



**HAL**  
open science

# Caractérisation d'une lance diphasique et étude de l'impact d'un jet ascendant sur la stratification des fumées d'incendie

Louis Hardy

► **To cite this version:**

Louis Hardy. Caractérisation d'une lance diphasique et étude de l'impact d'un jet ascendant sur la stratification des fumées d'incendie. Milieux fluides et réactifs. Université de Lorraine, 2023. Français. NNT : 2023LORR0013 . tel-04099794

**HAL Id: tel-04099794**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-04099794>**

Submitted on 17 May 2023

**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.



**UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES  
UNIVERSITAIRES**

## 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 bibliothèque : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)  
*(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)*

## 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.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

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



Université de Lorraine  
Laboratoire Énergies, Mécanique Théorique et Appliquée  
UMR 7563 / UL / CNRS  
Préfecture de police de Paris  
Laboratoire Central de la Préfecture de Police  
École doctorale SIMPPÉ : Sciences et Ingénierie des Molécules, des Produits, des  
Procédés et de l'Énergie - ED 608

# Caractérisation d'une lance diphasique et étude de l'impact d'un jet ascendant sur la stratification des fumées d'incendie

## THÈSE

Présentée et soutenue publiquement le 7 mars 2023

pour l'obtention du

**Doctorat de l'Université de Lorraine**

spécialité Énergie et Mécanique

par

**Louis HARDY**

**devant le jury composé de**

|                      |                   |   |
|----------------------|-------------------|---|
| <i>Président :</i>   | Olivier VAUQUELIN | Professeur, Université Aix-Marseille                      |
| <i>Rapporteurs :</i> | Eric GUILLAUME    | Directeur général, Efectis France                         |
|                      | Thomas ROGAUME    | Professeur, Université de Poitiers                        |
| <i>Examineurs :</i>  | Camille RIERA     | Ingénieur de recherche, Direction Générale de l'Armement  |
|                      | Mathieu SUZANNE   | Ingénieur, Laboratoire Central de la Préfecture de Police |
| <i>Invité :</i>      | Fabian TESTA      | Lieutenant-colonel, Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris  |
| <i>Directeurs :</i>  | Pascal BOULET     | Professeur, Université de Lorraine, LEMTA                 |
|                      | Anthony COLLIN    | Professeur, Université de Lorraine, LEMTA                 |



## Remerciements

Pour commencer, j'aimerais exprimer toute ma gratitude à mes directeurs de thèse au LEMTA, Pascal Boulet et Anthony Collin, ainsi que mon encadrant au LCPP, Mathieu Suzanne, pour toute l'aide et l'écoute qu'ils m'ont apportées lors de ces trois années de thèse. Merci pour votre soutien, vos remarques et vos conseils. Merci car grâce à vous j'ai pu m'épanouir tout au long de ce travail en apprenant beaucoup de nos échanges.

Je veux aussi remercier M. Pezron, directeur de laboratoire central de la préfecture de police, qui m'a permis de réaliser ma thèse dans une entité unique en France. Je ne pouvais espérer une meilleure ambiance de travail ou des personnels d'encadrements plus bienveillants pour réaliser mes travaux de thèse. Je suis donc très fier de pouvoir rejoindre cette institution à l'issue de ma thèse et ainsi prendre part aux missions de protection des populations. Je dois évidemment remercier Aurélien Thiry-Muller qui a été mon chef de pôle avant de devenir directeur adjoint et qui a su trouver les mots d'encouragements et de soutien depuis mon stage il y a 4 ans.

Je tiens également à adresser mes plus sincères remerciements au Lieutenant-colonel Testa de la brigade des sapeurs-pompiers de Paris de m'avoir permis de participer à ce projet exceptionnel. Ces conseils et citations, toujours pleines d'espoir dans l'intelligence humaine, restent des références pour moi et j'en suis persuadé me serviront dans ma future carrière.

Je veux également dire ma reconnaissance à l'ensemble du personnel du laboratoire modélisation, étude et expérimentation encore présent ou non, Delphine Cendra, Manel Chaouchi, Nicolas Dreuille, Sylvie Dupont, Eddie Faure, Aurélien Leroy, Renato Mole-Antoniazza, Jean-François Texier et Adissa Traoré. Votre soutien et votre bonne humeur en toutes circonstances et malgré les conditions éprouvantes des essais ont été essentiels pour le bon déroulement de cette thèse. Je suis obligé de faire une mention particulière pour certains d'entre eux qui ont eu une place particulière. Tout d'abord merci à Jean-Luc Paillat qui a été un support informatique infailible et qui a sauvé des situations compliquées à plusieurs reprises (et un bon conseiller en brassage). Je dois aussi citer à part Etienne Pinsard mon compagnon de bureau qui m'a supporté, dans tout les sens du terme, et avec qui j'ai pu échanger sur tout les sujets. Bravo tu as réussi à finir sa thèse avant moi. Pour finir je veux remercier Giacomo Erez, travailler avec toi sur ce projet a été un réel plaisir que ce soit au bureau, lors des essais ou même après les essais. J'ai pu grâce à toi apprendre énormément de choses sur la conduite des essais et leur traitement informatique qui me seront encore utile dans mes futures missions. Vous m'avez tous permis de vivre des moments de partage et convivialité, qui ont été des refuges dans l'enchaînement des évènements de ma thèse.

Je n'oublie pas Bouaza Lafdal au LEMTA qui m'a également aidé pour de nombreuses démarches et avec qui échanger a toujours été un plaisir ; et Solange Ferriere pour son accueil lors de mon passage au LEMTA et sa gentillesse à toute épreuve.

Je dois évidemment remercier l'ensemble des sapeurs-pompiers avec qui j'ai travaillé lors des nombreux essais réalisés et qui ont permis de travailler dans une ambiance détendue mais extrêmement professionnelle, Alexandre Piquet, Arnaud Sourdain, Aurélien Duret, Nicolas Beaumont, Nicolas Buguet, Pierre-Louis Angeli, Thibault Poncet (ce n'est pas de notre faute si le béton armé c'est fragile), Valentin Faucon, Julien Piffard et Damien Poitel. Travailler avec des gens de l'art aussi expérimenté, et ouvert au monde scientifique, a été une vraie chance pour moi.

Je veux aussi exprimer ma reconnaissance aux personnes qui m'ont fait confiance pour prendre part à ce projet de grande importance et qui m'ont permis de présenter officiellement une partie de ces résultats lors la séance plénière du colloque des sciences appliquées aux sapeurs-pompiers, en particulier Mathieu qui m'a laissé sa place.

Enfin je veux remercier ma famille qui m'a supportée dans le choix de faire une thèse en particulier ma femme Yue qui m'a permis de réaliser ma période de rédaction dans les meilleures conditions possibles.

En résumé, merci à tous ceux que m'ont accompagné ou que j'ai croisé au cours de ces trois années pour tout les bons moments que nous avons partagés et pour tout ce que vous m'avez apporté et qui me permet d'être où j'en suis aujourd'hui.

*Je dédie cette thèse  
à l'ensemble des personnes qui travaillent pour améliorer  
la sécurité des intervenants qui nous protègent au quotidien.*

*« La tolérance atteindra un tel niveau que les personnes intelligentes seront interdites de  
toute réflexion pour ne pas offenser les imbéciles »  
Dostoïevski*

*« La seule chose qui permet au mal de triompher est l'inaction des hommes de bien »  
Edmund Burke*





# Table des matières

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introduction</b>   | <b>1</b>  |
| <b>Introduction</b>   | <b>1</b>  |
| 1 Contexte . . . . .  | 1         |
| 2 Démarche mise en place . . . . .  | 2         |
| <b>1 Contexte opérationnel et état de l'art</b>                                     | <b>5</b>  |
| 1.1 Contexte opérationnel pour les sapeurs-pompiers . . . . .                       | 5         |
| 1.1.1 État de l'art sur les lances à incendie . . . . .                             | 5         |
| 1.1.2 Limites opérationnelles des outils . . . . .                                  | 8         |
| 1.1.3 Changement de paradigme : l'approche performantielle . . . . .                | 11        |
| 1.2 Etat de l'art : brouillard d'eau et brumisation diphasique . . . . .            | 12        |
| 1.2.1 Mécanisme d'action de l'eau lors d'un incendie . . . . .                      | 13        |
| 1.2.2 Description des brouillards d'eau . . . . .                                   | 15        |
| 1.2.3 Description du système diphasique utilisé pendant les travaux . . . . .       | 19        |
| 1.3 Études des effets des sprays sur le comportement du feu et des fumées . . . . . | 21        |
| 1.3.1 Interactions entre un spray et un foyer . . . . .                             | 21        |
| 1.3.2 Interactions entre un spray et une couche de fumée . . . . .                  | 22        |
| 1.4 Objectifs de la thèse . . . . .   | 23        |
| <b>2 Caractérisation complète des deux jets diphasiques</b>                         | <b>25</b> |
| 2.1 Mesures des caractéristiques géométriques . . . . .                             | 25        |
| 2.1.1 Présentation de la configuration d'essai . . . . .                            | 26        |
| 2.1.2 Méthode de post-traitement . . . . .  | 26        |
| 2.1.3 Présentation des résultats obtenus . . . . .                                  | 29        |
| 2.2 Mesure de la vitesse et de la taille des gouttes . . . . .                      | 30        |
| 2.2.1 Présentation de la méthode de mesure . . . . .                                | 30        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.2.2    | Présentation de la configuration d'essai . . . . .   | 31        |
| 2.2.3    | Présentation des résultats sur le système diphasique . . . . .                                 | 32        |
| 2.2.4    | Limite à apporter aux résultats obtenus . . . . .  | 37        |
| 2.3      | Protection thermique du porteur . . . . .  | 38        |
| 2.3.1    | Adaptation du protocole de l'approche performantielle . . . . .                                | 39        |
| 2.3.2    | Présentation de la procédure de post-traitement . . . . .                                      | 40        |
| 2.3.3    | Présentation des résultats . . . . .   | 42        |
| 2.4      | Conclusion . . . . .   | 45        |
| <b>3</b> | <b>Essais comparatifs en vraie grandeur entre la lance diphasique et la lance<br/>actuelle</b> | <b>47</b> |
| 3.1      | Objectifs des essais et démarche . . . . .   | 47        |
| 3.2      | Présentation des configurations d'essai . . . . .  | 48        |
| 3.2.1    | Progression à contre tirage vertical . . . . .   | 49        |
| 3.2.2    | Progression à contre tirage horizontal . . . . .   | 51        |
| 3.3      | Présentation de l'instrumentation mise en place . . . . .                                      | 54        |
| 3.3.1    | Les arbres de thermocouples horizontaux et verticaux . . . . .                                 | 54        |
| 3.3.2    | Emplacements des appareils de mesure complémentaires . . . . .                                 | 56        |
| 3.4      | Résultats et conclusion . . . . .  | 56        |
| 3.4.1    | Les actions locales . . . . .  | 57        |
| 3.4.2    | Les actions globales . . . . .   | 58        |
| 3.4.3    | Conclusions . . . . .  | 63        |
| <b>4</b> | <b>Étude à échelle intermédiaire de l'interaction entre un jet et une couche<br/>de fumée</b>  | <b>65</b> |
| 4.1      | Présentation de la maquette et instrumentation . . . . .                                       | 65        |
| 4.1.1    | Choix de la buse et orientation . . . . .  | 66        |
| 4.1.2    | Nouvelle méthode de mesure . . . . .   | 68        |
| 4.1.3    | Répétabilité des foyers . . . . .  | 71        |
| 4.2      | Présentation des résultats . . . . .   | 72        |
| 4.2.1    | Analyse des résultats bruts . . . . .  | 72        |
| 4.2.2    | Généralisation des résultats . . . . .   | 73        |
| 4.2.3    | Bilans des essais . . . . .  | 77        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>5</b> | <b>Modélisation des essais pour réaliser les bilans massique et énergétique</b>                        | <b>79</b>  |
| 5.1      | Établissement des bilans massique et énergétique . . . . .   | 79         |
| 5.1.1    | Bilan massique sur la phase gazeuse et la phase liquide . . . . .                                      | 79         |
| 5.1.2    | Bilan énergétique sur la phase gazeuse et la phase liquide . . . . .                                   | 80         |
| 5.2      | Détermination des capteurs numériques nécessaires . . . . .  | 81         |
| 5.3      | Vérification sur un cas test . . . . .   | 83         |
| 5.3.1    | Configuration avec un brûleur au gaz et sans spray . . . . .   | 84         |
| 5.3.2    | Configuration avec le spray seul et sans brûleur . . . . .   | 84         |
| 5.3.3    | Conclusion . . . . .   | 88         |
| 5.4      | Modélisation des expérimentations à échelle intermédiaire . . . . .                                    | 88         |
| 5.4.1    | Choix des paramètres pour la simulation . . . . .  | 88         |
| 5.4.2    | Comparaisons simulations et expérimentations . . . . .   | 91         |
| 5.5      | Analyse des échanges thermiques au niveau des particules pour une action ascendante inclinée . . . . . | 94         |
| 5.5.1    | Effet du changement de débit . . . . .   | 94         |
| 5.5.2    | Effet du changement de diamètre . . . . .  | 96         |
| 5.6      | Analyse des échanges thermiques au niveau des particules pour trois types d'injection . . . . .        | 97         |
| 5.7      | Conclusions et discussion . . . . .  | 99         |
|          | <b>Conclusion et perspectives</b>  | <b>101</b> |
| 1        | Résultats opérationnels . . . . .  | 101        |
| 2        | Résultats académiques . . . . .  | 102        |
|          | <b>Bibliographie</b>   | <b>105</b> |
|          | <b>Annexe</b>  | <b>111</b> |
| 1        | Ensembles des mesures de granulométrie et de vitesse pour les coupes verticales . . . . .              | 112        |
| 2        | Schéma détaillé des zones d'expérimentations . . . . .   | 113        |
| 2.1      | Schéma cave . . . . .  | 113        |
| 2.2      | Schéma couloir . . . . .   | 113        |
| 2.3      | Positionnement des thermocouples horizontaux . . . . .   | 113        |
| 2.4      | Positionnement des thermocouples verticaux . . . . .   | 115        |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 2.5 | Dimensions des ouvrants . . . . .            | 115 |
| 3   | Modification du code source de FDS . . . . . | 117 |

# Table des figures

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Exemple de lance à longue portée utilisée à la BSPP . . . . .   | 6  |
| 1.2  | Images d'une des lances à main utilisée actuellement par les sapeurs-pompiers . . . . .   | 7  |
| 1.3  | Jet de protection obtenu avec une lance de type queue de paon . . . . .   | 8  |
| 1.4  | Représentation graphique des différents critères retenus dans le cadre de l'approche performantielle . . . . .                      | 12 |
| 1.5  | Part des phénomènes participants à l'extinction issu de Ndubizu et <i>coll.</i> . . . .   | 14 |
| 1.6  | Montage expérimental de Zegers et <i>coll.</i> . . . . .  | 15 |
| 1.7  | Classement international des brouillards d'eau . . . . .  | 16 |
| 1.8  | Type de fragmentation hydraulique en fonction du nombre de Reynolds et du nombre d'Ohnesorge . . . . .                              | 16 |
| 1.9  | Schéma d'une collision entre deux gouttes . . . . .   | 17 |
| 1.10 | Cartographie des différents types de collisions possibles entre gouttes . . . . .   | 18 |
| 1.11 | Vue de côté des brouillards produits par le système diphasique . . . . .  | 20 |
| 1.12 | Évolution de la lance diphasique au cours des travaux de thèse . . . . .  | 20 |
| 1.13 | Figure extrait de l'article de Tang et <i>coll.</i> . . . . .   | 22 |
| 2.1  | Banc d'essai pour la mesure de la portée et de l'angle d'ouverture . . . . .  | 27 |
| 2.2  | Exemple d'une image obtenue avec la caméra infrarouge située sur le côté . . . . .  | 27 |
| 2.3  | Exemple de la détection du contour suite au seuillage pour les deux buses . . . . .   | 28 |
| 2.4  | Visualisation de la calibration infrarouge . . . . .  | 29 |
| 2.5  | Visualisation du contour recalibré du spray pour la buse ronde . . . . .  | 29 |
| 2.6  | Photographie du banc d'essai pour les mesures de granulométrie et de vitesse des gouttes . . . . .                                  | 32 |
| 2.7  | Évolution de la vitesse moyenne $V_{avg}$ et du diamètre moyen $D_{avg}$ des gouttes dans l'axe du spray pour chaque buse . . . . . | 34 |
| 2.8  | Répartition du diamètre des gouttes avant et après la cassure . . . . .   | 35 |
| 2.9  | Schéma des mesures verticales réalisées à 4 m . . . . .   | 35 |
| 2.10 | Évolution du diamètre moyen et de la vitesse moyenne des gouttes pour la buse plate lors de mesures verticales . . . . .            | 36 |
| 2.11 | Évolution du diamètre moyen et de la vitesse moyenne des gouttes pour la buse ronde lors des mesures verticales à 4 m . . . . .     | 37 |
| 2.12 | Schéma de la configuration expérimentale adaptée . . . . .  | 39 |
| 2.13 | Mise en place de l'alignement entre le support de lance et le panneau radiant . . . . .   | 40 |
| 2.14 | Résultat après post traitement d'une cartographie du jet plat . . . . .   | 41 |
| 2.15 | Nombre total de mesures par pixel sur la cartographie du jet plat . . . . .   | 42 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.16 | Résultats issus du post traitement complet pour la buse plate . . . . .   | 43 |
| 2.17 | A gauche cartographie de l'atténuation pour le jet plat et à droite pour le jet rond . . . . .  | 44 |
| 2.18 | Comparaison du niveau d'atténuation en fonction de la surface considérée autour du centre. . . . .  | 45 |
| 3.1  | Image de la cave avant brûlage . . . . .  | 48 |
| 3.2  | Schéma de la configuration cave. Les numéros 1, 2 et 3 indiquent la position des ouvrants et les lettres A, B et C l'emplacement des sapeurs-pompiers lors des actions. . . . .   | 49 |
| 3.3  | Dimensions standards des palettes « Europe ». . . . .   | 50 |
| 3.4  | Profils de températures sur un arbre de thermocouples vertical proche du foyer. Le thermocouple le plus haut, courbe bleue, est situé à 10 cm du plafond plus les suivants sont régulièrement espacés de 50 cm. . . . . | 50 |
| 3.5  | A gauche photo du foyer lors de la phase de ventilation, à droite photo prise depuis l'ouvrant 2 avant l'engagement d'un binôme . . . . .   | 52 |
| 3.6  | Schéma des volumes utilisés pour la deuxième configuration. Les numéros 1, 2, 3 et 4 indiquent la position des ouvrants et les lettres A, B, C et D l'emplacement des sapeurs-pompiers lors des actions. . . . .        | 52 |
| 3.7  | Photographie de la zone foyer pour la configuration couloir . . . . .   | 53 |
| 3.8  | Emplacements des arbres de thermocouples. . . . .   | 55 |
| 3.9  | Emplacements des thermocouples dans le couloir. . . . .   | 55 |
| 3.10 | Sur la gauche, exemple d'une mesure de température exclue lors du post-traitement à cause d'un dépôt d'eau. Sur la droite, exemple d'une mesure conservée lors du post-traitement. . . . .                              | 56 |
| 3.11 | Emplacements des caméras et des cannes de prélèvements de gaz. . . . .  | 57 |
| 3.12 | Mesure de température lors d'une action de lance avec les points d'intérêt permettant de calculer le critère local. . . . .   | 58 |
| 3.13 | Notes obtenues après chaque action de lance. . . . .  | 59 |
| 3.14 | Emplacement des arbres de thermocouples (points rouge et bleu) utilisés pour l'étude des effets globaux des actions de lance. . . . .   | 60 |
| 3.15 | Niveaux thermiques obtenus après chaque action de la lance diphasique au niveau de l'arbre rouge (figure 3.14). . . . .   | 61 |
| 3.16 | Niveaux thermiques obtenus après chaque action de la lance classique au niveau de l'arbre rouge (figure 3.14). . . . .  | 62 |
| 4.1  | Schéma de la maquette avec l'emplacement des capteurs . . . . .   | 66 |
| 4.2  | Schémas en vue latérale des configurations d'injection étudiées. . . . .  | 67 |
| 4.3  | Essai réalisé avec un spray ascendant incliné à 45° . . . . .   | 67 |
| 4.4  | Exemple de mesure réalisée sur la lance diphasique. Les droites vertes représentent la fenêtre de mesure sélectionnée. La droite rouge représente la coupure détectée lors de l'analyse des résultats. . . . .          | 69 |
| 4.5  | Résultats de mesures obtenus par une autre équipe de recherche [1] où l'on peut également observer une coupure dans la mesure. . . . .  | 69 |
| 4.6  | Cumul des mesures avec post traitement . . . . .  | 70 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.7  | Comparaison des HRR obtenus pour les différents tests . . . . .  | 71 |
| 4.8  | Exemple de données brutes obtenues lors des essais . . . . .   | 74 |
| 4.9  | Profils de température au cours du temps pour les trois configurations d'injection étudiées, avec à gauche l'arbre côté foyer et à droite l'arbre côté sortie. . . . .   | 75 |
| 4.10 | Résultats obtenus pour différents brûlages sans adimensionnement . . . . .   | 76 |
| 4.11 | Profils de température avant (en rouge) et après l'injection, pour deux pressions d'alimentation (courbe bleue pour 4 bars et verte pour 8 bars) avec les écarts types. La colonne de gauche correspond à l'arbre côté foyer et la colonne droite à l'arbre côté sortie. . . . . | 76 |
| 5.1  | Adaptation du schéma du bilan massique réalisé par A. Jenft . . . . .  | 80 |
| 5.2  | Schéma du bilan énergétique réalisé par A. Jenft, les ajouts sont visibles en orange. . . . .  | 81 |
| 5.3  | Schéma du bilan massique avec les capteurs correspondants dans FDS. . . . .  | 82 |
| 5.4  | Schémas du bilan énergétique avec les capteurs correspondants dans FDS. . . . .  | 82 |
| 5.5  | Évolution de chaque terme du bilan massique sur la phase gazeuse au cours du temps. . . . .  | 84 |
| 5.6  | Évolution de chaque terme du bilan énergétique sur la phase gazeuse au cours du temps. . . . .   | 85 |
| 5.7  | Évolution de chaque terme du bilan massique sur la phase gazeuse au cours du temps avec utilisation d'un spray. . . . .  | 85 |
| 5.8  | Évolution de chaque terme du bilan énergétique sur la phase gazeuse au cours du temps avec utilisation d'un spray. . . . .   | 86 |
| 5.9  | Évolution de chaque terme du bilan massique sur la phase liquide au cours du temps. . . . .  | 87 |
| 5.10 | Répartition des échanges thermiques sur les particules mesurés par FDS. . . . .  | 87 |
| 5.11 | Évolution de chaque terme du bilan énergétique sur la phase liquide au cours du temps. . . . .   | 88 |
| 5.12 | Problème de diffusion des particules entre les maillages . . . . .   | 89 |
| 5.13 | Évolution des échanges en fonction du diamètre de goutte et du temps de vie . . . . .  | 89 |
| 5.14 | Comparaison des niveaux thermiques pour les arbres amont et aval pour trois tailles de mailles différentes. . . . .  | 90 |
| 5.15 | Comparaison entre les débits calorifique mesuré et celui prescrit dans la simulation. . . . .  | 91 |
| 5.16 | Ré inflammation observable dans la simulation après injection à cause de la sous-ventilation. . . . .  | 92 |
| 5.17 | Débits calorifiques utilisés pour les simulations avec le bac de 65 mm de diamètre. . . . .  | 92 |
| 5.18 | Profils de température avant injection en amont et en aval pour la simulation et l'expérimentation. . . . .  | 93 |
| 5.19 | Profils de température avant injection en amont et en aval pour la simulation et l'expérimentation. . . . .  | 94 |
| 5.20 | Variation des échanges thermiques en fonction du débit. . . . .  | 95 |
| 5.21 | Variation des échanges thermiques en fonction du diamètre de goutte. . . . .   | 98 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 5.22 | variation des échanges thermiques en fonction du type d'injection. . . . .   | 98  |
| 1    | Schéma avec les dimensions de la configuration cave. . . . .   | 113 |
| 2    | Schéma avec les dimensions de la configuration couloir. . . . .  | 113 |
| 3    | Emplacements des arbres de thermocouples dans les deux configurations étudiées. . . . .  | 114 |
| 4    | Emplacements des thermocouples horizontaux dans les deux configurations étudiées. . . . .  | 114 |
| 5    | Positions des thermocouples sur les arbres verticaux. . . . .  | 115 |
| 6    | Dimensions des soupiroux, ouvrant 3 pour la configuration en contre tirage vertical et 3 et 4 pour la configuration en contre tirage horizontal. . . . .                         | 115 |
| 7    | Dimension de la porte d'accès pour la configuration en contre tirage vertical. La porte d'accès a les même dimensions pour la configuration en contre tirage horizontal. . . . . | 116 |



# Introduction

## 1 Contexte

La lutte contre l'incendie est la mission historique des sapeurs-pompiers et son évolution a été marquée par plusieurs événements. Plusieurs incidents tragiques ont conduit à des évolutions majeures dans la façon de mener cette lutte, avec en particulier l'incendie de l'ambassade d'Autriche en 1810 qui a abouti à la création de la future Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris (BSPP). On peut aussi rappeler l'incendie de la discothèque le 5-7 à Saint-Laurent-du-pont en 1970 qui fit 146 morts et celui du tunnel du Mont Blanc en 1999 qui ont rappelé la nécessité de la prévention incendie. En plus des évolutions provoquées par de tels événements des innovations technologiques ont également transformé les tactiques d'attaque d'un foyer que peuvent utiliser les sapeurs-pompiers. Les évolutions les plus spectaculaires par leur impact qui peuvent être citées sont la mécanisation des engins et des pompes, l'installation d'un réseau d'eau sur l'ensemble du territoire mais aussi des inventions comme l'appareil respiratoire isolant en 1934 ou le passage du manteau de cuir aux tenues de protection modernes en textile à partir de 2005. Évidemment, la lance à eau a également connu des évolutions au cours du temps, en lien avec les capacités nouvelles d'alimentation en eau des engins. Ainsi les premières lances consistant en un tube tronconique avec une manette ont évolué pour devenir des outils permettant d'obtenir différents types de jets ou de modifier le débit d'eau en sortie.

Récemment, une démarche associant mesures scientifiques et évolution des matériels a vu le jour grâce à un partenariat entre différentes entités : bataillon des marins pompiers de Marseille et les services départementaux d'incendie et de secours d'Ille-et-Vilaine, du Rhône et de Seine-et-Marne. Le but de cette démarche est de s'assurer que les futures évolutions restent bénéfiques pour les intervenants à l'aide de mesures objectives réalisées selon un protocole unique. Cette thèse s'inscrit directement dans la continuité de ces travaux car elle est réalisée avec trois entités impliquées déjà lors des essais précédents. Il s'agit tout d'abord du Laboratoire Énergies Mécanique Théorique et Appliquée (LEMETA), rattaché à l'Université de Lorraine, et plus précisément de son équipe de recherche Feux et du Laboratoire Central de la Préfecture de Police (LCPP) qui constituent la partie scientifique de ce partenariat. L'autre partenaire est évidemment la BSPP qui est l'entité qui a bénéficié de cette étude. Le système diphasique à caractériser comporte une technologie innovante qui n'avait jamais été utilisée dans une lance à main. Le LCPP, qui a pour mission d'apporter un soutien scientifique à la BSPP, a estimé qu'une telle recherche nécessitait une thèse et a donc fait appel au LEMETA pour assurer l'encadrement.

Tous les travaux ont été réalisés en vraie grandeur avec les contraintes logistiques et hu-

maines associées. Les expérimentations n'ont pu être effectuées que grâce à la mobilisation de la BSPP et la mise à disposition de structure et de personnels. Le LCPP et le LEMTA ont pu mettre en œuvre un large panel de mesures lors des nombreuses expérimentations menées afin d'apporter les réponses les plus complètes possible. Dans une deuxième partie, une étude des interactions entre le spray d'une lance à incendie et une couche de fumée a été réalisée avec une expérimentation à échelle 1/5<sup>ème</sup>, complétée par des modélisations. Cette partie avait pour but de documenter et expliquer les phénomènes mis en jeu lors de la progression des sapeurs-pompiers. Une validation des simulations par comparaison avec l'expérimentation permettra à de futurs travaux d'étudier plus particulièrement l'impact des actions réalisées par les sapeurs-pompiers.

## 2 Démarche mise en place

Le mémoire comporte cinq chapitres distincts. Le premier chapitre consiste en un état de l'art sur les moyens opérationnels disponibles pour les sapeurs-pompiers et leurs limites. La présentation des phénomènes permettant l'extinction d'un incendie montre l'intérêt de fragmenter l'eau pour obtenir des diamètres faibles pour les petites gouttes. La dernière partie expliquera les méthodes de fragmentation des sprays et leur interaction lors d'une utilisation comme système de protection et de lutte contre l'incendie. Enfin le système diphasique étudié dans la suite du manuscrit sera présenté, en particulier les jets et les conditions d'alimentation en air et en eau.

Le deuxième chapitre porte sur la caractérisation complète du système diphasique avec trois parties distinctes :

- Tout d'abord un travail établissant les paramètres géométriques des deux jets diphasiques produits par la nouvelle lance ;
- Puis une mesure de la taille et de la vitesse des gouttes composant les sprays ;
- Pour finir nous présenterons les niveaux d'atténuation face au rayonnement thermique obtenus pour les sprays diphasiques et nous les comparerons avec les niveaux obtenus pour la lance actuelle.

Le troisième chapitre est consacré aux résultats obtenus lors d'essais avec feux et engagement de personnels. Ce chapitre comporte quatre parties différentes :

- Tout d'abord une présentation de la démarche et des objectifs d'une telle démarche ;
- Puis une description des configurations retenues et des séquences d'essais ;
- Ensuite l'instrumentation mise en place sera détaillée ;
- Pour finir les résultats obtenus seront présentés ainsi que leur implication sur l'utilisation des outils.

Le quatrième chapitre porte sur une expérimentation à petite échelle afin d'étudier les interactions entre un jet et une couche de fumée en fonction de l'angle d'injection. Ce chapitre comporte deux parties différentes :

- Tout d'abord une présentation de la maquette et de l'instrumentation utilisée ;
- Puis une analyse des résultats obtenus et les conclusions qui peuvent en être faites.

Le dernier chapitre porte sur la modélisation des essais à petite échelle. Une modification du code de simulation Fire Dynamics Simulator a permis de réaliser des bilans massique et énergétique lors de l'injection. Ce chapitre comporte trois parties différentes :

- Tout d'abord la présentation d'une étude préliminaire sur un cas test pour valider les modifications apportées au code de calcul ;
- Puis une description des paramètres de simulation choisis et une vérification de l'accord entre les résultats expérimentaux et numériques ;
- Pour finir une analyse des résultats obtenus avec les différents paramètres étudiés sera détaillée.

Enfin une conclusion générale sur l'ensemble des travaux sera proposée avec en particulier les résultats qui ont déjà permis à la BSPP de finaliser le développement du système diphasique.



# Chapitre 1

## Contexte opérationnel et état de l'art

### 1.1 Contexte opérationnel pour les sapeurs-pompiers

Dans cette première partie, nous allons nous intéresser au matériel existant de lutte contre l'incendie et à la doctrine appliquée en France par les sapeurs-pompiers. Toutefois, la gestion des secours en France est réalisée au niveau départemental, en suivant les avis de la Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion de Crise, et des différences de matériels peuvent donc exister. La description qui va suivre ne pourra donc pas être exhaustive, elle a pour objectif d'énumérer les outils communément utilisés, les problèmes opérationnels qui sont actuellement rencontrés et la démarche mise en place pour améliorer les outils.

#### 1.1.1 État de l'art sur les lances à incendie

Historiquement la lutte contre l'incendie s'est limitée à « faire la part du feu », c'est-à-dire à couper le feu de tout nouveau combustible et à attendre l'extinction par manque de matériaux. Cette technique atteint bien l'objectif d'extinction, mais au prix d'efforts importants et en sacrifiant les zones adjacentes au foyer. Les intervenants avaient alors le nom de sapeurs comme pour les soldats du génie dans l'armée. Les développements technologiques ont permis par la suite de commencer à projeter de l'eau avec des pompes à bras tractées par des chevaux au début du XIX<sup>e</sup> siècle. Cette évolution du métier entraîne également un changement de nom pour les intervenants qui deviennent les sapeurs-pompiers. Dans le siècle suivant, la mécanisation a permis d'améliorer l'efficacité du pompage et surtout de diminuer le nombre de sapeurs nécessaire au fonctionnement des pompes. Il a alors fallu créer un outil, la lance à incendie, permettant de diriger le jet et ainsi d'améliorer grandement l'efficacité de la lutte contre les incendies.

#### **La lance comme outil d'action à longue distance**

Les premières lances utilisées étaient de conception très simple, elles étaient composées d'un tube métallique qui se rétrécit au bout de manière à accélérer le flux d'eau en sortie.



FIGURE 1.1 – Exemple de lance à longue portée utilisée à la BSPP

Une poignée située sur le dessus permettait de déclencher le jet. Ces premières lances avaient pour objectifs de permettre aux sapeurs-pompiers de rester à une distance raisonnable de l'incendie tout en ayant une action sur ce dernier. Cette distance est d'autant plus importante que les équipements de protection individuelle sont alors peu efficaces, voire inexistantes. La veste de cuir qui correspond au premier niveau de protection des sapeurs-pompiers n'apparaît qu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Ce type de lance peut encore être trouvé dans certains engins d'intervention aujourd'hui car elles permettent une projection à longue portée sans avoir recours à des camions d'intervention dotés de pompe grande puissance.

Aujourd'hui la technologie a évidemment permis d'améliorer cet outil rustique et de gagner encore plus de portée de projection de l'eau. Il existe donc des lances grand débit ayant un tuyau d'alimentation d'environ 70 mm de diamètre (une variation de quelques millimètres peut exister en fonction du département) qui vont permettre de projeter  $1000 \text{ L min}^{-1}$  d'eau à plus de 40 m. Il s'agit toujours d'une lance à main mais il faut prévoir trois personnes au minimum pour la tenir. Les générations suivantes de lances sont donc directement placées sur un support comme le montre la figure 1.1 : nacelle, toit de l'engin, trépied. . . Ces outils peuvent aujourd'hui atteindre des débits de  $3000 \text{ L min}^{-1}$  d'eau pour une portée de 60 m. Ils sont donc principalement utilisés sur les feux d'entrepôt ou de toiture. L'objectif est de projeter une quantité d'eau importante avec un pompier éloigné du foyer. L'efficacité de l'eau projetée n'est pas prise en compte, car l'objectif est de compenser le manque d'efficacité de l'eau projetée, due à la distance et au type de jet, par une utilisation massive de cette dernière. Ce type d'outil peut provoquer d'importants dégâts s'il est mal utilisé à cause de la quantité d'eau très importante qui va se déverser sur les étages inférieurs et les zones adjacentes. En résumé, ces outils servent à « taper fort » sur le foyer lorsqu'il est impossible ou dangereux d'approcher le foyer (niveau thermique trop élevé, risque d'effondrement . . .), la quantité d'eau utilisée devient alors un critère secondaire. Le rendement estimé de ce type de lance, c'est à dire la quantité d'eau participant à l'extinction par rapport à la quantité d'eau projetée, est de 20% [2, 3], soit 80% d'eau qui s'écoule au sol sans action sur le foyer.



