en partie basse vers la pièce (cf figure III.12). Ce contre-courant peut altérer la stratification en mélangeant l'air frais et la fumée.

Ce phénomène de contre-courant est amplifié par la puissance du feu, par la nature du combustible (conditionnant la réaction de combustion), par la concentration en O_2 et par le confinement de la pièce (ses ouvertures).

Afin de minimiser ce phénomène et dans le but de favoriser la stratification en deux zones dis-

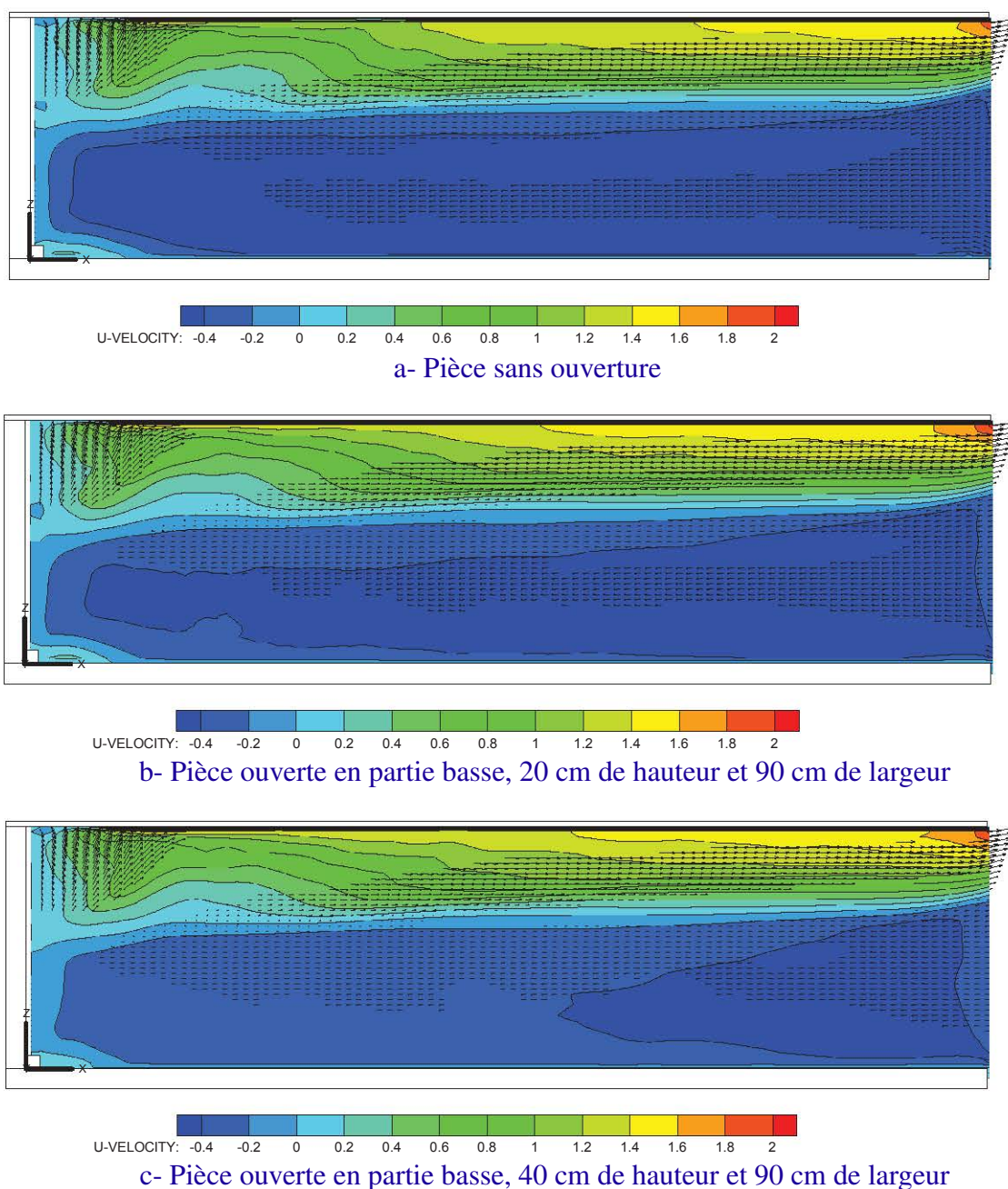


Fig. III.12 — Coupe longitudinale montrant les vitesses de circulation des gaz dans le couloir, en $Y=0$ m

tinctes, une ouverture vers l'extérieur dans la pièce est envisagée (cf figure III.13). L'ouverture dans la pièce permet une arrivée d'air supplémentaire alimentant le foyer en dioxygène lors de la combustion qui ne traverse pas tout le couloir. L'objectif de l'étude qui suit est d'évaluer l'utilité d'une ouverture, voire même de déterminer sa surface, sur les écoulements de gaz dans le couloir. L'ouverture est modulable en fonction du combustible et de sa puissance : sa largeur est de 90 cm de et sa hauteur peut varier de 0 à 80 cm.

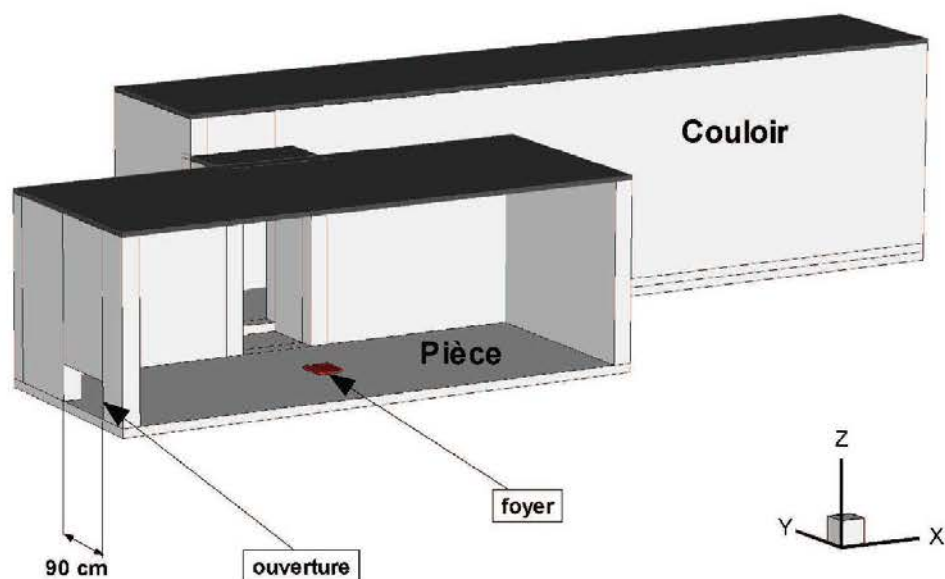


Fig. III.13 — Vue en 3 dimensions représentant la pièce-couloir et l'ouverture dans la pièce

Simulation d'une ouverture dans la pièce

Trois configurations sont simulées dans cette partie pour tester l'influence sur la circulation de l'air dans la configuration pièce-couloir. La première simulation est une configuration où la pièce est fermée à l'extérieur et ne donne que la possibilité au foyer de s'alimenter en air par le sas via le couloir. La deuxième et la troisième simulation comportent une ouverture en partie basse de la pièce de dimensions respectives 20 cm de haut par 90 cm de large et 40 cm par 90 cm. Les écoulements au travers du sas et dans la circulation sont représentés ci-dessus sur les figures III.11 et III.12. On constate que le débit d'air traversant le couloir puis le sas est moins important lorsque l'ouverture dans la pièce est grande.

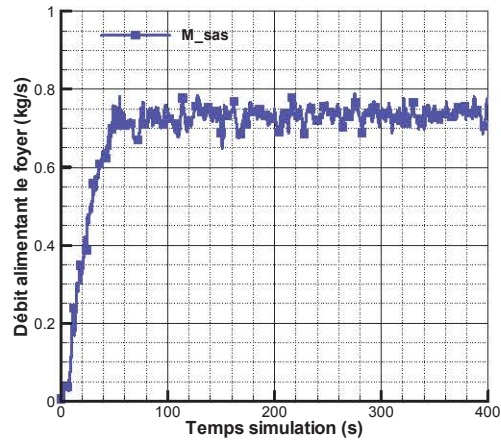
L'influence de l'ouverture dans la pièce peut être calculée en sommant tous les débits d'air entrant dans la pièce, par toutes les ouvertures. Une section de calcul est positionnée sous le linteau du sas, donnant ainsi la quantité de gaz entrant dans la pièce par cette ouverture. La deuxième section est positionnée dans l'ouverture en partie basse de la pièce et rend compte du débit de gaz entrant dans la pièce par l'ouverture. Les résultats du calcul des débits sont regroupés dans le tableau III.3.

Lorsque la pièce ne comprend pas d'ouverture, le débit d'air entrant dans la pièce ne provient que du couloir et passe par le sas, le débit est égal à 0,733 kg/s. Pour l'ouverture de 20 cm de hauteur, le débit passant par le sas est de 0,532 kg/s alors qu'il est de 0,434 kg/s pour l'ouverture de 40 cm de hauteur.

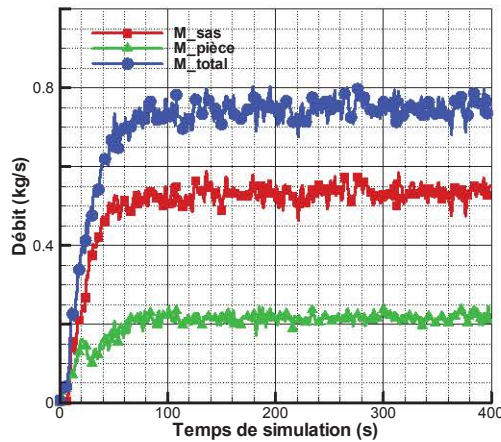
Pour conclure, une ouverture modulable dans la pièce pour les essais peut réduire l'importance du phénomène de contre-courant dans le sas qui peut altérer la stratification en faisant le mélange entre les deux couches (cf figure III.14).

Ouverture	Sans ouverture	Ouverture de 20 cm de haut	Ouverture de 40 cm de haut
$\langle M_{SAS} \rangle$ (kg/s)	0,733	0,532	0,434
$\langle M_{pièce} \rangle$ (kg/s)	0,000	0,215	0,315
$\langle M_{total} \rangle$ (kg/s)	0,733	0,747	0,749

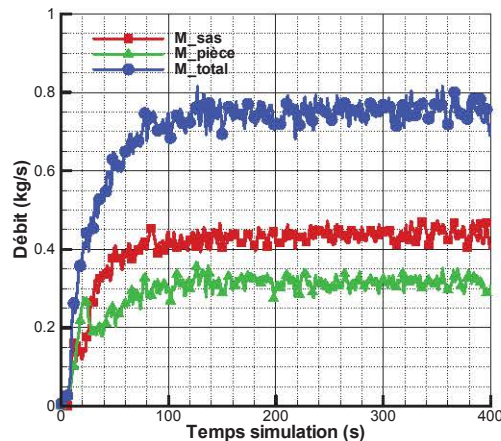
Tab. III.2 — Débits entrant dans la pièce



a- Pièce sans ouverture



b- Pièce ouverte en partie basse, 20 cm de hauteur et 90 cm de largeur



c- Pièce ouverte en partie basse, 40 cm de hauteur et 90 cm de largeur

Fig. III.14 — Evolution des débits d'air entrant dans la pièce pour les trois simulations

III.4 Positionnement d'un linteau à l'extrémité ouverte du couloir

La stratification de l'environnement enfumé dans le couloir qui a été observée dans les sections précédentes a montré que l'épaisseur de la nappe de fumée diminuait à mesure que l'on se rapproche de la sortie du couloir. Afin d'observer une stratification de l'environnement parfaitement établie et horizontale, on envisage de positionner un linteau en partie haute du couloir à l'extrémité ouverte. L'influence et la nécessité de ce linteau sont évaluées dans cette section par le biais de quatre simulations, en faisant varier ses dimensions.

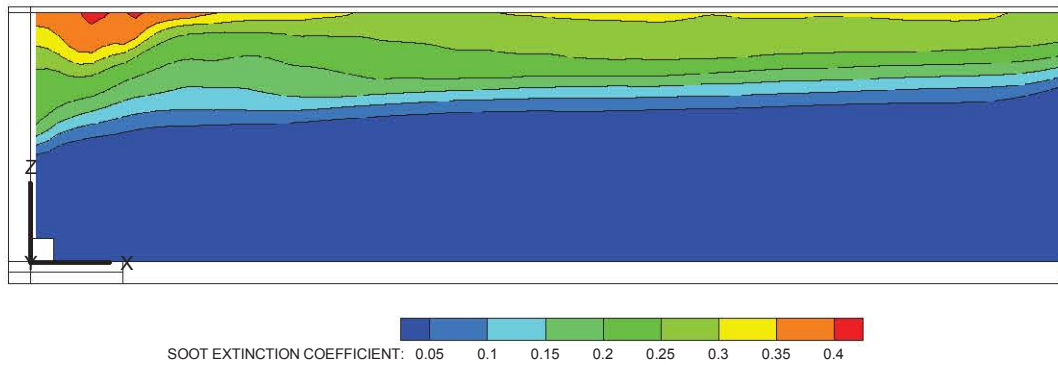
La première simulation est la même que dans les sections précédentes avec un couloir ne comportant pas de linteau. Ainsi, la hauteur de passage est de 2,35 m. La deuxième configuration testée est un linteau descendant de 20 cm sous le plafond en extrémité du couloir, réduisant l'espace de passage à 2,15 m. Pour la simulation suivante, le linteau est de 40 cm de hauteur laissant une hauteur de passage de 1,95 m. Notons que les deux configurations précédentes (2,15 m et 1,95 m) correspondent à des dimensions que l'on pourrait trouver en ERP. La dernière configuration testée correspond à un linteau est de 60 cm et le couloir offre donc une hauteur de passage de 1,75 m.

En régime établi, l'environnement comprend une nappe de fumée. Cette nappe de fumée est observée pour les quatre simulations sur la figure III.15 présentant les coefficients d'extinction des suies dans la section longitudinale médiane du couloir. Le coefficient d'extinction des suies est caractéristique de la capacité qu'ont les suies à absorber le rayonnement lumineux. Ce coefficient est calculé par le code FDS à l'aide de la fraction volumique en suies et est donc représentatif de la couche de fumée visible dans la circulation.

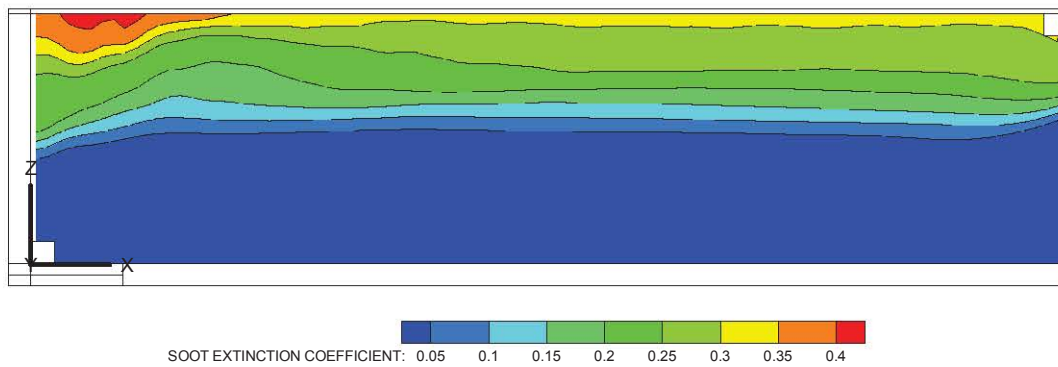
L'influence des linteaux sur la nappe de fumée est observable thermiquement sur la figure III.16. Cette stratification est intéressante et un linteau de ce type sera mis en place pour les essais de feu dans la configuration de la pièce-couloir.