(a) Exemple de lance à main utilisée en France



(b) Jet de protection des lances à main actuelles

FIGURE 1.2 – Images d’une des lances à main utilisée actuellement par les sapeurs-pompiers

### La lance multi-usages

Lorsqu’un binôme de sapeurs-pompiers s’engage dans un environnement dangereux, il doit pouvoir utiliser un outil associant la protection du binôme ainsi que l’attaque à distance. Un autre outil a donc été créé qui permet d’obtenir un moyen d’extinction à main : la lance à débit mixte réglable (LDMR) ou lance à débit variable. Cette lance est alimentée avec un tuyau de 45 mm de diamètre et son débit peut être réglé à l’aide d’une manette, par exemple 150, 250 ou 500 L min<sup>-1</sup> comme illustré sur la figure 1.2. Ce réglage permet au pompier d’adapter l’utilisation de l’eau à la situation à laquelle il est confronté, par exemple flamme visible ou uniquement de la fumée. Un autre réglage est également possible, via une bague tournante située à l’avant, qui permet de changer la forme du jet obtenu en sortie. Le pompier peut choisir un jet concentré, « jet bâton », qui va lui permettre d’avoir une portée significative ou un jet diffusé de protection qui va créer un écran devant lui afin d’absorber le rayonnement thermique incident comme on peut l’observer. Enfin, un dernier type de jet a été ajouté à cet outil qui ne correspond à aucune des fonctionnalités décrites précédemment : le jet diffusé d’attaque. Ce jet a une forme conique et sert à projeter de l’eau à moyenne portée sur une surface importante avec un faible pouvoir de pénétration, l’objectif étant de mouiller une grande surface rapidement et d’abattre les flammes.

La LDMR permet donc aux pompiers de s’adapter à la situation qu’ils rencontrent en choisissant son débit et son type de jet. Cela permet également d’avoir une utilisation raisonnée de la quantité d’eau projetée, ce qui est essentiel en milieu confiné. Ce point sera expliqué plus en détail par la suite. Le rendement estimé de ce type de lance est meilleur que celui des lances grande portée, des travaux récents [2,3] l’ont estimé entre 50% et 80%. Toutefois, même si le rendement paraît bon, il convient de remarquer que l’eau qui n’a pas servi à l’extinction va stagner au sol. Cette eau pourra alors impacter négativement les intervenants qui progresse à genoux en mouillant leurs tenues ou en provoquant des brûlures si elle se vaporise.



FIGURE 1.3 – Jet de protection obtenu avec une lance de type queue de paon

### La lance comme outil de protection

Une autre utilité des lances moins connue du grand public est d'assurer un rideau de protection face aux agressions thermiques (en particulier le rayonnement) du foyer sur des zones préservées. Il existe pour cela des lances dont l'objectif n'est pas de projeter loin mais au contraire de disperser l'eau sur une grande surface afin de capter le rayonnement émis par le foyer. Ces lances « rideaux d'eau », ou « queues de paon », sont posées au sol et ont donc pour unique objectif de protéger une zone choisie par les sapeurs-pompiers afin d'éviter les propagations. Elles ont un débit d'environ  $400 \text{ L min}^{-1}$  et assurent un rideau d'une largeur d'environ 25 m et d'une hauteur de 5 m comme on peut l'observer sur la figure 1.3. Ces outils peuvent également être utilisés en feu de forêt pour protéger un groupe de véhicules piégés par l'avancée trop rapide des flammes.

Pour assurer la protection, l'utilisation de l'eau est très différente de celle des lances à main. L'objectif est de répartir l'eau sur une surface la plus importante possible tout en gardant un niveau d'atténuation du rayonnement très élevé. La quantité d'eau devient ici le critère important car la protection doit pouvoir être maintenue au maximum dans la durée malgré des réserves d'eau parfois limitées. Les techniques de projection et l'épaisseur du rideau ainsi créé deviennent les éléments primordiaux pour cette utilisation. Ce type d'outil correspond aux rideaux d'eau fixes qui peuvent exister en protection incendie dans de grands volumes et dont l'intérêt pour la protection thermique a été démontré dans plusieurs publications [4–7].

## 1.1.2 Limites opérationnelles des outils

### Des outils complexes à utiliser

Les lances actuelles, qui cumulent un grand nombre de fonctionnalités, ont également plusieurs limites. Tout d'abord, le fait d'avoir plusieurs réglages possibles rend obligatoirement l'efficacité très dépendante de l'opérateur. En effet, le choix du jet et du débit dépendra de l'expérience du pompier, de sa compréhension du système feu, de son aguerissement... Ce phénomène a pu être observé lors d'essais où des personnels professionnels (militaires ou non) et volontaires devaient faire la même action dans les mêmes



conditions [8]. Une dispersion des résultats a été observée lors des différents passages avec des zones d'action non répétables. Une telle hétérogénéité lors des actions, malgré une reconnaissance des lieux avant le passage et un protocole précis à suivre, laisse présager des écarts encore plus importants en conditions réelles. Par ailleurs, les réglages ne peuvent être faits simultanément car une main doit tenir en permanence la lance et il existe une manette et une bague de réglage. Ainsi la manœuvre de mise en sécurité du binôme qui demande un réglage complet de la lance, alors que les pompiers doivent en même temps s'allonger, doit être comparée au temps de survenue d'un phénomène thermique. Un autre inconvénient des lances actuelles est le poids de l'ensemble du système d'extinction en charge, lance et tuyaux, qui limite fortement la mobilité des intervenants. Une lance en elle-même pèse environ 2 kg mais l'essentiel du poids est dû aux tuyaux. Un tuyau en eau de 45 mm de diamètre pèse 31 kg pour 20 m et 76 kg pour les tuyaux de 70 mm de diamètre de même longueur. Un établissement hydraulique comprend obligatoirement plusieurs tuyaux comme ceux décrits précédemment (habituellement trois). La mobilité des intervenants est donc fortement limitée par la masse des établissements hydrauliques. Ce manque de mobilité est encore plus pénalisant lors de feux en extérieur : voiture, poubelle, végétation... lors desquels l'extinction doit être réalisée en tournant rapidement autour du foyer.

### Une utilisation raisonnée de l'eau

La France ayant été confrontée à une série d'accidents impliquant des sapeurs-pompiers, un groupe de travail a eu pour objectif, en 2005, de trouver un premier critère d'utilisation des lances à incendie à main permettant d'assurer la sécurité des intervenants face à l'occurrence d'un phénomène thermique. La démarche complète peut être retrouvée dans le rapport du groupe de travail sur les accidents thermiques [9] mais un résumé est proposé ci-après. Les rédacteurs ont tout d'abord estimé la puissance thermique dont il faut protéger les intervenants. Le cas de référence choisi est une pièce uniquement ventilée par une porte d'une hauteur de 2 m et d'une largeur de 1 m. Les auteurs font l'hypothèse que le foyer est contrôlé par la ventilation et que la puissance thermique dégagée ne dépend que du facteur de ventilation. La puissance du foyer peut alors être estimée par l'équation de Babrauskas 1.1.

$$\dot{Q}_{piece} = K \cdot A \sqrt{H} \quad (1.1)$$

Avec  $K$  une constante valant  $1500 \text{ W m}^{-2,5}$ ,  $A$  la surface de l'ouvrant en  $\text{m}^2$  et  $H$  la hauteur de l'ouvrant en m.

En utilisant cette équation pour une pièce de référence avec un seul ouvrant de 2 m par 1 m, on trouve une puissance de foyer de 4,2 MW. Il faut maintenant estimer la quantité d'eau nécessaire pour absorber cette puissance thermique. Pour ce faire, un effet uniquement thermique de l'eau est pris en compte dans cette approche. L'équation 1.2 permet de calculer la puissance nécessaire à l'échauffement de l'eau liquide et à son évaporation. L'échauffement de la vapeur d'eau n'est pas prise en compte dans ces travaux.

$$\dot{Q}_{eau} = \eta \cdot q_v \cdot (C_{pl} \cdot \Delta T + L_v) \quad (1.2)$$

$$q_v = \frac{K \cdot A \sqrt{H}}{\eta \cdot (C_{pl} \cdot \Delta T + L_v)} \quad (1.3)$$

$$q_v = \frac{1500 \cdot 2 \cdot \sqrt{2}}{0.2 \cdot 4180 \cdot 90 + 2260 \cdot 10^3} = 500 \text{ L min}^{-1}$$

Avec  $\eta$  le rendement de l'eau projetée sans unité,  $q_v$  le débit massique d'eau utilisée en  $\text{kg s}^{-1}$ ,  $C_{pl}$  la capacité thermique massique de l'eau en phase liquide en  $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ,  $\Delta T$  l'écart de température entre l'eau en phase liquide et la température d'évaporation en K et  $L_v$  la chaleur latente de vaporisation massique en  $\text{J kg}^{-1}$ .

Les auteurs retournent alors l'équation 1.2 pour trouver le débit utile,  $q_v$ , pour protéger les intervenants dans le cas particulier décrit précédemment. En utilisant l'équation 1.3 on obtient qu'un débit minimal de  $500 \text{ L min}^{-1}$  est nécessaire.

Cette approche simplifiée a entraîné l'augmentation du débit des lances à incendie pour améliorer le niveau de protection des sapeurs-pompier. Toutefois, certaines limites de cette approche doivent être notées. Tout d'abord, l'eau une fois en vapeur continue d'absorber de l'énergie en passant de  $100^\circ\text{C}$  à  $300^\circ\text{C}$  par exemple et ce phénomène n'est pas du tout pris en compte dans les calculs. De plus, l'eau n'agit pas uniquement au niveau thermique mais également sur plusieurs autres aspects qui seront abordés dans la partie 1.2.1 qui doivent être pris en compte pour estimer sa capacité réelle d'extinction. On peut également noter que le choix du volume de référence et des conditions de ventilation ne permettent d'assurer le contrôle du foyer que dans un cas très particulier. Le seul critère d'un débit minimal sécuritaire ne permet pas de prendre en compte la technique ou la qualité de projection du jet. Les contraintes opérationnelles induites par cette approche ont été décrites dans la partie « Cadre de l'étude » du rapport d'essai sur l'approche performantielle [8]. De plus, l'effet de l'eau restant au sol sur les intervenants et sur l'environnement proche n'est pas pris en compte dans ces calculs : on aboutit donc à un gain d'efficacité si l'on augmente le débit. Il faudrait créer un critère pour décrire les effets négatifs (brûlures par les vapeurs, dégâts des eaux, pollution des sols ...) lorsque l'on augmente le débit et chercher un équilibre optimal entre ces paramètres.

En effet, l'utilisation massive de l'eau entraîne des écoulements importants lors de l'extinction et provoque des dégâts des eaux importants, en particulier dans le cas des feux de grande ampleur. De plus, ces eaux d'extinction sont polluées, car elles ont absorbé divers polluants lors de leur passage dans les fumées et les matériaux dégradés. Ces eaux d'extinction ne sont que rarement traitées ce qui peut provoquer une pollution importante de l'environnement.

Par ailleurs, les outils actuels ayant un rendement faible, les pompiers doivent parfois progresser dans un milieu humide avec de l'eau au sol et saturé en vapeur. Or les pompiers effectuant leur progression à genoux, l'eau va mouiller leur tenue ce qui va provoquer une perte de protection thermique et même parfois des brûlures dues à l'évaporation de l'eau dans la tenue ou à la pénétration de la vapeur directement dans les couches supérieures de la peau. Ce phénomène est connu chez les sapeurs-pompier sous le nom de « retour

vapeur » ce qui exprime bien le fait qu'il s'agit d'une conséquence directe de l'action de lance. Le sapeur-pompier doit donc chercher un compromis entre la quantité d'eau qu'il utilise pour assurer sa progression de manière sécurisée et celle qu'il utilisera pour éteindre le foyer. Des études ont été menées pour déterminer l'efficacité des tenues de protection face à la vapeur d'eau et améliorer la résistance à ce type d'agression externe [10, 11]. Des études physiologiques ont également été réalisées pour étudier et prédire la survenue de ces brûlures et enfin les traiter [12–14]. L'ensemble de ces études montre bien l'importance de cet aspect dans les interventions des sapeurs-pompiers.

### 1.1.3 Changement de paradigme : l'approche performantielle

Une nouvelle approche a été mise en place lors d'une étude menée de 2016 à 2018 afin de ne plus raisonner uniquement en quantité d'eau projetée mais en efficacité quantifiable par des critères basés sur des mesures physiques. Il s'agit donc d'une approche expérimentale, basée sur des protocoles scientifiques, et non plus théoriques. La démarche a pour but de ne plus mettre en avant uniquement la quantité d'eau mais plutôt la façon de projeter cette eau. Pour cela, trois critères ont été établis afin de quantifier l'efficacité des outils d'extinction :

- la protection du porteur face à un rayonnement thermique
- la sécurisation d'un plafond de fumée
- le contrôle d'un feu en phase de post flash-over

Chacun de ces critères correspond à une étape nécessaire pour éteindre un foyer. Le premier critère assure la protection des intervenants lorsqu'ils sont confrontés à un foyer particulièrement violent et étendu. Le deuxième consiste à vérifier que l'outil permet de réaliser la technique de progression des sapeurs-pompiers afin d'atteindre le foyer. En effet, avant de pouvoir agir sur le feu, les sapeurs-pompiers doivent avancer en refroidissant les fumées situées en partie haute du volume sans les brasser et les ramener en partie basse où ils sont situés. Le dernier critère permet de s'assurer que l'outil permet le contrôle d'un incendie dans sa phase la plus puissante. Pour chacun de ces critères, une note a été instaurée pour comparer les différents systèmes d'extinction entre eux. Cette note est basée sur un paramètre scientifique calculé à partir des mesures physiques réalisées lors des différents essais.

Cette nouvelle approche a abouti à la rédaction d'un rapport d'essai complet (protocoles, mesures, critères...) [8] et d'une publication scientifique qui reprend en détail la mesure de protection du porteur face au rayonnement thermique [16]. En effet, la mesure d'atténuation du rayonnement est la plus importante car un résultat insuffisant disqualifierait obligatoirement une lance à main. Un travail particulier sur le choix de la source de rayonnement et l'appareil de mesure a donc été réalisé. Il a été démontré que le panneau radiant, qui est une source stable dans le temps et reproductible, peut être utilisé à la place d'un foyer palette, une source variable dans le temps, et qu'un fluxmètre permet d'avoir un résultat final similaire à celui obtenu avec une caméra infrarouge ou un spectromètre. De plus, la Direction Générale de la Sécurité Civile et de Gestion des Crises a créé un label « sécurité civile française » qui permet de savoir si un système d'extinction est conforme aux exigences minimales établies. La figure 1.4 permet de visualiser facilement si un système d'extinction remplit ou non les conditions pour être conforme aux critères

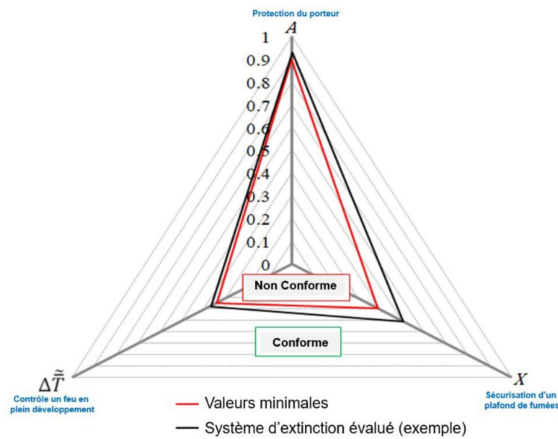


FIGURE 1.4 – Représentation graphique des différents critères retenus dans le cadre de l'approche performantielle [15]

du label, la lance testée doit avoir une note supérieure pour les trois valeurs minimales représentées par le tétraèdre rouge. L'ensemble des protocoles de mesure et critères peuvent être retrouvés dans le référentiel technique « Performance des systèmes d'extinction » [15].

Une des principales conclusions de cette étude a été de démontrer que l'efficacité maximale d'une lance à main n'est pas forcément obtenue pour un débit d'eau maximal. La façon de répartir l'eau a une influence équivalente à la quantité d'eau projetée : une inhomogénéité du spray a pu être observée sur certaines lances, ce qui provoque de fortes variations de concentration en gouttes et donc d'atténuation du flux radiatif. Cette étude novatrice dans le domaine des lances à main a permis de déterminer que certains outils avec un débit inférieur aux  $500 \text{ L min}^{-1}$  réglementaires assurent une protection au moins aussi efficace que des systèmes d'extinction conformes pour certains des critères étudiés.

## 1.2 Etat de l'art : brouillard d'eau et brumisation di-phasique

Maintenant qu'il n'est plus nécessaire d'avoir un débit minimal de  $500 \text{ L min}^{-1}$  pour assurer la sécurité des sapeurs-pompiers, de nouvelles technologies de lance à main peuvent être étudiées. En particulier, les brouillards d'eau sont depuis longtemps identifiés comme ayant un fort potentiel dans la lutte contre l'incendie. On peut citer par exemple le livre de Grimwood [17] qui montre grâce à de nombreuses expérimentations que le débit minimal, avec un système classique, pour contrôler un foyer dans une pièce de  $16 \text{ m}^2$  est de  $2 \text{ L min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . Ce débit doit être doublé pour que les conditions soient supportables pour les intervenants et passe à  $6 \text{ L min}^{-1} \text{ m}^{-2}$  si l'on considère deux pièces. Dans la suite de l'étude les auteurs ont testé un système de brouillard d'eau et ont trouvé que le débit critique (toujours pour contrôler le foyer et non l'éteindre) peut alors être abaissé à seulement  $0,5 \text{ L min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . Ces conclusions ont incité au développement d'un système de

| Diamètre (mm) | Nombre de gouttes (million) | Surface d'échange (m <sup>2</sup> ) |
|---------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| 1             | 2                           | 6.28                                |
| 0.1           | 2000                        | 62.8                                |
| 0.01          | 2 000 000                   | 628                                 |

TABLE 1.1 – Évolution des ordres de grandeurs caractéristiques du spray en fonction du diamètre de goutte pour 1 L d'eau

prévention par brouillard d'eau pour la protection de zones sensibles car il permet, avec une utilisation minimale d'eau, d'agir de façon efficace sur un foyer.

### 1.2.1 Mécanisme d'action de l'eau lors d'un incendie

On sait depuis longtemps que l'eau est un excellent agent d'extinction car elle agit à plusieurs niveaux sur les phénomènes physico-chimique qui contrôlent la combustion. Plusieurs essais en laboratoire ont été réalisés pour mieux comprendre la proportion de ces différents phénomènes. La capacité de refroidissement de l'eau est majoritairement due à l'évaporation des gouttes et subsidiairement à l'échauffement de l'eau puis de la vapeur. La diminution de la taille de goutte, pour une même quantité d'eau, permet d'améliorer le taux d'évaporation du jet car on augmente de manière significative la surface d'échange thermique. Or plus les échanges thermiques sont facilités, plus la capacité du jet à absorber l'énergie du foyer sera élevée, car à quantité d'eau constante le temps d'évaporation diminue lorsque l'on augmente la surface d'échange (i.e. on diminue le diamètre des gouttes). Ainsi, pour 1 L d'eau la surface d'échange peut être multipliée par 100 en changeant le diamètre des gouttes de 1 mm à 10  $\mu$ m comme l'indique le tableau 1.1.

L'eau a également un deuxième effet qui est dû au changement de volume lorsque la phase liquide passe en phase gazeuse. Ainsi un litre d'eau sous phase liquide occupe  $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  tandis qu'un litre d'eau sous phase gazeuse occupe  $1,7 \text{ m}^3$  dans des conditions normales de pression et de température. Ce changement de volume permet une dilution des gaz combustibles et de l'oxygène et donc une baisse de la réactivité et de la combustion.

Il existe également un mécanisme d'interaction chimique avec la flamme car la vapeur d'eau permet de modifier ou de limiter les réactions radicalaires [18] qui ont lieu dans la zone réactive. Certains articles ont démontré que l'ajout d'un additif dans le brouillard permet d'augmenter l'efficacité de l'extinction, par exemple avec de l'hydroxyde de sodium dans les travaux de Chelliah et *coll.* [19] ou avec des additifs plus classiques pour les sapeurs-pompiers, émulseurs ou mouillants, comme lors des essais réalisés par le NIST [20]. Les interactions chimiques étant extrêmement complexes, elles ne seront pas détaillées dans ce manuscrit. Toutefois, le lecteur voulant plus de détails sur ces mécanismes pourra se référer aux références [21, 22] en plus de ceux précédemment cités.

Plusieurs travaux académiques ont essayé de déterminer la prévalence d'un de ces phénomènes par rapport aux autres. Ces essais ont été réalisés en atmosphère contrôlée avec des injections de brouillard à contre-courant ou co-courant afin de contrôler au

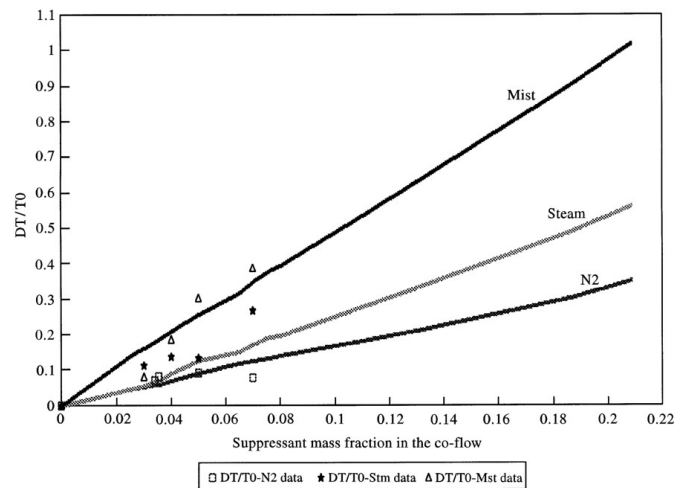


FIGURE 1.5 – Part des phénomènes participants à l'extinction issu de Ndubizu et *coll.* [23]

mieux les conditions expérimentales et de faire varier un paramètre après l'autre. On peut en particulier citer le travail de [23]. Les auteurs ont procédé à l'extinction d'une flamme de diffusion en injectant, à la base de la flamme, un agent extincteur. Trois types d'injections ont été réalisées, en premier uniquement du diazote pour quantifier l'effet de dilution du combustible. Ensuite en injectant directement de la vapeur d'eau pour quantifier les effets de la dilution des gaz et l'absorption d'énergie de la phase gazeuse. Enfin, les auteurs ont utilisé un brouillard d'eau, ayant un diamètre de Sauter de  $50\ \mu\text{m}$ , pour quantifier l'importance de la vaporisation des gouttes sur la flamme. La figure 1.5 permet de visualiser la part de chaque phénomène étudié, les courbes représentent les valeurs théoriques et les puces les résultats expérimentaux obtenus. Malheureusement ces conclusions sont contredites par d'autres expérimentations [24, 25], et la part de chaque phénomène semble fortement dépendante de la configuration expérimentale étudiée. Les mécanismes d'actions de l'eau sont donc bien connus mais leur proportion respective en conditions contrôlées reste à déterminer. L'impact de ces phénomènes dans un incendie à taille réelle, même avec un foyer calibré, est donc actuellement encore mal évalué.

D'autres études [26] et [27] se sont intéressées à l'évolution de la vitesse des gouttes entre leur lieu d'injection et la zone réactive. Ces études cherchent à déterminer si les gouttes peuvent traverser la zone de combustion et donc potentiellement atteindre une surface pyrolysante. La configuration expérimentale consiste en un brouillard ascendant et une flamme de diffusion à contre-courant, la figure 1.6 représente un des deux montages expérimentaux utilisés. La mesure de la vitesse est effectuée avec un « phase doppler anemometer » à trois endroits différents : à l'injection, au moment de l'interaction entre le spray et la flamme et enfin après la zone réactive. Ces deux articles ont montré que la vitesse des gouttes ralentit après la sortie du tube d'injection, effets cumulés de la pesanteur et de la trainée, puis subit une accélération en s'approchant de la zone réactive. Cela est dû à l'évaporation des gouttes lorsqu'elles s'approchent de la zone réactive. Dans les deux articles, les auteurs montrent également qu'un diamètre de goutte minimal est nécessaire pour traverser la zone réactive. Deux diamètres de gouttes différents sont testés,

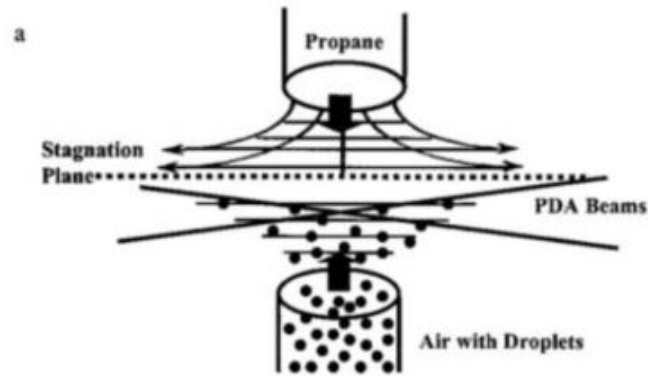


FIGURE 1.6 – Montage expérimental de Zegers et coll. [27]

mais un seul arrive à conserver une phase liquide après son passage à travers la flamme, le diamètre le plus faible s'évaporant complètement. Le diamètre des gouttes qui traversent la zone réactive passe de  $30\ \mu\text{m}$  à  $6\ \mu\text{m}$  et leur vitesse re-diminue après jusqu'à devenir nulle. Malheureusement, aucune corrélation entre une approche théorique et les résultats expérimentaux n'a pu être trouvée par les auteurs.

Enfin, le dernier phénomène est l'absorption du rayonnement par les phases liquide et gazeuse. En effet, si l'on superpose le spectre d'émission d'un corps noir avec le spectre d'absorption de l'eau liquide, dans l'infrarouge, on remarque la capacité de l'eau à absorber le rayonnement. L'application immédiate est la possibilité de protéger une personne ou un objet du rayonnement incident mais aussi de diminuer le retour radiatif qui entretient la pyrolyse si on arrive à projeter cette eau entre la zone rayonnante et la surface qui pyrolyse. Ce phénomène a été étudié dans plusieurs travaux [5,6,28] où il a été mis en avant la forte dépendance de la protection radiative au diamètre des gouttes et à la fraction volumique d'eau. La thèse de Sullivan Lechene [29] propose une étude combinant expérimentations et modèles numériques, avec le logiciel BERGAMOTE, afin de déterminer les techniques d'injection les plus efficaces pour protéger une cible du rayonnement thermique incident.

## 1.2.2 Description des brouillards d'eau

### Caractéristiques et interactions des brouillards d'eau

Les brouillards d'eau permettent de diminuer le diamètre des gouttes composant le spray, par rapport au système de sprinkler classique, et ainsi d'augmenter l'efficacité des échanges thermiques comme cela a été montré dans la partie précédente. Trois paramètres principaux caractérisent les brouillards d'eau : le diamètre, la vitesse et la concentration des gouttes. Différents diamètres peuvent être considérés en fonction de l'usage recherché du spray, le diamètre de Sauter est celui utilisé pour les sprays en incendie car il décrit le mieux la capacité d'échange thermique d'une goutte. Le diamètre de Sauter correspond au rapport du volume d'une goutte et de sa surface. Plus le diamètre de Sauter sera petit et plus les échanges seront favorisés. Toutefois pour classer l'ensemble des brouillards quelle que soit leur utilisation finale, le calcul d'un autre diamètre est privilégié. Ainsi le

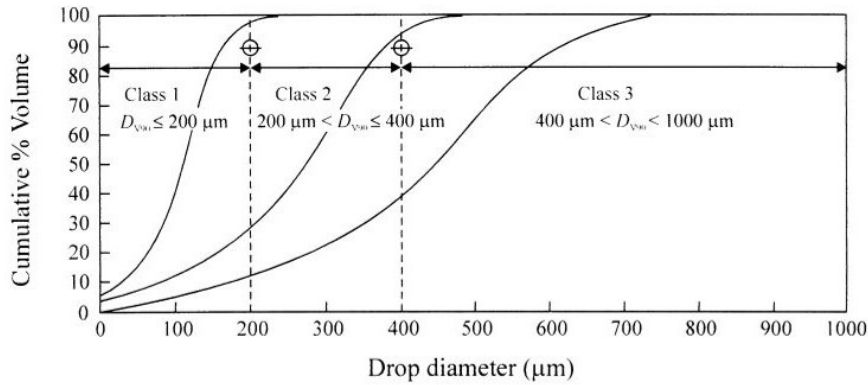


FIGURE 1.7 – Classement international des brouillards d'eau [30]

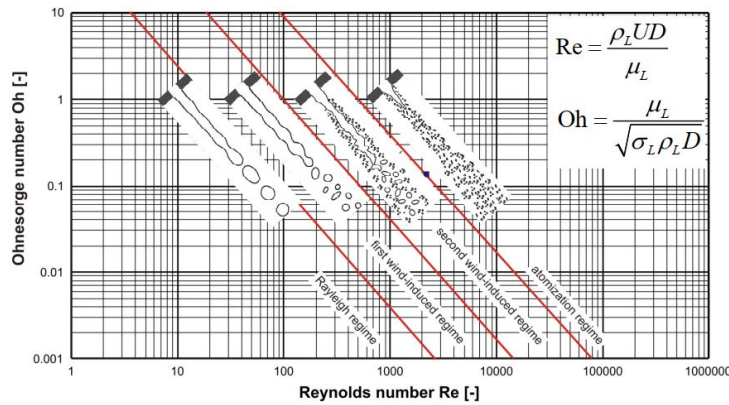


FIGURE 1.8 – Type de fragmentation hydraulique en fonction du nombre de Reynolds et du nombre d'Ohnesorge [31]

classement proposé dans le Fire Protection Handbook [30], illustré par la figure 1.7, utilise le diamètre en deçà duquel 90% du volume total des gouttes sont comprises, soit le  $D_{v90}$ . Le choix d'une classe de spray dépend principalement de l'application qui en sera faite et des conditions environnementales d'utilisation.

Le deuxième paramètre à prendre en compte est la vitesse des gouttes. Ce paramètre va influencer principalement sur deux phénomènes : la fragmentation du jet et son interaction avec une surface. L'atomisation du jet est régie par plusieurs nombres adimensionnels :

- le nombre de Reynolds, qui représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses ;
- le nombre de Weber, qui représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces de tension superficielle ;
- le nombre de Ohnesorge, qui représente le rapport entre les forces visqueuses avec la tension superficielle et les forces d'inertie.

Une autre méthode permettant de modifier la fragmentation consiste à ajouter un autre fluide tensio-actif pour modifier la tension de surface du liquide atomisé. Dans



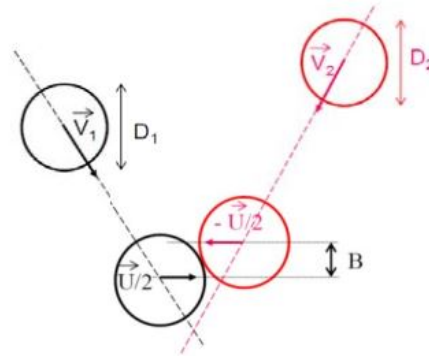


FIGURE 1.9 – Schéma d'une collision entre deux gouttes [32]

notre cas, nous nous intéresserons uniquement à l'eau (des additifs peuvent être ajoutés au système diphasique étudié) et donc le paramètre essentiel pour fragmenter le spray est bien la vitesse de sortie de buse. La fragmentation d'un jet dans l'air a été étudiée pour de nombreux types d'application : injection d'essence, traitement de surface agricole, peinture... La figure 1.8, permet à partir du nombre de Reynolds et d'Ohnesorge, de connaître le type de fragmentation. Le changement de régime intervient en fonction de l'importance des différentes instabilités que subit le spray : Rayleigh-Plateau, Kelvin-Helmholtz et Rayleigh-Taylor. Une seconde atomisation peut également avoir lieu à cause des collisions entre les gouttes à l'intérieur du jet ou lors de l'impact du spray avec une paroi. La collision entre gouttes a été décrite, par exemple, lors d'une conférence du professeur Tropea [32] qui utilise un paramètre de collision  $X$ . L'équation 1.4, avec la figure 1.9, définit les paramètres utilisés pour définir ce nouveau nombre adimensionnel.

$$X = \frac{2 \times B}{D_1 + D_2} \quad (1.4)$$

Avec  $D_1$  et  $D_2$  les diamètres de goutte en m et  $B$  la différence de hauteur entre les deux centres au moment du contact en m également.

Ces travaux permettent de déterminer, si l'on connaît le diamètre des gouttes et la vitesse de ces dernières, le résultat d'une collision entre les gouttes d'un spray. Le graphique 1.10 résume le résultat d'une collision entre deux gouttes en fonction du nombre de Weber et du paramètre de collision. La fragmentation secondaire peut également être provoquée par l'impact de la goutte sur une surface. Ce type d'interaction est important dans le cadre de la lutte contre l'incendie car un spray doit avoir la capacité à déposer une couche d'eau sur les surfaces pyrolysantes pour arrêter la réaction en chaîne. Le livre de Rioboo et coll. [33] décrit les conditions qui permettent aux gouttes de s'étaler sur une surface lors de l'impact et non de rebondir. Un effet particulier, « Leidenfrost effect », est observé lorsque la paroi sur laquelle arrive l'eau atteint une certaine température. Cette température, de  $160^\circ\text{C}$  pour l'eau, provoque une évaporation immédiate en partie basse de la goutte qui va empêcher le reste de la goutte de s'évaporer à son tour. Cet effet disparaît lorsque l'on continue de chauffer la surface, il n'est donc contraignant lors

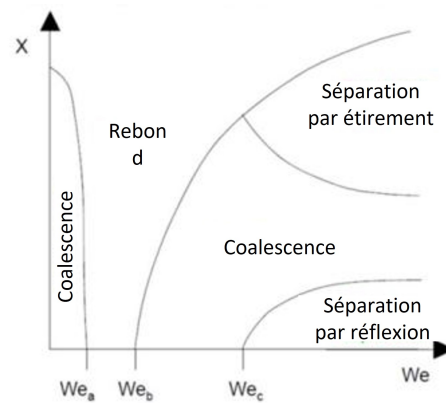


FIGURE 1.10 – Cartographie des différents types de collisions possibles entre gouttes [32]

de la lutte contre l'incendie pour laquelle les températures des surfaces pyrolysantes sont généralement supérieures à  $300^\circ\text{C}$ .

### Génération d'un spray

L'obtention d'un diamètre de goutte assez faible pour être catégorisé comme brouillard nécessite obligatoirement une étape de fragmentation des gouttes. Les phénomènes d'atomisation primaire et secondaire sont détaillés par exemple dans les références [31, 34, 35]. Ces phénomènes dépendent principalement de la vitesse d'éjection, du diamètre de la buse et de la viscosité du fluide. La thèse de Miloud [36] explique la fragmentation d'un jet de métal liquide en détail du point de vue numérique et expérimental.

Les atomiseurs utilisant uniquement de l'eau vont faire varier deux paramètres pour améliorer la fragmentation des gouttes : le diamètre de sortie et la pression d'alimentation. On peut citer, dans les équipements disponibles pour les sapeurs-pompiers, la lance Cobra à haute pression qui a un diamètre de buse de 2,3 mm et une pression d'alimentation de 80 bars. Ce type d'outil permet l'obtention d'un brouillard mais engendre de nombreuses contraintes techniques et logistiques car il s'agit d'un moyen spécialisé avec une formation spécifique pour les intervenants.