Au regard de la figure III.15, le linteau a une influence directe sur la stratification du milieu enfumé, sa hauteur faisant varier l'épaisseur de la nappe de fumée. La fumée remplit la hauteur sous plafond qui lui est offerte grâce aux différents linteaux puis passe sous cet obstacle pour s'évacuer naturellement. Le linteau trop petit ne permet pas de retenir la fumée (cf figure III.15 a-). Au contraire, un linteau trop grand n'offre pas la possibilité à la fumée de s'évacuer et elle s'accumule dans le couloir (cf figure III.15 d-), comme cela était observé dans la partie du couloir fermé (section III.2).

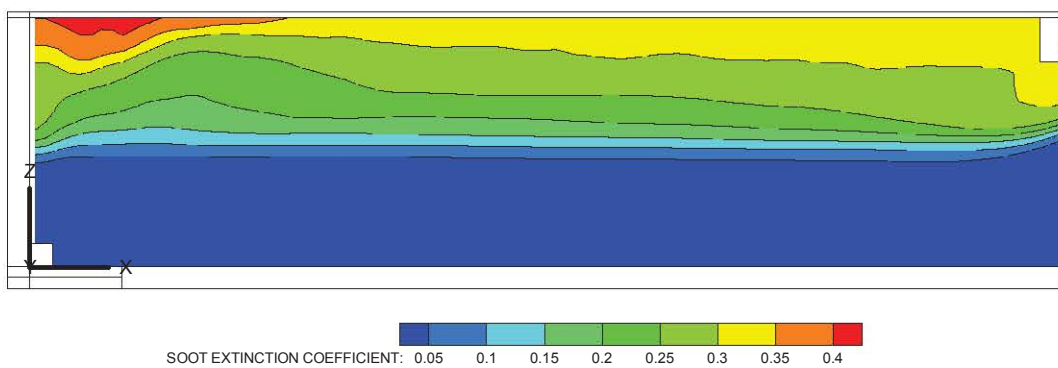
Il est justifié, dans le cadre de notre étude, d'installer un linteau d'une hauteur de 40 cm. Ce linteau conduit à une couche de fumée d'environ 80 cm avec une stratification de l'environnement.



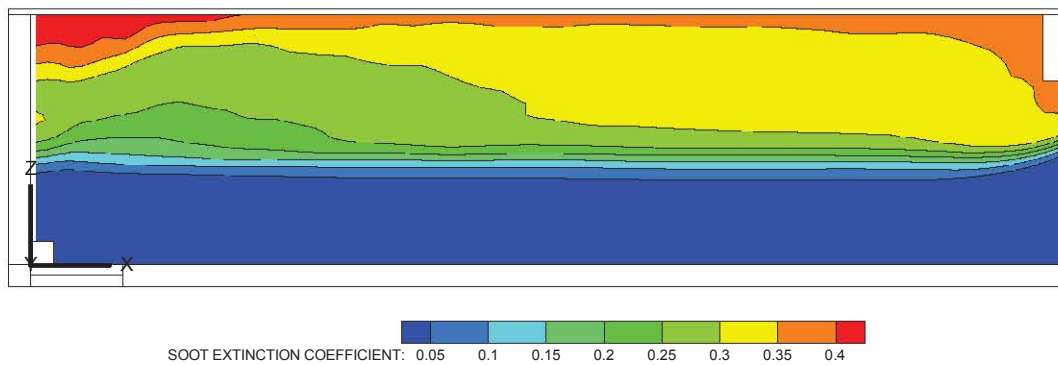
a- sans linteau



b- linteau 20 cm

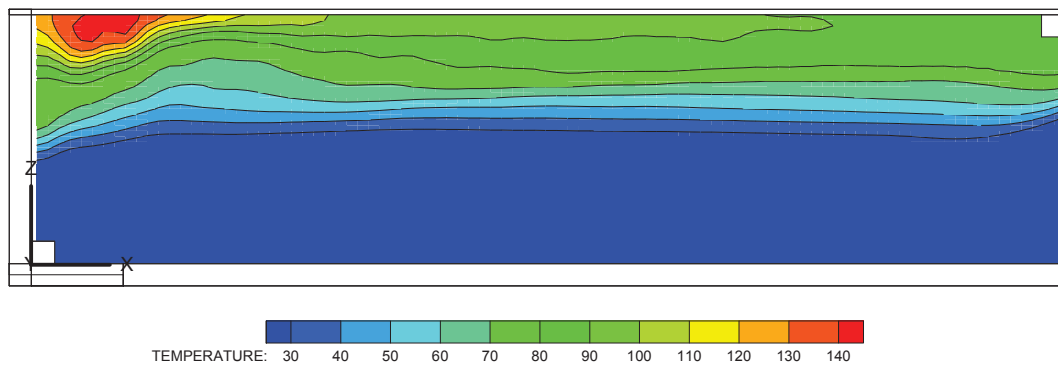


c- linteau 40 cm

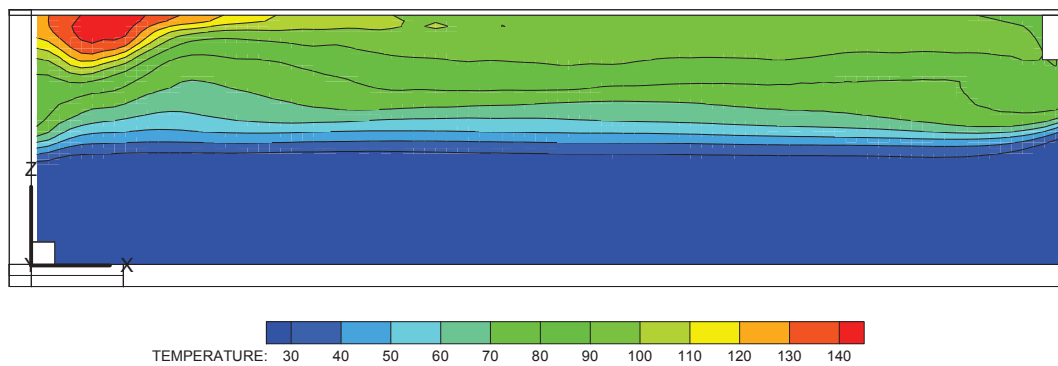


d- linteau 60 cm

Fig. III.15 — Coupe longitudinale représentant le champ de coefficients d'extinction des suies dans le couloir en régime établi, $Y=0,00$ m



a- linteau 20 cm



b- linteau 40 cm

Fig. III.16 — Coupe longitudinale représentant les niveaux de température dans le couloir en régime établi, $Y=0,00$ m

III.5 Définition de la métrologie à mettre en œuvre

L'étude numérique a permis de modifier la configuration de la pièce-couloir (obstruction d'une partie du couloir, ouverture de la pièce, positionnement d'un linteau dans le couloir). Elle sert à présent au choix de la métrologie pour la campagne d'essais.

III.5.1 Mesure de la puissance du feu

Dans les simulations numériques, la puissance dégagée par la combustion de l'heptane a été considérée constante pour simplifier l'exploitation des résultats. En réalité, l'environnement ainsi que le bac employé pour la combustion apportent leur contribution à l'évolution de la puissance au cours du temps. La durée de combustion calculée théoriquement est également modifiée par des phénomènes radiatifs, par exemple liés au bac, intervenant lors de la combustion.

Lors des prochains essais, il est judicieux de savoir mesurer l'évolution de cette puissance en fonction du temps pour ensuite l'implémenter dans les modèles numériques. Pour cela, il existe plusieurs méthodes. La première méthode consiste à mesurer l'évolution de la masse de combustible en fonction du temps. La puissance du feu est donnée par le produit du débit massique de combustible par la chaleur de combustion du combustible :

$$HRR = \dot{m}_{comb} \times \Delta H_c \quad (III.1)$$

La deuxième méthode est une analyse de consommation de dioxygène. On peut calculer cette consommation grâce à une analyse de la fumée en sortie de couloir.

Dans un premier temps, seule la balance mesurant l'évolution de la masse de combustible au cours du temps est installée. Une hotte en sortie de couloir avec un analyseur de gaz complèteront l'installation durant la thèse.

III.5.2 Stratification thermique

Précédemment, dans la section III.4, l'écoulement de la fumée a été étudié. Pour le cas particulier d'un linteau de 40 cm, on a mesuré une température de fumée allant jusqu'à 150 °C. Cette gamme de température permet d'utiliser des thermocouples de type K de diamètre 2 mm dont la gamme de mesure s'étend de -250 °C à 1372 °C.

Pour étudier la stratification thermique de l'environnement, on mesure un gradient vertical de température et ce, à l'aide d'échelles de thermocouples disposées dans le couloir. Quatre échelles de thermocouples sont prévues : une à la sortie du sas et trois dans le plan longitudinal médian du couloir. L'écart entre les thermocouples est réduit en partie haute du couloir pour pouvoir mieux caractériser la fumée. L'écart entre les thermocouples est de 20 cm jusqu'à 1 m de haut. Entre 1 m et

jusqu'à 10 cm sous le plafond (plafond à 2 m pour le sas et à 2,35 m pour le couloir), l'espacement entre chaque thermocouple est réduit à 10 cm. Il y a donc 14 Tc (thermocouples) sur l'échelle à la sortie du sas et 18 Tc pour les autres échelles disposées dans le couloir, soient 68 Tc au total.

Pour disposer les échelles, il est nécessaire de comprendre les écoulements dans le couloir. Ainsi, à la sortie de la pièce, la fumée impacte sur le mur opposé, ce qui engendre une perturbation de l'écoulement de la fumée dans le couloir. Pour l'étude de la stratification thermique, il est important de tenir compte de cette distance de stabilisation de l'écoulement de la nappe de fumée vers l'extrémité du couloir. La perturbation de l'écoulement par l'entrée de la fumée dans le couloir est montrée sur la figure III.17. La figure III.18 propose trois positions de mesures pour les échelles de mesure de température.

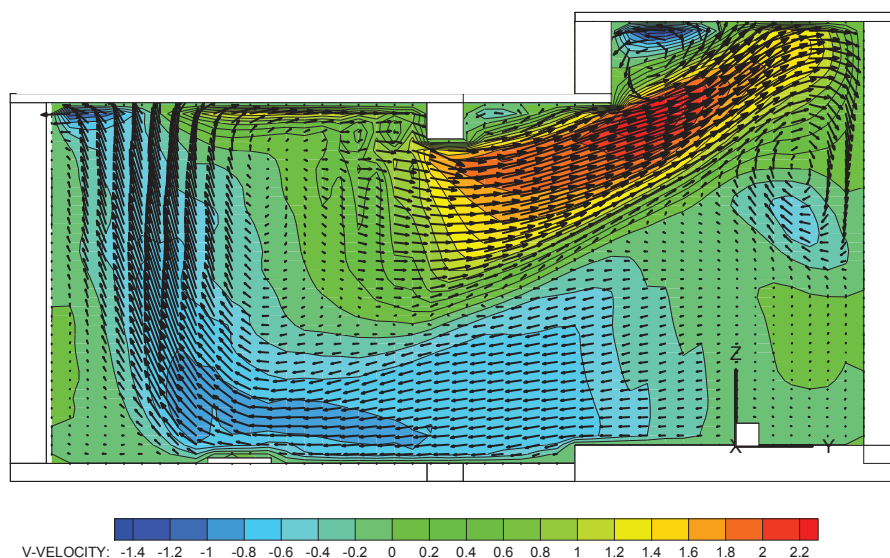


Fig. III.17 — Coupe AA montrant le mouvement de la fumée entrant dans le couloir et impactant le mur opposé

La longueur estimée nécessaire à l'établissement d'une nappe de fumée sans perturbation dans le couloir est évaluée numériquement, pour un foyer de 150 kW, entre deux ou trois mètres (cf figure III.18). La première échelle de thermocouples est placée à 3 m du mur d'obstruction (défini à la section III.2). Les deux suivantes sont disposées tous les 3 m jusqu'à la sortie du couloir, soient aux positions 6 m et 9 m (cf figure III.20). L'échelle de thermocouples installée à la sortie de la pièce au raz du sas comme le montre la figure III.19 permet de connaître le gradient de température en sortie de pièce.

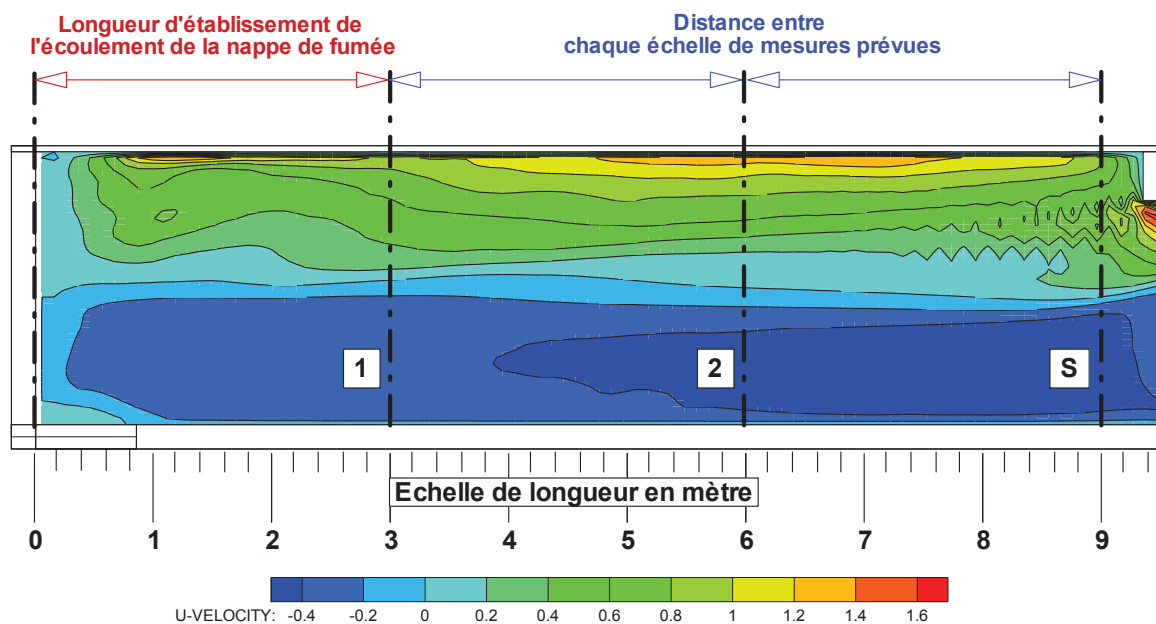


Fig. III.18 — Circulation des gaz dans le couloir et établissement de la nappe de fumée

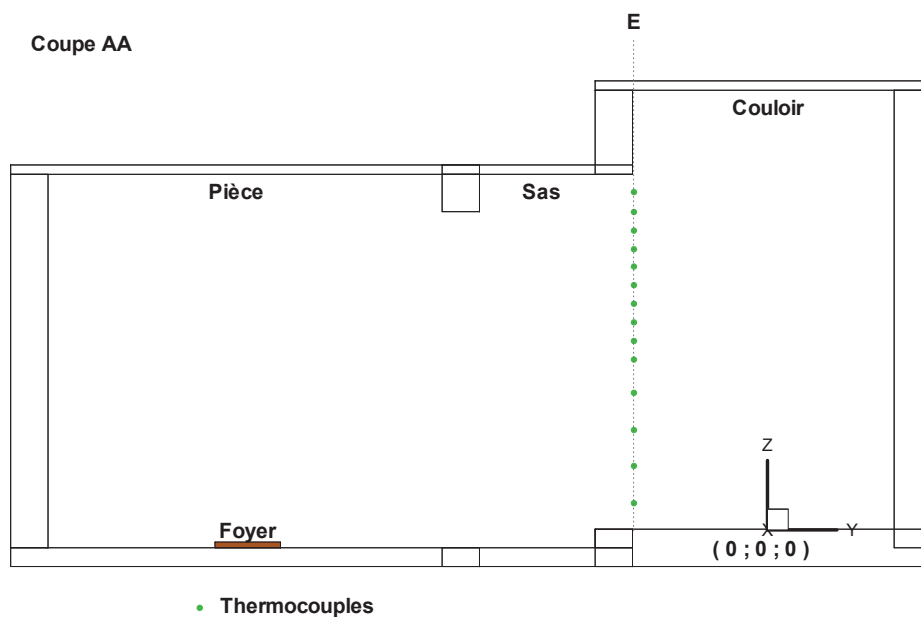
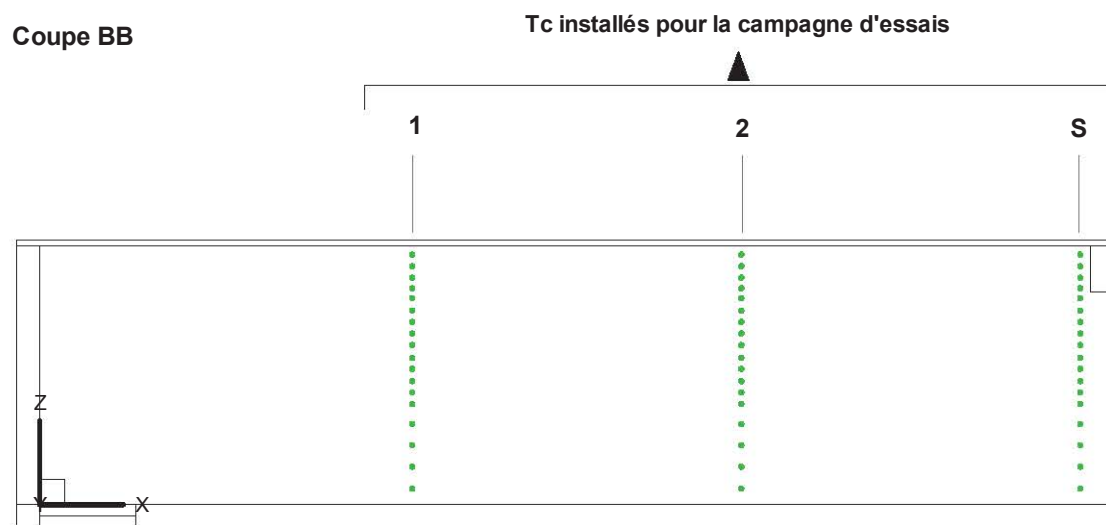


Fig. III.19 — Coupe AA illustrant la position de l'échelle de thermocouples à la sortie de la pièce



- 18 Thermocouples - hauteurs : [0,2 ; 0,4 ; ... ; 1,0] et [1,2 ; 1,1 ; ... ; 2,3] m

Fig. III.20 — Coupe BB illustrant la position des échelles de thermocouples dans le couloir

III.5.3 Stratification optique

La stratification optique est étudiée en mesurant la transmittance à plusieurs hauteurs, le long d'une ligne de visée. La transmittance est une valeur sans dimension traduisant la capacité d'un milieu gazeux à laisser passer le rayonnement optique. Elle est égale à 1 lorsque le milieu est totalement transparent et à 0 lorsque le milieu est opaque. Notons que dans un espace enfumé (ne comportant pas de gouttes d'eau), les suies sont les principales responsables de l'absorption du rayonnement.

Dans un essai, la transmittance d'un milieu gazeux est évaluée en effectuant le ratio entre un signal reçu (traversant le milieu gazeux absorbant) et un signal étalon (évalué en l'absence de fumée). Ces signaux sont mesurés à l'aide d'opacimètres. Les opacimètres sont constitués d'un émetteur laser et d'un récepteur. Dans le cadre de la présente recherche, la diode laser de l'émetteur émet à la longueur d'onde de 635 nm fluctuant légèrement avec la température (± 5 nm).

Dans une simulation numérique, le code FDS ne calcule pas de transmittance. Le calcul de la transmittance d'un milieu gazeux repose sur une hypothèse : le rayonnement, en l'absence des gouttes d'eau dans l'environnement gazeux est purement absorbé par la présence des suies dans la fumée. La transmittance du milieu gazeux (fumée, air) est liée au coefficient d'extinction local en (m^{-1}) des suies dans une gamme de longueur d'onde. La transmittance est telle que :

$$\tau = e^{\int_0^L \kappa \cdot dy} \equiv e^{\sum_i \kappa_i \cdot \Delta y} \quad (\text{III.2})$$

avec κ_i le coefficient d'extinction à la position i , Δy la taille de maille. Notons que $\sum \Delta y = L$ où L est la longueur de la ligne de visée.

Le code FDS permet de calculer un coefficient d'extinction intégré sur une partie du spectre. Or, les opacimètres utilisés lors de la campagne émettent à la longueur d'onde $\lambda = 635$ nm. D'après SOLOVJOV et WEBB [16], il est possible de connaître le coefficient d'extinction à l'aide de la fraction volumique en suies. Le coefficient d'extinction est proportionnel à la fraction volumique en suies et inversement proportionnel à la longueur d'onde du rayonnement lumineux considéré :

$$\kappa_i = \frac{cste \cdot f_{v_i}}{\lambda} \quad (\text{III.3})$$

On obtient donc une valeur spectrale du coefficient d'extinction lié à la présence de suies dans l'environnement gazeux. La constante est déterminée, empiriquement, à 5,5 [16]. Pour un rayon lumineux d'une longueur d'onde égale à 635 nm, l'expression du coefficient d'extinction local des suies devient :

$$\kappa_i = \frac{5,5 \cdot f_{v_i}}{635 \cdot 10^{-09}} \quad (\text{III.4})$$

Numériquement, les fractions volumiques des suies sont extraites dans la largeur du couloir sur

l'axe Y, tous les 10 cm ($Y = 0,1 ; 0,2 ; \dots ; 1,3$ m). L'équation III.4 permet de traduire la fraction volumique de suies en coefficient d'extinction local pour un rayonnement lumineux à $\lambda = 635$ nm, puis l'équation III.2 nous donne la transmittance au travers du couloir, dans la largeur. Cette transmittance correspond à ce que donnent les opacimètres laser prévus pour les essais.

Dans le cadre de la recherche menée par le CSTB et le LEMTA, il pourra être intéressant de comparer les stratifications thermique et optique mesurées dans le couloir. Pour cette raison, les opacimètres sont placés au mêmes endroits que les échelles de thermocouples, positions 1 et 2, à 3 et 6 m du mur d'obstruction. Les hauteurs de calcul de l'opacimétrie sont de 60 cm, 1,00 m, 1,40 m, 1,80 m et 1,90 m.

On rappelle que ces calculs sont réalisés dans la configuration pièce-couloir en considérant un foyer de type bac heptane délivrant une puissance de 150 kW en régime établi.

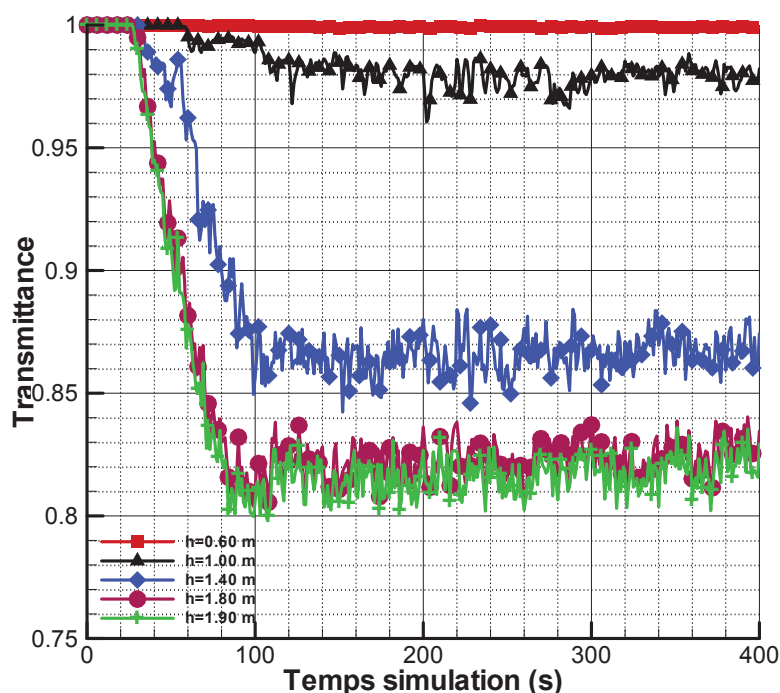


Fig. III.21 — Évolution des transmittances à différentes hauteurs en fonction du temps à la position $X=3.0$ m

L'évolution de la transmittance pour la position 1 et respectivement 2 est donnée sur la figure III.21 et la figure III.22. Sous 1 m, la transmittance est proche de 1, voire égale à 1 pour 60 cm. Cela signifie que la visibilité est très peu ou pas impactée par la présence de fumée en partie haute. Cette zone correspond à la hauteur libre de fumée. À 1,40 m, la transmittance a chuté à 0,87 et son évolution au cours du temps est fortement bruitée. Ce bruit de mesure et cette valeur de transmittance intermédiaire indique que cette hauteur de mesure se situe dans la zone de mélange entre l'air et la fumée, une zone où l'écoulement est perturbé. Au dessus de 1,80 m, la valeur de transmittance n'est

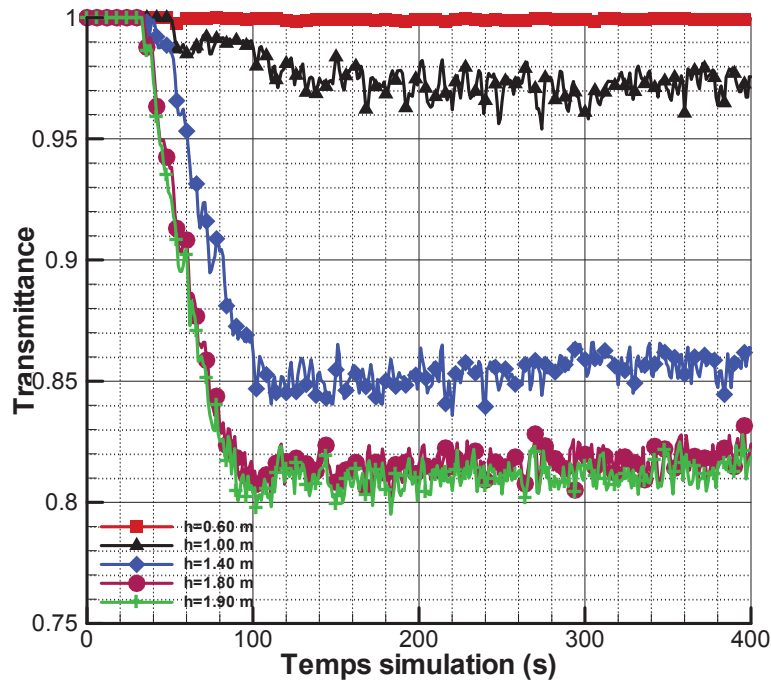


Fig. III.22 — Evolution des transmittances à différentes hauteurs en fonction du temps à la position $X=6.0\text{m}$

plus autant bruitée et est égale à 0,82. Il s'agit de la couche de fumée.

La figure III.23 montre les profils de transmittances moyennes en fonction de la hauteur lorsque le régime est établi. Les deux profils sont très proches, ce qui illustre un profil de fumée homogène dans le couloir. Cela est dû au linteau en sortie de couloir. La zone entre les deux couches de gaz (fumée et air) se situe entre 1 m et 1,4 m. La transmittance étant très proche entre 1,8 m et 1,9 m, on se propose pour les essais de supprimer la mesure à 1,9 m et de la remplacer par une mesure à 1,6 m, dans le but de caractériser au mieux la zone entre les deux couches de la stratification.

III.6 Conclusion du chapitre

L'étude numérique préliminaire a permis de modifier la géométrie de la configuration pièce-couloir, favorisant l'étude de la stratification de l'environnement :

- dimensionnement du foyer,
- obstruction de la partie du couloir fermé,
- création d'une ouverture d'alimentation en air dans la pièce contenant le foyer,
- positionnement d'un linteau en extrémité de couloir.

Les différentes étapes de l'évolution du couloir pour l'observation du milieu enfumé sont regroupées ci-dessous avec l'objectif de chaque modification.

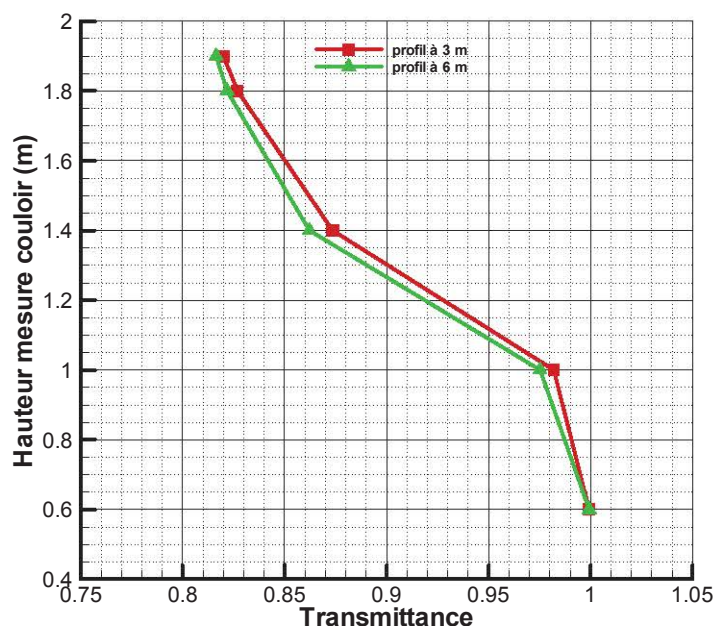


Fig. III.23 — Profils de transmittance moyenne en régime établi pour deux sections dans le couloir

Dimensionnement du foyer

Le dimensionnement du foyer a permis de déterminer une puissance, une durée ainsi qu'un combustible produisant une quantité de suies observable pour la stratification optique. De plus, la puissance du feu choisie constitue un bon compromis entre cette production de suies et les niveaux de températures atteints, n'engendrant pas de dégradation des systèmes de mesures. Ce foyer a également permis de simuler les différentes étapes de la modification géométrique du couloir.