La deuxième solution pour fragmenter un fluide est l'utilisation d'une deuxième phase, appelée phase porteuse. Il s'agit alors de dispositifs diphasiques qui associent à l'eau un gaz qui va permettre une fragmentation pneumatique de l'eau et lui transmettre une énergie cinétique importante. Un exemple d'un tel dispositif est le système de protection fixe développé par Siemens en 2010 qui associe à l'eau du diazote, du  $\text{CO}_2$  ou du fluorokétone en fonction des technologies et des contraintes d'utilisation, la thèse de Bourrilhon présente en détail cet outil et la technologie utilisée [37].

Dans le cadre des interventions des sapeurs-pompiers, il faut disposer d'un outil le plus léger et maniable possible. Les sapeurs-pompiers se sont donc naturellement intéressés aux systèmes diphasiques car un tuyau rempli d'air et d'eau est plus léger de 70% par rapport à des tuyaux classiques. Des premiers prototypes ont été réalisés aux États-Unis dans les années 1980 et par la BSPP en 1998. Toutefois, ces outils n'ont pas pu aboutir à

l'époque car les technologies nécessaires n'étaient pas suffisamment matures. La société Zelup a réussi à résoudre les points bloquants des anciens modèles et a donc permis un développement complet d'un système diphasique : tuyau unique transportant air et eau, raccords spécifiques et chambre de fragmentation dans la lance. L'ensemble de ces innovations technologiques a fait l'objet de dépôts de brevet de la part de l'industriel et de la BSPP (numéros WO 2021/234276 A1 et FR 3115714).

### 1.2.3 Description du système diphasique utilisé pendant les travaux

L'ensemble des travaux de thèse ont été menés avec un système diphasique complet et non uniquement sur la lance, c'est-à-dire les tuyaux qui permettent d'emmener les deux phases, air et eau, séparément et la lance. Le mélange s'effectue à l'intérieur de la lance dans la chambre de fragmentation, et un écoulement diphasique (air et gouttelettes) sort de la buse. Les pressions et débits d'alimentation restent proches des valeurs standards comme rappelé dans le tableau 1.2.

| Phase | Diphasique                   |                 | LDMR                         |                 |
|-------|------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|
|       | Débit en L min <sup>-1</sup> | Pression en bar | Débit en L min <sup>-1</sup> | Pression en bar |
| Eau   | 100                          | 7.5             | 500                          | 6               |
| Air   | 2200                         | 7.5             | /                            | /               |

TABLE 1.2 – Conditions d'alimentation de la lance diphasique et d'une lance LDMR

Une modification importante du système d'extinction étudié est l'absence de réglage du débit. Avec cet outil, l'opérateur n'a plus qu'une unique action possible via une manette en partie basse de la lance qui correspond au réglage du jet. Trois positions ont été retenues, en plus de la position neutre. Il s'agit de deux jets diphasiques différents, un premier généré avec une forme de buse plate verticale, et un deuxième formé à l'aide d'une buse ronde qui permet d'obtenir un jet plus concentré et donc avec plus de portée. La figure 1.11 permet de visualiser les deux jets produits par le système diphasique. Leur utilité respective sera décrite plus loin dans ce manuscrit. La dernière position est un jet avec un très faible pourcentage d'air, l'objectif de ce jet est d'éviter une fragmentation trop importante pour augmenter la taille de goutte et ainsi de pouvoir agir plus efficacement la phase solide. Le présent manuscrit ne s'intéressera qu'aux jets diphasiques car le dernier type de jet ne sera pas utilisé lors d'une phase active de l'incendie mais uniquement pour finaliser l'extinction. On peut observer sur la figure 1.12 que la lance diphasique a fortement changé au cours de la thèse. Toutefois la chambre de fractionnement et les conditions d'alimentation sont restées les mêmes entre les différents essais, il ne s'agit donc que d'évolutions ergonomiques et non techniques.



(a) Brouillard produit avec la buse plate



(b) Brouillard produit avec la buse ronde

FIGURE 1.11 – Vue de côté des brouillards produits par le système diphasique



(a) Premier prototype de la lance diphasique, octobre 2019



(b) Version actuelle de la lance diphasique, octobre 2022

FIGURE 1.12 – Évolution de la lance diphasique au cours des travaux de thèse

## 1.3 Études des effets des sprays sur le comportement du feu et des fumées

Lors d'un incendie, une stratification thermique peut se mettre en place avec en partie haute, des fumées chaudes et, en partie basse, une couche d'air plus frais. Cette stratification est due aux effets de flottabilité des fumées. Ce phénomène naturel peut permettre une évacuation plus facile des victimes et également une progression simplifiée pour les sapeurs-pompiers en apportant plus de visibilité et des conditions de progression plus supportables lorsque le plan neutre<sup>1</sup> est situé assez haut. Plusieurs études ont été réalisées pour étudier les interactions entre les sprays et les fumées afin de déterminer l'impact, sur la stratification, de sprinklers ou de rideaux d'eau. Le cas des tunnels a particulièrement été étudié car il s'agit de très longs volumes non encloués qui nécessitent une protection contre l'incendie la plus efficace possible. Dans ce cas, l'objectif n'est pas forcément d'éteindre le foyer mais de préserver les zones non impactées. Des études complémentaires ont été réalisées pour étudier l'extinction dans des volumes de plus petite taille.

### 1.3.1 Interactions entre un spray et un foyer

Une étude paramétrique numérique [38] a permis de trouver les valeurs optimales de diamètres de gouttes, de vitesse et de débit massique afin de réaliser l'extinction d'un feu dans une unique pièce. Les auteurs ont aussi changé la direction d'injection pour déterminer la configuration la plus efficace. L'étude porte sur une pièce de 9,25 m<sup>2</sup> avec un feu de 980 kW en son centre, alimenté en air par une seule ouverture, une porte standard. Les auteurs ont montré que le positionnement le plus optimal des quatre sprinklers est au plafond (ils ne sont pas placés au-dessus du foyer) par rapport à une injection depuis le sol ou depuis les parois latérales. Les temps d'extinction, avec le reste des paramètres constants, varient énormément avec un rapport d'au moins quatre entre l'injection depuis le plafond et celles depuis les parois latérales et de dix avec l'injection depuis le sol. L'étude démontre également qu'à débit massique constant, la diminution du diamètre de goutte (de 200 µm à 100 µm) et l'augmentation de la vitesse de sortie (de 50 cm s<sup>-1</sup> à 100 cm s<sup>-1</sup>) permettent d'encore diminuer le temps d'extinction. Naturellement, l'augmentation du débit massique favorise également l'extinction. Une autre étude expérimentale [39] montre que ces conclusions ne peuvent pas être étendues à des grands volumes et particulièrement lors de feu d'hydrocarbures (il s'agit ici d'un feu de machine de navire) et ce quelle que soit la disposition testée. Les gardes-côtes américains ont également mené des tests [40–42] sur différents volumes pour confirmer ces résultats. Les sprinklers permettent toutefois d'obtenir une extinction dans des volumes confinés par manque d'oxygène, phénomènes qui sera confirmé expérimentalement par une autre équipe de recherche [43]. La thèse d'Alexandre Jenft [44] permet d'avoir une vision générale des phénomènes mis en jeu en comparant les mécanismes d'extinction, et également les développements numériques mis en place afin de les décrire le plus précisément possible.

---

1. Il s'agit du plan séparant la couche de fumée chaude de la couche de fumée froide ou de la couche libre de fumée.

### 1.3.2 Interactions entre un spray et une couche de fumée

Dans la majorité des cas, les sprinklers ne seront pas forcément installés à proximité du départ de feu et n'auront pas d'impact sur le foyer mais sur les fumées et leur écoulement. Une étude expérimentale [45] consistant à remplir une hotte de fumée puis à déclencher l'aspersion a permis de montrer que le brassage est plus important lorsque les fumées sont plus froides ou lorsque l'on augmente la pression d'alimentation de la buse. Cette étude a été réutilisée pour développer un modèle analytique sur le déplacement de fumées lors d'une injection descendante d'un spray [46]. Il s'agit d'une approche par zones s'appuyant sur la résolution des équations de conservation de la quantité de mouvement. Ce modèle a été amélioré en prenant en compte des échanges supplémentaires entre zones qui avaient été négligés dans un premier temps [47] comme représenté sur la figure 1.13. Un deuxième modèle analytique a été réalisé [48] mais nécessite encore d'être confirmé expérimentalement. Cette approche permet également de faire un bilan d'énergie pour estimer les échanges entre le spray, les fumées et la couche d'air en partie basse. Il faut également citer l'article de Heskestad [49], qui permet de faire une montée en échelle pour étudier les phénomènes d'interaction entre un foyer et un système d'extinction par aspersion. Le changement d'échelle ne prend pas en compte l'atténuation radiative qui ne peut être conservée avec ce type d'approche.

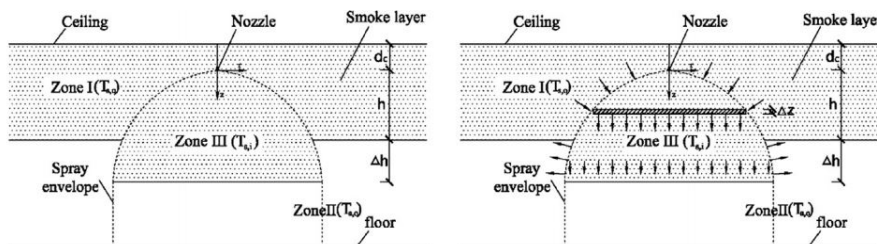


FIGURE 1.13 – Figure extrait de l'article de Tang et *coll.* [47]

Les systèmes d'aspersion sont très utilisés en prévention incendie et, en particulier, dans les tunnels. Toutefois, les effets positifs de ces systèmes doivent être mis en balance avec les effets de dé-stratification qui peuvent mettre les personnes en danger. Plusieurs études numériques cherchent à expliquer les conditions optimales d'alimentation des sprinklers et surtout les logiciels permettant de décrire le mieux possible le refroidissement des fumées et leur déplacement. On peut par exemple citer l'article de Alpert datant de 1985 [50] qui utilise le code TEACH-T pour réaliser les modélisations et des études plus récentes [51, 52] utilisant le logiciel Fire Dynamics Simulator développé par le NIST. Ce second logiciel sera celui utilisé dans le cadre de cette thèse pour la partie simulation numérique. Enfin, l'utilisation d'un système d'aspersion dans les tunnels, qu'il s'agisse de la phase travaux ou exploitation, a été spécifiquement traitée par Mehaddi et *coll.* [53] qui ont montré qu'un rideau d'eau provoquera un brassage complet des couches hautes et basses et donc une dé-stratification optique et thermique. Le bénéfice d'atténuation que confère un rideau d'eau est également très limité car la distance au foyer permet également de diminuer le flux incident. La thèse de Raphaël Meyrand [54] décrit

plus précisément l'ensemble de ces phénomènes et arrive aux mêmes conclusions : l'intérêt limité d'un rideau d'eau en tunnel et d'un sprinkler si la buse n'est pas située directement au dessus du départ de feu (et si celui-ci n'est pas protégé de l'impact direct du spray).

## 1.4 Objectifs de la thèse

Nous avons vu dans cet état de l'art que les brouillards d'eau sont utilisés depuis longtemps et que leurs impacts sur le feu ou les fumées sont déjà très étudiés. Le brassage des fumées, le refroidissement d'un milieu voire même l'extinction du foyer, ont pu être reliés aux différents paramètres d'un spray : vitesse d'injection, granulométrie, fraction massique du spray. . . L'interdiction définitive des halons dans la lutte contre l'incendie en 2003 a en particulier relancé la recherche sur les systèmes d'aspersion. Les brouillards diphasiques ont rapidement montré un fort potentiel pour remplacer les systèmes existants en limitant l'usage de l'eau. Des systèmes de protection fixes ont alors été créés ; la thèse de Thibaut Bourrilhon [37] décrit complètement le fonctionnement d'un des systèmes existants. Toutefois, l'ensemble de ces travaux ne s'intéresse qu'au fonctionnement de buses de taille réduite et de systèmes fixes installés au plafond. Ces études ne permettent pas d'extrapoler au fonctionnement d'un moyen mobile d'extinction qui produirait un spray diphasique injecté du bas vers le haut. Le développement d'un outil opérationnel pour les sapeurs-pompiers nécessite donc de reprendre complètement les travaux déjà menés car les techniques d'utilisation changent, les sapeurs-pompiers travaillent en impulsion et non en spray continu. La géométrie du jet, le débit massique et l'ensemble des caractéristiques de base des sprays changent d'ordre de grandeur. Les moyens de mesures existants pour les buses ne sont pas forcément réutilisables pour une lance à incendie. Toutefois, grâce aux travaux déjà réalisés nous savons déjà quels sont les paramètres importants à mesurer lors de l'étude de brouillard d'eau : forme du jet, taille et vitesse des gouttes. L'approche performantielle permet également de connaître d'ores et déjà les critères que doivent satisfaire le nouvel outil afin d'être, au minimum, aussi efficace que les lances actuelles.

Cette thèse a donc plusieurs objectifs afin de répondre au besoin opérationnel de la BSPP. Tout d'abord, les travaux porteront sur la caractérisation des jets diphasiques : emprise, angle d'ouverture, granulométrie et capacité de protection radiative. La principale difficulté est de trouver les outils permettant ce type de mesure et adaptés à cette nouvelle lance. En effet, tous les essais devront être réalisés directement à échelle 1 car une montée en échelle n'est pas réalisable sans repousser le développement de plusieurs années. Des essais avec feux réels devront ensuite être réalisés afin de mesurer l'efficacité de l'outil pour faciliter la progression des sapeurs-pompiers. Ces essais sont particulièrement complexes à mettre en place car ils nécessitent l'engagement des pompiers sur des feux réalistes en sécurité alors que l'outil est encore expérimental. L'appui de la BSPP sera primordial pour cette partie. Enfin, une recherche expérimentale sur les interactions entre une couche de fumée et un jet ascendant, vertical ou incliné, sera réalisée à l'échelle  $1/5^{\text{ème}}$ , cette fois-ci avec une buse monofluide. L'objectif de cette partie est de déterminer les paramètres influents sur les phénomènes de brassage et de refroidissement dans un couloir lors de l'injection en continu d'un spray. Ces paramètres pourront alors être utilisés

pour améliorer la sécurité des intervenants lors de leur progression ou pour modifier leur technique de lance. Des essais avec une injection descendante seront également réalisés afin de comparer à la littérature déjà existante. De plus, des simulations numériques de la maquette seront réalisées pour obtenir les bilans énergétiques des différents cas testés afin de trouver les paramètres optimaux du spray pour refroidir la phase gazeuse.



# Chapitre 2

## Caractérisation complète des deux jets diphasiques

Le système diphase étudié est entièrement nouveau et doit donc être complètement caractérisé. Dans un premier temps, il a donc fallu mener différentes campagnes de mesures pour obtenir la portée et l'angle d'ouverture des différents jets qui sont les grandeurs caractérisant habituellement les lances à main. Pour le système diphase, d'autres mesures ont été réalisées car, comme nous l'avons vu précédemment, la taille et la vitesse des gouttes sont des paramètres essentiels lorsque l'on s'intéresse à des brouillards. Ces données à échelle microscopique sont extrêmement rares pour les lances actuelles.

### 2.1 Mesures des caractéristiques géométriques

Avant l'approche performantielle, et la modification de la doctrine nationale, les moyens d'extinction manuels devaient répondre à un certain nombre d'exigences :

- un débit minimal de  $500 \text{ L min}^{-1}$  ;
- un couple maximum de résistance pour les pièces de réglages ;
- une masse et des dimensions maximales en fonction du débit de la lance ;
- un angle de diffusion en sortie de buse de  $30^\circ$  pour un jet diffusé étroit et de plus de  $100^\circ$  pour un jet diffusé large.

L'ensemble de ces paramètres et des configurations expérimentales permettant de les mesurer sont décrits dans la norme NF EN 1585-2. Même si l'approche performantielle évoquée en 1.1.3 a permis de changer certaines de ces exigences en les remplaçant par un critère d'efficacité, certaines données comme la portée et l'angle d'ouverture restent utiles pour décrire l'outil utilisé. Ce chapitre est donc dédié dans un premier temps à la mesure de la portée et des angles d'ouvertures des deux jets diphasiques, puis la capacité d'atténuation respective des jets sera étudiée à la fin pour s'assurer que la lance puisse être utilisée en toute sécurité en conditions de feux réels.

### 2.1.1 Présentation de la configuration d'essai

Actuellement, il existe un protocole de mesure dans la norme NF EN 1585-2 permettant de mesurer, entre autres, la portée et l'angle d'ouverture des jets. La mesure de l'angle d'ouverture se fait en activant le spray à 1 m d'un mur comprenant trois zones différentes. Une zone pour un angle inférieur à  $30^\circ$ , une zone pour un angle entre  $30^\circ$  et  $100^\circ$  et la dernière pour les angles d'ouvertures de plus de  $100^\circ$ . Il suffit alors d'observer l'impact du jet pour savoir s'il respecte la norme. Dans notre cas aucun angle particulier n'est prescrit, il a été choisi de modifier le protocole pour mesurer précisément ces grandeurs. Pour déterminer la portée efficace d'une lance, cette dernière est positionnée à 1 m du sol avec un angle de  $30^\circ$  vers le haut pour augmenter la portée comme cela est pratiqué en intervention. La portée efficace de la lance est alors définie comme 90 % de la portée mesurée, 100 % correspondant à la distance où retombent les dernières gouttes détectées. Cette définition n'est pas adaptée aux brouillards d'eau, car les gouttes d'eau, ayant un diamètre très faible, peuvent être transportées à longue distance sans que l'on puisse réellement parler de portée du jet.

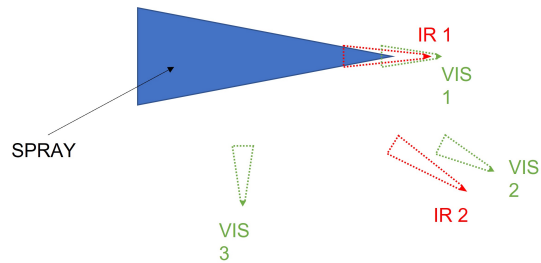
Un nouveau protocole adapté à l'outil a été choisi de manière à définir le mieux possible la portée des jets diphasiques. Il a été décidé de positionner la lance sur un support fixe à 1,3 m du sol et sans angle pour éviter les rebonds des gouttes au sol. Des tissus noirs ont été mis au sol et sur les murs pour éviter les reflets dus à l'eau et ainsi faciliter le post-traitement. Des projecteurs ont également été répartis sur toute la longueur du jet pour permettre sa visualisation. Deux caméras de type GoPro HERO5 Black ont été installées pour filmer latéralement et visualiser l'ensemble du jet et une autre est positionnée à l'arrière de la lance filmant le point de vue d'un porteur de lance. Deux caméras infrarouge Optris IP400 ont également été positionnées, une sur le côté et une derrière le jet. La figure 2.1 présente la disposition du banc d'essai dans son ensemble et l'emplacement des différentes caméras. Le calcul de la portée sera fait à partir des images infrarouges, car les essais ont été effectués en hiver et le contraste entre l'eau et l'air ambiant permet de détecter le jet. Les images dans le domaine visible n'ont pas permis de faire la mesure car un éclairage homogène de tout le spray n'était pas réalisable, on peut l'observer sur la figure 1.11, malgré l'utilisation du matériel d'éclairage professionnel mis à disposition par le bureau communication de la BSPP. Les portées effectives des jets et leurs angles d'ouvertures seront déterminés à partir d'une analyse des images et de la détection du contour des jets. Ce protocole ne ressemble donc pas à celui de la norme mais permet de mesurer l'ensemble des caractéristiques géométriques voulues.

### 2.1.2 Méthode de post-traitement

Les images qui permettent d'obtenir les caractéristiques du jet sont obtenues suite à un post traitement appliqué aux images issues d'une caméra infrarouge comme celle présentée à la figure 2.2. On peut observer sur la droite de la figure la lance sur son support et l'empreinte du jet, la tache noire étant le dépôt d'eau sur le tissu au sol. Cette image permet de visualiser l'ensemble du jet, mais la caméra a dû être placée avec un léger angle, car le recul suffisant ne pouvait être obtenu. Une correction sera apportée à ce défaut de prise de vue grâce à des mires placées dans le plan du jet avant chaque mesure.



(a) Photographie de la configuration expérimentale



(b) Disposition schématique des caméras vue de haut

FIGURE 2.1 – Banc d'essai pour la mesure de la portée et de l'angle d'ouverture

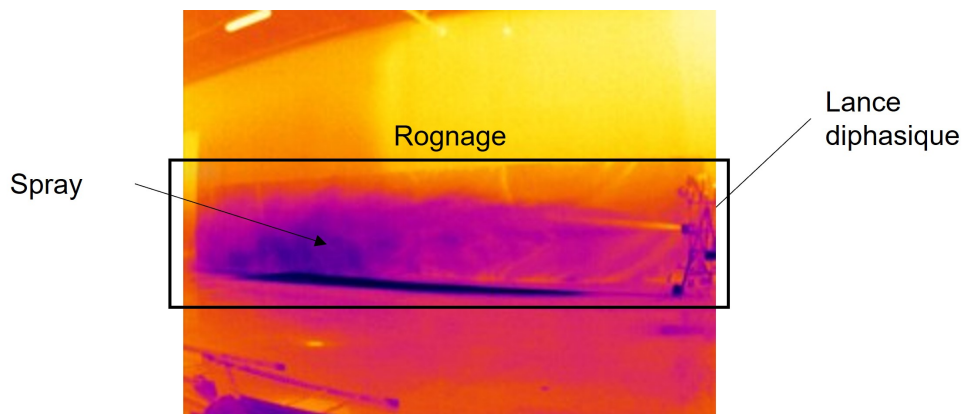
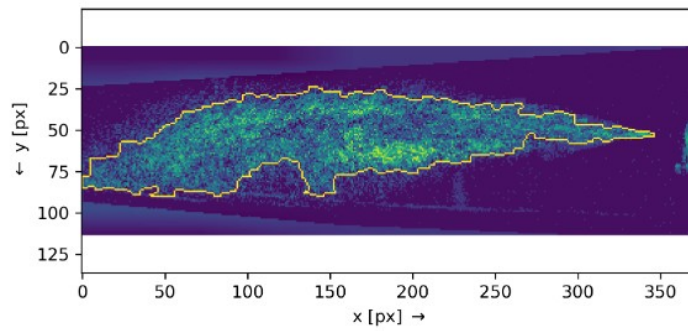
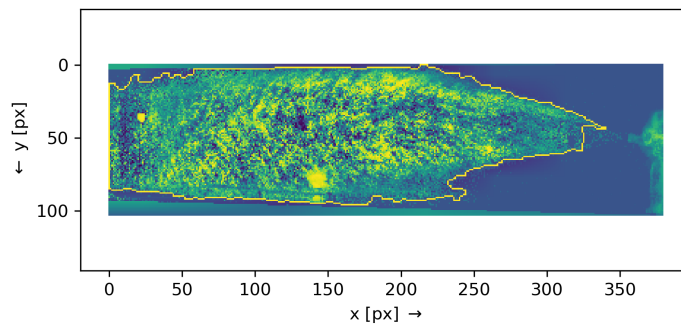


FIGURE 2.2 – Exemple d'une image obtenue avec la caméra infrarouge située sur le côté



(a) Cumul des détections de mouvement sur une image de fond pour la buse ronde



(b) Cumul des détections de mouvement sur une image de fond pour la buse ronde

FIGURE 2.3 – Exemple de la détection du contour suite au seuillage pour les deux buses

La première étape consiste en une détection des pixels qui changent entre deux images consécutives. Cette technique permet de soustraire le fond qui reste immobile tout le long de l'essai et ainsi de faire disparaître la tache noire au sol due au dépôt d'eau. Toutefois, le jet étant très turbulent, la comparaison d'une image à l'autre ne permet de détecter que certaines zones du jet. Afin de trouver l'empreinte totale du jet, un cumul est effectué sur toute la durée de l'enregistrement, ce cumul est reporté sur un fond sans jet. Ainsi, pour chaque pixel, on détecte s'il change par rapport à l'image précédente. Si un mouvement est détecté alors le pixel correspondant sur l'image de fond augmente sa valeur d'un et l'on recommence à l'image d'après. Grâce à cette valeur cumulée l'image peut être traduite en niveau de gris qui est seuillée par la suite pour être transformée en image binaire. La détection du bord du spray sera alors effectuée sur cette image comme illustré sur la figure 2.3. Tous ces traitements d'image ne permettent pas encore de transformer les pixels en distance, il reste encore l'étape de calibration à effectuer.

Cette calibration est nécessaire afin de prendre en compte l'angle de prise de vue et la déformation due à l'objectif de la caméra infrarouge. Des cadres ont été positionnés avant l'établissement du jet dans le plan central du jet et des marquages ont été positionnés sur chacun des cadres. Nous avons donc quatre distances de références comme indiqué sur la figure 2.4, une sur chaque cadre entre les marques et deux entre les cadres. Ces distances permettent de faire correspondre un nombre de pixel à une distance réelle.

On obtient alors la figure 2.5, où les pixels ont été remplacés par les distances réelles.

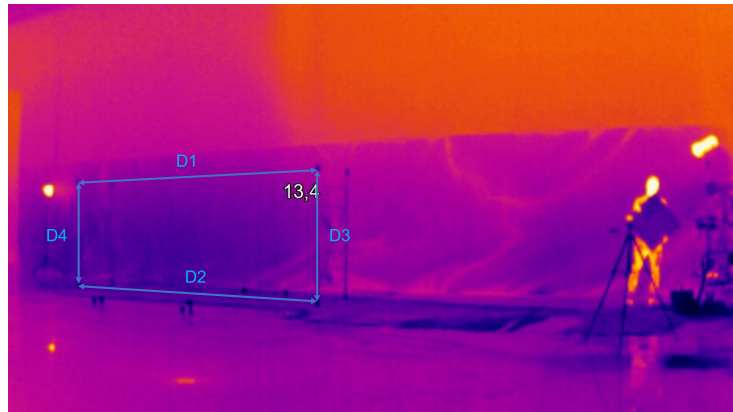


FIGURE 2.4 – Visualisation de la calibration infrarouge

La figure a également été retournée pour que la distance soit croissante en allant vers la droite.

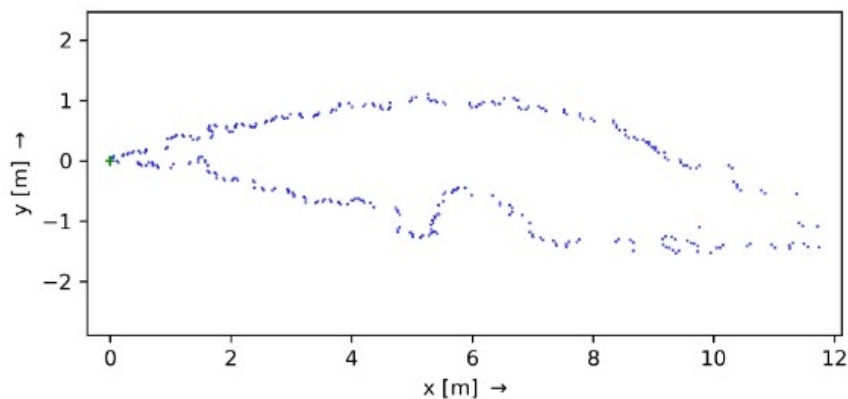


FIGURE 2.5 – Visualisation du contour recalibré du spray pour la buse ronde

### 2.1.3 Présentation des résultats obtenus

Deux approximations linéaires, une sur la partie haute et une sur la partie basse du contour, sont effectuées sur le premier mètre du jet pour déterminer l'angle d'ouverture des jets. La longueur du jet est directement accessible après calibration. On peut également trouver une « hauteur maximale » du jet, mais cette notion n'est pas utile pour les applications nécessaires aux sapeurs-pompiers. L'ensemble des caractéristiques mesurées est résumé dans le tableau 2.1<sup>2</sup>. Les mesures avec un astérisque sont des mesures minimales, la configuration expérimentale ne permettant pas de mesurer au-delà de ces dimensions. Ainsi les deux buses ont la même portée mesurée, d'au moins 12 mètres. Toutefois la portée de la buse ronde est supérieure en réalité mais n'a pas pu être mesurée à

2. Une troisième buse a été testée mais n'a pas été retenue car elle n'a pas montré de réelle plus-value.

cause du manque de recul des appareils de mesure, malgré un objectif grand angle. On trouve que la buse ronde a un angle d'ouverture inférieur à la buse plate ce qui correspond à un jet plus concentré. La mesure obtenue pour la buse plate est limitée car l'absence de fond noir au-delà de 3 mètres ne permet plus d'assurer la mesure. La buse plate permet donc de répartir l'eau sur une plus grande hauteur que la buse ronde mais n'a pas la même portée. La buse ronde sert donc à attaquer la phase solide et à déposer de l'eau à longue distance alors que la buse plate sert à traiter la phase gazeuse dans son ensemble en couvrant une grande surface. Les lances actuelles doivent avoir une portée minimale de 30 mètres lorsqu'elles sont alimentées à 400 litres par minutes, en jet plein et avec un angle de 30°. Le système diphasique ne permet pas d'avoir une portée équivalente car le jet concentré présent sur les lances actuelles n'existe pas sur ce nouvel outil. De plus un brouillard d'eau est soumis de manière plus importante aux forces de traînée et subit un ralentissement plus rapide qu'un jet concentré à haut débit. Des changements du réglage du rapport eau-air ont été effectués dans le cadre de la lutte contre les feux de forêt pour augmenter la portée et l'effet mécanique du jet. Ces changements ne semblent pas pertinents dans le cadre des feux urbains classiques.

| Buse  | Longueur en m | Hauteur en m  | Angle sur 1 m en ° |
|-------|---------------|---------------|--------------------|
| Ronde | 12*           | $2.2 \pm 0.2$ | $27 \pm 3$         |
| Plate | 12*           | 3*            | $41 \pm 1$         |

TABLE 2.1 – Géométries des jets obtenues lors des essais

## 2.2 Mesure de la vitesse et de la taille des gouttes

Dans un deuxième temps, une mesure des caractéristiques microscopiques a été réalisée. Nous avons pu voir l'importance des grandeurs telles que le diamètre et la vitesse des gouttes. En effet, ce sont ces caractéristiques physiques qui peuvent permettre une meilleure évaporation des gouttes ou une meilleure pénétration des gouttes dans la zone réactive. Par ailleurs, la société Zelup nous a fourni des corps de lances plus adaptées à la réalisation des essais car de forme rectangulaire et avec des filetages pour pouvoir fixer facilement la lance et s'assurer de la stabilité durant tout le temps de la mesure. Ces lances ont été utilisées pour réaliser les mesures de tailles et de vitesses de gouttes mais aussi la mesure d'atténuation du flux qui sera présentée par la suite. Ces lances sont alimentées selon les mêmes conditions que celles décrites dans le chapitre 1 et produisent le même type de jet. Les mesures réalisées sont donc identiques à celles qui auraient pu être faites sur les lances opérationnelles.

### 2.2.1 Présentation de la méthode de mesure

Habituellement, les caractéristiques d'un spray peuvent être mesurées par deux méthodes différentes. L'anémométrie laser Doppler [55–57] permet de mesurer la vitesse des particules et les systèmes à diffraction laser [58, 59] permettent de mesurer la tailles des

gouttes. Ces appareils sont dimensionnés pour réaliser des mesures sur des sprays de faibles dimensions dans de nombreux domaines (agriculture, peinture. . .). Les essais sont principalement réalisés sur banc de mesure en laboratoire car l'ensemble des appareils de mesure doit être fixe pour conserver l'alignement des différents organes de visée. De plus, ces appareils ne doivent pas être impactés par le jet, car la source laser n'est pas protégée et l'adaptation nécessiterait un important travail préparatoire. Une opportunité s'est présentée au cours de la thèse pour acquérir un nouvel appareil qui permet de déporter la source laser et ainsi de positionner les optiques de mesures directement dans le jet ; il s'agit du SpraySpy de AOM system. Cet instrument de mesure utilise une nouvelle technique de mesure : « Time Shift System ». Le principal avantage de cet outil, en plus de pouvoir le positionner dans un spray, est de pouvoir réaliser la mesure de vitesse ( $< 100 \text{ m s}^{-1}$ ) et de taille de goutte ( $> 1 \mu\text{m}$ ) en même temps. De plus, aucun réglage d'alignement entre des optiques d'émission et de réception n'est nécessaire ce qui facilite sa mise en place. Une description détaillée de la méthode de mesure peut être trouvée pour la partie théorique et expérimentale dans plusieurs articles [1, 60, 61]. Une approche numérique a également été réalisée par Li et *coll.* [62], on y retrouve aussi le développement de l'outil numérique mis en place pour exploiter les résultats.

Cet appareil permet d'obtenir le diamètre moyen des gouttes  $D_{avg}$  mais également le diamètre en deçà duquel 10% du volume total des goutte est compris, soit le  $D_{V10}$ . On peut également déterminer le  $D_{V90}$  déjà présenté dans la partie 1.2.2 qui permet de classer les brouillards d'eau en différentes classes de sprays. Les mêmes données peuvent être obtenues sur les vitesses des gouttes.

### 2.2.2 Présentation de la configuration d'essai

Les essais ont été réalisés en intérieur dans une halle de 20 mètres de longueur, 15 mètres de largeur et une hauteur sous plafond minimale de 7 mètres. Cette configuration permet de ne pas être impacté par un vent extérieur et de ne pas avoir d'effet des parois sur le jet. La lance est positionnée sur un support fixe à 1,3 m du sol sans angle de tangage (jet horizontal). Le jet s'épanouit dans l'ensemble du volume. Les mesures ont été effectuées tous les mètres sur l'axe central de la lance jusqu'à ce que le temps d'acquisition devienne trop important pour continuer à reculer. Le temps d'acquisition est lié à la densité de goutte détecté, au minimum 1000 gouttes doivent être mesurées. La distance maximale varie donc en fonction de la buse considérée. De plus, la mesure à 2 m pour la buse ronde n'a pas été réalisée car l'impact sur le trépied maintenant le SpraySpy était trop important à cette distance. Par ailleurs, deux coupes transversales ont été réalisées à 4 m et 6 m. Ces coupes ont consisté en une mesure tous les 25 cm selon l'axe vertical. Les mesures sont également arrêtées lorsque le temps d'acquisition devient trop important (moins de 1 goutte toute les 2 secondes). Les distances de 4 m et 6 m ont été choisies par les sapeurs-pompier, car elles correspondent aux distances auxquelles ils vont généralement impacter des objets ou directement le foyer. On peut observer sur la figure 2.6 la lance sur son support, sur la droite de l'image, ainsi que la partie comprenant les optiques de mesure du SpraySpy positionnée sur le trépied. La source laser et l'ordinateur d'acquisition ne sont pas visibles, car ils ont été déportés pour être protégés du jet.



FIGURE 2.6 – Photographie du banc d'essai pour les mesures de granulométrie et de vitesse des gouttes

| Types de mesures            |           | Mesure à 3 m |        | Mesure à 6 m |        |
|-----------------------------|-----------|--------------|--------|--------------|--------|
|                             |           | Test 1       | Test 2 | Test 1       | Test 2 |
| Diamètre en $\mu\text{m}$   | $D_{V10}$ | 94           | 105    | 75           | 91     |
|                             | $D_{avg}$ | 181          | 188    | 206          | 211    |
|                             | $D_{V90}$ | 282          | 284    | 336          | 333    |
| Vitesse en $\text{ms}^{-1}$ | $V_{V10}$ | 16           | 16     | 7            | 7      |
|                             | $V_{avg}$ | 20           | 21     | 10           | 10     |
|                             | $V_{V90}$ | 25           | 25     | 13           | 13     |

TABLE 2.2 – Mesures de répétabilité effectuées sur la buse plate à deux positions différentes : 3 m et 6 m de la buse.