Obstruction de la partie fermée du couloir

L'objectif de cette modification était d'observer une stratification homogène de l'environnement dans le couloir. L'obstruction de la partie du couloir fermé a permis de s'affranchir d'une zone de fumée morte. La stratification dans l'autre partie du couloir est plus homogène et n'a pas été altérée par la construction de cette paroi. De plus, l'obstruction de cette partie du couloir va permettre de placer du matériel d'observation pour la visibilité dans la fumée, par exemple une caméra ou des observateurs décrivant le milieu enfumé à différents instants.

Création d'une ouverture d'alimentation en air en partie basse de la pièce

Cette ouverture a été créée pour permettre de limiter les écoulements d'air alimentant le foyer passant par le couloir. Le foyer entraînant l'air dans la géométrie créait un phénomène de contre-courant entre l'air entrant en partie basse et la fumée sortant en partie haute. Ce contre-courant qui mélange les deux zones et perturbe la stratification est diminué grâce à cette ouverture.

Positionnement d'un linteau en extrémité de couloir

Le positionnement du linteau en extrémité de couloir permet un remplissage de fumée en partie haute du couloir. La hauteur de la nappe de fumée est plus homogène et les stratifications optique et thermique sont favorisées.

L'étude numérique préliminaire a permis aussi de mettre en place un dispositif métrologique caractérisant la stratification. D'abord, la stratification thermique est observée par le biais de thermocouples de type K, placés sur différentes sections statégiques et à différentes hauteurs. Ensuite, l'étude de la stratification thermique est complétée par celle de la stratification optique grâce au positionnement d'opacimètres laser. Les positions des points de mesure sont résumées dans les figures III.24 et III.19.

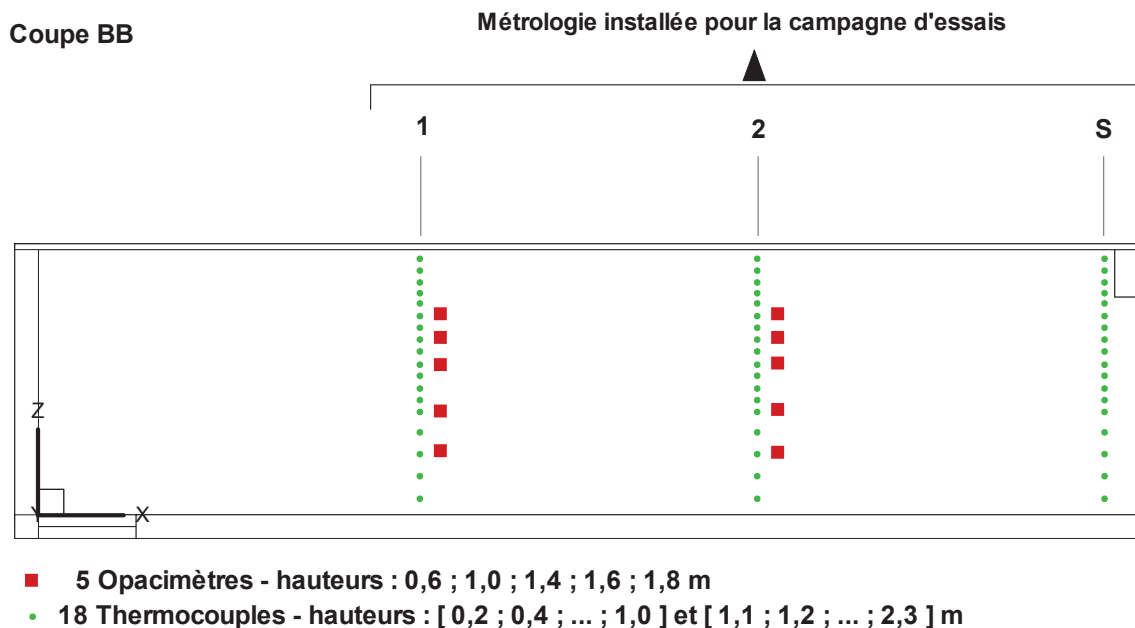


Fig. III.24 — Coupe BB illustrant la position des échelles de thermocouples et les opacimètres dans le couloir

IV

Campagne d'essais expérimentaux

Les simulations numériques ont permis la modification de l'installation pièce-couloir et son instrumentation. Durant le stage, les modifications sur la pièce-couloir ont été faites au fur et à mesure des simulations. Les premiers essais sur la pièce-couloir débouchent de ce travail de simulation numérique et font l'objet de ce chapitre.

La mise en configuration de la pièce-couloir représentait l'objectif principal du stage en vue du commencement de la thèse. Les avancées ont déjà permis de réaliser deux essais et d'effectuer une première comparaison avec FDS. Ces premiers essais ont également permis de tester la configuration expérimentale et les éléments de métrologie.

La première section de ce chapitre est consacrée au rappel de la configuration mise en jeu. La configuration géométrique d'essais, le foyer mis en place ainsi que l'instrumentation y sont rappelés. La seconde section propose les résultats de deux essais de cette configuration à échelle 1. L'évolution de la puissance du feu, les stratifications thermique et optique de l'environnement propres aux essais sont décrites. Dans cette même section, une simulation des essais avec FDS est faite à titre de comparaison. Dans la section suivante, on propose quelques perspectives sur la contribution de l'aspersion par brouillard d'eau sur la destratification. La dernière section conclut ce chapitre et offre des perspectives pour la thèse.

IV.1 Rappel de la configuration pièce-couloir

IV.1.1 Configuration géométrique de la pièce-couloir

La configuration initiale présente au CSTB sur le site de Champs-sur-Marne a évolué au fur et à mesure de l'étude numérique pour favoriser la stratification du milieu enfumé. Ces études numériques ont, outre le fait d'améliorer la configuration, montré l'établissement d'une nappe de fumée ouvrant ainsi l'étude sur la stratification et la préparation de la métrologie. La nouvelle configuration favorisant la stratification de l'environnement enfumé est présentée par la figure IV.1 ci-dessous.

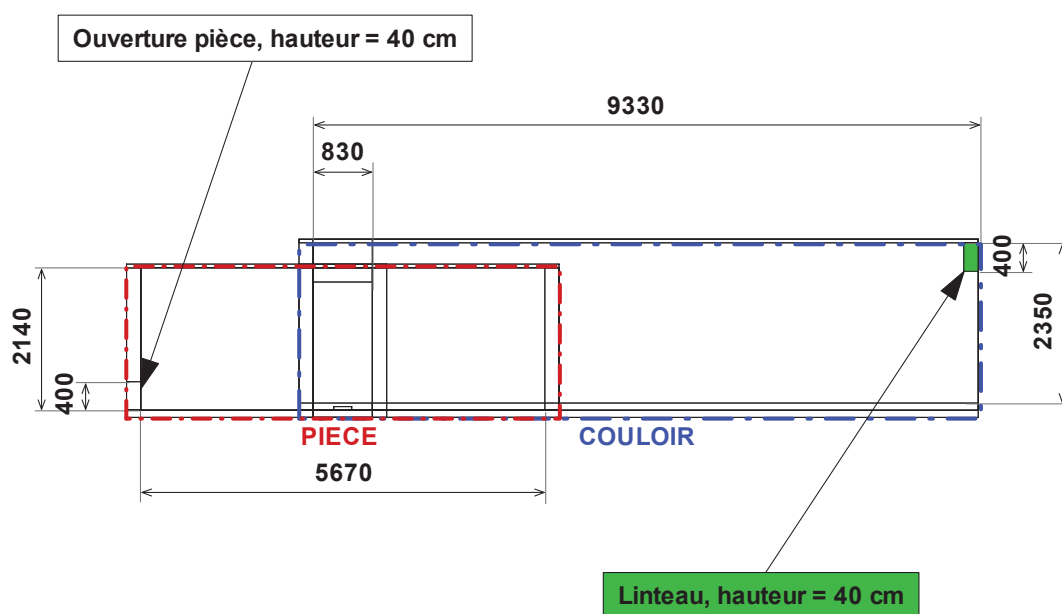


Fig. IV.1 — Configuration de la pièce-couloir après les modifications

La configuration de la pièce-couloir pour les essais est constituée d'une pièce de 12 m². Cette pièce est un container métallique avec un enduit de ciment (IR4020) projeté, d'une épaisseur de 45 mm. Au sol, on a une épaisseur de 100 mm de SIPOREX enduit de ciment (IR4020) sur 70 mm. La pièce donne sur un couloir ouvert à une des extrémités (à droite sur la figure IV.1). Ce couloir est construit avec des briques de SIPOREX de 200 mm d'épaisseur et est enduit d'une projection à base de ciment (IR4020) sur une épaisseur de 70 mm. Une ouverture réglable est faite en partie basse de la pièce, mesurant pour les essais présentés 20 cm de haut sur 90 cm de large. Un linteau placé en sortie de couloir, favorisant la stratification de l'environnement, mesure 40 cm de haut.

IV.1.2 Foyer mis en jeu

Les simulations de la configuration en situation de feu ont mis en jeu un foyer de l'ordre de 150 kW¹ pour de l'heptane. Le bac d'heptane utilisé a les dimensions détaillées dans le tableau IV.1.

1. Puissance théorique compte tenu du type de combustible et de la taille du bac

Dimensions bac	
Longueur	0.447 m
Largeur	0.245 m
Hauteur	0.03 m
D_{eq}	0.373 m

Tab. IV.1 — Tableau récapitulatif de la dimension du bac d’heptane utilisé pour les essais

La référence [2] fournit une estimation de la puissance libérée par le feu à partir du diamètre équivalent² du bac. Pour un bac rectangulaire, le diamètre équivalent est calculé à partir de l’équation IV.1.

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4.L.l}{\pi}} \quad (IV.1)$$

La puissance théorique d’un combustible liquide est proportionnelle à la surface de la nappe de liquide. D’après la référence [2], la puissance du feu est :

$$\dot{q} = \Delta h_c \times \dot{m}_{comb}'' \times A \quad (IV.2)$$

où Δh_c est l’enthalpie de combustion, A la surface du bac et $\dot{m}_{comb}''$ le débit de combustible. L’enthalpie de combustion est référencée dans la littérature pour tout type de combustible.

Le débit de combustible est également donné par la référence [2] :

$$\dot{m}_{comb}'' = \dot{m}_{comb\infty}'' (1 - e^{-k\beta.D_{eq}}) \quad (IV.3)$$

avec $\dot{m}_{comb\infty}''$, $k\beta$ et ΔH donnés par les abaques [2].

Le tableau IV.2 récapitule les résultats des calculs pour la puissance donnée par le bac d’heptane utilisé. La puissance théorique calculée est de 166 kW en régime établi. Cette puissance correspond approximativement à la puissance recherchée et définie dans l’étude numérique préliminaire.

La hauteur du bac conditionne la durée théorique de la combustion. Pour calculer la durée de la combustion, on utilise la relation suivante³ :

$$t_{combustion} = \frac{\rho \times h_{bac}}{\dot{m}_{comb}''} \quad (IV.4)$$

La durée théorique correspondante au bac utilisé est donnée par le tableau IV.3. On voit que la durée prévue de l’essai est de l’ordre de 10 minutes.

2. Le diamètre équivalent du bac est le diamètre d’un bac circulaire correspondant à la même surface d’échange qu’un bac de forme quelconque

3. Cette formule a été déterminée par analyse dimensionnelle : $\frac{[\rho] \times [h_{bac}]}{[\dot{m}_{comb}'']} = \frac{M.L.L^2.T}{M.L^3} = T$

Calcul puissance foyer		
Paramètres	Unités	Valeurs Heptane
$\dot{m}_{comb_{\infty}}''$	kg/(m ² .s)	0.101
$k\beta$	m ⁻¹	1.1
ΔH	MJ/kg	44.6
$\dot{m}_{comb}''$	kg/(m ² .s)	0.03402
Puissance	kW	166.18

Tab. IV.2 — Tableau donnant la puissance du feu pour de l'heptane avec le bac utilisé dans les essais

Calcul de la durée du foyer		
Paramètres	Unités	Valeurs Heptane
ρ	kg/m ³	675
m_{comb}/ρ	m/s	$5.0403.10^{-05}$
Temps	s	595.20
	min	9'55"

Tab. IV.3 — Tableau donnant la durée de la combustion pour de l'heptane avec le bac utilisé dans les essais

IV.1.3 Instrumentation

L'instrumentation de la pièce-couloir permet de caractériser le milieu. Pour les premiers essais, l'évolution de la masse de combustible ainsi que les niveaux de température et de transmittance en fonction de la position et de la hauteur dans le couloir sont mesurés. Pour la masse de combustible, une balance numérique est utilisée. Pour les températures, des thermocouples sont employés et disposés comme sur la figure IV.2. Pour la transmittance, des opacimètres sont mis en place (figure IV.2).

Ces instruments de mesure sont connectés à une centrale d'acquisition, KEITHLEY, permettant d'enregistrer les tensions de mesure en fonction du temps via un programme EXCEL. Les tensions reçues par l'acquisition sont ensuite transformées en température, en transmittance ou en masse suivant la mesure.

Les différents dispositifs sont décrits plus précisément ci-dessous.

Centrale d'acquisition des mesures

La centrale d'acquisition est de marque KEITHLEY. Elle permet de mesurer une différence de potentiel électrique en Volt donnée par les instruments de mesure (balance, thermocouples, opacimètres). L'acquisition se fait grâce à un logiciel fonctionnant à partir d'EXCEL. Ce logiciel d'acquisition, ExceLINK, permet de contrôler la mesure :

- pas de temps d’acquisition (limité par le nombre de voies d’acquisition),
- durée d’acquisition,
- type de données acquises (thermocouple type K, courant continu, tension...),
- précision de mesure,
- ...

Les résultats de l’acquisition sont tabulés par colonne pour les différentes chaînes (voies de mesure) et par ligne pour les temps d’acquisition.

Balance de pesée pour le combustible

Une balance de pesée est placée sous le bac d’heptane. Cette balance enregistre les variations de masse de combustible liées à la consommation du combustible. Cette pesée nous permet de retrouver l’évolution du HRR grâce à l’enthalpie de combustion, comme dans l’équation IV.2 citée plus haut.

La pesée du combustible sera complétée, dans les futurs essais, par un analyseur de gaz de combustion en sortie de couloir pour rendre compte de l’évolution du HRR.

Echelles de thermocouples et d’opacimètres

La stratification de l’environnement est caractérisée par la visibilité dans le milieu enfumé et les niveaux de température.

Pour la visibilité, nous utilisons des opacimètres, placés comme sur la figure IV.2, basés sur l’absorption d’un rayon laser au travers de l’environnement gazeux. Le signal reçu lors de l’essai est rapporté au signal de référence mesuré avant l’essai. L’acquisition reçoit un voltage proportionnel à l’intensité lumineuse reçue au niveau du récepteur.

Pour la température, des thermocouples de type K sont disposés dans le couloir comme le montre la figure IV.2. Le programme d’acquisition recevant une tension transcrit ce voltage en une température (prenant en compte la compensation de soudure froide de la centrale).

La photographie IV.3 a été prise avant les essais. On voit, au centre du couloir les échelles de thermocouples (T_1, T_2 et T_S), sur la paroi droite les émetteurs des opacimètres et sur la paroi gauche les récepteurs des opacimètres.

IV.2 Premiers résultats expérimentaux

IV.2.1 Essais

Les deux essais présentés dans ce travail ont été effectués le même jour, le 20 juillet 2012 à 11h00 pour le premier (essai 1) et à 11h30 pour le second (essai 2).

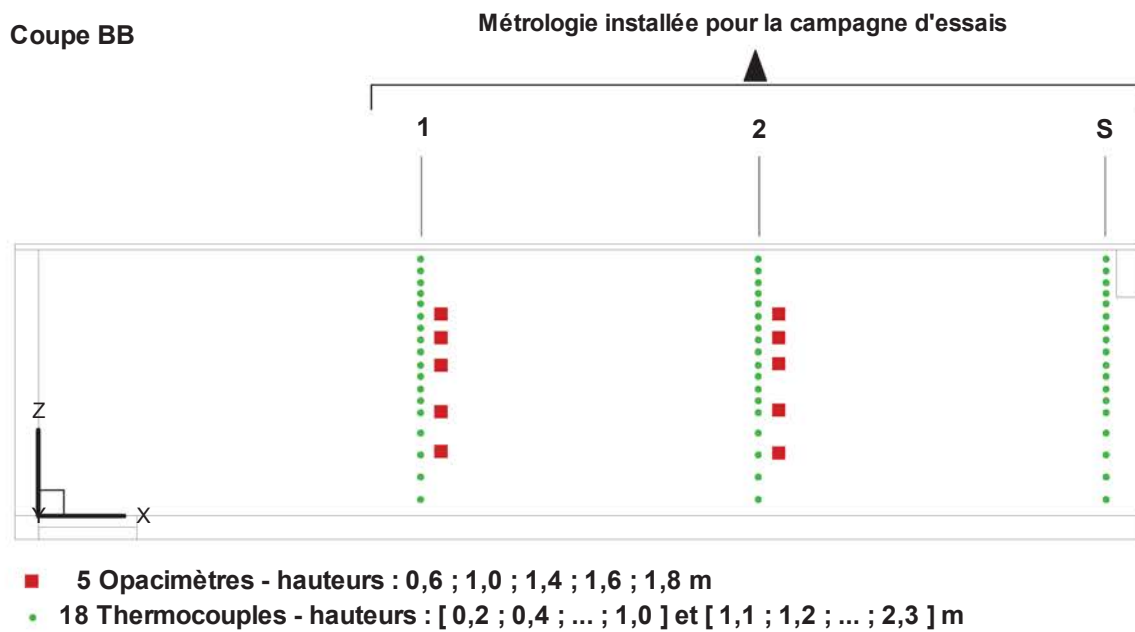


Fig. IV.2 — Position des échelles de thermocouples et d'opacimètres mis en place dans le couloir



Fig. IV.3 — Photographie prise avant les essais dans la pièce-couloir : thermocouples et opacimètres

Conditions météorologiques

Les essais ayant eu lieu le même jour, les conditions extérieures sont identiques et sont regroupées dans le tableau IV.4.

Conditions météorologiques	Température extérieure	Vent	Orientation	Pluie	H (%)	Pression
Ciel couvert	17 °C	10 km/h	Ouest	0 mm	67 %	1017 mb

Tab. IV.4 — Tableau donnant les conditions météorologiques des essais

Evolution du débit de combustible

L'acquisition de la masse de combustible donne un résultat brut en tension. Une règle de trois permet de trouver la masse de combustible à chaque instant en fonction de l'intensité de mesure. Une partie du tableau récapitulatif est donné ci-dessous (tableau IV.5 pour l'essai 1 et tableau IV.6 pour l'essai 2).

Temps acquisition (s)	Tension mesurée (V)	Masse combustible (kg)
0	1,191	2,037
14	1,190	2,023
28	1,189	2,000
41	1,188	1,946
55	1,186	1,886
69	1,184	1,829
83	1,182	1,764
97	1,179	1,682
111	1,176	1,594
124	1,173	1,518
138	1,171	1,447
...	...	...
360	1,123	0,001

Tab. IV.5 — Tableau représentant l'acquisition et l'exploitation de la masse de combustible, essai 1

Les mesures donnent une valeur instantanée de la masse de combustible dans le temps. Un débit de combustible est la dérivée de la masse par rapport au temps :

$$\dot{m}_{comb} = \frac{dm}{dt} \quad (\text{IV.5})$$

On peut approcher cette dérivée par :

$$\dot{m} = \frac{m^{n+1} - m^{n-1}}{2\Delta t} \quad (\text{IV.6})$$

où m^{n+1} et m^{n-1} sont, respectivement, les masses de combustibles au moment $n + 1$ et au moment

Temps acquisition (s)	Tension mesurée (V)	Masse combustible (kg)
0	1,181	1,869
14	1,181	1,857
28	1,179	1,818
42	1,178	1,762
55	1,175	1,686
69	1,173	1,611
83	1,170	1,538
98	1,168	1,473
111	1,165	1,399
125	1,162	1,286
139	1,158	1,191
...	...	...
334	1,119	0,000

Tab. IV.6 — Tableau représentant l'acquisition et l'exploitation de la masse de combustible, essai 2 $n - 1$.

Le débit calculé nous permet de trouver l'évolution du HRR au cours de l'essai. Notons que pour les essais ultérieurs, le pas de temps sera affiné afin d'améliorer la précision de calcul.

Les puissances liées à ces débits sont montrées sur la figure IV.5. L'évolution des puissances pour les deux essais est la même, une phase croissante jusqu'à un palier puis une deuxième phase croissante avant de décroître très rapidement vers zéro.

Le calcul théorique de la puissance du foyer prévoyait une puissance de feu de 166 kW. Or, on remarque que les puissances calculées durant l'essai sont beaucoup plus importantes. Il y a plusieurs critères entrant en compte dans la réalité qui ne sont pas considérés dans le calcul que nous avons fait pour la puissance.

Premièrement, nous faisons une hypothèse de calcul liée à l'enthalpie de combustion. Nous avons considéré ΔH_{comb} constant et ayant pour valeur dans le cas de l'heptane 44,6 MJ/kg. Cette valeur est déterminée par des essais en combustion complète (sans production de monoxyde de carbone) et en régime établi.

Deuxièmement, pendant la combustion, le niveau d'heptane dans le bac diminue en même temps que la température du bac s'élève. La puissance du feu croît jusqu'à atteindre un palier, d'une puissance légèrement supérieure à la valeur calculée. Lorsque la température du bac est élevée les parois rayonnent vers le combustible (heptane). Ce phénomène accélère la vaporisation de l'heptane entraînant une combustion plus rapide et plus puissante. C'est pourquoi on observe une augmentation de la

puissance après le palier jusqu'à un pic. Après ce pic, l'heptane est presque entièrement consommé et le feu s'éteint jusqu'à atteindre une puissance de combustion nulle.

Ces essais préliminaires mériteront confirmation. En particulier la corrélation IV.2 ne fait intervenir que la section du bac alors qu'on voit à partir des essais que l'épaisseur du liquide (et donc la quantité de combustible) intervient également.

La photographie IV.4 ci-dessous montre le foyer durant l'essai de 11h. On observe l'inclinaison de la flamme du fait de la circulation de l'air du couloir vers la pièce.



Fig. IV.4 — Photographie de la pièce lors d'un essai feu : heptane en feu

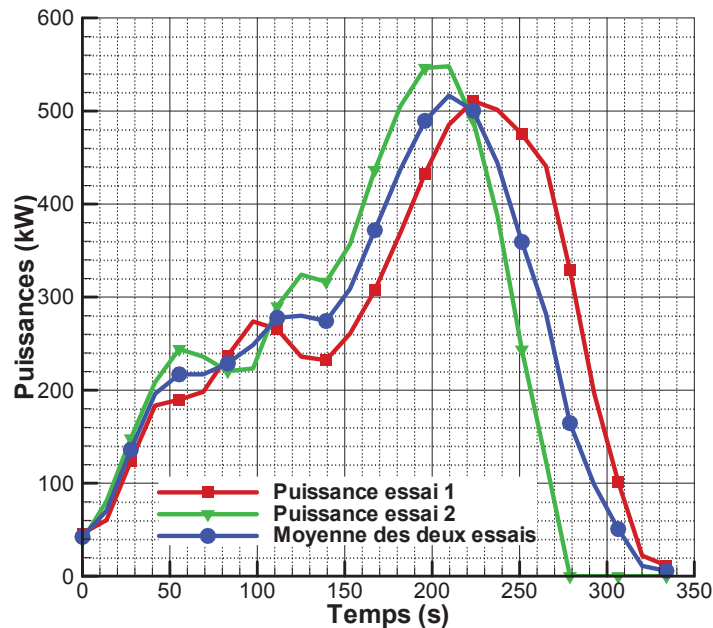


Fig. IV.5 — Evolution du HRR en fonction du temps durant l'essai

Les deux essais sont très proches et il est possible de faire la moyenne des puissances afin de pouvoir le simuler avec FDS. Cette simulation sera détaillée dans la sous-section suivante.

Stratification thermique

Les thermocouples mis en place dans le couloir permettent de construire les profils de température au centre du couloir en fonction de la hauteur pour différentes positions. Pour tracer les profils de température, la température est moyennée entre les instants 50 s et 250 s pour chaque hauteur de mesure. La stratification thermique dans le couloir est marquée par le point d'inflexion sur chaque profil. Les deux essais sont proches thermiquement et témoignent d'une bonne répétabilité des essais comme le montre la figure IV.6.

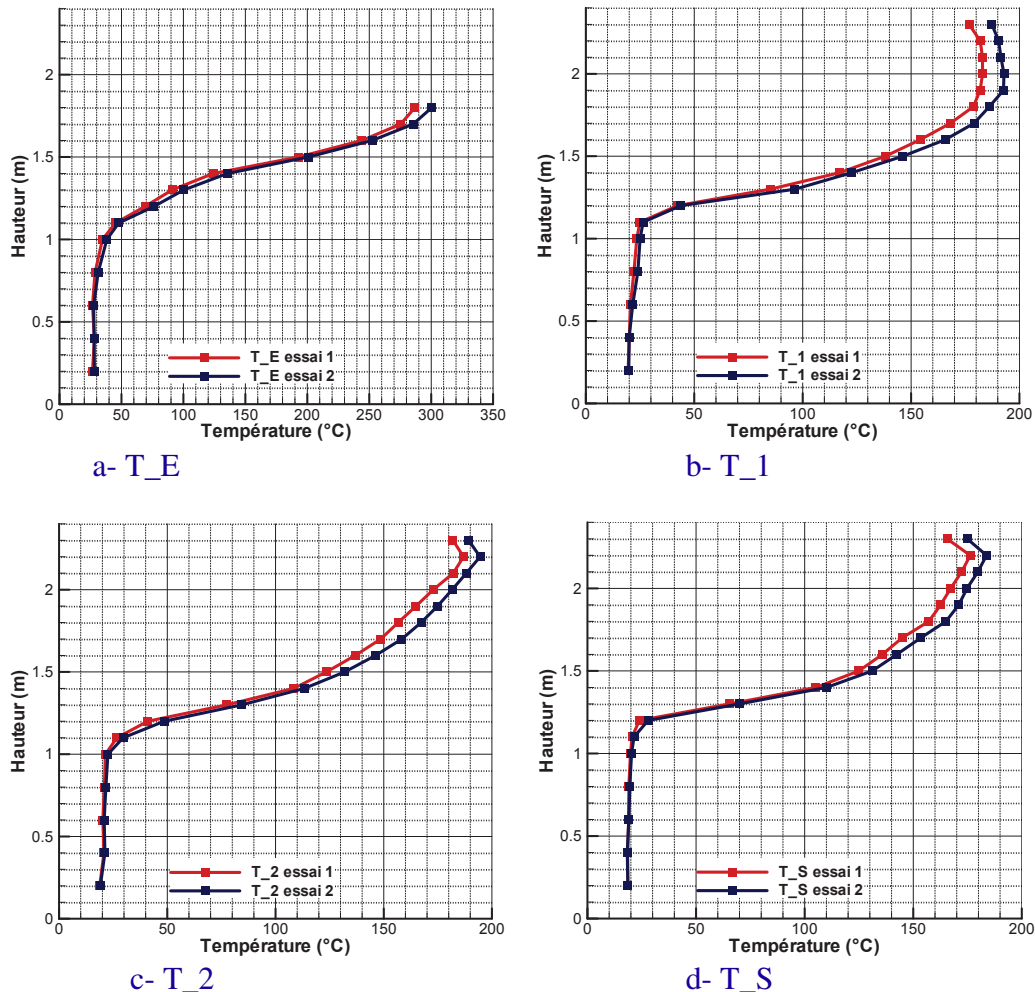


Fig. IV.6 — Comparaison des profils de température pour les deux essais à chaque positions

Stratification optique

La stratification optique est caractérisée par la transmittance d'un rayonnement au travers de la fumée. Durant ces essais, des problèmes liés à l'intensité du courant d'alimentation des émetteurs ont endommagés les diodes laser. Malgré les difficultés concernant ces appareils, ces essais ont tout de même permis d'éprouver le système de mesure par opacimètres. Des réglages ont été testés et les futurs essais bénéficieront du retour de ces premiers tests, ce qui permettra d'obtenir des mesures fiables en termes d'opacimétrie du milieu. Seules quatre mesures peuvent être exploitées. Pour les

raisons évoquées, ces mesures doivent être analysées avec précaution. Elles sont tout de même fournies même si elle ne permettent pas d'étudier le phénomène de stratification optique.

Pour exprimer la transmittance, on fait le rapport entre l'intensité du signal reçu à un instant donné et l'intensité du signal reçu avant l'essai. Ainsi, on obtient une valeur comprise entre 0 et 1. Le calcul de la transmittance est donnée par :

$$\tau = \frac{I}{I_0} \quad (\text{IV.7})$$

où I_0 est l'intensité du signal en l'absence de gaz de combustion.