### 2.2.3 Présentation des résultats sur le système diphasique

L'appareil de mesure SpraySpy nécessite de choisir la vitesse maximale de détection que l'on souhaite mesurer, ce choix imposant la vitesse minimale qui équivaut à 10% de la vitesse maximale. Ce réglage est particulièrement sensible car les gouttes en dehors de la plage de détection ne seront pas mesurées et les résultats sur les valeurs de vitesses et de diamètres du spray seront alors faussés (une analyse particulière de ce paramètre sera effectuée par la suite). Le tableau 2.2 reprend l'ensemble des mesures de répétitions réalisées. On peut observer que les écarts sont très faibles en ce qui concerne le  $D_{avg}$  et le  $D_{V90}$ , de l'ordre du pourcent. L'écart est plus important sur le  $D_{V10}$ , de l'ordre de 10% entre les deux mesures. Les résultats obtenus permettent d'estimer une précision de mesure de  $\pm 7,5 \mu\text{m}$  pour le diamètre et de  $\pm 1 \text{ms}^{-1}$  pour la vitesse.

L'ensemble des mesures effectuées sur l'axe central du jet est repris dans le tableau 2.3 pour la buse plate et le tableau 2.4 pour la buse ronde. La figure 2.7 permet une visualisation plus rapide de l'évolution de diamètre de goutte moyen et de la vitesse moyenne. On remarque que, pour les deux buses, la vitesse moyenne décroît lorsque l'on s'éloigne de la lance, ce résultat est dû à la force de traînée. On retrouve également que la



| Types de mesures             |           | Distance |     |     |     |     |     |
|------------------------------|-----------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                              |           | 2 m      | 3 m | 4 m | 5 m | 6 m | 7 m |
| Diamètre en $\mu\text{m}$    | $D_{V10}$ | 106      | 84  | 72  | 70  | 75  | 69  |
|                              | $D_{avg}$ | 175      | 175 | 186 | 191 | 206 | 195 |
|                              | $D_{V90}$ | 259      | 287 | 307 | 310 | 336 | 322 |
| Vitesse en $\text{m s}^{-1}$ | $V_{V10}$ | 20       | 13  | 11  | 10  | 7   | 6   |
|                              | $V_{avg}$ | 26       | 18  | 15  | 13  | 10  | 9   |
|                              | $V_{V90}$ | 32       | 23  | 19  | 16  | 13  | 11  |

TABLE 2.3 – Résultats des diamètres et vitesses de gouttes mesurés sur l’axe central avec la buse plate.

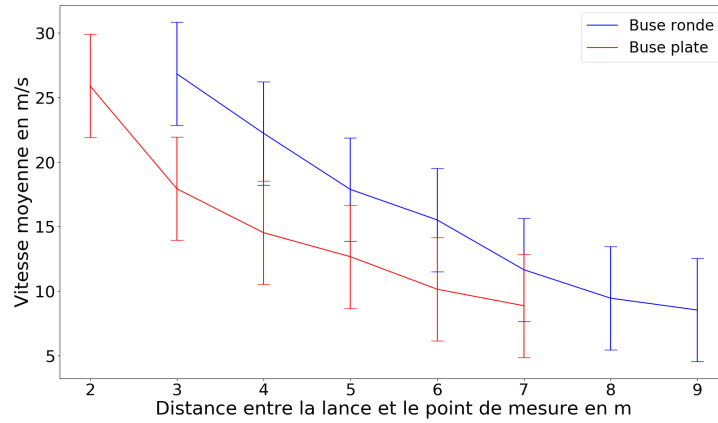
| Types de mesures             |           | Distance |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------|-----------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                              |           | 3 m      | 4 m | 5 m | 6 m | 7 m | 8 m | 9 m |
| Diamètre en $\mu\text{m}$    | $D_{V10}$ | 150      | 91  | 56  | 123 | 97  | 74  | 65  |
|                              | $D_{avg}$ | 241      | 192 | 171 | 235 | 214 | 209 | 194 |
|                              | $D_{V90}$ | 331      | 293 | 283 | 349 | 340 | 337 | 322 |
| Vitesse en $\text{m s}^{-1}$ | $V_{V10}$ | 20       | 17  | 13  | 12  | 8   | 7   | 6   |
|                              | $V_{avg}$ | 27       | 22  | 18  | 16  | 12  | 9   | 9   |
|                              | $V_{V90}$ | 34       | 28  | 23  | 20  | 15  | 12  | 11  |

TABLE 2.4 – Résultats des diamètres et vitesses de gouttes mesurés sur l’axe central avec la buse ronde.

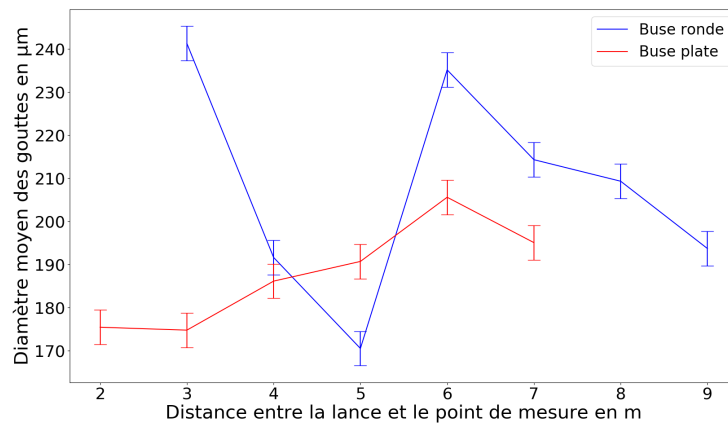
vitesse moyenne est supérieure pour la buse ronde ce qui permet d’effectuer les mesures jusqu’à 9 m sans augmenter de manière déraisonnable le temps d’acquisition.

Les deux buses ont par contre un comportement très différent en ce qui concerne l’évolution du diamètre moyen de gouttes le long de l’axe. On observe une augmentation du diamètre moyen pour la buse plate avec la distance ce qui correspond à la perte des plus petites gouttes qui sont ralenties plus rapidement. A l’inverse, la buse ronde produit un spray avec un diamètre moyen de goutte qui diminue jusqu’à 5 m puis une forte rupture est observée pour revenir au diamètre moyen initial et de nouveau décroître jusqu’à 9 m. Ce résultat est totalement inattendu et a nécessité une étude plus approfondie de ce phénomène.

On remarque sur le tableau 2.4 que l’ensemble des diamètres mesurés ( $D_{V10}$ ,  $D_{avg}$ , et  $D_{V90}$ ) subit cette rupture. Il ne s’agit donc pas d’une part plus importante de gouttes de fort diamètre mais bien de la disparition d’une famille de goutte entière. La figure 2.8 représente la répartition des diamètres de gouttes à 5 m et 6 m, soit avant et après la rupture observée sur la figure 2.7b. On remarque qu’une partie importante des petites gouttes détectées à 5 m n’est plus présente sur l’axe du jet à 6 m. Cette cassure correspond bien à une réalité physique qui avait déjà été détectée lors de la détermination de l’empreinte du jet. En effet, si l’on revient à la figure 2.5, on observe un creux dans le jet issu de la buse ronde entre 5 m et 6 m. Les mesures réalisées concordent donc pour indiquer qu’une part

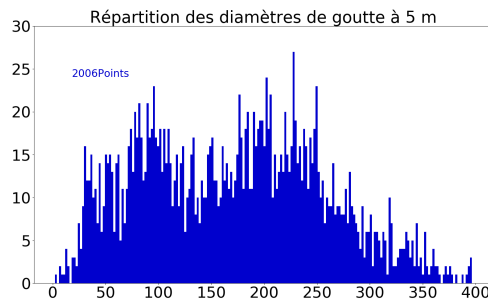


(a) Mesures des diamètres moyens réalisées sur l'axe pour les deux jets

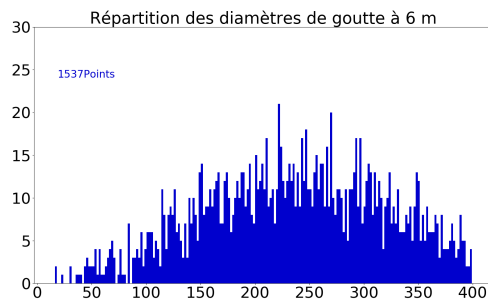


(b) Mesures des vitesses moyennes réalisées sur l'axe pour les deux jets

FIGURE 2.7 – Évolution de la vitesse moyenne  $V_{avg}$  et du diamètre moyen  $D_{avg}$  des gouttes dans l'axe du spray pour chaque buse



(a) Histogramme des diamètres de gouttes à 5 m de la buse ronde



(b) Histogramme des diamètres de gouttes à 6 m de la buse ronde

FIGURE 2.8 – Répartition du diamètre des gouttes avant et après la cassure

importante des petites gouttes est déposée avec ce spray à la moitié de la portée totale.

En complément de ces mesures, deux coupes verticales ont été réalisées à 4 m et 6 m. Le schéma de la figure 2.9 représente les emplacements choisis pour effectuer les mesures. Les points de mesure à 6 m sont similaires à ceux représentés sur le schéma. Le choix des distances de mesure a été fait par la BSPP. Ces distances correspondent à celles où le jet impacterait une surface solide dans le cas d'un feu de contenant (appartement, local technique...). Les mesures pour la buse plate sont représentées sur la figure 2.10 et sur la figure 2.11 pour la buse ronde. L'ensemble des mesures est disponible en annexe .1 pour plus de détails.

Ces mesures montrent des variations de diamètre moyen de gouttes relativement faibles sur la verticale. Un écart de 4,3% a été mesuré pour la buse ronde à 4 m (la distance

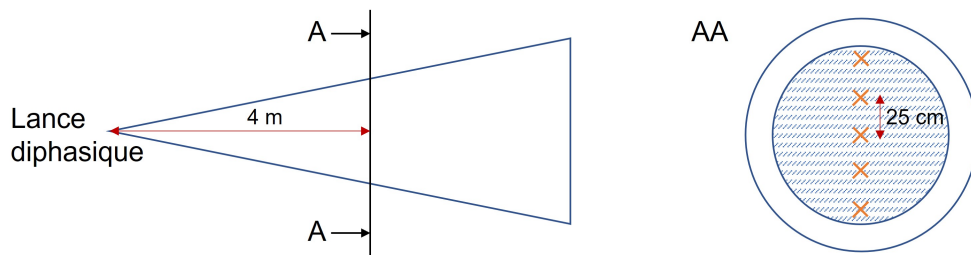
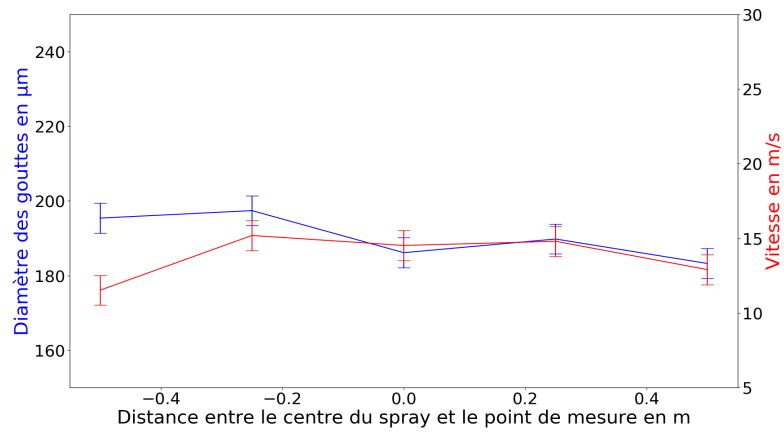
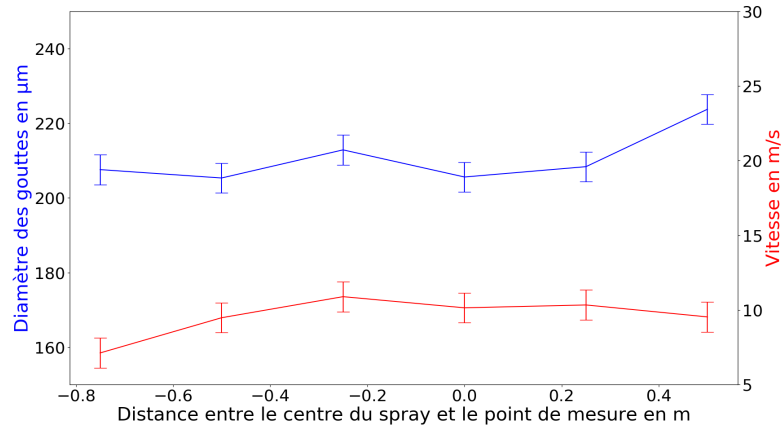


FIGURE 2.9 – Schéma des mesures verticales réalisées à 4 m



(a) Mesure verticale à 4 m pour la buse plate



(b) Mesure verticale à 6 m pour la buse plate

FIGURE 2.10 – Évolution du diamètre moyen et de la vitesse moyenne des gouttes pour la buse plate lors de mesures verticales

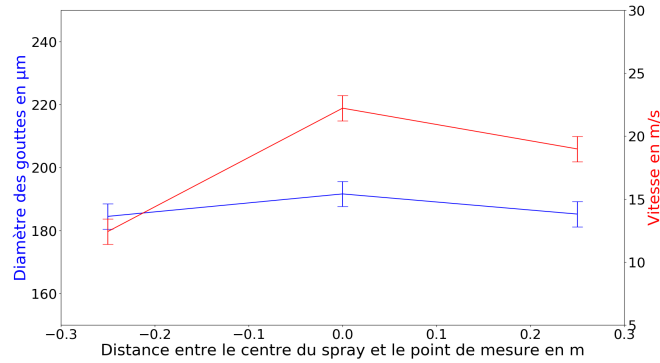


FIGURE 2.11 – Évolution du diamètre moyen et de la vitesse moyenne des gouttes pour la buse ronde lors des mesures verticales à 4 m

maximale entre deux points de mesure est de 50 cm) et de 7,4% pour la buse plate (la distance maximale est alors de 1 m). La variation du diamètre au sien de la coupe augmente lorsque l'on s'éloigne de la buse. On obtient une dispersion de 9% à 6 m pour la buse plate (l'amplitude verticale des mesures a également augmenté pour atteindre 1,25 m). Les variations des vitesses moyennes sont, quant à elles, très importantes même sur de petites distances avec un écart de 56,6% à 4 m pour la buse ronde entre une mesure au niveau de l'axe et une autre 25 cm en-dessous. Le même constat est vérifié pour la buse plate avec un écart de 21,4% et 42,1% à respectivement 4 et 6 m. Dans l'ensemble, la vitesse maximale est toujours située au centre du jet, les gouttes les plus lentes se retrouvent en partie basse et la partie haute du jet a un comportement proche du cœur du spray. Les jets diphasiques sont donc homogènes selon l'axe vertical, en ce qui concerne la granulométrie mais non les vitesses.

Ces essais ont permis d'obtenir les caractéristiques sur la taille et la vitesse des gouttes présentes dans les jets diphasiques, deux paramètres essentiels pour décrire un brouillard d'eau. En se référant au classement présenté dans la section 1.7, les deux jets diphasiques étudiés peuvent être considérés comme des brouillards de classe 2. Un phénomène inattendu a aussi pu être mis en avant sur la buse ronde avec une perte importante de gouttes de faible diamètre entre 5 m et 6 m.

#### 2.2.4 Limite à apporter aux résultats obtenus

Lors du traitement des données, une forte dépendance au réglage de l'appareil par l'opérateur a été observée. En effet, une variation importante des résultats a été remarquée en fonction de la grandeur  $V_{max}$  renseignée. Le tableau 2.5 reprend les résultats obtenus pour un même point de mesure mais avec deux réglages différents. Le choix des deux vitesses maximales a été fait en observant les histogrammes (de l'interface du logiciel) et en cherchant la plage de mesure la plus adaptée. À savoir, aucune coupure ne doit être visible au niveau des faibles vitesses et au niveau des fortes vitesses. Pourtant les résultats obtenus diffèrent fortement avec des écarts de plus de 10% sur la mesure du

| Types de mesures             |           | $V_{max} = 40 \text{ m s}^{-1}$ |        | $V_{max} = 30 \text{ m s}^{-1}$ |
|------------------------------|-----------|---------------------------------|--------|---------------------------------|
|                              |           | Test 1                          | Test 2 | Test 1                          |
| Diamètre en $\mu\text{m}$    | $D_{V10}$ | 94                              | 105    | 84                              |
|                              | $D_{avg}$ | 181                             | 188    | 175                             |
|                              | $D_{V90}$ | 282                             | 284    | 287                             |
| Vitesse en $\text{m s}^{-1}$ | $V_{V10}$ | 16                              | 16     | 13                              |
|                              | $V_{avg}$ | 20                              | 21     | 18                              |
|                              | $V_{V90}$ | 25                              | 25     | 23                              |

TABLE 2.5 – Mesures de répétabilité effectuées avec deux réglages différents à 3 m

| Types de mesures             |           | $V_{max} = 20 \text{ m s}^{-1}$ |        | $V_{max} = 30 \text{ m s}^{-1}$ |        |
|------------------------------|-----------|---------------------------------|--------|---------------------------------|--------|
|                              |           | Test 1                          | Test 2 | Test 1                          | Test 2 |
| Diamètre en $\mu\text{m}$    | $D_{V10}$ | 75                              | 91     | 53                              | 64     |
|                              | $D_{avg}$ | 206                             | 211    | 152                             | 175    |
|                              | $D_{V90}$ | 336                             | 333    | 271                             | 294    |
| Vitesse en $\text{m s}^{-1}$ | $V_{V10}$ | 7                               | 7      | 7                               | 7      |
|                              | $V_{avg}$ | 10                              | 10     | 10                              | 11     |
|                              | $V_{V90}$ | 13                              | 13     | 13                              | 14     |

TABLE 2.6 – Mesures de répétabilité effectuées avec deux réglages différents à 6 m

diamètre moyen pour 2 réglages différents. Une deuxième série de mesure a été réalisées à 6 m, les résultats sont présentés dans le tableau 2.6. L'écart mesuré, pour les deux réglages, est cette fois-ci de 27 %. Cette forte hausse de l'erreur de mesure a été attribué a une erreur de mesure sur le test 1 réalisé avec la  $V_{max}$  de  $30 \text{ m s}^{-1}$  (en rouge dans le tableau). Malheureusement d'autres mesures n'ont pas pu être réalisées pour confirmer ou infirmer ces hypothèses, car ce résultat n'a été obtenu que lors du post-traitement complet et que l'organisation d'une nouvelle campagne de mesure n'était plus possible.

Les résultats présentés précédemment doivent donc être considérés avec une incertitude d'environ 10%. La partie 4.1.2 de ce manuscrit reviendra en détails sur ce problème et proposera une solution pour les futures mesures.

## 2.3 Protection thermique du porteur

Avant de réaliser des essais avec des feux réels, il faut vérifier que le niveau de protection pour les intervenants est au moins aussi élevé qu'avec les outils actuels. L'objectif de l'essai suivant consiste donc à quantifier la protection face au rayonnement thermique des différents jets diphasiques qui seront utilisés par la suite. Il s'agit du critère établi lors de l'approche performantielle [8]. Un protocole a déjà été établi lors de la mise en place de l'approche performantielle afin de mesurer le niveau d'atténuation des jets de protection des lances actuelles.

### 2.3.1 Adaptation du protocole de l'approche performantielle

Le protocole décrit dans le rapport d'essai [8] est adapté à des lances « classiques », qui utilisent une technologie de projection d'eau monophasique. Il ne peut pas être directement réutilisé car le système diphasique ne produit pas un jet sous forme de corolle comme les lances actuelles, figure 1.2, mais uniquement deux jets de grande portée. La forme des jets diphasiques assure une épaisseur du spray importante entre une source de rayonnement et le porteur mais sur une moindre surface. Il avait été montré une forte dépendance du niveau d'atténuation à l'épaisseur du spray lors des essais précédents [16]. La campagne expérimentale a pour objectifs de quantifier le niveau d'atténuation, mais également la surface que le système diphasique est capable de protéger. Ce dernier point est une donnée supplémentaire par rapport au protocole déjà existant mais nécessaire pour le système diphasique.

Un nouveau protocole a été créé pour assurer la mesure en prenant en compte les particularités des jets et le besoin d'une grande surface rayonnante. La mesure physique pour quantifier l'atténuation du rayonnement reste identique, c'est-à-dire un rapport du niveau de signal reçu par une caméra infrarouge avec et sans le jet, lorsque le panneau radiant est positionné dans l'axe de la lance. Les essais ont été réalisés avec un panneau de 50 cm par 50 cm alimenté au propane. Afin d'assurer une juste comparaison des outils, la lance classique ayant obtenu le meilleur niveau de protection lors de la campagne d'essai précédente sera de nouveau utilisée avec le nouveau protocole.

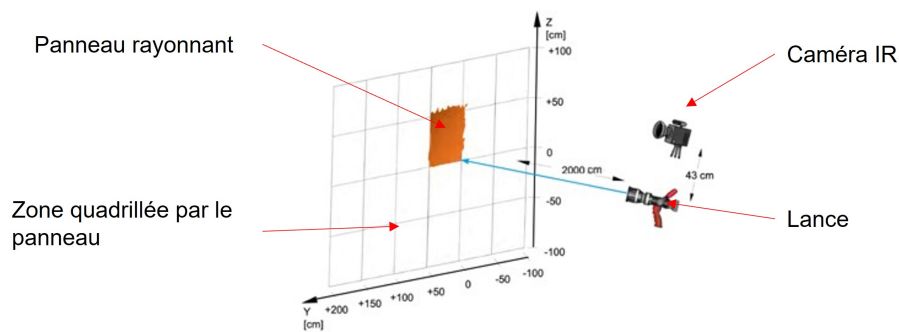


FIGURE 2.12 – Schéma de la configuration expérimentale adaptée

Le panneau radiant a été reculé à une distance de 20 m de la lance pour qu'il n'y ait pas d'interaction entre le jet et la source rayonnante. En effet, nous avons vu dans la partie précédente que la portée des jets diphasiques est d'au moins 12 m sur les deux jets qui ont été conservés. Malheureusement, le fait de reculer le panneau radiant ne permet pas d'avoir « un rapport distance au panneau / taille du panneau » assez important. Il a donc été choisi de déplacer horizontalement et verticalement le panneau radiant par pas de 50 cm afin de couvrir une plus grande surface. Une répétition par pas de 40 cm a également été réalisée pour assurer le recouvrement des bords du panneau. La figure 2.12

permet de comprendre la disposition complète des essais. La caméra infrarouge qui permet la mesure du rayonnement est placée 43 cm au-dessus de la lance. Cette position a été choisie car elle correspond approximativement à la position de la tête du sapeur-pompier qui manie la lance.

La principale contrainte de ce nouveau dispositif est la nécessité d'assurer un alignement précis entre le panneau radiant et la lance à tester. La distance entre les deux étant de 20 m un écart d'un degré dans l'angle d'alignement engendre une erreur de plus de 30 cm sur la position voulue du panneau. Un dispositif spécial a donc été construit afin d'assurer l'alignement tout au long des essais. Tout d'abord, des rails ont été construits pour faire translater le chariot qui sert de support au panneau. Ensuite, un support de lance qui peut s'adapter aux différents outils a également été construit. Les rails et le support ont été fixés au sol une fois l'alignement entre les deux structures assuré. L'alignement a été réalisé à l'aide d'un scanner laser 3D qui permet une précision de mesure de plus ou moins 1 cm. Des cibles ont été placées sur le panneau et le support de lance pour procéder à l'alignement comme on peut l'observer sur la figure 2.13. Le panneau a été déplacé tout le long du rail afin de s'assurer qu'il reste bien perpendiculaire au jet quelle que soit la position choisie. Une vérification de l'alignement a également été réalisée au cours des deux semaines d'essais pour s'assurer que les fixations au sol permettaient bien de conserver l'alignement initial.

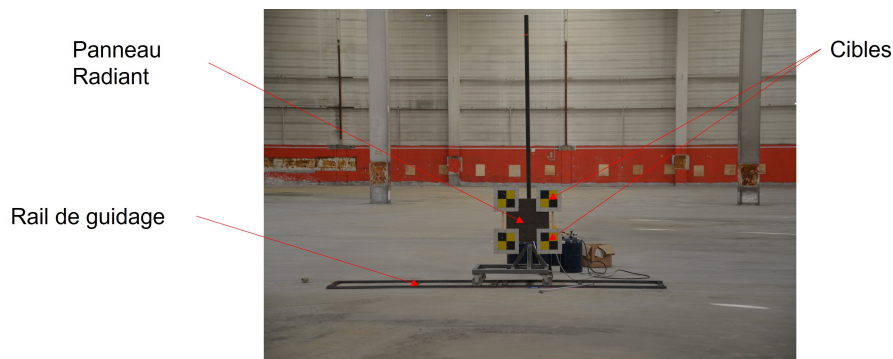


FIGURE 2.13 – Mise en place de l'alignement entre le support de lance et le panneau radiant

Cette nouvelle disposition permet bien de réaliser la mesure d'atténuation du flux radiatif sans que le jet n'impacte la source. De plus, la translation du panneau permet d'avoir une surface totale, une fois concaténée, de 6 m<sup>2</sup>. Cette surface importante permet d'estimer à partir de quelle distance, par rapport au centre du jet, le niveau de protection diminue. La comparaison avec une lance actuelle permet d'identifier directement l'efficacité des différents outils.

### 2.3.2 Présentation de la procédure de post-traitement

L'appareil de mesure utilisé est une caméra infrarouge FLIR, ORION SC7000. Il s'agit d'une caméra qui permet de faire des mesures avec différents filtres devant l'objectif. Les



résultats présentés dans la suite sont ceux obtenus avec le filtre à  $2564\text{ cm}^{-1}$  qui permet d'observer le rayonnement du foyer sans perturbation par les gaz de combustion, il s'agit du même filtre que celui utilisé dans les précédents essais [8]. La plage de mesure de la caméra permet d'avoir des niveaux de signal allant de 0 à 16000. Un réglage est effectué avant chaque mesure afin que le niveau de signal dans la zone du panneau soit compris entre 14000 à 15000. Ce réglage permet d'utiliser l'ensemble de la plage de mesure et donc d'améliorer la précision.

$$A_{test} = 1 - \frac{I_{test} - I_{zero}}{I_{ref} - I_{zero}} \quad (2.1)$$

Le calcul d'atténuation,  $A_{test}$ , est effectué avec la relation 2.1 où  $I_{zero}$  est une image réalisée avec un cache devant l'objectif,  $I_{test}$  est l'intensité mesurée avec le jet et  $I_{ref}$  l'intensité mesurée sans le jet. Le calcul est effectué sur chaque pixel couvrant le panneau avec des moyennes effectuées sur 30 images pour la référence et au minimum 200 images pour la mesure avec le jet. Certains pixels, présents en partie basse du jet, aboutissent à une atténuation supérieure à 100%. Ces points ont été supprimés, car ils ne correspondent à aucune réalité physique. La figure 2.14 présente les résultats obtenus à l'issue de cette première étape, deux rangées de pixels sont ôtées sur tout le tour du panneau pour ne pas être sensibles aux effets de bord. Le centre de la lance correspond au point de coordonnées (200,135). La partie gauche du jet a été cartographiée plus précisément car, les buses étant symétriques, nous avons formulé l'hypothèse que le jet est symétrique verticalement. Cette figure permet également de vérifier l'alignement des panneaux. En effet, aucun ré-alignement n'a été effectué, il s'agit uniquement d'une superposition des mesures effectuées. L'utilisation du scanner laser 3D a permis d'assurer un positionnement conforme à celui souhaité pour réaliser la cartographie d'un jet sur une surface de  $6\text{ m}^2$ .

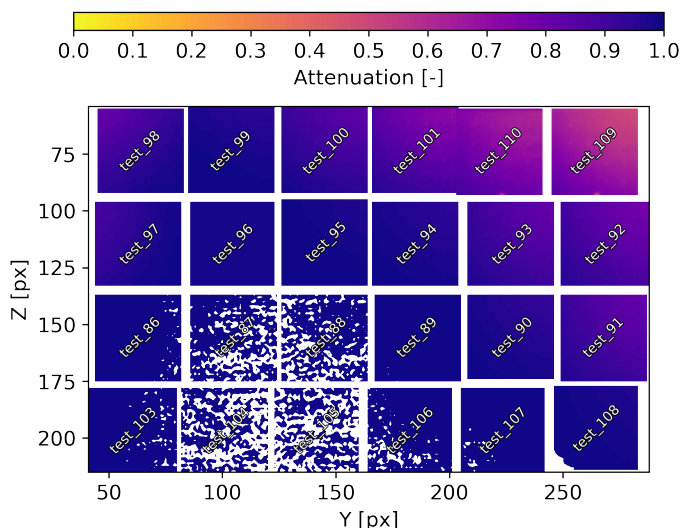


FIGURE 2.14 – Résultat après post traitement d'une cartographie du jet plat

En plus d'effectuer une moyenne temporelle, des essais de répétabilité ont été réalisés afin de s'assurer de la justesse des mesures, du positionnement du panneau radiant et des

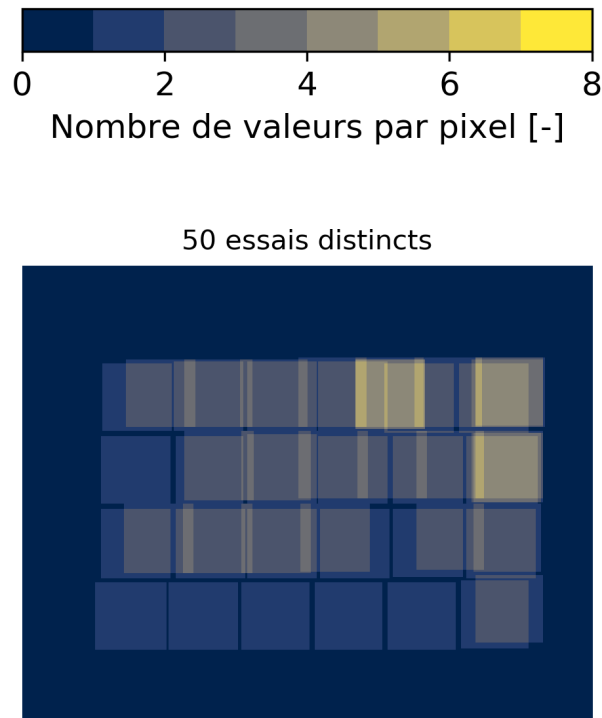
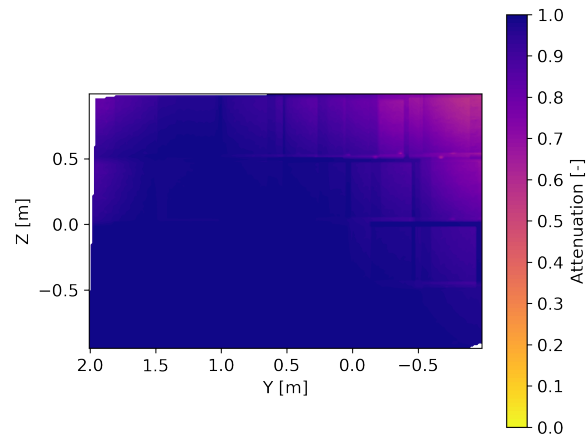


FIGURE 2.15 – Nombre total de mesures par pixel sur la cartographie du jet plat

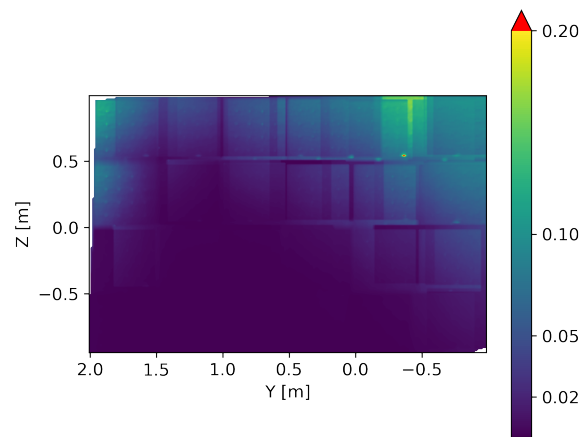
conditions d'alimentation de la lance en air et en eau. La figure 2.15 résume le nombre de mesures par pixel sur la totalité de la surface étudiée. Des mesures supplémentaires ont été effectuées dans le coin en haut à droite car une déviation du jet a été observée et cette zone correspondait en réalité au bord du jet. Cette partie de la cartographie peut avoir jusqu'à 7 mesures sur un même pixel. Les trous restants, malgré les répétitions, sont complétés à l'aide d'une interpolation linéaire, ce qui permet d'avoir une cartographie sur l'ensemble de la surface recherchée. La figure 2.16 permet de visualiser l'atténuation mesurée et l'écart type calculé sur l'ensemble de la surface. Les axes ne sont plus en pixels mais en mètres avec une position de la buse au point de coordonnées (0,0).

### 2.3.3 Présentation des résultats

La figure 2.17 permet de comparer les résultats obtenus avec les deux types de jets diphasiques testés. On observe que le jet plat a bien subi une dérive sur la gauche malgré des essais réalisés dans un hangar fermé. Ce type de jet est donc particulièrement sensible aux conditions extérieures. Des essais qualitatifs et plus réalistes ont été réalisés pour s'assurer que les résultats obtenus dans cette configuration expérimentale permettent également une protection suffisante des intervenants en extérieur. Le jet diphasique obtenu avec une buse ronde possède bien une symétrie verticale, en  $Y = 0$ . Les deux jets ayant le même débit en eau, on retrouve bien ici la preuve que la technique de projection de l'eau est un critère essentiel lorsque l'on s'intéresse à la protection face au rayonnement thermique.



(a) Cartographie d'atténuation du jet plat



(b) Cartographie des écarts types calculés sur l'ensemble de la surface

FIGURE 2.16 – Résultats issus du post traitement complet pour la buse plate

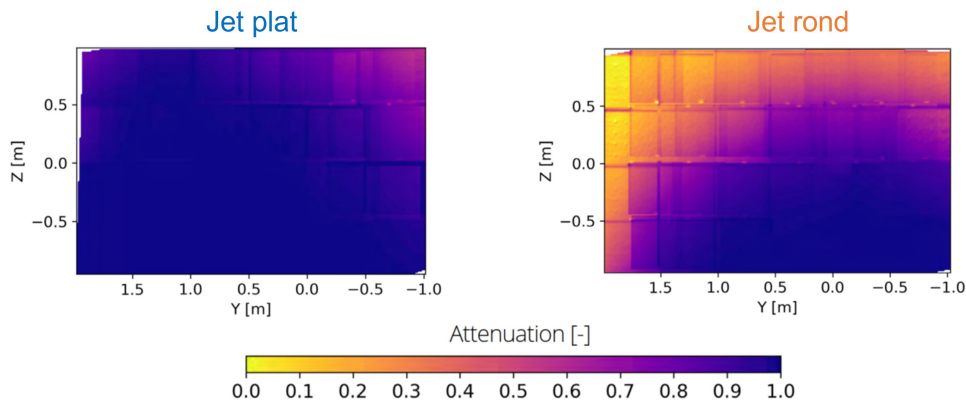


FIGURE 2.17 – A gauche cartographie de l’atténuation pour le jet plat et à droite pour le jet rond

Le jet obtenu avec une buse plate, à gauche sur la figure 2.17, permet une atténuation de plus de 90 % sur la majorité de la surface étudiée, soit  $6\text{ m}^2$ . Le coin en haut à droite est la zone la moins bien protégée avec des valeurs entre 60 et 70 % d’atténuation. La perte de symétrie est due à un léger courant d’air existant à l’intérieur du hangar et conduit à un jet qui se déporte vers la gauche. Ce phénomène ne remet pas en cause la mesure qui reste valide, mais montre que ce brouillard est très dépendant des conditions ambiantes. Si l’on reprend les résultats obtenus sur les vitesses des gouttes, on peut également comprendre que ce jet est plus sensible que le jet obtenu avec une buse ronde car les vitesses sont inférieures. Lors d’une intervention, le sapeur-pompier pourrait orienter la lance pour compenser cet effet si nécessaire.