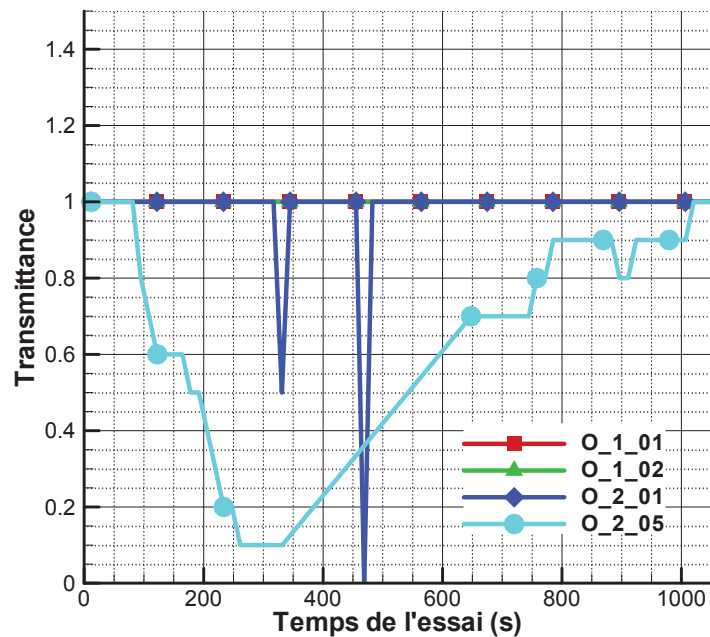


Fig. IV.7 — Evolution de la transmittance en fonction du temps durant l'essai 1

Les opacimètres ayant fonctionnés correctement sont les suivants :

- Op_1_01 situé sur la section 1 à 3 m du mur d'obstruction, à 60 cm du sol,
- Op_1_02 situé sur la section 1 à 3 m du mur d'obstruction, à 100 cm du sol,
- Op_2_01 situé sur la section 1 à 6 m du mur d'obstruction, à 60 cm du sol,
- Op_2_05 situé sur la section 1 à 6 m du mur d'obstruction, à 180 cm du sol.

La partie sous 1 m (cf figure IV.7) est totalement transparente. La transmittance est constante⁴ et égale à 1.

A 1,80 m, la transmittance décroît au passage de la fumée pour atteindre une valeur de 0,1 à 300 secondes du début de l'essai (cf figure IV.7).

4. Les pics descendants pour la section 2 à 60 cm du sol sont le résultats d'un faux contact au niveau des fiches de branchement de la centrale d'acquisition.

La stratification optique est visible qualitativement sur la photographie IV.8 prise lors d'un essai feu dans la pièce. On constate que la fumée est en partie haute alors que l'air frais est en partie basse.



Fig. IV.8 — Photographie prise lors d'un essai au CSTB dans le couloir : stratification de l'environnement enfumé

Les profils de température ainsi que la photographie IV.8 permettent de mettre en relation la hauteur de stratification thermique et la hauteur de la couche de fumée. En effet, les profils de température, figure IV.6 montrent une hauteur libre de fumée comprise entre 1,10 m et 1,30 m sur la longueur du couloir et la photographie IV.8 permet d'estimer qualitativement la hauteur de fumée à 1,20 m. Sur cette photographie, on voit la limite inférieure de la fumée située entre les opacimètres Op_2_02 (disposé à 1.00 m du sol) et Op_2_03 (disposé à 1.40 m du sol).

Il existe donc bien une corrélation entre la hauteur de stratification thermique et la hauteur de stratification optique, comme attendu intuitivement et confirmé suite à nos résultats de simulation. Les simulations et essais futurs permettront d'étudier plus finement ces notions de stratification thermique et optique, puis d'établir un critère de stratification corrélant les deux aspects. Un des enjeux sera d'analyser l'influence de l'aspersion dont les conséquences peuvent être différentes sur les critères optiques et thermiques.

IV.2.2 Simulation des essais

Pour compléter l'étude de la configuration pièce-couloir, une simulation numérique est lancée en prenant en compte l'évolution réelle du HRR calculée grâce aux essais.

Données d'entrée

Les deux essais ont permis de déterminer l'évolution réelle du HRR en fonction du temps. On a pu voir qu'il était différent de ce que nous avons calculé théoriquement. Les simulations permettent de mettre en relation la simulation avec le cas réel. L'évolution du HRR programmée dans FDS est donnée par la figure IV.9. Cette évolution est calée sur la moyenne des deux essais.

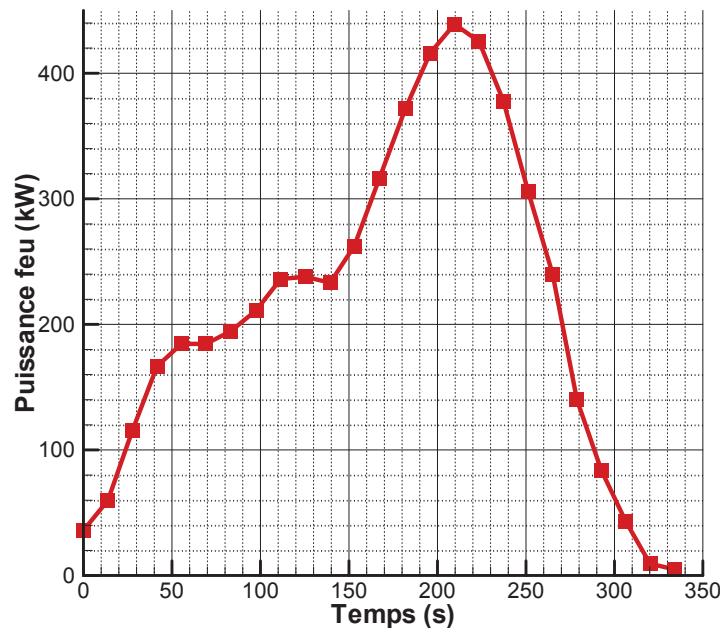


Fig. IV.9 — Evolution du HRR simulé dans FDS

Comparaison

De manière générale, la concordance entre les résultats numériques et expérimentaux en termes de température est plutôt satisfaisante. Les évolutions suivant la hauteur dans le couloir sont similaires. On note toutefois quelques différences.

Au niveau de l'ouverture (profils T_E), les profils de température sont similaires (cf figure IV.10). Cependant, la hauteur libre de fumée dans le cas des essais est d'environ 1,10 m alors que dans le cas de la simulation, la hauteur est moins haute et est de 0,90 m.

Dans le couloir, les profils calculés par FDS montrent une stratification moins importante de la fumée que dans le cas réel. La différence est probablement due aux approximations lors de la moyenne entre les deux essais. En effet, il est peut être judicieux de comparer chaque essai à une

simulation correspondante plutôt que de moyenner deux essais.

De plus, l'évolution du HRR pendant un essai feu est particulièrement délicate et peut s'avérer approximative. C'est cette donnée d'entrée qui conditionne principalement la hauteur de stratification obtenue. Disposer d'une mesure par consommation d'oxygène permettra d'avoir deux dispositifs de mesure pour le calcul du HRR. Cela devrait permettre d'affiner la mesure.

L'amélioration de la fréquence d'acquisition pour affiner la mesure sera faite pour les futurs essais réalisés.

De même, une évaluation des incertitudes expérimentales et une analyse de sensibilité numérique permettront de mieux encadrer les résultats et d'affiner les comparaisons.

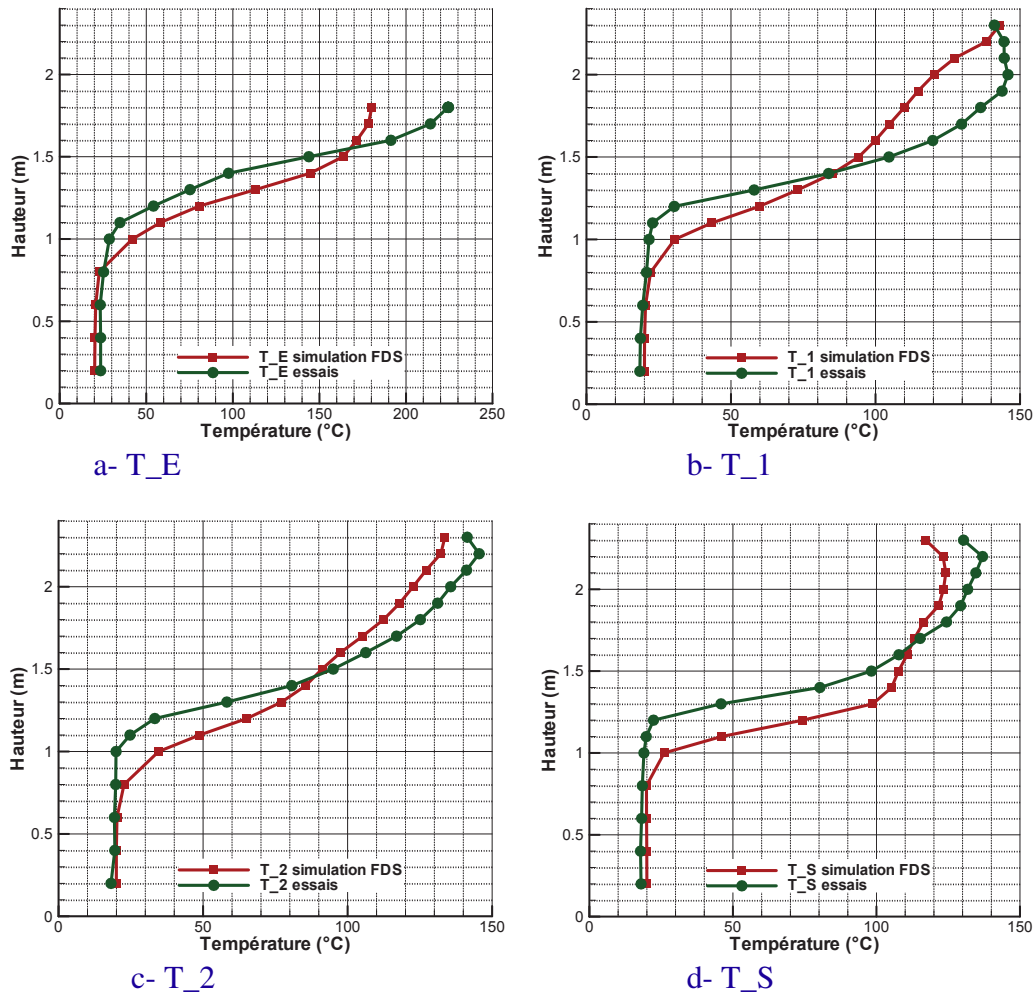


Fig. IV.10 — Comparaison des profils de température entre la moyenne des deux essais et la simulation

IV.3 Perspectives

La stratification est essentielle dans la stratégie d'évacuation d'un bâtiment en situation de feu. La ventilation contribue à cette stratification. Cependant, de plus en plus d'établissements recevant du public installent des systèmes d'aspersion dans les circulations.

Durant la thèse, des essais d'aspersion par brouillard d'eau et sprinkler sur fumée vont être effectués. Pour préparer ces études, des simulations d'aspersion sont faites dans cette section. Il s'agit d'ouvrir des perspectives afin de préparer les essais futurs.

Une pulvérisation de gouttes polydisperse est testée, de diamètre de Sauter égale à $100\text{ }\mu\text{m}$. La pression de fonctionnement est de 90 b et le débit d'alimentation 16,2 L/min. La température de pulvérisation des gouttes est de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ce sont des dimensions caractéristiques de la pulvérisation d'eau par brouillard installée dans le couloir. Ces données avaient également fait l'objet d'une étude par BLANCHARD [3] dans sa thèse.

Deux positions de buse sont testées. Une à 3 m du mur d'obstruction et l'autre à 6 m de ce mur. Ce sont deux positions choisies arbitrairement pour effectuer des tests. L'aspersion est déclenchée au bout de 100 s dans les deux cas, le régime de la combustion étant établi. La stratification est établie avant pulvérisation, pour les deux simulations, comme le montre la figure IV.11 pour la stratification thermique et la figure IV.12 pour la stratification optique (caractérisée ici d'après la concentration en suies, directement responsable de la perte de visibilité).

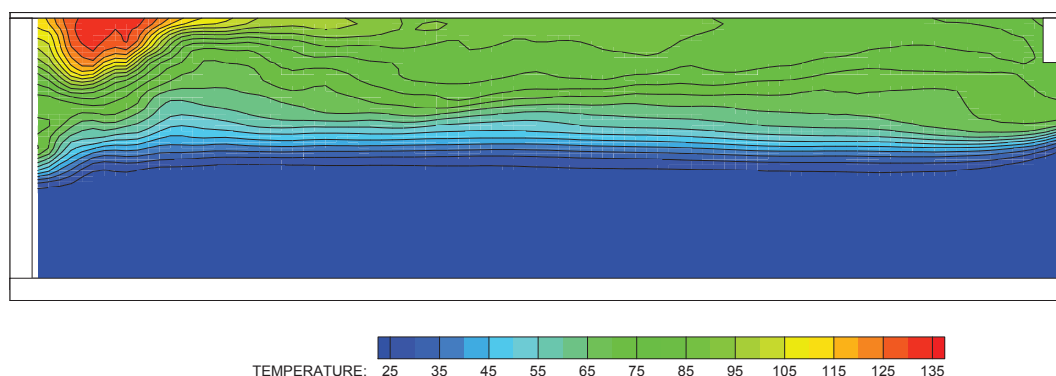


Fig. IV.11 — Coupe longitudinale représentant les niveaux de température dans le couloir en régime établi avant aspersion, $Y=0,00\text{ m}$

L'aspersion déclenchée à partir de 100 s est maintenue durant 300 s, jusqu'à 400 s de simulation. Durant l'aspersion, la stratification thermique est altérée au droit de la pulvérisation pour les deux positions (cf figure IV.13). Cependant, la stratification thermique en amont et en aval de l'aspersion est conservée durant l'aspersion. Bien que la stratification thermique de l'environnement soit conservée, les gradients de température sont moins importants. Cela est visible sur la représentation des profils de température, figure IV.14, où on observe un environnement stratifié thermiquement à

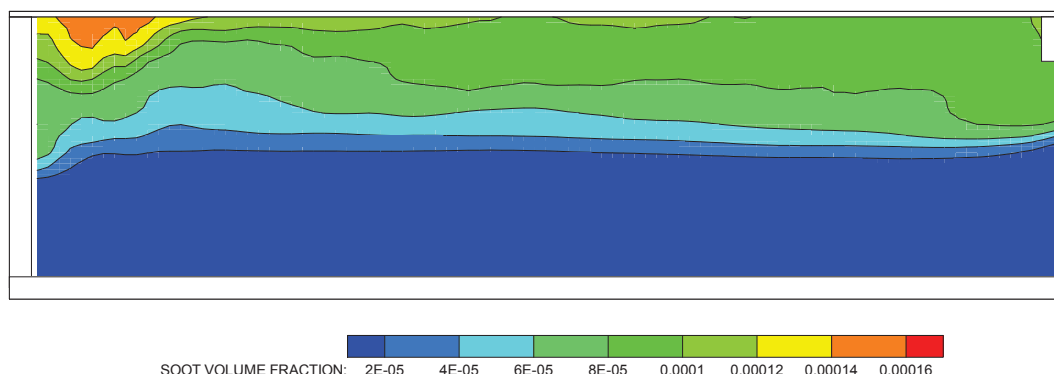


Fig. IV.12 — Coupe longitudinale représentant les concentrations en suies dans le couloir en régime établi avant aspersion, $Y=0,00$ m

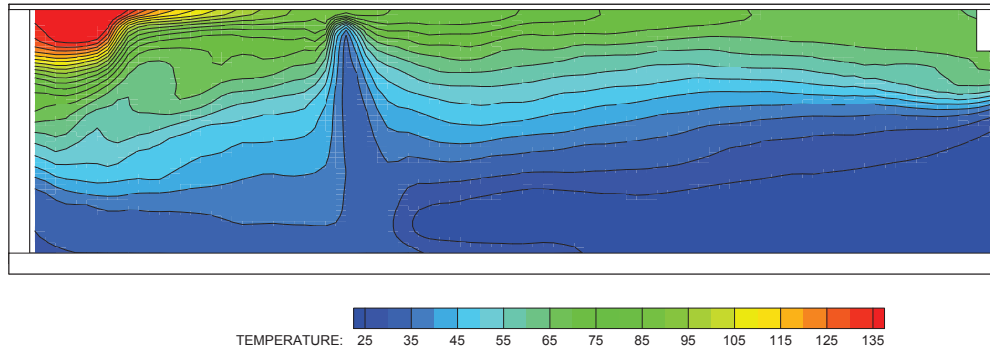
T_E (amont de l'aspersion) et T_S (aval de l'aspersion). Sous les buses, durant l'aspersion, la température est constante et égale dans les deux pulvérisations, à environ 27°C . L'eau injectée refroidit l'environnement.