La buse ronde, à droite sur la figure 2.17, permet quant à elle d’obtenir une répartition du jet concentrée uniquement en partie basse. On obtient alors des niveaux d’atténuation supérieurs à 90 % sur un demi-cercle de  $3\text{ m}^2$ , uniquement en partie basse. Ce haut niveau d’atténuation est dû à la retombée des gouttes sur toute la longueur du jet et donc à l’augmentation de l’épaisseur du jet comme vu dans le chapitre 1. À l’inverse, en partie haute, peu de gouttes restent en suspension ou sont projetées dans cette direction. On obtient alors des niveaux d’atténuation plus faibles, voire quasiment inexistantes sur le coin en haut à gauche (il s’agit de la zone la plus éloignée du centre du jet). Ce jet est bien symétrique autour de l’origine car sa vitesse lui permet de ne pas être aussi sensible au vent latéral que la buse plate. Une comparaison des différents jets sur une surface donnée sera réalisée par la suite.

Le même travail a été réalisé avec une lance classique, celle ayant obtenu la meilleure note sur ce critère lors des essais précédents [8]. Toutefois, le jet étant beaucoup plus homogène avec une valeur d’atténuation constante quelle que soit la distance au centre du jet et des écarts types très faibles (0.07), nous avons réalisé moins de points de mesure. Il a été choisi de considérer que la lance classique assure le niveau de protection mesuré sur l’ensemble des  $6\text{ m}^2$ . Cette valeur d’atténuation, d’environ 70 %, est similaire à celle trouvée dans le rapport d’essai [8] avec la mesure non directionnelle effectuée sur la caisse de formation.

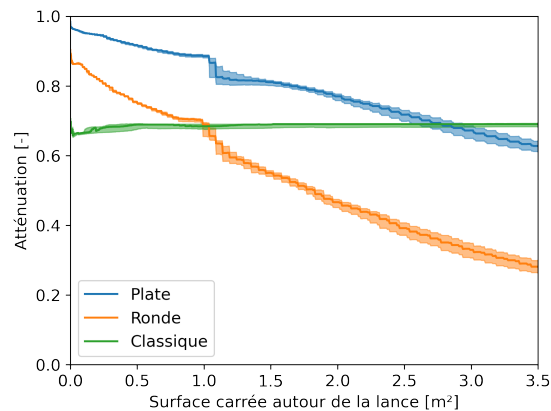


FIGURE 2.18 – Comparaison du niveau d’atténuation en fonction de la surface considérée autour du centre.

Pour faciliter la comparaison de l’efficacité des différents jets testés, nous avons choisi d’étudier une surface carrée centrée sur l’axe du jet et de l’augmenter progressivement. La figure 2.18 permet de facilement comparer le niveau de protection de chaque outil lorsque l’on considère une surface de plus en plus grande autour de la lance. Les courbes représentent la valeur médiane de protection pour la surface correspondante avec les interquartiles. Ainsi, pour une surface de  $1\text{ m}^2$ , les deux jets diphasiques assurent une protection face au rayonnement thermique supérieure à la lance actuelle. Le jet plat, en particulier, assure une protection minimale de 90 % sur toute cette surface alors que le niveau de protection du jet rond diminue rapidement pour devenir similaire à celui de la lance classique. Cette chute importante est due au manque d’eau projetée vers le haut avec ce type de spray. Le niveau de protection assuré par la lance classique redevient supérieur à celui du jet plat à partir de  $2,7\text{ m}^2$ , cela correspond approximativement à la surface d’un couloir. Cette surface pourrait probablement être supérieure sans l’influence du vent sur le jet.

En résumé, nous avons créé un protocole adapté au nouvel outil développé par la BSPP qui permet de comparer l’efficacité des différents jets testés. Nous avons pu observer que les deux jets diphasiques permettent une meilleure protection sur une surface de  $1\text{ m}^2$  autour du centre du jet. Pour protéger une surface plus importante, pouvant couvrir deux sapeurs-pompiers par exemple, il faut privilégier le jet plat qui permet de mieux protéger cette zone que le jet rond ou la lance classique. Par contre, les jets diphasiques ne permettent pas de couvrir plus efficacement une surface supérieure à  $2,7\text{ m}^2$ .

## 2.4 Conclusion

L’ensemble des expérimentations menées dans ce chapitre a permis de classer les jets diphasiques obtenus avec la nouvelle technologie de lance comme appartenant à la classe 2 des brouillards d’eau. Ils ont également permis d’avoir des ordres de grandeurs sur la vitesse et le diamètre des gouttes le long du jet. Ainsi, les deux principaux paramètres per-

mettant de décrire un brouillard sont maintenant connus et peuvent permettre de futures études d'impact du jet sur une surface, de temps de vie des gouttes dans un milieu chauffé, de l'épaisseur de flamme traversable par un tel jet... De plus, des caractéristiques plus opérationnelles comme la portée ou l'angle d'ouverture ont pu être déterminées et transmises aux sapeurs-pompiers afin qu'ils puissent travailler à une doctrine d'emploi. Enfin la mesure d'atténuation du flux radiatif incident a permis de démontrer que sur une surface équivalente à un couloir la lance diphasique permet une meilleure protection des intervenants avec le jet issu de la buse plate. Ce résultat est essentiel pour pouvoir continuer le développement de l'outil et réaliser des essais avec feux. L'ensemble des mesures ont été réalisées directement à l'échelle 1 avec des protocoles inexistantes pour ce type d'outil. De nouveaux protocoles expérimentaux ont été établis permettant d'effectuer des mesures similaires à celles réalisées sur les lances actuelles afin de pouvoir comparer l'efficacité des différents outils. Le chapitre suivant va maintenant s'intéresser à la comparaison des outils sur feux réels dans les configurations les plus contraignantes pour les sapeurs-pompiers.

# Chapitre 3

## Essais comparatifs en vraie grandeur entre la lance diphasique et la lance actuelle

### 3.1 Objectifs des essais et démarche

L'ensemble des travaux sur la lance diphasique sont basés sur une même démarche qui consiste à définir des configurations expérimentales permettant d'évaluer un besoin, une performance, directement exprimés par les utilisateurs finaux. Ainsi les sapeurs-pompiers appartenant au groupe de travail ont proposé de nombreux scénarios d'essais qui peuvent être triés en trois catégories principales :

- feux de plein air (poubelle, voiture ...);
- feux de compartiments (appartement, maison ...);
- feux spéciaux (chimique, électrique, métaux, végétaux ...).

La première catégorie de feux est facile à évaluer avec une approche qualitative qui nécessite peu d'instrumentation et les intervenants ne sont pas mis en danger lors de ce type d'intervention. Ainsi l'extinction est obtenue avec les deux outils testés mais la lance diphasique permet aux pompiers d'être plus mobiles autour du foyer et d'avoir une quantité d'eau d'extinction au sol très faible.

Les feux de compartiments sont les plus importants pour les sapeurs-pompiers, alors qu'ils ne représentent qu'un faible pourcentage des interventions, car ce sont ceux qui mettent en danger les intervenants et qu'ils nécessitent un haut niveau technique lors de l'utilisation de lance. Une attention particulière a donc été portée sur ces essais avec une instrumentation spécifique. Lors des discussions entre les différents acteurs, il a été choisi de limiter le nombre de configurations à cause des contraintes logistiques impliquées par l'organisation d'une telle campagne d'essai. Deux configurations distinctes ont été retenues car elles correspondent aux situations les plus contraignantes pour les intervenants.

La dernière catégorie comprend des combustibles particuliers qui nécessitent des structures d'essais spécifiques et n'a donc pas pu être traitée dans le cadre de cette thèse.

Ce chapitre sera dédié aux deux configurations retenues pour les feux de compartiments, à l'instrumentation mise en place et à l'exploitation des mesures réalisées.

La première configuration est un feu de cave qui nécessite une progression à contre tirage<sup>3</sup> vertical et la deuxième est une progression à contre tirage horizontal dans un couloir. De plus, lors des discussions, les sapeurs-pompiers ont unanimement expliqué que la difficulté lors des incendies de compartiment n'est pas l'extinction du foyer mais bien la progression jusqu'à ce dernier. Nous avons donc choisi d'orienter ces essais uniquement sur l'évaluation des conditions de progression des intervenants et l'impact des actions de lance sur ces conditions. Les participants aux essais n'auront pas d'action directe sur le foyer mais uniquement dans le volume permettant d'y accéder. D'autres essais sur la capacité d'extinction ont été menés par la suite pour vérifier la capacité du système diphasique à refroidir la phase solide et à stopper la pyrolyse mais ils ne seront pas présentés dans ce manuscrit car ils sont uniquement qualitatifs.

Le système diphasique étant complètement nouveau il n'est pas possible de réutiliser directement les protocoles établis lors de l'approche performantielle. La comparaison entre le système classique et diphasique sera réalisée avec des actions de lance (durée et angle d'application) adaptées à chaque outil. Dans un premier temps de nombreux essais exploratoires ont été réalisés par les formateurs incendies de différents services d'incendie pour trouver la technique de lance adaptée au système diphasique. L'utilisation de la lance classique est quant à elle déjà connue et n'a pas nécessité d'essais exploratoires.

## 3.2 Présentation des configurations d'essai

Le site d'essais utilisé pour les deux configurations est un bâtiment désaffecté qui sera détruit par la suite. Les étages ont été complètement vidés et il ne reste plus que les murs extérieurs avec des ouvertures très importantes. Des feux sous-ventilés ne peuvent pas être réalisés dans ces volumes. Par conséquent les essais se dérouleront dans un sous-sol semi enterré avec comme ouvrants des soupiroux en partie haute comme illustré sur la figure 3.1. Pour chaque configuration, des travaux d'aménagement ont été réalisés pour mettre en place une ventilation adaptée et bloquer l'accès aux volumes adjacents (en particulier les pièces desservies par le couloir). Une instrumentation spécifique à chaque zone d'essai, présentée par la suite, a également été mise en place.



FIGURE 3.1 – Image de la cave avant brûlage

---

3. Les sapeurs-pompiers doivent avancer dans le sens inverse de l'écoulement des fumées.



### 3.2.1 Progression à contre tirage vertical

#### Configuration d'essai

La première configuration étudiée correspond à un feu de cave. La combustion pour ce type d'incendie est fortement sous ventilée, donc très fumigène et avec de nombreux imbrûlés dans les fumées. Elle nécessite une progression complexe à contre-courant du flux de fumée pour les intervenants.

On peut observer sur la figure 3.2 que les sapeurs-pompiers doivent parcourir environ 4m en contre tirage vertical (escalier) avant d'accéder au volume où est situé le foyer. La cave possède trois ouvrants distincts : la porte d'accès (numéro 1 sur le schéma) sur laquelle sera placé un rideau stoppeur de fumée ; le soupirail (numéro 2 sur le schéma) qui sert uniquement pour ventiler la cave et décharger le volume en vapeur au cours des essais ; e dernier ouvrant (numéro 3 sur le schéma) est une porte obstruée en partie haute qui permet une ventilation uniquement en partie basse. Cette ouverture peut également servir de sortie de secours lors des essais. Un schéma détaillé avec des cotes est disponible en annexe .2.1.

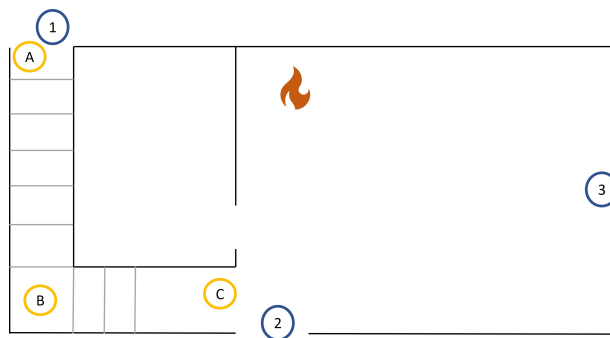


FIGURE 3.2 – Schéma de la configuration cave. Les numéros 1, 2 et 3 indiquent la position des ouvrants et les lettres A, B et C l'emplacement des sapeurs-pompiers lors des actions.

Le foyer a été positionné dans la salle principale afin de permettre une ventilation directe en partie basse via l'ouvrant 2. Une semaine de pré-essais a été réalisée afin de déterminer la ventilation nécessaire au développement du feu et à la reprise du foyer avant un nouvel engagement. Ces pré-essais ont également permis de calibrer le foyer afin d'assurer une bonne reproductibilité des essais.

#### Calibration du foyer

Le foyer est composé de palettes en pin de type « Europe », les dimensions des palettes sont illustrées par la figure 3.3. Le foyer initial est constitué de huit palettes entrecroisées formant une pile, soit un total de 200 kg de bois. La figure 3.4 illustre les températures obtenues sur un arbre de thermocouples positionné à environ 50 cm du foyer. On observe que six passages ont pu être effectués avec le chargement initial de huit palettes, correspondant à un trait vertical pour chaque passage. Toutefois, les quatre premiers passages sont

effectués dans des conditions initiales comparables (environ  $580^{\circ}\text{C}$ ) alors que les deux derniers débutent avec des conditions de températures ambiantes inférieures (environ  $400^{\circ}\text{C}$ ). Les pré-essais nous ont permis de déterminer que le chargement initial de huit palettes permet d'obtenir un foyer stable pendant 1100s puis que des palettes doivent être rajoutées avant de procéder à de nouveaux passages. Par la suite un rechargement de quatre ou cinq palettes sera effectué après quatre passages pour revenir aux conditions initiales (au minimum  $580^{\circ}\text{C}$ ) et permettre de ventiler complètement le volume pour évacuer la vapeur d'eau accumulée.

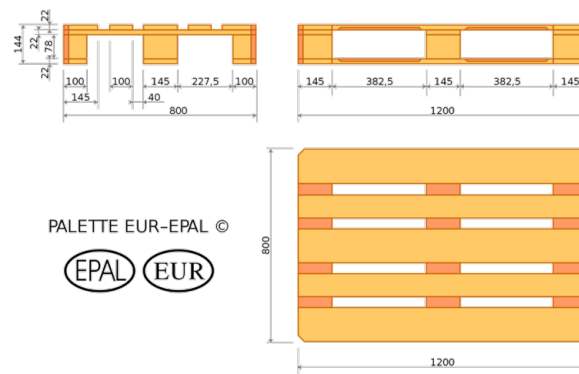


FIGURE 3.3 – Dimensions standards des palettes « Europe ».

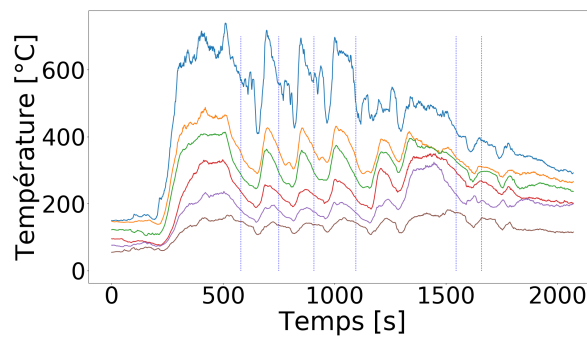


FIGURE 3.4 – Profils de températures sur un arbre de thermocouples vertical proche du foyer. Le thermocouple le plus haut, courbe bleue, est situé à 10 cm du plafond plus les suivants sont régulièrement espacés de 50 cm.

### Séquence d'essais

Plusieurs types d'essais ont été réalisés dans cette configuration. Tout d'abord des essais fortement instrumentés et répétables afin de comparer les différentes lances à incendies, ensuite des essais exploratoires ont permis aux sapeurs-pompiers de tester des attaques depuis l'extérieur du volume en partie basse et haute et avec plusieurs foyers.

Dans ce manuscrit, nous nous intéresserons uniquement aux essais répétables. La séquence retenue pour mener les essais est la suivante :

- développement du foyer avec les ouvrants 1, 2 et 3 totalement ouverts
- passage en foyer sous ventilé avec la fermeture des ouvrants
- engagement du binôme et actions (3 paliers de progression : A, B, C, figure 3.2)
- repli du binôme et ouverture des ouvrants 1 et 2
- ventilation du foyer pour revenir aux conditions thermiques avant engagement.

Au total, 75 passages avec le système diphasique ont été réalisés dans cette configuration. Le type de buse et les débits d'alimentation ont également été modifiés pour certains passages afin d'évaluer l'efficacité de l'outil malgré un problème d'alimentation. La lance classique<sup>4</sup> n'a pu être utilisée que sur 11 passages dans cette configuration car l'eau au sol et la présence importante de vapeur ne permettait pas d'assurer la sécurité des sapeurs-pompiers sur un plus grand nombre d'engagements.

Les actions réalisées lors de l'engagement ont été choisies par les formateurs incendie ayant participé aux pré-essais, leurs emplacements sont indiqués par les lettres A, B et C sur la figure 3.2. Les actions diffèrent en fonction de l'outil utilisé car elles sont adaptées à la façon dont l'eau est projetée. Les deux protocoles choisis sont détaillés dans le tableau 3.1.

| Lieu d'action | Temps d'application [s] |           |
|---------------|-------------------------|-----------|
|               | Diphasique              | Classique |
| A             | 5                       | 3         |
| B             | 1                       | 1         |
| C             | /                       | /         |

TABLE 3.1 – Durées des actions de lance en fonction de l'outil utilisé

Aucune action n'est réalisée en position C car l'objectif de l'essai n'est pas d'obtenir l'extinction du foyer mais seulement d'évaluer la facilité de progression des intervenants. En position C, le porte-lance devait faire un compte rendu sur les conditions de visibilité, l'état du foyer et un ressenti de chaleur. Ce compte rendu est uniquement utilisé pour la conduite des essais et non pour l'évaluation des outils. La figure 3.5 permet de visualiser les conditions d'engagements lors des essais pour les intervenants avec à gauche le foyer avant la fermeture des ouvrants et à droite un plafond de fumée très bas et une visibilité nulle dans la cave, la photographie est prise depuis l'ouvrant 2.

### 3.2.2 Progression à contre tirage horizontal

#### Configuration d'essai

La deuxième configuration étudiée correspond à un feu sous-ventilé nécessitant une progression horizontale de 25 m avant d'atteindre le foyer. La géométrie retenue est en forme de J, cela permet d'éviter l'impact direct des actions de lance sur le foyer. Ce choix

4. Il s'agit de la même lance que celle utilisée pour les essais d'atténuation.



FIGURE 3.5 – A gauche photo du foyer lors de la phase de ventilation, à droite photo prise depuis l'ouvrant 2 avant l'engagement d'un binôme

est une adaptation du couloir utilisé lors de l'approche performantielle, les intervenants ayant voulu augmenter la distance de progression. La figure 3.6 permet de comprendre la disposition des volumes utilisés.

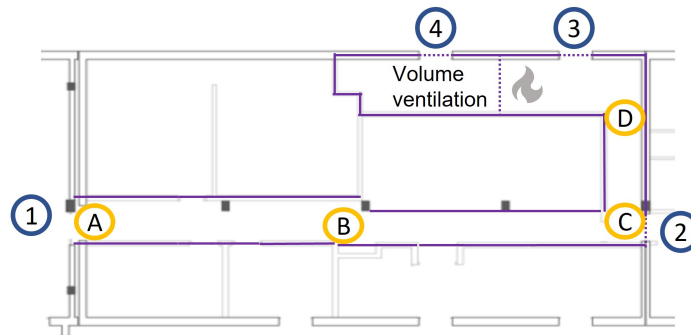


FIGURE 3.6 – Schéma des volumes utilisés pour la deuxième configuration. Les numéros 1, 2, 3 et 4 indiquent la position des ouvrants et les lettres A, B, C et D l'emplacement des sapeurs-pompiers lors des actions.

Dans cette configuration, il existe quatre ouvrants possibles pour ventiler le foyer, numéroté de 1 à 4 sur la figure. Le premier est l'accès du binôme sur lequel sera placé un rideau stoppeur de fumée afin de permettre un abaissement du plafond de fumée. Le suivant est situé au bout de la première portion de couloir et consiste en une ventilation en partie basse qui sert également de sortie de secours lors des essais pour le binôme engagé. Le rechargement du foyer en palettes « Europe » sera également réalisé par cet accès. Ces deux ouvrants sont ouverts lors du repli pour améliorer les conditions thermiques lors du retour. Un soupirail situé à côté du foyer (numéro 3 sur le schéma) permet, en l'ouvrant, d'extraire la vapeur produite lors des essais et de relancer le foyer si besoin. Le dernier ouvrant est directement situé dans le volume ventilation adjacent au foyer. Cette zone particulière a été créée afin d'assurer une ventilation permanente du foyer en partie basse. On peut observer sur la figure 3.7 qu'un mur a été construit pour séparer la zone foyer et le volume de ventilation, il est indiqué par le trait en pointillé derrière l'emplacement du foyer sur la figure 3.6. Ainsi le soupirail situé derrière le foyer permet d'assurer une ventilation permanente uniquement en partie basse. Cette configuration permet d'avoir



FIGURE 3.7 – Photographie de la zone foyer pour la configuration couloir

une ventilation suffisante du foyer durant tout l'essai tout en obligeant les fumées à sortir par l'accès. On retrouve bien la configuration en contre tirage comme souhaitée par les sapeurs-pompier. Les dimensions sont disponibles en annexe .2.2.

### Calibration du foyer

Le foyer est constitué de palettes en pin de type « Europe » positionnées en bucher comme décrit dans la configuration cave. La seule différence est que le foyer initial est constitué de 12 palettes pour avoir une puissance suffisante pour enfumer l'ensemble du couloir et garder une stratification thermique jusqu'à l'entrée du couloir. Un rechargement en palette en cours d'essai sera réalisé lorsque des conditions d'engagements, similaires à celles des premiers passages, ne pourront plus être obtenues faute de combustible.

### Séquence d'essai

Le protocole d'engagement a également été établi lors d'une semaine de pré-essais. Cette semaine a permis de trouver la séquence de ventilation permettant une bonne répétabilité des essais et les actions adaptées au système diphasique. La figure 3.6 indique les quatre positions de progression des sapeurs-pompier : A, B, C et D. Comme pour les essais dans la configuration à contre tirage vertical la dernière position, ici la position D, est uniquement une position d'observation où aucune action de lance ne sera effectuée. Le tableau 3.2 reprend l'ensemble des actions réalisées par les sapeurs-pompier à chaque emplacement.

| Lieu d'action | Temps d'application [s] |           |
|---------------|-------------------------|-----------|
|               | Diphasique              | Classique |
| A             | 10                      | 3         |
| B             | 5                       | 1         |
| C             | 3                       | 1         |
| D             | /                       | /         |

TABLE 3.2 – Durée des actions de lance en fonction de l'outil utilisé

La séquence complète d'engagement retenue pour mener les essais est la suivante :

- développement du foyer avec les ouvrants 1, 2, 3 et 4 ouverts
- passage en foyer sous-ventilé avec la fermeture des ouvrants 1, 2 et 3
- engagement du binôme et actions (4 paliers de progression)
- repli du binôme et ouverture des ouvrants 1 et 2
- décharge possible de la vapeur d'eau accumulée avec l'ouverture de l'ouvrant 3

### 3.3 Présentation de l'instrumentation mise en place

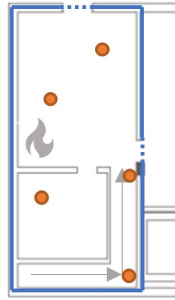
La mesure principale effectuée lors de ces essais est une mesure de température avec des thermocouples de type K, gainés de 1,5 mm de diamètre, répartis dans l'ensemble du volume. D'autres mesures ont été réalisées mais ne sont malheureusement pas exploitables. En effet, les résultats des fluxmètres totaux ont été perturbés par des dépôts de suies et d'eau. Des mesures d'opacimétrie ont également été effectuées à l'aide de trois arbres de d'opacimètres. Malheureusement, les données issues des essais montrent que l'installation de ces capteurs à telle échelle nécessite une préparation spécifique à cause de l'alignement à conserver sur une distance d'un mètre et demi à travers deux murs exposés à des températures élevées. De plus, une surpression du volume est obligatoire pour éviter que les fumées impactent les lentilles des récepteurs et faussent la mesure.

#### 3.3.1 Les arbres de thermocouples horizontaux et verticaux

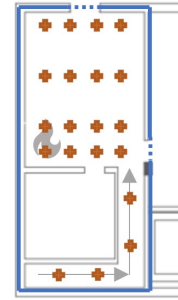
L'instrumentation mise en place diffère de celle proposée dans l'approche performantielle [8]. Précédemment, seules certaines zones étaient instrumentées et les sapeurs-pompier devaient effectuer leurs actions uniquement sur ces zones. Dans le cadre de ce manuscrit, la lance diphasique doit être comparée à une lance classique. Or ces deux outils ne peuvent pas être utilisés de la même manière car les jets produits sont de nature trop différentes. L'instrumentation doit donc être capable de capter l'ensemble des effets de chaque outil. Les thermocouples ont été placés dans l'ensemble du volume afin de pouvoir mesurer les effets de n'importe quelle action. Des arbres de thermocouple sont positionnés comme indiqués sur les figures 3.8a et 3.9a pour respectivement la cave et le couloir. Le positionnement de chaque thermocouples est détaillé en annexe .2.3. De plus un maillage horizontal de thermocouples est positionné 10 cm sous plafond afin de suivre l'évolution de la température au sein des fumées lors de la progression des intervenants. Les figures 3.8b et 3.9b montrent l'emplacement de tous les thermocouples horizontaux pour les deux configurations. Ces thermocouples sont positionnés sur un fil qui est maintenu tendu par un système de poulie et de contrepoids malgré l'augmentation de température.

#### Traitement des thermocouples accumulant de l'eau

Lors des actions de lance, certains thermocouples peuvent être directement impactés par le jet d'eau. La mesure de température est alors faussée car le thermocouple ne mesure plus directement la température des gaz mais celle de la goutte située au bout. Un traitement semi-automatique a été réalisé afin d'écarter les mesures non exploitables. tout

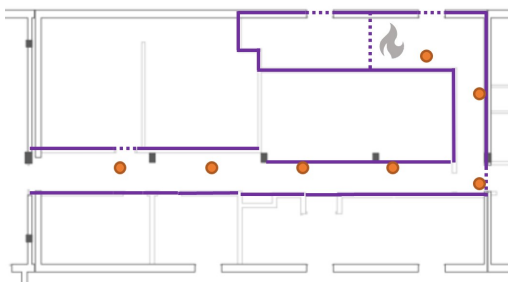


(a) Emplacements des arbres de thermocouples dans la cave.

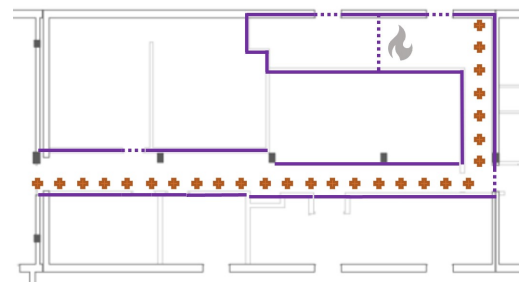


(b) Emplacements des thermocouples sous plafond dans la cave.

FIGURE 3.8 – Emplacements des arbres de thermocouples.



(a) Emplacements des arbres de thermocouples dans le couloir.



(b) Emplacements des thermocouples sous plafond dans le couloir.

FIGURE 3.9 – Emplacements des thermocouples dans le couloir.

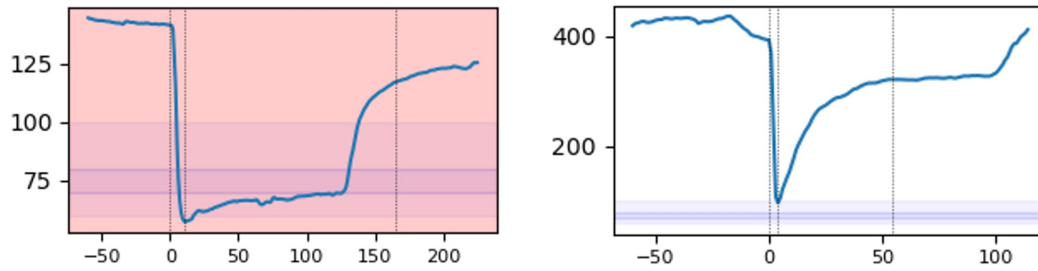


FIGURE 3.10 – Sur la gauche, exemple d’une mesure de température exclue lors du post-traitement à cause d’un dépôt d’eau. Sur la droite, exemple d’une mesure conservée lors du post-traitement.

d’abord un code informatique sélectionne les thermocouples potentiellement impactés, c’est-à-dire une température mesurée inférieure à  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  avec une absence de remontée après à la fin de l’action. Puis une personne confirme, ou infirme, l’exclusion de la mesure. Toutefois, la décision d’exclusion reste partiellement subjective car aucun critère clair n’existe pour identifier si un thermocouple est impacté par l’eau. Ce travail a donc été réalisé par une seule personne afin de limiter au maximum la subjectivité du choix. Un exemple type de thermocouple écarté est présenté sur la figure 3.10. Cette mesure a été exclue car la température diminue sous la valeur seuil de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  et reste à ce niveau pendant plus de 100s avant de revenir à une valeur proche de la température initiale, ce phénomène correspond à un dépôt d’eau sur le thermocouple suivi de son évaporation.

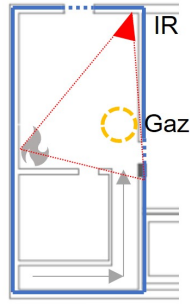
### 3.3.2 Emplacements des appareils de mesure complémentaires

Des caméras infra-rouge ont également été positionnées dans les volumes pour suivre la progression des sapeurs-pompiers et observer la direction et la durée des applications d’eau. La figure 3.11 indique l’emplacement des caméras infrarouge (notée IR) pour la cave et le couloir. Des mesures de concentration gazeuses en oxygène ont également été réalisées en partie haute et basse (noté Gaz). Ces mesures permettent de vérifier le niveau de sous ventilation au cours des essais.

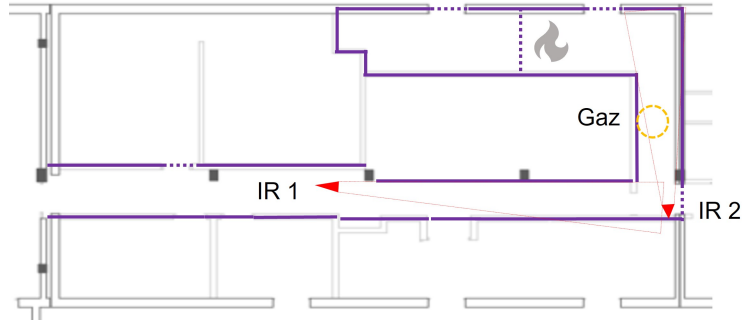
## 3.4 Résultats et conclusion

La configuration cave n’a pas pu être entièrement post-traitée car la quantité de données était trop importante pour le temps restant dans la thèse. Il a été choisi de prioriser la deuxième configuration qui est plus proche de celle utilisée lors des essais de caractérisation des lances à main [8]. Toutefois certains points ont pu être mis en avant. Tout d’abord la différence du nombre d’engagements entre le système diphasique et actuel montre bien que le fait de diminuer la quantité d’eau permet d’effectuer un plus grand nombre de passages car moins d’eau résiduelle est présente au sol, le retour vapeur est donc fortement diminué. Par ailleurs une analyse rapide ne semble pas mettre en avant des niveaux de refroidissement significativement différents entre les outils. Les niveaux thermiques sous





(a) Emplacements des caméras infrarouges et de la zone d'analyse des gaz dans la cave.



(b) Emplacements des caméras infrarouges et de la zone d'analyse des gaz dans le couloir.

FIGURE 3.11 – Emplacements des caméras et des cannes de prélèvements de gaz.

plafond, sur l'ensemble du volume, sont semblables pour les deux systèmes :  $458\text{ °C} \pm 23$  pour la lance diphasique et  $484\text{ °C} \pm 21$  pour la lance classique. Le même constat a été fait pour les arbres de thermocouples. Aucune différence flagrante n'est visible en première approche sur les conditions thermiques dans le volume après les applications d'eau.

La partie suivante porte uniquement sur les relevés de température dans la configuration couloir. Les thermocouples sous plafond seront tout d'abord étudiés afin de trouver un critère d'efficacité du refroidissement local, puis nous nous intéresserons aux thermocouples verticaux afin d'étudier le refroidissement sur la durée dans l'ensemble du couloir.

### 3.4.1 Les actions locales

Le critère utilisé dans cette partie est issu du rapport sur les moyens mobiles d'extinction [8]. Il s'agit du critère local correspondant à l'équation 3.1 qui décrit la vitesse et l'intensité de la chute de température. Les termes en  $T$  dans l'équation correspondent à des températures alors que les termes en  $t$  correspondent à des temps. Chaque terme est illustré plus précisément sur la figure 3.12. L'indice  $s$  correspond au début de l'action (start), l'indice  $p$  correspond au minimum local et l'indice  $f$  la fin de l'effet de l'action. Le fait d'avoir une fraction prenant en compte la température et une autre le temps permet de quantifier l'impact d'un effet durable dans le temps ou très accentué au niveau température. Toutefois ce critère ne permet pas de différencier une action longue avec peu d'effet, d'une action courte très efficace.

$$\chi = \frac{T_s - T_p}{T_s} \frac{t_f - t_s}{t_p - t_s} \quad (3.1)$$

Ce critère a été calculé sur chaque thermocouple situé sous plafond après chaque action de lance. Une moyenne sur l'ensemble des passages (si le thermocouple n'est pas considéré comme mouillé) a été effectuée pour établir la note finale sur chaque capteur. Une représentation graphique de ce critère est proposée par la figure 3.13. Chaque rond correspond à l'emplacement d'un thermocouple sous plafond, le diamètre (ou la couleur)

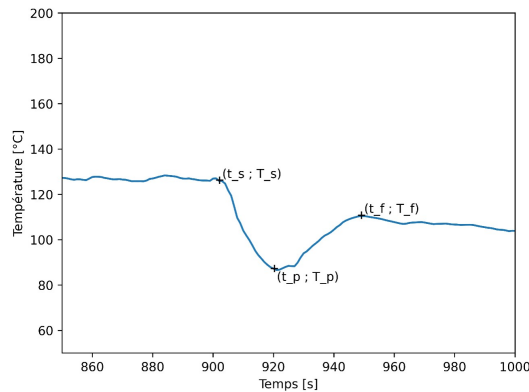


FIGURE 3.12 – Mesure de température lors d’une action de lance avec les points d’intérêt permettant de calculer le critère local.

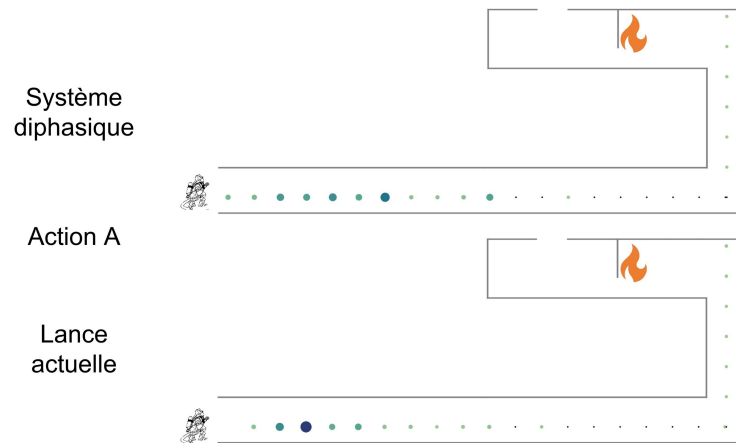
indique l’intensité de l’effet mesuré. On peut donc facilement déterminer la zone impactée par une action de lance et si action est efficace ou non pour la lance classique et la lance diphasique.

On remarque que lors de la première action, figure 3.13a, l’effet de la lance classique est extrêmement localisé sur le début du couloir avec le troisième thermocouple qui est très fortement impacté alors qu’avec la lance diphasique le critère est moins élevé mais quantifiable sur la moitié du couloir. Ce phénomène est encore plus marqué avec la deuxième action, figure 3.13b. La deuxième partie du couloir est impactée par cette action de lance avec l’outil diphasique alors qu’un seul thermocouple subit un refroidissement quantifiable avec la lance actuelle. La troisième action, figure 3.13c, confirme ce phénomène avec une action de la lance classique non quantifiable.

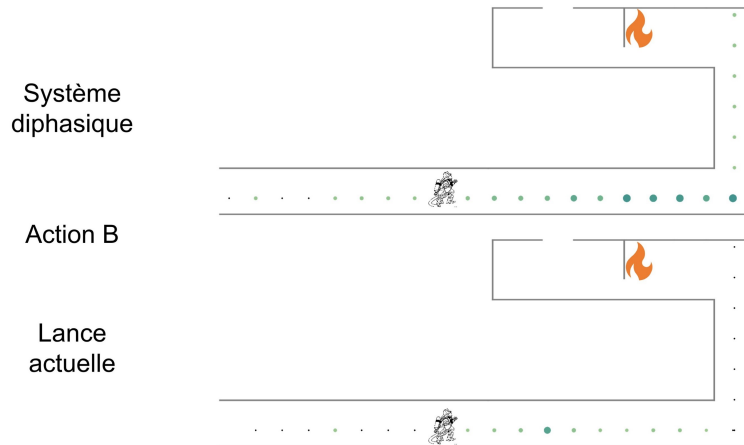
### 3.4.2 Les actions globales

Un autre effet propre au système diphasique a pu être mis en avant lors des essais grâce aux retours des sapeurs-pompiers après leurs passages. Il s’agit d’une persistance du refroidissement dans le temps et l’espace, ce qui facilite la progression des intervenants. Pour évaluer cet effet, deux zones d’intérêt ont été retenues : une dans la première partie du couloir et l’autre sur la deuxième partie du couloir menant au foyer. Les résultats présentés ci-après correspondent aux arbres de thermocouples rouge et bleu indiqués sur la figure 3.14. Ces arbres ont été choisis car ils ne sont pas impactés par un ouvrant proche, le foyer ou un effet de coin. De plus, leur position permet de déterminer si les actions de lance ont un effet loin devant le porteur et si un angle empêche le spray d’agir sur le milieu situé en amont des intervenants.

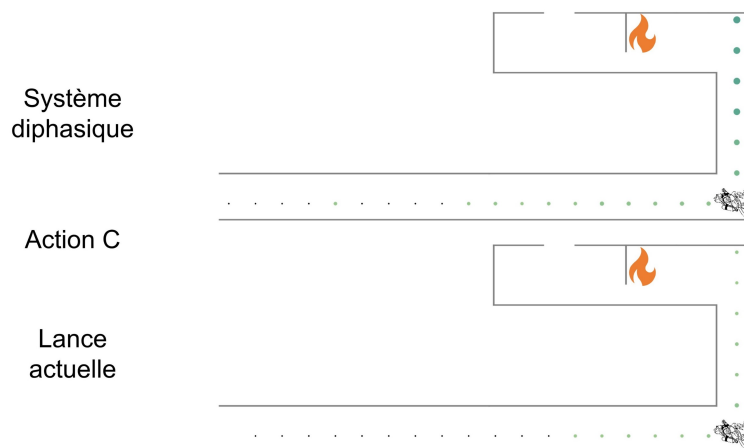
Nous allons donc observer l’état des conditions ambiantes sur toute la hauteur du volume avant chaque action de lance et comparer l’état du milieu à l’état initial. Cette méthode permet de déterminer l’effet de chaque action de lance, et les conditions dans lesquelles est effectuée la suivante. Les figures 3.15 et 3.16 présentent les profils de température verticale obtenus lors des différents essais réalisés. Les figures 3.15a et 3.16a



(a) Notes obtenues après l'action en A.



(b) Notes obtenues après l'action en B.



(c) Notes obtenues après l'action en C.

FIGURE 3.13 – Notes obtenues après chaque action de lance.

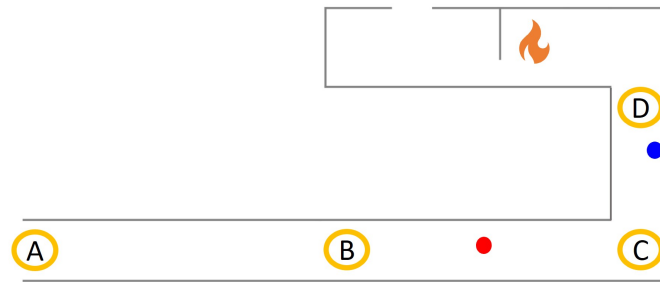


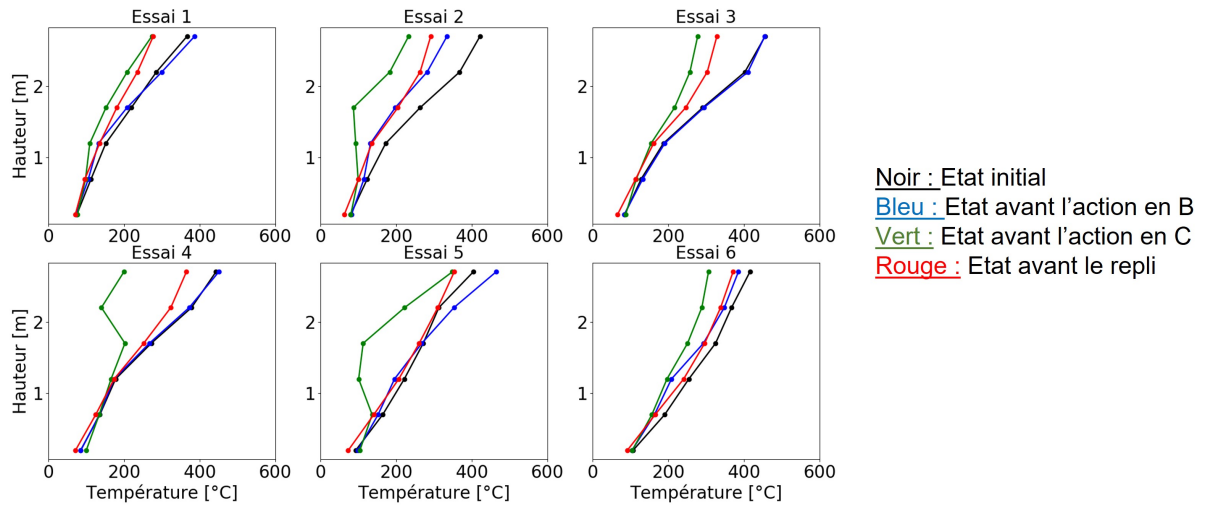
FIGURE 3.14 – Emplacement des arbres de thermocouples (points rouge et bleu) utilisés pour l'étude des effets globaux des actions de lance.

présentent les résultats pour l'arbre positionné dans la partie courte du couloir (arbre bleu) et les figures 3.15b et 3.16b ceux pour l'arbre positionné dans la première partie du couloir (arbre rouge). Un refroidissement du milieu ambiant correspond donc à un décalage des courbes vers la gauche.

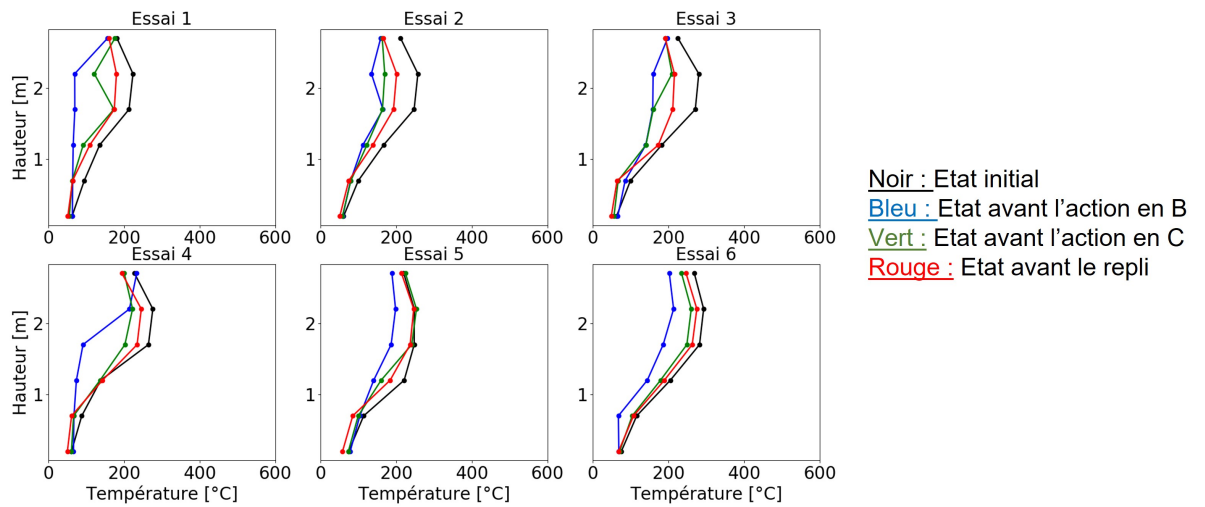
Les profils de température tracés correspondent à l'état thermique du milieu avant la réalisation des actions. La première courbe, courbe noire, est l'état du couloir avant que les sapeurs-pompiers ne réalisent la première action. La courbe suivante, courbe bleue, est obtenue lorsque les pompiers ont effectué la première action à l'entrée du couloir puis ont progressé jusqu'à la position suivante. De même, la courbe verte correspond à l'état du couloir lorsque la deuxième action a été réalisée et que les sapeurs-pompiers ont avancé jusqu'au coin du couloir. La dernière courbe, courbe rouge, est obtenue lorsque la dernière action a été effectuée et après le compte-rendu radio, soit juste avant le repli.

En observant la figure 3.15a, on remarque que la première action de la lance diphasique a peu d'effet sur l'arbre proche du foyer. Les profils de température pour les essais 1, 3 et 4 ne sont pas modifiés de façon significative alors que les essais 2 et 6 subissent un refroidissement, un maximum de  $87^{\circ}\text{C}$  en partie haute. À l'inverse, on remarque lors de l'essai 5 un léger réchauffement dans la zone haute et un refroidissement dans la zone basse. La deuxième action produit elle un refroidissement sur les deux-tiers supérieurs de l'arbre de thermocouple sur l'ensemble des essais avec un refroidissement moyen sur les deux thermocouples les plus hauts de  $140^{\circ}\text{C}$  et  $128^{\circ}\text{C}$ . La troisième action ne permet pas de refroidissement sur la durée. Toutefois, si l'on compare l'ambiance thermique initiale (courbe noire) et celle avant repli (courbe rouge) on observe que le niveau thermique a été abaissé pour les essais 1, 2, 3 et 4 mais qu'il est similaire pour les essais 5 et 6 malgré l'absence d'action directe sur le foyer.

Lorsque l'on observe le deuxième arbre de thermocouple, figure 3.15b, on remarque que la première action produit un refroidissement sur toute la hauteur dans l'ensemble des essais. À l'inverse, la deuxième action qui est réalisée juste devant l'arbre étudié, ne permet pas de refroidir davantage le milieu. On remarque sur les essais 2 et 3 que les conditions thermiques ont été maintenues, les courbes bleues et vertes sont similaires, alors que dans les autres cas l'ambiance thermique a été réchauffée par rapport à la situation obtenue après la première action de lance. Lors de l'ensemble des essais, la situation lors de la sortie est soit améliorée soit stabilisée par rapport aux conditions d'entrée du binôme.

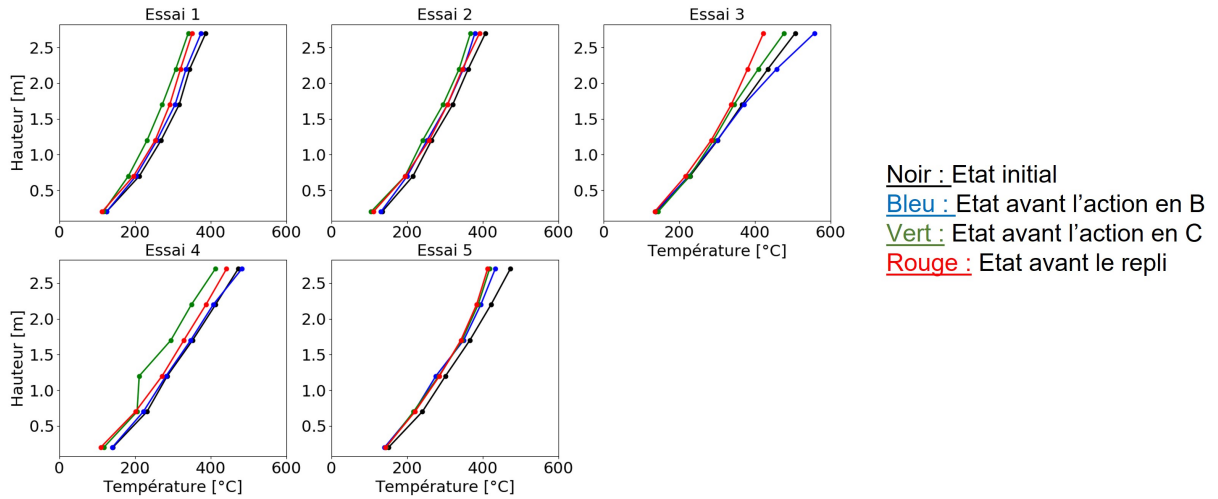


(a) Niveaux thermiques obtenus après chaque action de la lance diphasique au niveau de l'arbre bleu (figure 3.14).

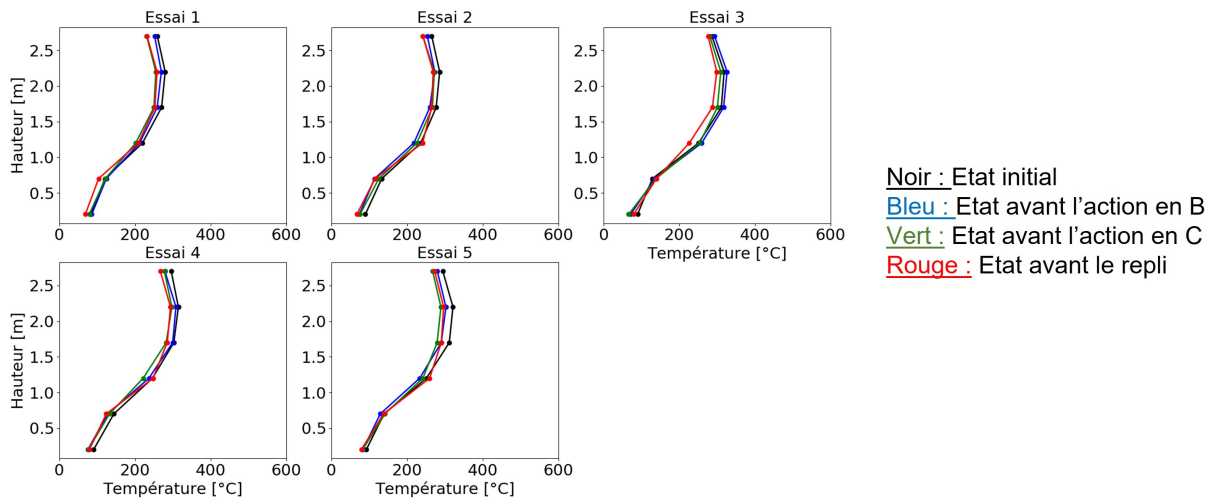


(b) Niveaux thermiques obtenus après l'action en B de la lance diphasique.

FIGURE 3.15 – Niveaux thermiques obtenus après chaque action de la lance diphasique au niveau de l'arbre rouge (figure 3.14).



(a) Niveaux thermiques obtenus après chaque action de la lance classique au niveau de l'arbre bleu (figure 3.14).



(b) Niveaux thermiques obtenus après l'action en B de la lance actuelle.

FIGURE 3.16 – Niveaux thermiques obtenus après chaque action de la lance classique au niveau de l'arbre rouge (figure 3.14).

Ces essais ont permis de mettre en évidence une nouvelle action du système diphasique. Cet outil permet une action dans la durée avec un refroidissement à distance du porteur. On remarque qu'une action de lance a un effet important environ dix mètres en amont de la progression. Ainsi l'action effectuée depuis l'entrée produit un refroidissement sur l'arbre situé dans la première partie du couloir mais n'a pas d'effet quantifiable sur celui situé plus loin. Par contre la deuxième action ne refroidit pas de manière significative l'arbre devant lequel elle est effectuée (cette zone subit toujours les effets du refroidissement de l'action précédente) mais agit sur l'arbre situé à dix mètres et cela malgré la présence d'un coude dans le couloir. En conclusion, les actions de lance avec le système diphasique permettent une action de refroidissement dans la durée à distance du porteur et une stabilisation de l'environnement proche des sapeurs-pompiers. L'outil permet donc de sécuriser la progression des sapeurs-pompiers en refroidissant le milieu avant que les intervenants ne l'atteignent.

Si l'on compare les courbes des figures 3.16a et 3.16b, correspondant à la lance actuelle, à celles observées précédemment on remarque qu'aucun refroidissement durable significatif n'a été mesuré. L'arbre le plus proche du foyer est le plus impacté avec un refroidissement médian de 30 °C en partie haute, soit très éloigné des 140 °C obtenus avec la lance diphasique. Dans ce cas nous avons préféré utiliser la valeur médiane de température pour prendre en compte la dispersion des mesures, en particulier les résultats obtenus lors du troisième essai. Le refroidissement moyen est de 38 °C mais cette valeur semble surestimée lorsque l'on considère l'ensemble des essais.

### 3.4.3 Conclusions

Ces essais ont permis de démontrer que le système diphasique agit différemment de la lance actuelle lors de la progression des intervenants. La lance utilisée aujourd'hui permet d'avoir un effet de refroidissement très important mais localisé à l'endroit précis de l'action de lance et sur une courte durée. L'efficacité de l'outil dépend de la bonne utilisation par les sapeurs-pompiers et donc du niveau d'entraînement, de l'aguerrissement, de l'expérience ... La lance diphasique a quant à elle un effet sur un volume important, les essais ont permis de mesurer des effets quantifiables à plus de dix mètres du lieu de l'ouverture de lance. De plus, le spray diphasique continue d'avoir une action malgré un angle droit dans le volume à traiter et agit ainsi sur une partie non visible par le porteur de lance.

Un nouvel effet a également pu être mis en avant, il s'agit d'un effet de refroidissement persistant dans le temps à distance du porteur. Cet effet peut être dû au temps de suspension supérieur des gouttes lorsque l'on utilise un brouillard d'eau et au type de jet obtenu avec la lance diphasique qui projette de l'eau plusieurs mètres devant les sapeurs-pompiers. Ce nouveau mode d'action du spray n'est pas possible avec la lance classique qui est utilisée en jet diffusé d'attaque. Ce phénomène est particulièrement intéressant pour assurer la sécurité des sapeurs-pompiers lors de leur progression.

Les essais comparatifs entre la lance actuelle et la lance diphasique ont permis de montrer que l'utilisation d'un brouillard d'eau permet une progression, dans des conditions thermiques et de visibilité très contraignantes, plus simple et plus sécurisée pour les intervenants. Chaque application de spray permet d'avoir un refroidissement sur une distance importante et qui perdure dans le temps. Le protocole utilisé est également important car

une autre utilisation de la lance diphasique a été testée mais n'a pas permis d'observer les mêmes phénomènes, il s'agissait de faire un mouvement circulaire (bulle de protection) d'une seconde autour du porteur lors de la progression (soit une action depuis l'entrée et 5 bulles lors de la progression). La technique de lance utilisée dans les essais présentés sera donc celle utilisée lors des interventions futures.



# Chapitre 4

## Étude à échelle intermédiaire de l'interaction entre un jet et une couche de fumée

Les travaux menés précédemment ne permettent pas une étude précise des phénomènes d'interaction entre un spray et une couche de fumée car les outils sont à échelle réelle. Pour la suite des travaux de thèse, il a donc été choisi d'utiliser une maquette à l'échelle  $1/5^{\text{ème}}$  afin de diminuer les contraintes logistiques, humaines et d'améliorer le contrôle des conditions d'essais. Une buse d'injection sera utilisée en lieu et place de la lance à incendie lors des essais sur la maquette. Des publications ont déjà démontré l'impact d'un jet sur la stratification d'une couche de fumée à cause des échanges de quantité de mouvement. Cette interaction peut partiellement bloquer la propagation de la fumée dans des situations confinées, comme l'ont récemment démontré Sun et *coll.* [63] ou Mehaddi et *coll.* [53]. De plus, les gouttelettes d'eau vont échanger de la chaleur avec le milieu environnant (air, flux de fumée ou surfaces) dans un processus de chauffage et d'évaporation des gouttelettes, ce qui entraîne un effet de refroidissement de l'environnement et donc une dé-stratification des fumées. Le diamètre des gouttelettes et le débit sont deux paramètres clés impliqués dans l'échange de chaleur, comme l'ont expliqué Yan et *coll.* [64] et Tissot et *coll.* [65] par exemple et seront particulièrement étudiés dans les travaux à suivre.

### 4.1 Présentation de la maquette et instrumentation

La maquette est composée de trois zones toutes réalisées en polycarbonate, de 5 mm d'épaisseur, comme illustré sur la figure 4.1. La zone n°1 est la zone foyer de hauteur 440 mm, de longueur 1160 mm et de largeur 420 mm. Toutes les parois ont été renforcées à l'aide d'un isolant thermique (en orange sur la figure) pour permettre de réaliser des essais avec des foyers de puissances plus importantes que ceux réalisés dans les travaux de Mehaddi et *coll.* [66]. De plus, l'amenée d'air a été agrandie sur toute la longueur du mur pour permettre une meilleure alimentation en oxygène du foyer. Elle est toujours réalisée en partie basse et en face arrière de la zone foyer, il s'agit du mur en pointillés sur le schéma de la maquette. La zone n°2 est un couloir intermédiaire qui permet une

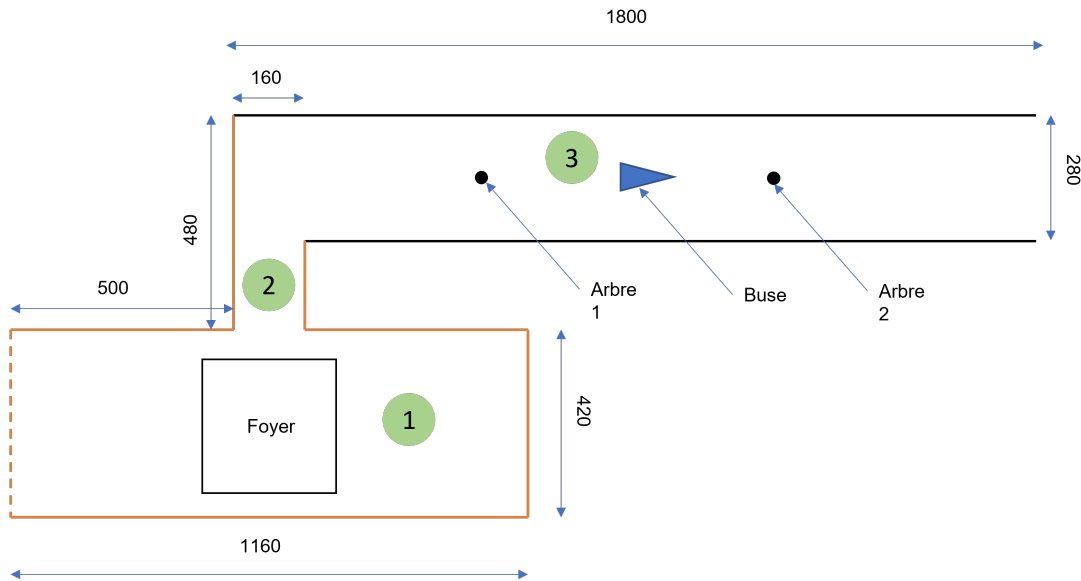


FIGURE 4.1 – Schéma de la maquette avec l'emplacement des capteurs

communication entre la zone foyer et le couloir. Cette zone, également renforcée avec de l'isolant, a les dimensions suivantes : longueur 200 mm, hauteur 380 mm et largeur 160 mm.

La zone n°3 est le couloir qui correspond à la zone d'étude à proprement parler. Les dimensions de cette zone sont, une longueur de 1800 mm, une hauteur de 480 mm et une largeur de 280 mm. Dans le couloir d'étude, seule la partie proche du couloir intermédiaire a été renforcée avec de l'isolant. Deux arbres de 24 thermocouples de type T, arbre 1 et arbre 2 sur la figure 4.1, sont installés dans le couloir à 1200 mm et 600 mm de la sortie, soit un thermocouple tout les 20 mm. La buse sera positionnée à équidistance des deux arbres de thermocouples en direction de la zone n°2, soit au plafond soit directement au sol. Ces positions correspondent respectivement à une application de type sprinkler (action descendante), sapeurs-pompiers (action ascendante inclinée) ou anti-sprinkler (action ascendante verticale). Cette nouvelle configuration permet d'étudier des puissances de foyer plus élevées que précédemment [66] et de protéger le foyer des actions du spray. En effet, le spray ne doit pas agir sur le terme source et la production de fumées qui doivent rester constants au cours de chaque expérimentation. Ainsi les effets sur la couche de fumée seront les conséquences de l'action directe du spray.

#### 4.1.1 Choix de la buse et orientation

La buse d'injection choisie est la TP400067 de Spraying systems and Co. déjà utilisée lors de précédentes études [53, 67, 68]. Les trois orientations d'injection étudiées expérimentalement sont schématisées sur la figure 4.2. La figure 4.3 est une photographie de la configuration lors d'un test. On peut observer la fumée stratifiée en partie haute et la lueur du foyer au fond du couloir. La buse d'injection est située en partie basse du couloir, avec un angle ascendant de 45°, entre les deux arbres de thermocouples.

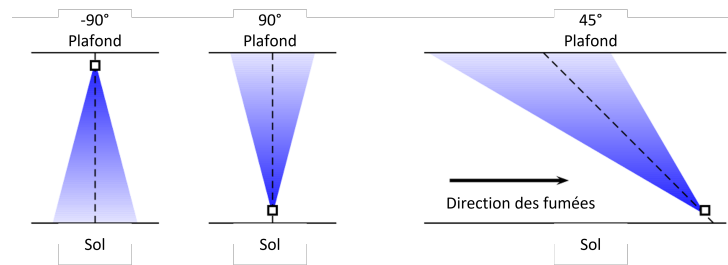


FIGURE 4.2 – Schémas en vue latérale des configurations d'injection étudiées.



FIGURE 4.3 – Essai réalisé avec un spray ascendant incliné à 45°

Cette buse produit un jet de gouttelettes polydispersées de forme triangulaire. Toutefois, il est possible de modifier le diamètre moyen des gouttes en réglant la pression d'alimentation de la buse. Une caractérisation de la taille et de la vitesse des gouttes a donc été réalisée à l'aide d'un dispositif de mesure Sprayspy (time shift system measurement), de la société AOM System. Il s'agit du même système que celui utilisé dans la section 2.2.1. Les mesures ont été effectuées uniquement à 20 cm de la sortie de la buse car cela correspond à la distance d'interaction entre le jet et le début de la couche de fumée.

Lors de l'exploitation des mesures effectuées sur la lance diphasique une variation des résultats avait été observée avec le changement de réglage de la vitesse maximale. L'analyse des résultats, sans utiliser l'interface du constructeur, a permis de détecter une coupure inexplicite, visible sur la figure 4.4, qui semble empêcher la détection de gouttes situées sous un certain rapport vitesse/taille de gouttes. En théorie, les mesures sont censées être effectuées entre les deux lignes horizontales vertes qui correspondent aux vitesses maximale et minimale de détection. Mais on observe une autre coupure, délimitée par la droite rouge, qui ne correspond pas à un phénomène prévu par le constructeur. Le coefficient directeur de la droite varie en fonction de la vitesse maximale renseignée par l'utilisateur avant de commencer la mesure. Cette observation est appuyée par la comparaison avec les résultats obtenus dans une autre étude [1], où l'on observe également cette coupure comme le montre la figure 4.5 ; les axes sont inversés sur cette représentation. Cette comparaison permet de s'assurer que la coupure n'est donc pas liée à un défaut de l'appareil. Cette limite n'est pas visible sur les représentations directement obtenues par le logiciel du constructeur qui montre uniquement des diagrammes de répartition des diamètres de goutte et des vitesses en échelle logarithmique. Ce défaut de mesure n'a malheureusement pu être identifié qu'après les essais réalisés sur la lance diphasique et une nouvelle campagne de mesure n'a pas pu être organisée avant la fin des travaux de thèse. Le diamètre de Sauter, le  $D_{V90}$  et le  $D_{V10}$  présentés précédemment sont donc probablement sous-estimés alors que la vitesse est sur-estimée. Une fois ce défaut détecté, une étude permettant de palier ce phénomène a été réalisée sur la buse TP400067, avec une méthode de mesure qui pourra être utilisée pour tout type de spray.

#### 4.1.2 Nouvelle méthode de mesure

La nouvelle méthode consiste à réaliser un grand nombre de mesures en augmentant à chaque fois la vitesse maximale de détection en conservant le temps de mesure constant. Les mesures effectuées vont d'une vitesse maximale de détection de  $5 \text{ m s}^{-1}$  à  $90 \text{ m s}^{-1}$ , avec un pas de  $5 \text{ m s}^{-1}$ . Ensuite, un cumul des mesures est effectué en conservant uniquement les gouttes entre la vitesse  $V_{max}$  et  $V_{max} - 5 \text{ m s}^{-1}$ , pour chaque essai afin de ne pas comptabiliser les gouttes plusieurs fois. Pour améliorer la qualité du post traitement et éviter d'être en limite de détection de l'appareil, un deuxième post traitement a été choisi où seules les vitesses entre  $V_{max} - 5 \text{ m s}^{-1}$  et  $V_{max} - 10 \text{ m s}^{-1}$  seront considérées. Le résultat de ce type de mesure est présenté sur la figure 4.6, où chaque couleur sur le graphique correspond à une mesure effectuée pour une vitesse maximale donnée. En comparant avec la figure 4.4, on remarque que la coupure observée précédemment n'apparaît plus avec cette nouvelle approche.

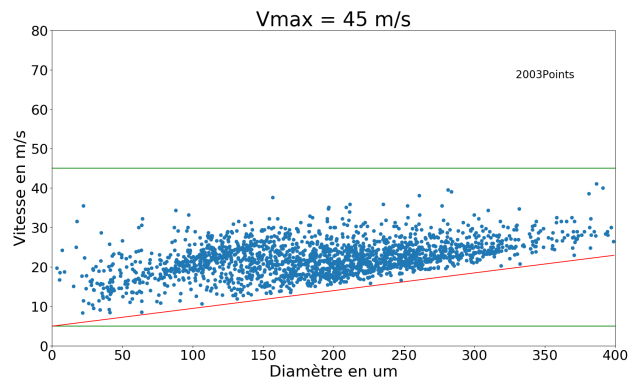


FIGURE 4.4 – Exemple de mesure réalisée sur la lance diphasique. Les droites vertes représentent la fenêtre de mesure sélectionnée. La droite rouge représente la coupure détectée lors de l’analyse des résultats.

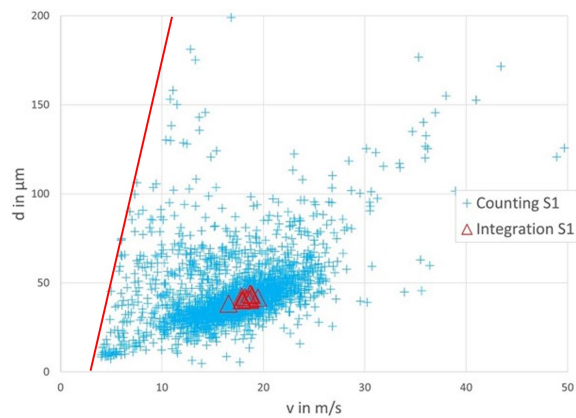


FIGURE 4.5 – Résultats de mesures obtenus par une autre équipe de recherche [1] où l’on peut également observer une coupure dans la mesure.

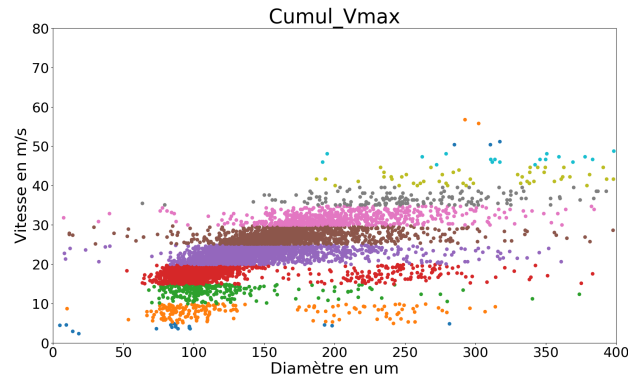


FIGURE 4.6 – Cumul des mesures avec post traitement

Le tableau 4.1 permet une comparaison entre les résultats obtenus par les deux méthodes de mesures. Une mesure simple correspond à une unique mesure avec vitesse maximale la plus adaptée, soit une mesure standard. La mesure multiple correspond à la nouvelle méthode mise en place nécessitant le cumul de plusieurs mesures. On observe que la mesure simple sous-estime le diamètre pour les deux cas testés, alors que la vitesse peut-être aussi bien sur-estimée que sous-estimée en fonction de la pression d'alimentation. L'écart maximal de mesure est de l'ordre de 6% qu'il s'agisse des mesures de diamètre ou de vitesse. Les mesures obtenues sur le système diphasique permettent donc d'avoir un ordre de grandeur pertinent des vitesses et diamètres de gouttes dans le jet. Si le besoin d'une caractérisation plus précise des jets diphasiques est nécessaire la nouvelle méthode devra être utilisée lors d'une nouvelle campagne de mesure. Toutefois, les écarts observés étant faibles, l'utilité d'une telle campagne semble limitée au regard de l'utilisation de la lance diphasique. Le nouveau protocole établi permet une mesure précise et juste de la répartition de la taille et de la vitesse de goutte et devra donc être utilisé lorsque des mesures précises sont souhaitées.

| Pression d'alimentation | Type de mesure                   | Diamètre moyen de goutte en $\mu\text{m}$ | Vitesse moyenne en $\text{m s}^{-1}$ |
|-------------------------|----------------------------------|---|--------------------------------------|
| 4 bar                   | simple ( $25 \text{ m s}^{-1}$ ) | 166                                       | 16,5                                 |
|                         | multiple                         | 173                                       | 16,8                                 |
| 8 bar                   | simple ( $40 \text{ m s}^{-1}$ ) | 143                                       | 24,8                                 |
|                         | multiple                         | 155                                       | 23,3                                 |

TABLE 4.1 – Comparaison des méthodes de mesure sur la buse TP400067 à 20 cm de l'orifice

### 4.1.3 Répétabilité des foyers

Le foyer est obtenu par un feu de bac, d'un diamètre de 90 mm, rempli d'heptane. Le débit calorifique (HRR) est calculé à partir de la mesure de perte de masse à l'aide de la relation suivante :

$$\dot{Q}_s = \dot{m} \cdot \Delta h_c \quad (4.1)$$

avec  $\dot{m}$  la perte de masse en  $\text{g s}^{-1}$ ,  $\Delta h_c$  la chaleur de combustion de l'heptane en  $\text{J g}^{-1}$  et  $\dot{Q}_s$  le débit calorifique en W. La valeur retenue pour l'enthalpie de combustion de l'heptane est issue du SFPE Handbook [69], il s'agit d'une valeur expérimentale qui inclut déjà l'efficacité de combustion.