Le constat fait sur la stratification thermique pendant l'aspersion est différent lorsque l'on regarde la concentration en suies. En effet, l'aspersion destratifie le milieu optique au droit de la buse mais également en amont de l'écoulement de la fumée dans le couloir (cf figure IV.15). En aval de l'aspersion, l'écoulement tend à se restratifier. L'aspersion joue le rôle d'une barrière pour la fumée, obstruant son écoulement, de ce fait, la fumée s'accumule avant le spray.

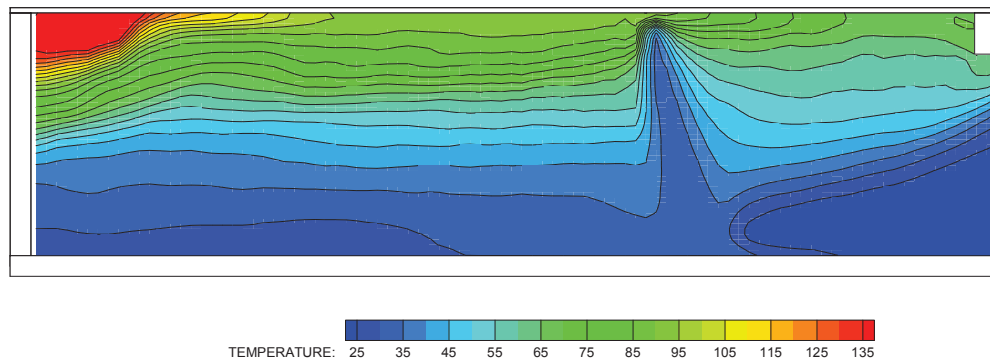
L'eau pulvérisée entraîne la nappe de fumée en lui transmettant une quantité de mouvement et en la refroidissant. En outre, on observe une conservation de la stratification thermique en amont de la pulvérisation alors que le champ des concentrations en suies, représentatif de la fumée et du milieu optique, est destratifié. Cela s'explique par le fait que le brouillard d'eau emporte de la matière (essentiellement des gaz de combustion) en tombant vers le sol et cette matière gazeuse se refroidit en échangeant de l'énergie avec l'eau, conservant le gradient thermique. Ainsi cette quantité de suies (représentatif de la fumée) descendante a peu d'effet sur la stratification thermique mais est visible dans le champ de concentration.

L'aspersion est arrêtée au bout de 400 s de simulation. La simulation dure 1500 s au total, et cet arrêt de l'aspersion contribue à la restratification du milieu enfumé. On peut le voir sur les figures IV.16 et IV.17 représentant respectivement les niveaux de température et les concentrations en suies dans une coupe longitudinale du couloir mettant en évidence la stratification thermique et optique.

Cette étude sur l'aspersion (sans interaction avec le foyer) offre de multiples possibilités d'essais pour l'avenir. Actuellement, un système d'aspersion par brouillard d'eau est installé dans la pièce-couloir. Les buses sont disposées tous les 50 cm d'un bout à l'autre du couloir et offrent la possibilité d'être actionnées simultanément par deux. Les simulations effectuées sur FDS pourront ainsi être complétées par des études expérimentales.



a- Aspersion à 3 m



b- Aspersion à 6 m

Fig. IV.13 — Coupe longitudinale représentant les niveaux de température dans le couloir en régime établi pendant l'aspersion, $Y=0,00$ m

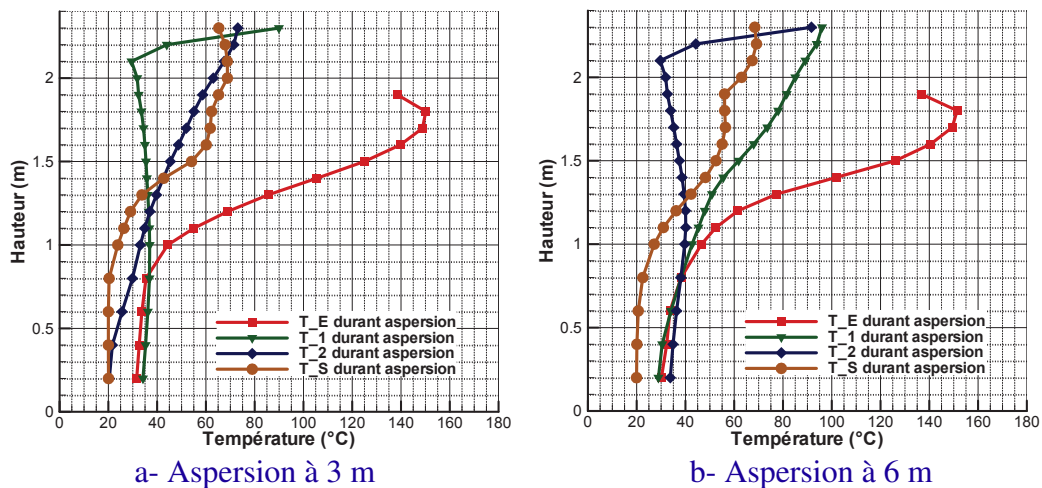


Fig. IV.14 — Représentation des profils de température pendant aspersion

IV.4 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis de tester la pièce-couloir dans des conditions de feu. Les échelles de thermocouples, la balance de pesée du foyer et les photographies ont permis de caractériser le milieu thermique, la combustion et la stratification de la fumée. Les modifications apportées à la configuration pièce-couloir ont permis l'observation d'une nappe de fumée d'épaisseur homogène dans tout

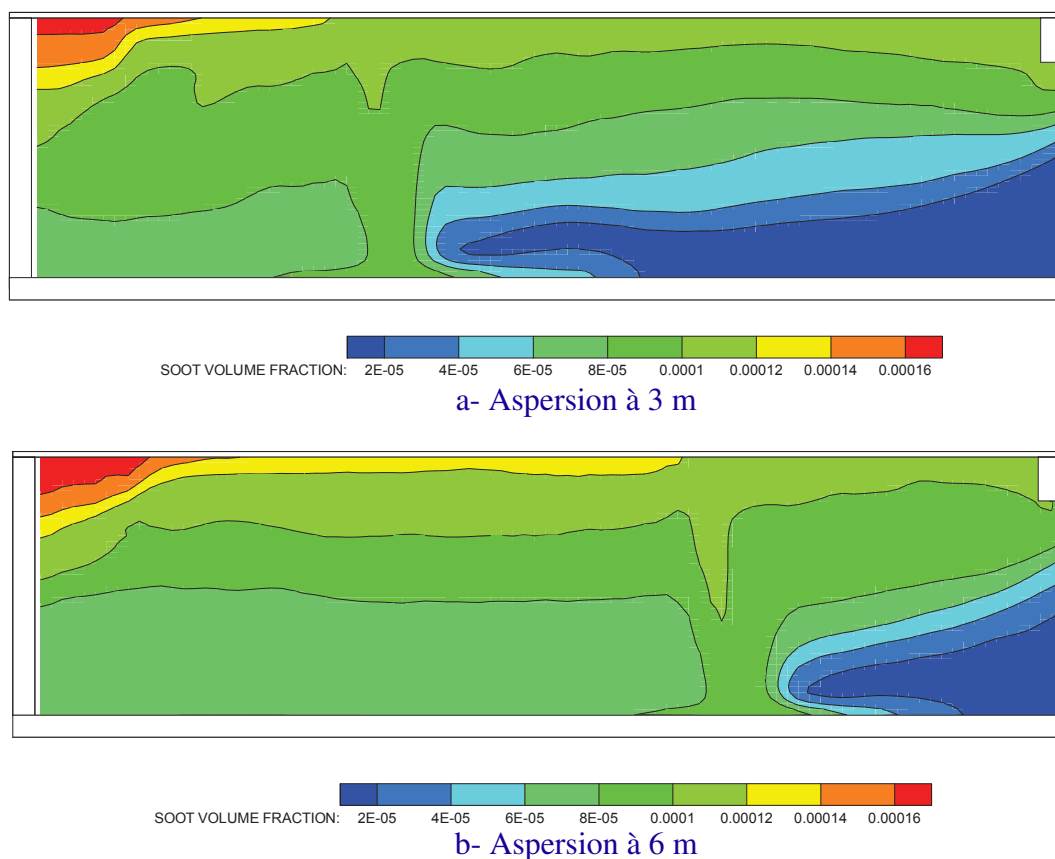


Fig. IV.15 — Coupe longitudinale représentant les concentrations en suies dans le couloir en régime établi pendant l'aspersion, $Y=0,00$ m

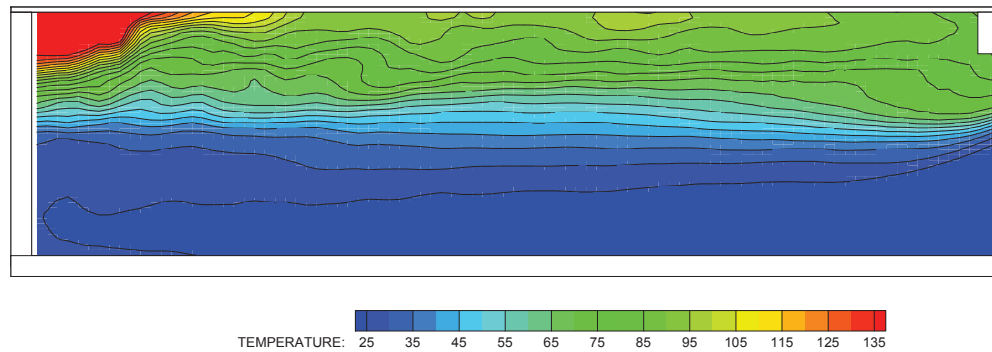
le couloir en minimisant au maximum les interactions entre l'air frais en partie basse et la fumée en partie haute.

Les simulations permettent de tester la configuration numériquement avant de modifier l'installation, ce qui constitue un gain de temps. De plus, des comparaisons peuvent être faites entre les simulations et les essais. Par la suite, une étude sur la sensibilité numérique (pas de temps, taille de maille, taille du domaine de calcul, évolution de la puissance du foyer...) et sur les incertitudes de mesures (liées aux thermocouples, aux opacimètres, à la centrale d'acquisition, ...) permettront de donner des intervalles de confiance aux résultats. Actuellement, les simulations numériques mises en jeu dans ce rapport débouchent d'une étude de sensibilité faite préalablement par BLANCHARD [3].

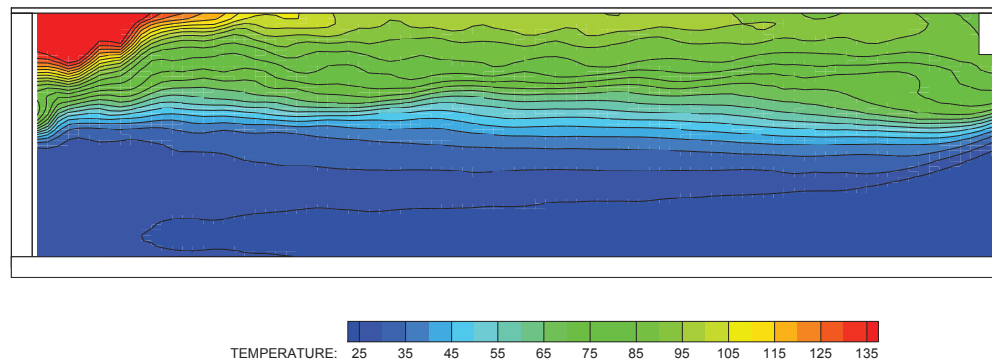
Les échelles de thermocouples sont prévues pour pouvoir être déplacées et offrent ainsi la possibilité de caractériser l'ensemble de l'environnement enfumé dans le couloir. Il est également prévu de faire de même avec les opacimètres.

Les perspectives d'essais offertes par la configuration sont importantes et des études numériques variées sont en cours pour définir de nouveaux protocoles d'essais :

- différents type de foyer,



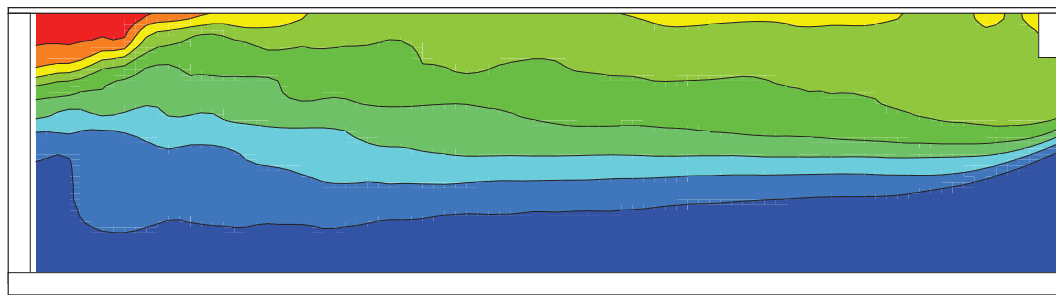
a- Aspersión à 3 m



b- Aspersión à 6 m

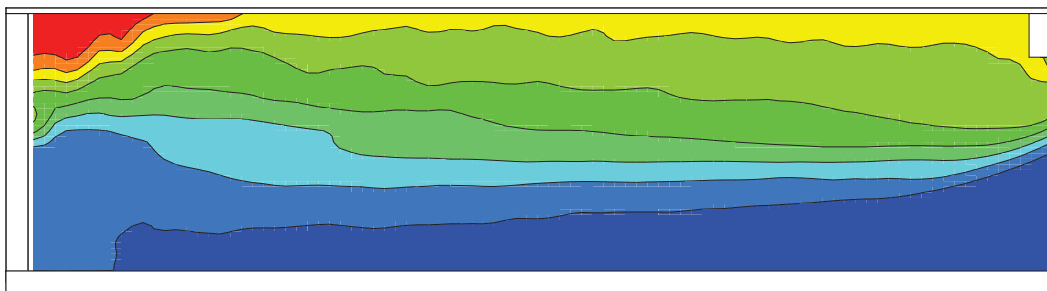
Fig. IV.16 — Coupe longitudinale représentant les niveaux de température dans le couloir en régime établi après l'aspersión, $Y=0,00$ m

- ventilation mécanique,
- aspersión,
- positions variables de l'instrumentation,
- ...