Les mesures de perte de masse sont réalisées toutes les secondes et sont moyennées à l'aide d'une fenêtre Gaussienne centrée glissante de 31 points pour filtrer les bruits de mesure. La valeur moyenne sur l'ensemble des essais du débit calorifique maximal (sur le plateau) est de 28 kW avec un écart type de plus ou moins 3 kW. Les lois usuelles de changement d'échelle [70, 71] pour ce type de maquette permettent d'estimer un débit calorifique à échelle réelle de 1,5 MW.

L'ensemble des débits calorifiques obtenus lors des essais est illustré par la figure 4.7 avec en gras la cas de référence sans aspersion. Les courbes ont été recalées temporellement sur la phase de décroissance afin de faciliter la comparaison. Le détail de l'ensemble des tests effectués est disponible dans le tableau 4.2.

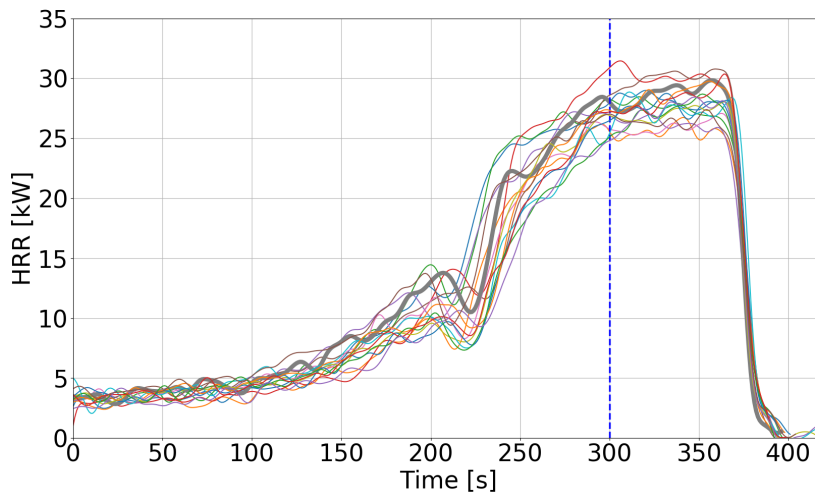


FIGURE 4.7 – Comparaison des HRR obtenus pour les différents tests

L'aspersion est déclenchée lorsque le débit calorifique atteint son maximum, le trait pointillé vertical sur la figure 4.7 indique le début de l'aspersion. Le spray ne sera stoppé que lorsque le foyer sera complètement éteint par manque de combustible. On observe que la présence ou non d'injection ne modifie pas le HRR quel que soit l'angle d'aspersion. Les différences de durée de combustion sont dues à des variations de masse initiale d'heptane,

| Numéro de test<br>[–] | Angle d'injection<br>[°] | Pression d'alimentation<br>[bar] | Nombre de répétitions<br>[–] |
|-----------------------|--------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| #01                   | Sans                     | Sans                             | 1                            |
| #02 → #04             | 90                       | 8                                | 3                            |
| #05 → #07             | 45                       | 8                                | 3                            |
| #08 → #10             | -90                      | 8                                | 3                            |
| #11 → #13             | 90                       | 4                                | 3                            |
| #14 → #16             | 45                       | 4                                | 3                            |
| #17 → #19             | -90                      | 4                                | 3                            |

TABLE 4.2 – Liste des essais effectués avec leurs paramètres correspondants

mais cela n'affecte pas significativement la répétabilité des essais, seule la durée du plateau est modifiée. Le débit calorifique étant protégé du jet et répétable quelle que soit la configuration testée. Il est donc considéré que les variations qui seront mesurées sur les arbres de thermocouples seront provoquées par les changements de conditions d'injection.

## 4.2 Présentation des résultats

### 4.2.1 Analyse des résultats bruts

Une analyse des données brutes sera d'abord réalisée pour chaque configuration avant de généraliser les conclusions. La figure 4.8 qui correspond aux mesures effectuées au niveau de l'arbre de sortie au cours d'un essai dans une configuration sprinkler (injection verticale descendante) va nous permettre d'expliquer différents phénomènes qui ont pu être observés lors des essais. On remarque tout d'abord que les températures initiales ne correspondent pas aux températures ambiantes avec des valeurs proches de 50 °C en partie haute. Ce phénomène est dû à un pré-chauffage réalisé avant chaque essai. En début de journée, un bac est brûlé sans être utilisé dans l'analyse, ensuite chaque essai fait fonction de pré-chauffage pour l'essai suivant. Le foyer est donc actif uniquement à partir de 80 secondes et jusqu'à la fin des courbes représentées. La décroissance des températures due à l'extinction par manque de combustible a été coupée pour faciliter l'analyse. De plus l'activation de l'aspersion est indiqué par le trait bleu pointillé vertical. Les variations observées à partir de cet instant sont donc provoquées par l'aspersion car nous avons montré précédemment que le foyer reste stable même lorsque le jet est activé. Sur le graphique, chaque courbe représente une mesure de température à une hauteur donnée, celle correspondant au thermocouple positionné à mi-hauteur a été mise en gras afin de faciliter la lecture. L'ensemble de ces conventions de représentations est utilisé sur la figure 4.9, permettant de comparer les résultats pour les trois configurations d'injection données pour une pression d'alimentation de 4 bar.

Les résultats obtenus avec une injection de type sprinkler peuvent être comparés avec d'autres études [72, 73] car il s'agit d'une configuration déjà largement étudiée. Lors de l'activation du spray un brassage est attendu avec une diminution de la température en partie haute et une augmentation en partie basse, les courbes de températures se



regroupent et l'ambiance thermique devient quasiment homogène. Dans notre cas, un mélange complet n'est pas observé, les deux thermocouples situés en partie haute du côté foyer subissent même une légère augmentation de température. Cette différence, par rapport aux essais déjà réalisés, est due au support de lance qui laisse un écart de 4 cm entre le plafond et la buse d'injection. Cet espace permet la circulation de fumées en partie haute qui ne sont ni refroidies ni entraînées par le spray.

L'arbre situé du côté de la sortie montre également un réchauffement important en partie basse à cause du brassage des fumées alors que les thermocouples situés en partie haute restent constants car le spray ne permet pas de bloquer les fumées en partie haute.

L'injection ascendante verticale permet de bloquer plus efficacement les fumées. On observe un réchauffement sur l'ensemble des thermocouples situés du côté foyer avec une augmentation de 80 °C pour les thermocouples situés à mi-hauteur. Une stratification thermique est maintenue malgré le brassage provoqué par le spray. À l'inverse, du côté de la sortie, un refroidissement très important est observé en partie haute alors qu'un léger réchauffement se produit pour les thermocouples du bas. L'homogénéisation observée en aval est similaire à celle décrite dans [72]. Il faut également remarquer que les thermocouples les plus bas en aval ne sont pas impactés par le spray et qu'une couche froide subsiste malgré le brassage important sur le reste de la hauteur.

La dernière configuration testée correspond à l'injection ascendante avec un angle de 45°, la situation la plus proche des actions réalisées par les sapeurs-pompiers. On peut observer sur les courbes en amont du spray un phénomène inattendu avec une couche d'air plus chaude en partie basse (80 °C) que celle en partie haute (40 °C). On obtient une stratification thermique inversée. Toutefois ce résultat doit être relativisé car le spray impacte directement l'arbre de thermocouples avec cet angle d'injection. Le refroidissement mesuré ne correspond pas forcément au refroidissement réel de la phase gazeuse. Les thermocouples situés du côté de la sortie (non impactés par le spray) montrent un brassage conséquent avec un refroidissement important en partie haute et une augmentation limitée en partie basse. Les thermocouples les plus bas restent préservés comme lors de l'injection ascendante verticale.

## 4.2.2 Généralisation des résultats

La comparaison des résultats entre les différents essais doit prendre en compte l'augmentation de température due à l'enchaînement des brûlages. On peut observer sur la figure 4.10 l'effet des brûlages successifs sur les conditions thermiques dans la maquette. La deuxième répétition reproduit bien les mêmes courbes mais décalées avec un effet de l'échauffement encore plus visible pour la dernière répétition. Les mesures de températures présentées par la suite seront donc adimensionnées à l'aide de la relation 4.2 afin de faciliter la comparaison. Cette méthode peut être utilisée car l'étude porte sur le comportement des fumées et ne s'intéresse pas à la valeur effective des températures.

$$T_{norm} = \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (4.2)$$

avec  $T_{min}$  la température minimale mesurée sur chaque arbre avant l'injection et  $T_{max}$  la température maximale mesurée avant l'injection. Ainsi la température maximale avant

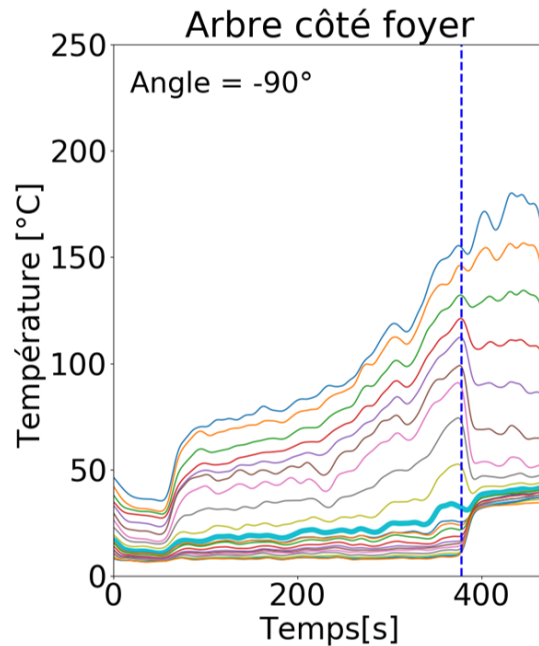


FIGURE 4.8 – Exemple de données brutes obtenues lors des essais

l'injection prend la valeur 1. Des valeurs supérieures à 1 après l'activation peuvent exister si une température dépasse la valeur maximale mesurée sans le jet. Ce traitement des données permet de comparer plus facilement les essais entre eux et de vérifier la répétabilité des mesures malgré l'échauffement progressif de la maquette. De plus, les données sont filtrées avec la même fenêtre Gaussienne centrée que celle utilisée pour le traitement du HRR.

La figure 4.11 représente l'ensemble des essais réalisés avec l'écart type pour chaque configuration (3 répétitions ont été effectuées pour chaque configuration). Avant toute analyse, il convient de noter que les résultats obtenus sont répétables, une fois adimensionnés, quel que soit le type de configuration et qu'une analyse des essais est bien pertinente. Les courbes rouges correspondent aux conditions en amont et en aval avant le déclenchement du spray. Il s'agit d'une mesure 5 secondes avant le début de l'injection. Ces mesures permettent de démontrer la présence d'une stratification thermique bien établie sur l'ensemble du couloir. Les courbes bleues et vertes sont calculées à partir d'une moyenne effectuée sur 30 secondes. Cette moyenne est effectuée 30 secondes après l'activation du jet pour être dans un régime établi. Les courbes bleues correspondent aux essais réalisés avec une pression d'alimentation de 4 bars et les vertes à une pression d'alimentation de 8 bars. Les figures de gauches représentent les profils de température en amont du spray (côté foyer) et celles de droites les profils en aval (côté sortie). Les écarts types présents sur chaque courbes permettent d'évaluer la répétabilité des mesures et des phénomènes détectés.

On remarque tout d'abord que le changement de pression (courbes bleue et verte) modifie l'effet du spray sur les fumées de manière significative en amont du spray pour les injections ascendantes. Lors de l'injection ascendante verticale, la partie basse du couloir

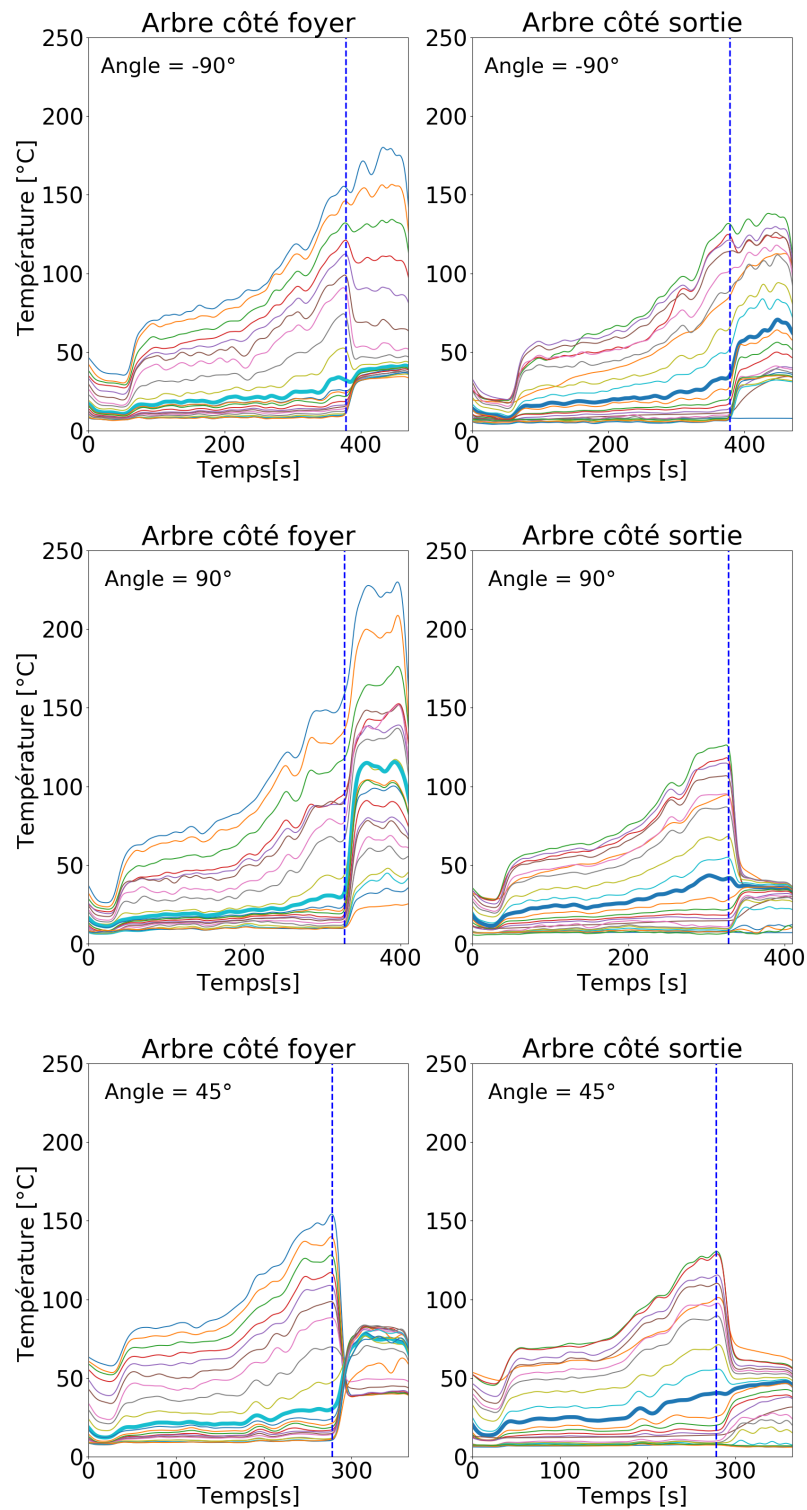


FIGURE 4.9 – Profils de température au cours du temps pour les trois configurations d'injection étudiées, avec à gauche l'arbre côté foyer et à droite l'arbre côté sortie.

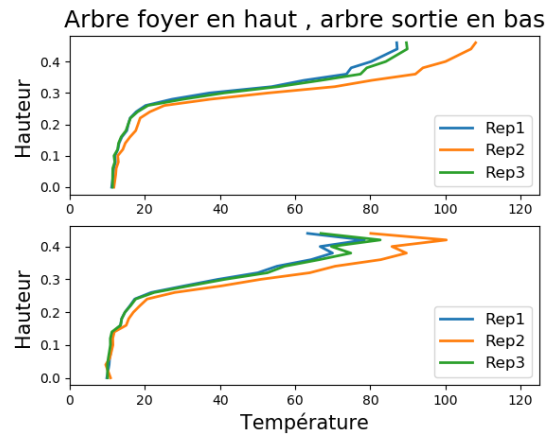


FIGURE 4.10 – Résultats obtenus pour différents brûlages sans adimensionnement

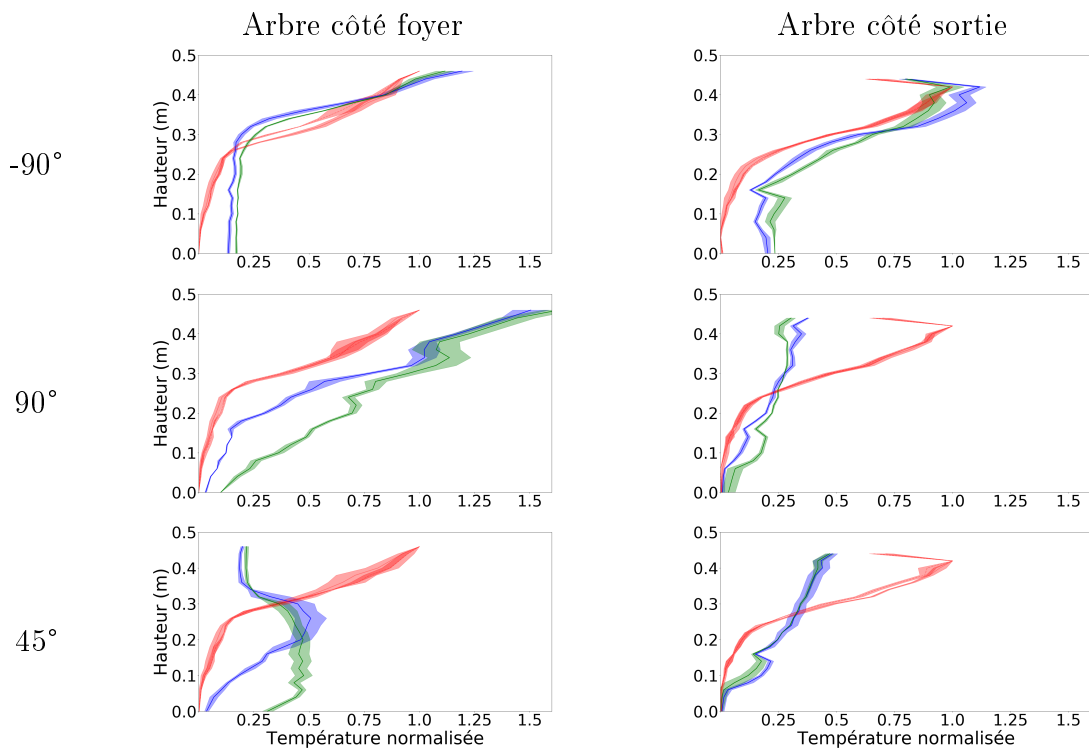


FIGURE 4.11 – Profils de température avant (en rouge) et après l'injection, pour deux pressions d'alimentation (courbe bleue pour 4 bars et verte pour 8 bars) avec les écarts types. La colonne de gauche correspond à l'arbre côté foyer et la colonne droite à l'arbre côté sortie.

du côté du foyer se retrouve avec des températures supérieures lorsque l'on augmente la pression mais l'effet le plus visible est observé pour l'injection ascendante avec un angle de 45°. Le changement de pression provoque un gain de température important sur toute la moitié basse du couloir situé en amont. Le changement de la force de trainée, à cause du changement de diamètre des gouttes et de leurs vitesses, n'apparaît pas comme le phénomène le plus impactant dans les phénomènes étudiés (dans la plage de pression d'alimentation étudiée) par rapport à l'angle d'injection.

Le paramètre modifiant le plus le comportement des fumées est le choix de l'angle d'injection. Une utilisation de type sprinkler permet de garder une stratification thermique mais ne produit pas de refroidissement significatif. Les effets sont similaires en amont et en aval de l'injection à cause de la configuration expérimentale (pour rappel il existe un espace entre la buse et le plafond). Une injection ascendante verticale permet de bloquer une partie des fumées provoquant un réchauffement significatif sur toute la hauteur du milieu en amont. En aval, on observe un refroidissement global de l'ambiance thermique mais un brassage massif des fumées homogénéise le milieu, une couche d'air reste tout de même non impactée par le spray en partie basse. Ces conclusions sont également valables pour l'injection ascendante avec un angle de 45°. L'inversion thermique mesurée est probablement due à l'impact de l'eau sur les thermocouples, donc un problème de mesure, et ne peut pas être considéré comme un phénomène physique.

### 4.2.3 Bilans des essais

La caractérisation de la buse TP400067 a permis de trouver la cause des écarts de mesure de granulométrie observés dans la section 2.2.1 et de proposer un nouveau protocole de mesure permettant d'obtenir la mesure précise et non plus approchée du diamètre et de la vitesse des gouttes. Ce résultat est essentiel pour la suite des mesures qui seront réalisées avec le dispositif Sprayspy. Les expérimentations à échelle réduite ont quant à elles montré que la pression d'alimentation des buses est un paramètre secondaire (dans la plage 4 à 8 bars) dans l'étude des interactions thermiques entre un jet et des fumées si l'on compare à l'effet du changement d'angle d'aspersion. Les effets produits étant différents en amont et en aval de l'aspersion le choix de l'angle d'injection dépend de l'objectif recherché. Les injections ascendantes permettent un refroidissement important en aval de l'injection mais provoque une déstratification par brassage des fumées. De plus, les conditions thermiques en amont sont dégradées par rapport à la situation initiale à cause du blocage des fumées provoqué par le spray. Toutefois, une zone correspondant à l'emplacement des intervenants semble ne pas être impactée et permettrait d'assurer un environnement stable autour des sapeurs-pompiers. L'utilisation en mode sprinkler, avec l'écart existant entre la buse et le plafond, ne permet pas de refroidir le milieu mais ne modifie pas la stratification thermique dans l'ensemble du couloir. Les environnements avant et après aspersion sont similaires.

Ces essais constituent une première étape dans l'étude possible, et souhaitable, des interactions entre un spray ascendant et une couche de fumée. Nous avons pu prouver que la méthode retenue permet de réaliser des essais répétables et des premières conclusions sur l'utilité des différentes applications ont été présentées mais ne peuvent pas être utilisées par les sapeurs-pompiers directement. De futurs travaux pourront s'intéresser à

des utilisations de spray plus proches de celles qui peuvent être faites par les sapeurs-pompiers en particulier en étudiant un jet fonctionnant par impulsion et non plus en continu. Un protocole avec une impulsion à l'entrée du couloir, puis une seconde entre les arbres de thermocouples, et une dernière après les arbres semble également particulièrement pertinent à étudier pour se rapprocher au maximum du protocole d'intervention. Une mesure de vélocimétrie par images et d'opacimétrie de particules permettrait de compléter l'approche uniquement thermique présentée dans ce manuscrit et de prendre en compte d'autres phénomènes qui n'ont pu être étudiés pour le moment. Une analyse numérique après simulation des essais peut aussi permettre de mieux comprendre les phénomènes d'interaction. C'est l'approche que nous avons choisie et qui sera présentée dans le chapitre suivant.

# Chapitre 5

## Modélisation des essais pour réaliser les bilans massique et énergétique

L'expérimentation menée précédemment ne permet pas de quantifier les échanges thermiques et massiques impliqués. Les essais présentés dans le chapitre précédent vont être utilisés afin de réaliser des simulations et de confirmer la concordance entre les modèles numériques et les résultats expérimentaux. Une fois les simulations validées, ces dernières seront utilisées pour effectuer des bilans massique et énergétique. L'objectif de ces simulations est de déterminer dans quelles proportions les changements de diamètre et de débit d'alimentation influent sur l'efficacité des échanges thermiques. Le logiciel utilisé est Fire Dynamics Simulator (FDS) développé par le NIST et couramment utilisé dans le domaine de la modélisation incendie.

Les bilans seront réalisés uniquement dans le couloir de la maquette (zone n°3 de la figure 4.1) car nous avons montré que la pièce foyer n'est pas impactée par le spray et que le but de l'étude est l'interaction entre le spray et les fumées. La réalisation des bilans nécessite une modification du code source, une étape de vérification sur un cas simple sera effectuée dans un premier temps. Il s'agit d'une boîte ouverte sur un côté contenant soit un sprinkler, soit un brûleur à gaz.

### 5.1 Établissement des bilans massique et énergétique

#### 5.1.1 Bilan massique sur la phase gazeuse et la phase liquide

La thèse d'Alexandre Jenft [44] propose dans son chapitre 4 une approche détaillée des bilans massique et énergétique qui sera reprise et complétée dans ce chapitre. La figure 5.1 permet de détailler les échanges de matière entre la phase liquide, la phase gaz et l'extérieur. Le terme  $\dot{m}_{evap}$  décrit l'évaporation des gouttes qui passe de la phase liquide à gazeuse. Les termes  $\dot{m}_{adv,g}$  et  $\dot{m}_{adv,p}$  représentent les échanges par les ouvrants pour respectivement le gaz et les particules d'eau. Les deux derniers termes sont  $\dot{m}_{pyro}$  le taux de pyrolyse et  $\dot{m}_{inj}$  la masse d'eau injectée par le sprinkler. Le terme  $\dot{m}_{pyro}$  est nul si le foyer n'est pas inclus dans le volume d'étude. Dans notre cas deux bilans différents seront effectués, le premier sur la phase gazeuse et le second sur la phase liquide.

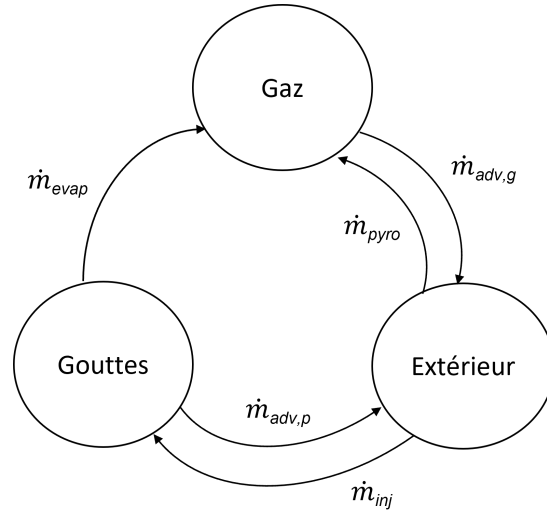


FIGURE 5.1 – Adaptation du schéma du bilan massique réalisé par Jenft [44].

Le bilan massique sur la phase gazeuse s'écrit :

$$\dot{m}_{evap} - \dot{m}_{adv,g} + \dot{m}_{pyro} = \frac{dm_g}{dt} \quad (5.1)$$

Le bilan massique sur l'eau en phase liquide s'écrit quant à lui :

$$\dot{m}_{inj} - \dot{m}_{evap} - \dot{m}_{adv,p} = \frac{dm_p}{dt} \quad (5.2)$$

### 5.1.2 Bilan énergétique sur la phase gazeuse et la phase liquide

Le bilan énergétique présenté sur la figure 5.2 est également adapté de la thèse de Jenft [44]. Un ajout en orange a été fait pour adapter le bilan à notre configuration. Le paramètre  $\dot{Q}_{adv,p}$  sert à prendre en compte les particules liquides allant vers l'extérieur, au sol ou en suspension, et la perte d'énergie que cela engendre. Les paramètres  $\dot{Q}_{conv,w/g}$  et  $\dot{Q}_{ray,w/g}$  décrivent les échanges aux parois par convection et rayonnement entre la phase gazeuse et solide, la somme de ces deux termes correspond aux échanges par conduction au sein des parois. Les échanges par convection et rayonnement nécessaires pour échauffer les gouttes sont représentés par  $\dot{Q}_{conv,g/p}$  et  $\dot{Q}_{ray,g/p}$ . L'énergie nécessaire pour l'évaporation des gouttes est incluse dans le terme  $\dot{Q}_{evap}$ . Les échanges par convection entre les particules et les murs sont décrits par le terme  $\dot{Q}_{w/p}$ . Les échanges aux ouvrants sont comptabilisés dans le paramètre  $\dot{Q}_{adv,g}$ . Le dernier terme,  $EI_g$ , correspond à l'énergie interne des gaz contenus dans le volume.

Le bilan énergétique sur la phase gazeuse s'écrit :

$$HRR + \dot{Q}_{adv,g} + \dot{Q}_{conv,w/g} + \dot{Q}_{ray,w/g} + \dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_{conv,g/p} - \dot{Q}_{ray,g/p} = \frac{dEI_g}{dt} \quad (5.3)$$

Le terme  $\dot{Q}_{ray,w/g}$  inclut les échanges par rayonnement aux parois mais également au niveau du brûleur. Il est essentiel de prendre en compte le retour radiatif sur la surface du brûleur car il s'agit d'un terme essentiel dans le phénomène de combustion.



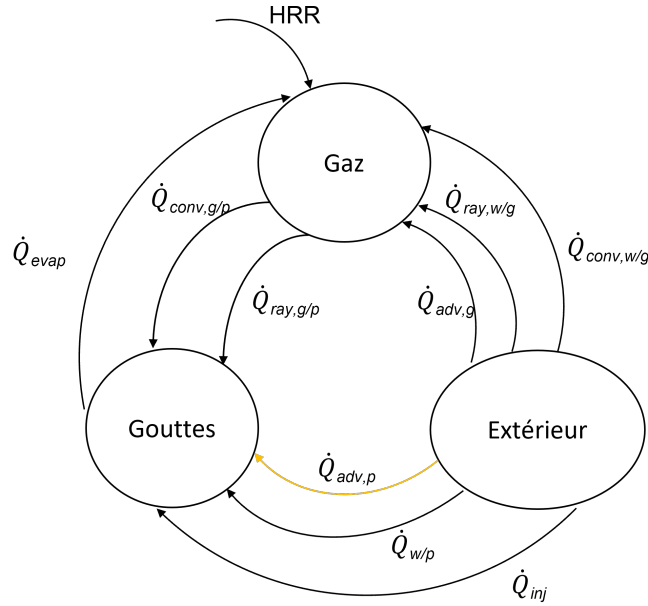


FIGURE 5.2 – Schéma du bilan énergétique réalisé par A. Jenft [44], les ajouts sont visibles en orange.

Le bilan énergétique sur l'eau en phase liquide s'écrit quant à lui :

$$\dot{Q}_{inj} + \dot{Q}_{conv,g/p} + \dot{Q}_{ray,g/p} - \dot{Q}_{evap/g} + \dot{Q}_{adv,p} + \dot{Q}_{w/p} = \frac{dEI_p}{dt} \quad (5.4)$$

Le terme  $\dot{Q}_{inj}$  correspond à la variation d'énergie interne contenue dans les particules injectées dans la boîte. Il dépend de la température prescrite dans le fichier de modélisation et peut donc facilement être calculé.

Toutes les valeurs utilisées dans ce bilan ne peuvent être accessibles qu'en modifiant le code.

## 5.2 Détermination des capteurs numériques nécessaires

Dans cette partie, nous présenterons les capteurs utiles pour effectuer les bilans présentés précédemment. Pour la thèse, la version utilisée est la 6.7.6 de Fire Dynamics Simulator. Cette version a été choisie car elle comporte des capteurs supplémentaires qui sont nécessaires pour effectuer les bilans souhaités (ces capteurs ont été supprimés sur les versions plus récentes). Les figures 5.3 et 5.4 reprennent les bilans établis précédemment avec en plus les capteurs permettant d'effectuer la mesure de certaines grandeurs en bleue. On remarque que certaines données ne peuvent pas être directement acquises lors de la simulation, elles sont indiquées en rouge sur le schéma, et nécessitent une attention particulière.

Les données manquantes concernent uniquement les échanges au niveau des gouttes.

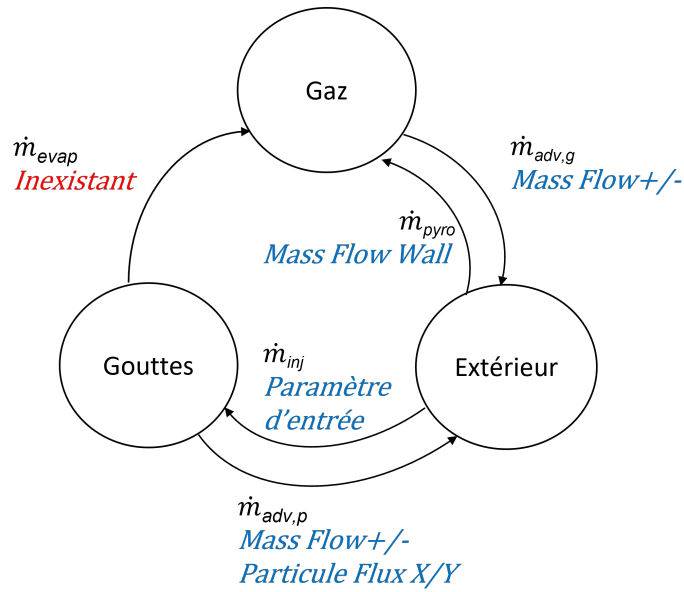


FIGURE 5.3 – Schéma du bilan massique avec les capteurs correspondants dans FDS.

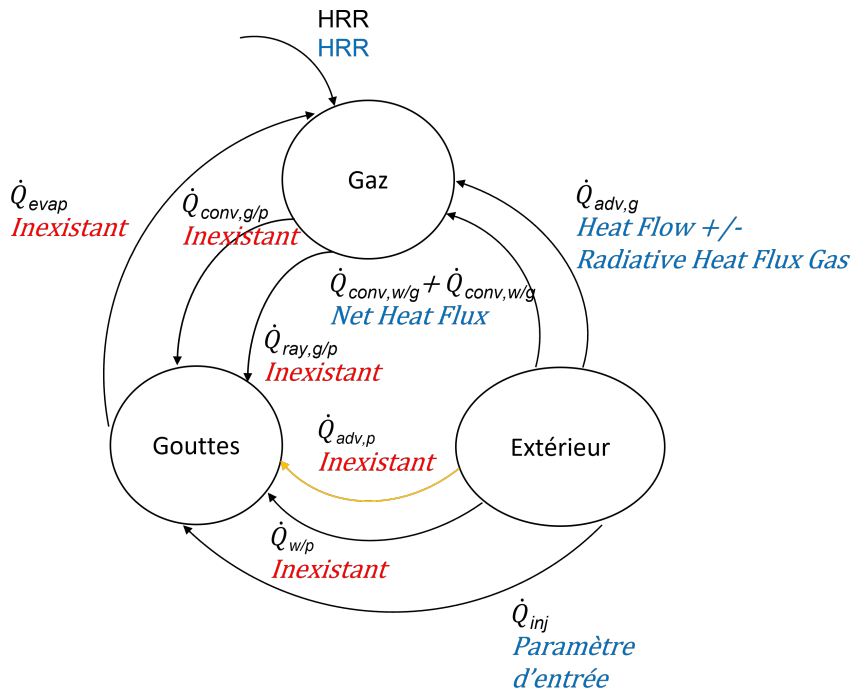


FIGURE 5.4 – Schémas du bilan énergétique avec les capteurs correspondants dans FDS.