SOOT VOLUME FRACTION: 2E-05 4E-05 6E-05 8E-05 0.0001 0.00012 0.00014 0.00016

a- Aspersión à 3 m



SOOT VOLUME FRACTION: 2E-05 4E-05 6E-05 8E-05 0.0001 0.00012 0.00014 0.00016

b- Aspersión à 6 m

Fig. IV.17 — Coupe longitudinale représentant les concentrations en suies dans le couloir en régime établi après l'aspersión, $Y=0,00$ m

Conclusion générale et perspectives

Ce travail de recherche est consacré à l'étude des phénomènes de stratifications « thermique et optique » en situation de feu confiné. L'objectif de ce stage est de comprendre et caractériser l'environnement enfumé, sans présence de flamme, d'un point de vue thermique et optique. La compréhension et la caractérisation du milieu enfumé constituent un enjeu majeur dans la sécurité incendie en bâtiment (ERP, IGH) et dans l'auto-évacuation des occupants.

Pour l'étude de ces phénomènes, le CSTB dispose d'une installation à échelle 1, représentant une pièce donnant sur un couloir. Cette installation permet de tester le comportement de la fumée dans un milieu confiné en situation de feu. Il permet également de tester une pulvérisation d'eau par brouillard ou sprinkler dans le couloir enfumé.

L'étude des phénomènes de stratification thermique et optique repose d'abord sur l'utilisation d'un outil numérique. Le code CFD, FDS, a permis de simuler des situations de feu dans la configuration pièce-couloir. Ces simulations ont permis de mettre en évidence la stratification de l'environnement pour des feux d'heptane et l'importance d'un critère de stratification pour la sécurité des occupants et du personnel de secours. De plus, les simulations ont permis la modification de la configuration, favorisant ainsi l'observation des gradients de température et de concentration en suies dans le couloir. Une partie du couloir a été fermée afin d'observer une nappe de fumée uniforme dans la partie du couloir ouverte à l'extérieur. L'accumulation de fumée qui se faisait dans la partie obstruée a ainsi été éliminée, favorisant l'écoulement de la fumée à la sortie de la pièce. Une ouverture de la pièce vers l'extérieur en partie basse a permis de limiter les mouvements en contre-courant dans le couloir entre l'air frais en partie basse (alimentant le foyer) et la fumée sous plafond (quittant le couloir). En extrémité de couloir, un linteau a été placé en partie haute, retenant la fumée et créant une nappe homogène de fumée dans le couloir.

Les simulations numériques ont également permis de définir à la disposition de la métrologie dans le couloir. Les thermocouples et les opacimètres ont été disposés dans le couloir de manière à caractériser la stratification optique et thermique de l'environnement enfumé.

Suite aux simulations numériques et aux modifications de la pièce-couloir, deux protocoles d'essais ont été définis durant ce stage. Les tests de feu effectués dans la pièce-couloir ont mis en évidence

l'effet de stratification de la fumée comme le prévoyaient les simulations. Les essais à échelle 1 ont été concluant du point de vue thermique. Grâce aux modifications apportées à la pièce-couloir et au dimensionnement d'un foyer adapté, il est possible d'étudier en taille réelle la notion de stratification d'un milieu enfumé.

Ce stage s'inscrit dans un projet plus large mené au CSTB (Champs-sur-Marne) en collaboration avec le LEMTA (Nancy) dont l'objectif est de **comprendre et de caractériser les stratifications « thermique et optique » d'un environnement enfumé en milieu confiné pouvant comprendre des gouttes en suspension**. Le principal enjeu de ce projet est de préciser l'estimation de la visibilité dans un environnement enfumé pouvant comprendre des gouttes d'eau en suspension. Une application pratique de ce projet sera de revoir les corrélations usuelles où la visibilité est basée sur l'inverse du coefficient d'extinction, corrélations établies en milieu ne contenant que de la fumée, purement absorbant (alors que les gouttes mélangées aux fumées produisent un milieu absorbant-diffusant). Pour revoir les corrélations sur la visibilité, le CSTB pourra compter sur une installation à échelle 1 offrant de nombreuses possibilités de scénarios.

Perspectives

Il conviendra d'étudier la notion de visibilité tant avec que sans aspersion. Il s'agira de comprendre l'influence de la présence de gouttes d'eau et de l'augmentation de la concentration en suies dans l'environnement gazeux sur l'opacité de la fumée. Cette étude pourrait permettre d'envisager un couplage entre les systèmes de désenfumage et d'aspersion dans la lutte contre l'incendie.

On peut imaginer par la suite plusieurs scénarios d'essais. On peut définir un ou plusieurs types de foyers adaptés à différentes problématiques comme un foyer bois, un foyer liquide plus puissant, plusieurs types de bûchers simulant deux ou trois meubles dans la pièce... Pour l'aspersion et son impact sur la visibilité, on peut également définir de multiples scénarios :

- une aspersion seule sans fumée pour caractériser la visibilité au travers d'un rideau d'eau,
- des essais avec des aspersions par brouillard d'eau et par sprinkler,
- des pulvérisations de gouttes de tailles différentes pour étudier l'effet d'une aspersion dans un environnement enfumé,
- deux pulvérisations simultanées et identiques à deux endroits différents dans le couloir,
- des pulvérisations intermittentes pour observer une éventuelle restratification de la fumée,
- ...

La thèse pourra permettre également le développement des modèles de simulations pour les codes à zones (CFAST, CIFI) et pour les codes à champs (FDS).

L'amélioration des codes à zones permettra de rendre des résultats plus rapidement que les codes à champs. Elle permettra également de faire beaucoup d'étude de sensibilité rapidement sur plusieurs

paramètres influents. On peut aussi envisager d'implémenter le facteur aspersion dans des codes à champs.

L'implémentation d'un modèle de rayonnement type Monte Carlo dans le code FDS permettra de tenir compte, dans la visibilité, du caractère absorbant et diffusant, dû à la présence d'eau dans le gaz, dans le milieu enfumé.

Bibliographie

- [1] P. ACHIM. *Simulation de collisions, coalescence et rupture de gouttes par une approche lagrangienne : application aux moteurs à propergol solide*. Thèse de doctorat, Université de Rouen, Rouen, France, 1999.
- [2] V. BABRAUSKAS. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. National Fire Protection Association, Quincy, Third edition, pages 3–1–3–37, 2002.
- [3] E. BLANCHARD. *Modélisation de l'interaction entre brouillard d'eau et feu en tunnel*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, France, 2011.
- [4] A. COLLIN. *Transferts de chaleur couplés rayonnement-conduction-convection. Application à des rideaux d'eau soumis à une intense source radiative*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, France, 2006.
- [5] L. Y. COOPER. The interaction of an isolated sprinkler spray and a two-layer compartment fire environment – phenomena and model simulations. *Fire Safety Journal*, 25 : 89–107, 1995.
- [6] A. COPPALLE. Fire protection : fire curtains. *Fire Safety Journal*, 20 : 241–255, 1993.
- [7] M. CURTAT. *Traité de physique du bâtiment - Physique du feu pour l'ingénieur*, volume 3. CSTB, Marne-la-Vallée, France, 2001.
- [8] D. DE LA SÉCURITÉ CIVILE (ÉDITION 2011). Les statistiques des services d'incendie et de secours. [http : //www.infosdis.fr/Docs/Statistiques2010l](http://www.infosdis.fr/Docs/Statistiques2010l), 2011.
- [9] W. GROSSHANDLER. Radiative heat transfer in nonhomogeneous gases : A simplified approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 23(11) : 1447–1459, Novembre 1980.
- [10] S. LECHÊNE. *Étude expérimentale et numérique des rideaux d'eau pour la protection contre le rayonnement thermique*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, France, 2010.
- [11] K. Y. LI, L. H. HU, R. HUO, Y. Z. LI, Z. B. CHEN, S. C. LI, X. Q. SUN. A mathematical model on interaction of smoke layer with sprinkler spray. *Fire Safety Journal*, 44 : 96–105, 2009.
- [12] K. MCGRATTAN, R. MCDERMOTT, S. HOSTIKKA, J. FLOYD. Fire Dynamics Simulator, User's Guide. NIST Special Publication 1019-5, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, Octobre 2010.
- [13] K. B. MCGRATTAN, S. HOSTIKKA, J. E. FLOYD, H. BAUM, R. REHM, W. E. MELL, R. MCDERMOTT. Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 1 : Mathematical Model. NIST Special Publication 1018-5, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD, États-Unis, Janvier 2011.

- [14] R. D. PEACOCK, W. W. JONES, P. A. RENEKE, G. P. FORNEY. Consolidated Model of Fire Growth Smoke Transport (Version 6), User's Guide. NIST Special Publication 1041, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, December 2008.
- [15] R. SIEGEL, J. HOWELL. *Thermal Radiation Heat Transfer*. Taylor and Francis, Fourth edition edition, 2002.
- [16] V. P. SOLOVJOV, B. W. WEBB. An efficient method for modeling radiative transfer in multi-component gas mixtures with soot. *Journal of Heat Transfer*, 123(3) : 450–457, June 2001.

Présentation des lieux d'accueil du stage

La première annexe décrit très rapidement les laboratoires de recherche accueillant le stage. Le stage a débuté par une période de 2 mois au LEMTA et s'est fini au CSTB durant les 4 derniers mois. Les deux premiers mois ont essentiellement servi au travail bibliographique sur la combustion, le feu, l'aspersion et les codes de calcul (FDS, CFAST). Pour la mise en place de l'installation et la définition du protocole d'essai, le stage s'est déroulé au CSTB. Cette période m'a permis de cotoyer le monde de l'entreprise et de me confronter à la mise en place de la métrologie pour la campagne d'essais dans la configuration pièce/couloir.

Laboratoire d'Energétique et Mécanique Théorique et Appliquée - LEMTA

LEMTA est un acronyme pour Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée qui se situe à Nancy. Ce laboratoire de recherche est une unité mixte entre le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) et l'Université de Lorraine et concentre ses recherches autour de la Mécanique et de l'Energie. Il compte parmi les 5 laboratoires de la Fédération Jacques Villers pour la Mécanique, l'Energie et les procédés. On distingue 3 groupes de travail au sein du LEMTA :

- Milieux fluides, réactifs, multiphasiques ;
- Mécanique des matériaux et structures ;
- Energie et Transferts.

Le laboratoire développe ses recherches autour de trois domaines d'excellence : la métrologie dans les milieux complexes, la modélisation multi-physiques multi-échelles et les milieux multiphasiques. Il compte dans ses rangs pas moins de 75 chercheurs et enseignants-chercheurs, autant de doctorants et post-doctorants, 23 personnels administratifs et techniques. Le LEMTA est également ouvert sur le plan national et international et est impliqué dans différentes coopérations.

Centre Scientifique et Techniques du Bâtiment - CSTB

Dans le cadre de recherche concernant la sécurité incendie, une coopération se fait avec le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) et plus particulièrement, avec le Département sur la Sécurité, Structure et Feu (Département SSF). Le CSTB est un établissement public français à caractère industriel et commercial créé en 1947. Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

[7] exerce quatre activités clés - recherche, expertise évaluation, diffusion de connaissances- qui lui permettent de répondre aux objectifs du développement durable pour les produits de construction, les bâtiments et leur intégration dans les quartiers et les villes. Il dispose de cinq implantations : Champs-sur-Marne (77), Paris (75), Grenoble (38), Nantes (44) et Sophia-Antipolis (06). Le CSTB compte un effectif total de 885 personnes (chiffres au 31 décembre 2010) répartis sur 8 départements :

- Energie, Santé, Environnement ;
- Sécurité, Structure, Feu ;
- Enveloppe et Revêtements ;
- Hydraulique et Equipements sanitaires ;
- Acoustique et Eclairage,
- Climatologie, Aérodynamique, Pollution, Epuration ;
- Economie et Sciences Humaines,
- Technologie de l'information et Diffusion du savoir.

Le département Sécurité, Structure, Feu (DSSF) réalise des études de haut niveau en utilisant les capacités d'expertise de l'équipe, notamment dans le domaine de l'ingénierie de la sécurité incendie.

Caractérisation et Compréhension des phénomènes de Stratification en Situation de Feu Confiné

Résumé

Ce travail de stage est consacré à l'étude des phénomènes de stratification en situation de feu de local. Tout d'abord, il se base sur l'utilisation d'un outil numérique type code à champs *Fire Dynamics Simulator* puis sur des essais de feu en milieu confiné à échelle 1. Une première partie constitue une approche bibliographique regroupant les phénomènes physiques liés à la circulation de la fumée en situation de feu confiné, l'effet de l'aspersion sur un milieu enfumé et stratifié puis sur le contexte de la sécurité incendie. Dans un second temps, un descriptif de l'outil numérique FDS est présenté, débouchant sur l'étude préliminaire d'une configuration pièce-couloir en situation de feu. Cette étude préliminaire, utilisant FDS, permet de préparer le protocole d'essais mis en place dans la dernière partie. Ces deux derniers chapitres ouvrent la voie sur notre compréhension des phénomènes de stratifications thermique et optique d'un milieu enfumé. Une évolution de la configuration pièce-couloir mise en place pour les essais est détaillée grâce à l'emploi de l'outil numérique. Deux essais sont ensuite réalisés et permettent d'appréhender le comportement de l'installation vis à vis de l'enfumage par le feu pour des essais futurs. La dernière partie du chapitre 4 offre la perspective d'essais de brouillard d'eau sur un milieu enfumé. Le travail de stage, qui s'inscrit dans un programme de recherche mené par le CSTB, débouche sur une thèse étudiant les stratifications thermique et optique d'un environnement enfumé en milieu confiné pouvant comprendre des gouttes en suspension.

Mots-clés :

Sécurité contre l'incendie, stratifications optique et thermique, essai feu, fumée, simulation numérique (FDS)

Characterization and Understanding of the Stratification Phenomena in Confined Fire Situation

Abstract

This work is devoted to the study of smoke stratification in case of fire building. It is based on simulations carried out with the CFD code *Fire Dynamics Simulator* and on fire tests at real scale. The first part is a literature survey which is focused on the physical phenomena related to the smoke flow in a confined space, to the influence of water droplet injection on a smoke layer, and more generally to the context of fire safety. In a second part, the numerical code FDS is presented, with a preliminary simulation of a room-corridor configuration in case of fire. This first study is aimed at preparing a test series which is detailed in a next part. The corresponding results lead toward a better understanding of the involved phenomena regarding thermal and optical stratification in a medium with smoke. The room-corridor configuration has been optimized using the numerical simulation as detailed in the report. Two tests have been carried out in order to qualify the experimental setup regarding the smoke flow, in view of a future experimental campaign. The last section is devoted to a future study of water mist - smoke interactions. The present work, which is a part of a research program headed by the CSTB, will be continued in the frame of a PhD thesis aimed at better describing the thermal and optical stratification in a smoke layer in a confined space, possibly altered by water mist application.

Keywords :

Fire safety, optical and thermal stratification, fire, smoke, numerical simulation, FDS