En repartant de l'équation 5.5, qui correspond à l'équation 21.2 du « User Guide » [74], on retrouve plusieurs termes présents dans les bilans.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int \rho h_s dV &= \int \dot{q}''' dV + \left( \dot{q}_{p,r} - \int \nabla \cdot \dot{q}_r'' dV \right) + \sum_{\alpha} \dot{m}_{p,\alpha} h_{s,\alpha} - \int \rho u h_s \cdot dS \\ &+ \left( \dot{q}_{p,w} - \int \dot{q}_c'' dA \right) + \sum_{\alpha} \int h_{s,\alpha} \rho D_{\alpha} \nabla Y_{\alpha} \cdot dS + \int \frac{d\bar{p}}{dt} dV \\ &+ (-\dot{q}_{p,r} - \dot{q}_{p,c} - \dot{q}_{p,w}) \end{aligned} \quad (5.5)$$

Par exemple les termes  $\dot{q}_{p,r}$ ,  $\dot{q}_{p,c}$  et  $\dot{q}_{p,w}$  correspondent respectivement à  $Q_{ray,g/p}$ ,  $Q_{conv,g/p}$  et  $\dot{Q}_{w/p}$  présents dans les bilans que nous avons établis. Malheureusement, le logiciel ne renvoie en donnée de sortie que le terme  $Q_{part}$  qui correspond à la somme des trois grandeurs qui nous intéressent. De même, le terme  $\dot{m}_{p,\alpha}$  est bien la masse d'eau évaporée, correspondant à la grandeur  $\dot{m}_{evap,g}$  utilisée dans les bilans, mais n'est pas renvoyée par le logiciel<sup>5</sup>. Une modification des codes sources de FDS a donc été réalisée afin de rajouter ces données au fichier de sortie. Un point essentiel pour effectuer les bilans souhaités est de pouvoir sélectionner la zone dans laquelle les données ci-dessus sont calculées. En effet, par défaut FDS effectue ses calculs sur l'ensemble du domaine de calcul, or dans notre cas nous ne voulons quantifier les échanges que dans une zone précise. Une nouvelle modification du code a été effectuée afin de pouvoir définir seulement une partie du domaine comme une zone d'étude. Le calcul des valeurs recherchées ne sera alors effectué que dans le volume prescrit, tous les échanges ayant lieu en-dehors de cette zone ne seront pas considérés. Cette modification est essentielle pour permettre d'effectuer les bilans quelle que soit la géométrie de la simulation. Le terme d'échange avec l'extérieur  $\dot{Q}_{adv,p}$  est maintenant défini implicitement au sein de chaque paramètre puisque si la particule sort de la zone le calcul ne comptabilise plus les échanges qui ont lieu. L'ensemble des modifications apportées sont décrites plus précisément en annexe 3.

### 5.3 Vérification sur un cas test

Le cas de vérification choisi consiste en une unique pièce entièrement ouverte sur un côté. Dans un souci de simplification la pièce est un cube avec un côté de longueur 50 cm. Deux cas différents seront testés afin de réaliser les bilans souhaités. La première configuration consiste en un brûleur positionné au centre de la pièce délivrant une puissance constante de 2 kW après une montée en puissance linéaire en 10 secondes. Dans la seconde configuration un sprinkler est positionné à mi hauteur et dirigé vers le bas. Le spray utilisé est polydispersé, il reproduit le jet de la buse TP400067 de la société Spraying et Co., avec un débit de  $0,34 \text{ L min}^{-1}$ . Dans les deux configurations, les bilans seront effectués à l'intérieur de la pièce et non sur l'ensemble du domaine. Quatre bilans différents ont été réalisés : des bilans massique et énergétique sur l'eau en phase liquide et des bilans massique et énergétique sur la phase gazeuse.

5. Le terme  $\dot{Q}_{evap,g}$  peut également être calculé de manière détournée en utilisant des capteurs mesurant la densité de vapeur d'eau.

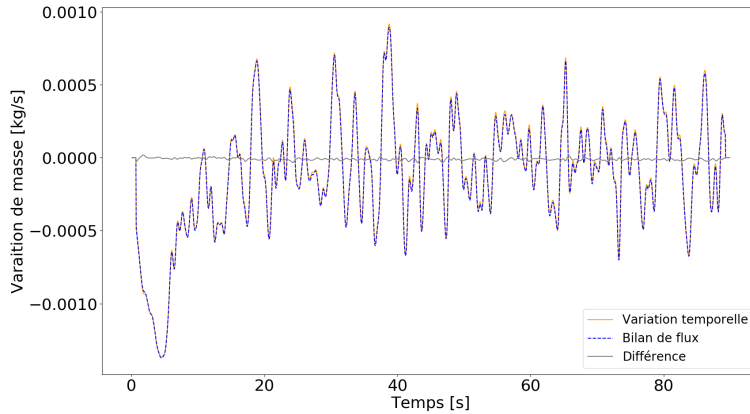


FIGURE 5.5 – Évolution de chaque terme du bilan massique sur la phase gazeuse au cours du temps.

### 5.3.1 Configuration avec un brûleur au gaz et sans spray

Le bilan massique sur la phase gazeuse, équation 5.6, aboutit à une excellente concordance entre les échanges massiques d’une part et la variation temporelle de la masse présente dans la pièce. La figure 5.5 illustre l’évolution de ces deux termes, la courbe grise correspond à la différence entre ces deux grandeurs. On observe que les deux courbes sont quasiment parfaitement superposées, à l’exception des pics. L’écart maximal est de  $1,86 \times 10^{-5} \text{ kg s}^{-1}$  pour des valeurs comprises entre  $9,16 \times 10^{-4} \text{ kg s}^{-1}$  et  $-1,37 \times 10^{-3} \text{ kg s}^{-1}$ . On remarque par ailleurs une diminution de la masse de gaz au début de la simulation, ce qui correspond bien à la consommation d’oxygène par le foyer et la dilatation des gaz. L’ensemble des capteurs utilisés permet bien d’effectuer le bilan massique sur la phase gazeuse dans la zone d’étude choisie.

Le bilan énergétique sur la phase gazeuse, équation 5.6, aboutit à des écarts plus importants entre les bilans de flux et la variation temporelle d’énergie du volume. On remarque sur la figure 5.6 que les deux parties du bilan suivent bien la même évolution mais qu’un décalage est observable, l’écart maximal est de 0,11 kW pour des valeurs comprises entre 0,46 kW et  $-0,28 \text{ kW}$ . Ces écarts sont probablement dus aux approximations lors des calculs de dérivées, une dérivée d’ordre 2 a été utilisée, qui sont directement dépendants du pas de temps d’écriture dans les fichiers.

### 5.3.2 Configuration avec le spray seul et sans brûleur

Dans cette configuration les bilans massique et énergétique seront effectués sur la phase gazeuse et la phase liquide. On retrouve la même concordance entre les flux massiques de la phase gazeuse et l’évolution temporelle de la masse gazeuse que celle obtenue dans le cas précédent. On observe sur la figure 5.7 que l’écart maximal est de  $5,39 \times 10^{-6} \text{ kg s}^{-1}$  pour des valeurs comprises entre  $1,57 \times 10^{-4} \text{ kg s}^{-1}$  et  $-4,02 \times 10^{-5} \text{ kg s}^{-1}$ .

Le bilan énergétique sur la phase gazeuse reste imprécis comme dans le cas du brûleur

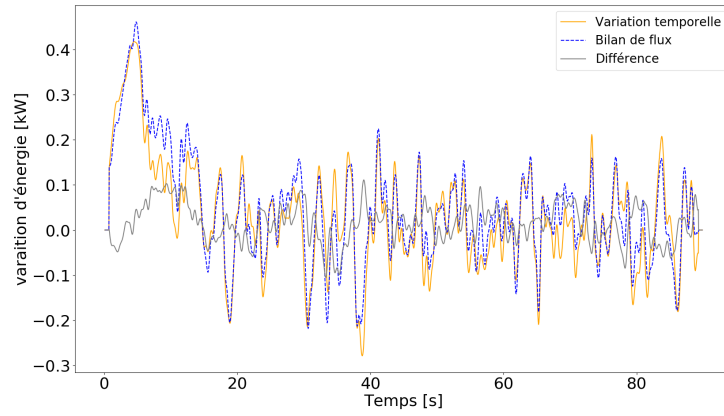


FIGURE 5.6 – Évolution de chaque terme du bilan énergétique sur la phase gazeuse au cours du temps.

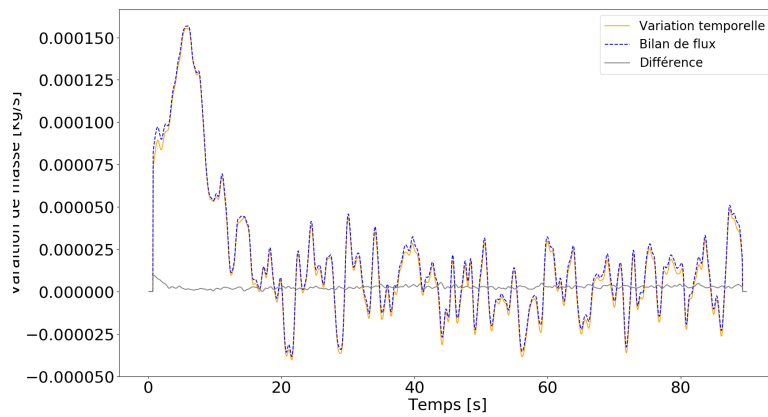


FIGURE 5.7 – Évolution de chaque terme du bilan massique sur la phase gazeuse au cours du temps avec utilisation d'un spray.

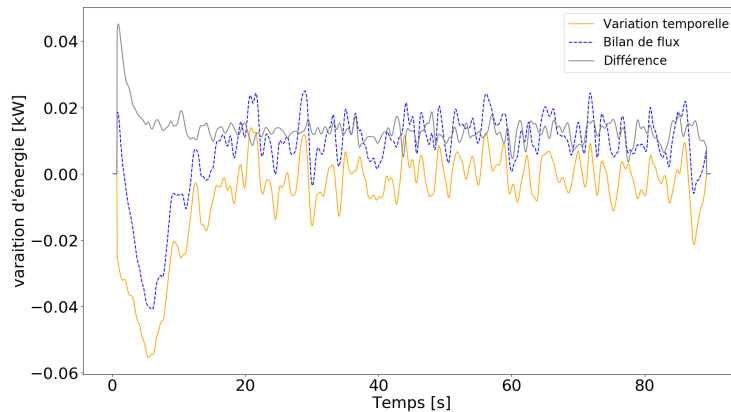


FIGURE 5.8 – Évolution de chaque terme du bilan énergétique sur la phase gazeuse au cours du temps avec utilisation d'un spray.

seul. On remarque sur la figure 5.8 que les évolutions sont similaires entre les flux et l'évolution temporelle de l'enthalpie, excepté au début. Un écart constant de  $0,018 \text{ kW}$  persiste entre les courbes lorsque l'on arrive en régime stationnaire. L'écart maximal est de  $1,87 \times 10^{-2} \text{ kg s}^{-1}$  pour des valeurs comprises entre  $2,50 \times 10^{-2} \text{ kg s}^{-1}$  et  $-5,55 \times 10^{-2} \text{ kg s}^{-1}$ .

La présence du sprinkler permet de réaliser les bilans massique et énergétique sur la phase liquide. Le bilan massique sur la phase liquide, équation 5.9, aboutit à une concordance entre les échanges massiques d'une part et la variation temporelle de la masse présente dans la pièce. On observe sur la figure 5.9 que les deux termes sont bien analogues, l'écart maximal est de  $2,73 \times 10^{-4} \text{ kg s}^{-1}$  pour des valeurs comprises entre  $3,30 \times 10^{-3} \text{ kg s}^{-1}$  et  $-3,49 \times 10^{-3} \text{ kg s}^{-1}$ . On retrouve bien au début une accumulation de masse le temps que l'eau se dépose au sol puis une variation de masse nulle car l'eau injectée correspond à l'eau sortant par l'ouvrant.

Pour réaliser le bilan énergétique sur la phase gazeuse nous nous sommes intéressés aux différents grandeurs renvoyées par le logiciel. Nous avons ainsi trouvé que la valeur  $\dot{Q}_{evap,g}$ , présente dans le bilan énergétique, est incluse dans le calcul de  $Q_{part}$  et donc qu'aucun capteur supplémentaire n'est nécessaire. La figure 5.10 montre que lorsque que l'on additionne l'ensemble des composantes de  $Q_{part}$  (radiative, convective et conductive) on obtient une valeur proche de celle comprenant le seul terme  $Q_{evap}$ . Cette différence entre les deux termes s'explique par l'énergie nécessaire pour chauffer la goutte avant qu'elle puisse s'évaporer. L'énergie d'évaporation est donc directement incluse dans  $Q_{part,conv}$ .

En prenant en compte cette remarque on peut effectuer le bilan énergétique sur la phase liquide grâce aux modifications apportées au code. On observe sur la figure 5.11 que les deux termes sont bien similaires, l'écart maximal est de  $0,35 \text{ kW}$  pour des valeurs comprises entre  $4,00 \text{ kW}$  et  $-0,42 \text{ kW}$ .

Une amélioration possible des bilans est de travailler sur la discrétisation en temps dans les fichiers de sortie. Cela permettrait un calcul plus précis des dérivées utilisées dans chaque bilan et donc une diminution des écarts mais provoquera une légère augmentation

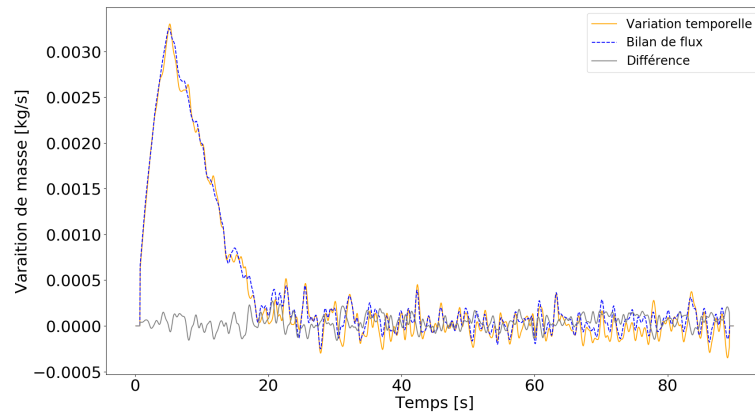


FIGURE 5.9 – Évolution de chaque terme du bilan massique sur la phase liquide au cours du temps.

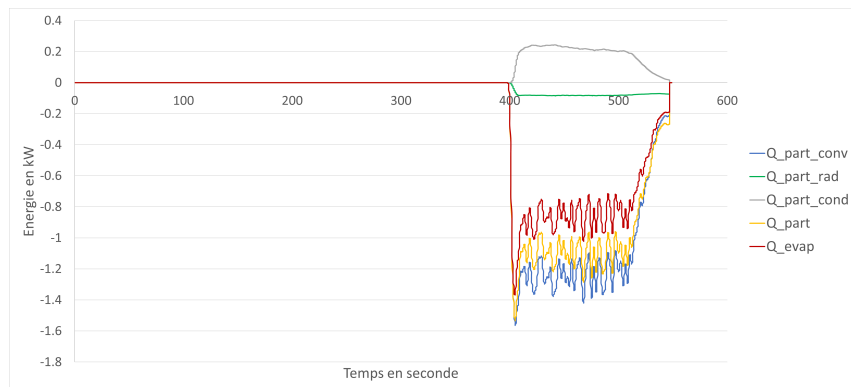


FIGURE 5.10 – Répartition des échanges thermiques sur les particules mesurés par FDS.

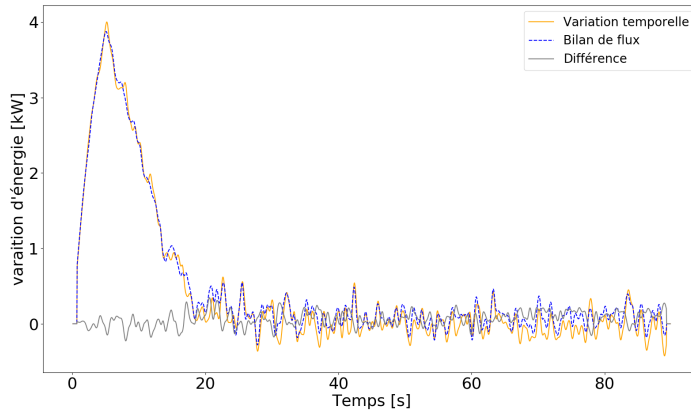


FIGURE 5.11 – Évolution de chaque terme du bilan énergétique sur la phase liquide au cours du temps.

du temps de simulation, à cause du temps d'écriture supplémentaire nécessaire.

### 5.3.3 Conclusion

Ce cas de vérification nous a permis de démontrer que les modifications apportées au code de calcul permettent d'effectuer les bilans souhaités. Ainsi grâce aux changements réalisés nous pouvons suivre à chaque pas de temps l'état des échanges thermiques dans un volume choisi. Nous pouvons quantifier les échanges de masse et d'énergie entre la zone de contrôle et l'extérieur mais surtout au sein de cette zone entre la phase gazeuse, les particules et les parois. Une étude paramétrique peut donc être réalisée afin de déterminer les grandeurs permettant d'améliorer l'efficacité des échanges thermiques. Ces bilans seront utilisés par la suite sur la modélisation des essais expérimentaux dans la zone couloir uniquement.

## 5.4 Modélisation des expérimentations à échelle intermédiaire

### 5.4.1 Choix des paramètres pour la simulation

En premier lieu, il a fallu déterminer le ou les maillages possibles pour réaliser la simulation. Une première approche avec six zones de maillages (trois pour le couloir, deux pour la pièce foyer et le dernier pour la liaison entre le deux) a montré que le passage des particules d'un maillage à l'autre ne semble pas être correctement pris en compte dans FDS. En effet, on observe sur la figure 5.12 que les gouttes sont bien déposées au sol mais ne passent pas dans les maillages adjacents. La décision a donc été prise de faire un unique maillage pour l'ensemble du domaine de calcul.



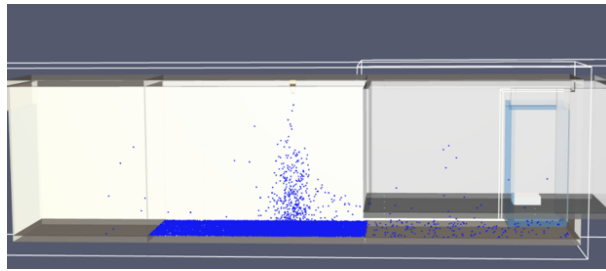


FIGURE 5.12 – Problème de diffusion des particules entre les maillages

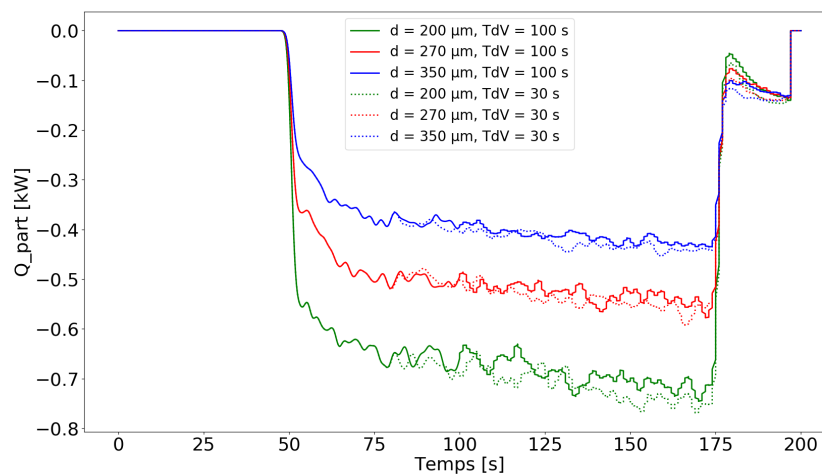


FIGURE 5.13 – Évolution des échanges en fonction du diamètre de goutte et du temps de vie

Un paramètre à choisir dans FDS lorsque l'on modélise un sprinkler est le temps de vie des particules. Lorsqu'une particule est injectée dans le domaine de calcul elle sera prise en compte dans les calculs uniquement pendant la durée correspondant au temps de vie. Si la particule sort du domaine avant la fin du temps de vie elle est supprimée immédiatement. Ce paramètre est donc essentiel lorsque l'on s'intéresse aux échanges entre les gouttes et les fumées. La figure 5.13 représente les échanges de chaleur calculés entre les particules et le milieu lorsqu'une injection est réalisée entre 50 secondes et 175 secondes. Les courbes de mêmes couleurs correspondent à un diamètre de goutte constant, celles en trait plein à un temps de vie de 100 secondes alors que celles en pointillés à un temps de vie de 30 secondes. On observe que le temps de vie ne modifie pas de manière significative les échanges modélisés et ce quel que soit le diamètre des particules.

Enfin une étude de convergence en maillage a été réalisée afin de trouver la taille de maille adéquate pour réaliser les simulations. Trois différentes tailles de mailles ont été étudiées, 2 cm, 1,5 cm et 1 cm. On retrouve sur la figure 5.14 les résultats pour l'arbre amont, en trait plein, et pour l'arbre aval, en pointillés, moyennés sur 30 secondes. Les

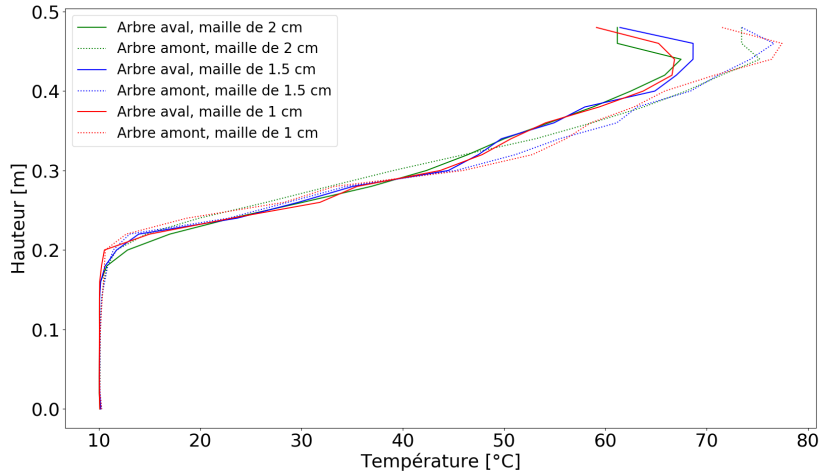


FIGURE 5.14 – Comparaison des niveaux thermiques pour les arbres amont et aval pour trois tailles de mailles différentes.

écarts entre les simulations sont de  $7^{\circ}\text{C}$  au maximum alors que le temps de calcul diverge rapidement comme illustré dans le tableau 5.1. Le gain de précision lié à la diminution de la taille de maille n'est pas nécessaire dans notre cas car l'étude ne porte pas sur la valeur précise des niveaux thermiques mais sur les phénomènes d'interaction.

| Taille de maille                                | 2 cm      | 1,5 cm            | 1 cm     |
|---|-----------|-------------------|----------|
| Temps de calcul pour 530 secondes de simulation | 17 heures | 2 jours 11 heures | 10 jours |

TABLE 5.1 – Évolution du temps de calcul en fonction de la taille de maille.

Un deuxième critère de vérification est proposé dans les documents techniques du logiciel [74, 75] en fonction de la puissance du foyer. La relation 5.6 permet de calculer le diamètre caractéristique du foyer numérique.

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} \cdot T_{\infty} \cdot C_p \cdot \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (5.6)$$

Avec  $\dot{Q}$  la puissance du foyer ;  $\rho_{\infty}$ ,  $T_{\infty}$  et  $C_p$  la masse volumique, la température et la capacité thermique de l'air au repos et  $g$  l'accélération de la pesanteur.

Le guide de validation préconise une taille de maille  $\Delta_x$  qui permet d'obtenir un rapport  $\frac{D^*}{\Delta_x}$  compris entre 5 et 20. Dans notre cas, une taille de maille de 2 cm permet d'avoir un rapport de 20. La suite des simulations sera donc effectuée avec une unique zone de maillage composée de mailles cubiques de 2 cm de côté.

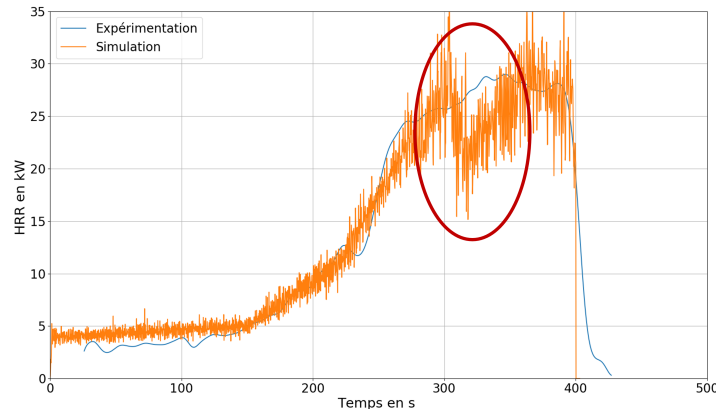


FIGURE 5.15 – Comparaison entre les débits calorifique mesuré et celui prescrit dans la simulation.

#### 5.4.2 Comparaisons simulations et expérimentations

Le premier paramètre à renseigner est le débit calorifique qui doit reproduire celui mesuré lors des essais. On observe sur la figure 5.15 que le HRR prescrit correspond bien à celui mesuré lors des essais avec le bac de 90 mm. La chute visible, entourée en rouge sur le graphique, est liée à un problème de simulation propre au logiciel. En effet, FDS est utilisé pour simuler des foyers suffisamment ventilés. Or, dans notre cas, le foyer est sous ventilé. Le logiciel va donc créer des imbrulés dans la pièce source qui seront transportés dans le couloir. Une fois dans le couloir le mélange oxygène/imbrulés revient dans les proportions permettant la combustion. On obtient alors des inflammations en sortie du couloir, ce phénomène est accentué par le brassage provoqué par le jet d'eau comme illustré par la figure 5.16. L'activation du spray provoque donc une baisse temporaire du HRR dans la zone couloir et non dans la pièce source. Ce phénomène n'est pas visible dans les résultats expérimentaux car les ré-inflammations dans le couloir n'ont jamais été observées. Une modification des conditions de ré-inflammation a été réalisée dans le logiciel, en utilisant le paramètre `AUTO_IGNITION_TEMPERATURE`, mais n'a pas permis d'empêcher complètement les reprises de combustion. Il n'a donc pas été possible de reproduire les niveaux thermiques mesurés, les températures simulées dans le couloir étant sur-évaluées à cause de la présence de flamme.

Il a été choisi de mener notre étude avec un bac le plus petit, à savoir 65 mm de diamètre, car aucune ré-inflammation n'est observée dans ce cas. Des essais supplémentaires ont été réalisés afin de disposer de résultats expérimentaux pour une aspersion de type sprinkler et une avec une injection ascendante inclinée. Nous vérifierons l'accord entre les simulations et les expérimentations sur ces deux configurations d'injection.

Avant de comparer la correspondance entre les simulations et les expérimentations lors de l'aspersion il convient de vérifier que les conditions initiales, avant activation du spray, sont bien reproduites également. On observe sur la figure 5.18 que les champs de température en amont (courbes vertes) et en aval (courbes bleues) sont similaires entre les



FIGURE 5.16 – Ré inflammation observable dans la simulation après injection à cause de la sous-ventilation.

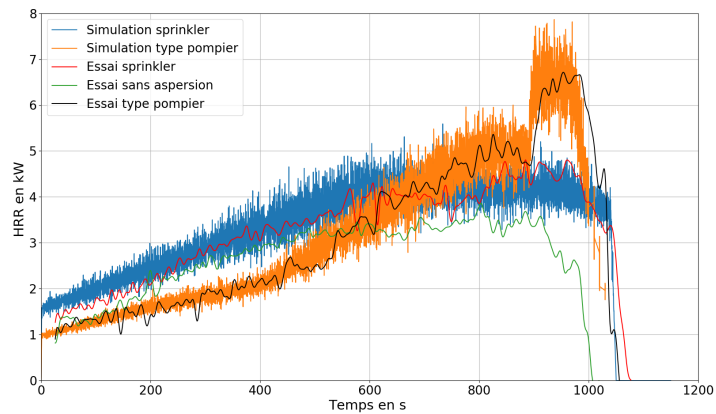


FIGURE 5.17 – Débits calorifiques utilisés pour les simulations avec le bac de 65 mm de diamètre.

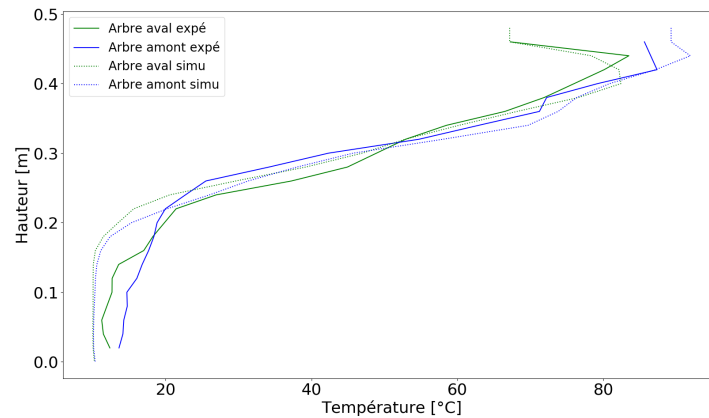


FIGURE 5.18 – Profils de température avant injection en amont et en aval pour la simulation et l’expérimentation.

simulations et les expérimentations. L’écart maximal mesuré sur l’ensemble de la hauteur est de  $7^{\circ}\text{C}$  et le niveau de stratification est bien reproduit par le logiciel de simulation. Le constat est similaire pour les conditions thermiques avant injection dans la configuration sprinkler, les écarts sont légèrement supérieurs en partie haute de l’ordre de la dizaine de degré.

Cette concordance entre les simulations et les expérimentations n’est plus observée après l’injection. La figure 5.19 propose une moyenne sur 30 secondes après l’injection pour les résultats expérimentaux et numériques dans le cas d’une injection ascendante inclinée. Qualitativement, on observe que l’allure des résultats obtenus sur l’arbre situé en amont (le plus proche du foyer) est reproduite dans la simulation. Le niveau thermique simulé ne correspond pas à celui mesuré mais les effets de refroidissement en partie haute et d’inversion de la stratification thermique sont similaires. Ce phénomène avait été attribué à la présence d’eau sur les thermocouples par le spray, mais le fait que la simulation reproduise cet effet semble indiquer qu’il s’agit bien d’un phénomène réel et non d’un problème de mesure. Par contre, les phénomènes ne sont pas correctement reproduits sur l’arbre aval (en vert) avec des écarts de température très importants, jusqu’à 50% en partie haute, et une hauteur de stratification différente entre la simulation et les essais.

En résumé, la simulation permet de reproduire les conditions thermiques avant l’injection avec précision. Au contraire, les effets de l’aspersion ne sont pas correctement décrits et un travail supplémentaire sur les modèles de turbulence et les interactions entre les gouttes et le milieu environnant est encore nécessaire pour améliorer les résultats simulés. Les simulations analysées dans la suite ne permettront pas d’obtenir les températures précises dans le volume d’étude. Elles seront donc utilisées en comparaison les unes aux autres pour étudier uniquement les échanges énergétiques entre les particules, la phase gazeuse et les parois.

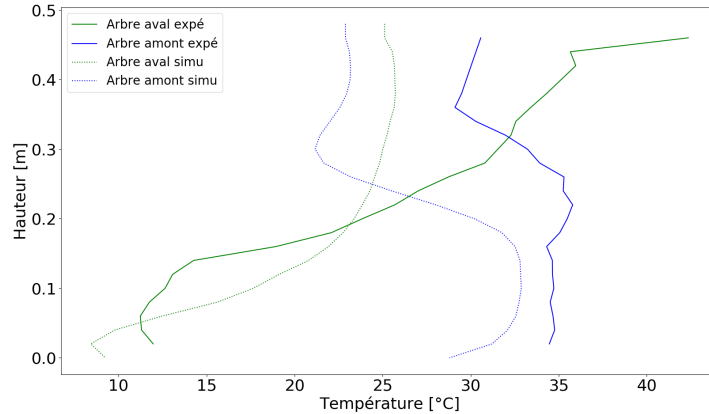


FIGURE 5.19 – Profils de température avant injection en amont et en aval pour la simulation et l’expérimentation.

## 5.5 Analyse des échanges thermiques au niveau des particules pour une action ascendante inclinée

Dans cette partie, deux paramètres du spray vont être modifiés : le débit et le diamètre. La vitesse de sortie des gouttes peut également influencer en modifiant le temps de séjour mais ne sera pas abordée dans ce manuscrit. Le spray modélisé par la suite sera donc toujours un spray mono-dispersé (à l’inverse des simulations présentées précédemment) et avec une vitesse d’éjection unique. De plus les travaux de thèse étant réalisés en lien avec les sapeurs-pompiers la configuration retenue est celle d’un jet ascendant à  $45^\circ$ . Par ailleurs, les simulations sont toujours réalisées avec un foyer de faible puissance afin d’éviter les ré-inflammations dans la zone d’étude. Les résultats présentés par la suite sont calculés à partir d’une moyenne sur trente secondes, trente secondes après le début de l’activation du spray. Dans les résultats présentés par la suite nous avons choisi de dissocier l’énergie nécessaire à l’évaporation, appelée  $\dot{Q}_{evap}$ , de celle correspondant à l’échauffement par convection  $\dot{Q}_{conv,g/p}$ .

### 5.5.1 Effet du changement de débit

Le spray utilisé dans cette partie est mono-dispersé avec un diamètre de  $200\ \mu\text{m}$  mais trois débits différents ont été retenus. Le débit de référence choisi correspond à celui mesuré lors des expérimentations. Les deux autres débits étudiés correspondent au double ou à la moitié de ce débit de référence. Le tableau 5.2 permet de montrer l’évolution des échanges radiatifs, convectifs et conductifs en fonction du débit prescrit. Les dernières lignes permettent quant à elles de quantifier la puissance utile à l’évaporation et la masse d’eau évaporée pour chaque cas.

La figure 5.20 permet de visualiser plus facilement l’évolution des échanges thermiques. On remarque tout d’abord que les échanges radiatifs sont secondaires par rapport au

| Grandeur             | Débit en $\text{g s}^{-1}$ | Résultats                 | Résultats rapporté au débit |
|----------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| $\dot{Q}_{ray,g/p}$  | 2,95                       | 73,7 W                    | $24,98 \text{ J g}^{-1}$    |
|                      | 5,89                       | 80,3 W                    | $13,63 \text{ J g}^{-1}$    |
|                      | 11,8                       | 91,5 W                    | $7,75 \text{ J g}^{-1}$     |
| $\dot{Q}_{conv,g/p}$ | 2,95                       | 35,9 W                    | $12,17 \text{ J g}^{-1}$    |
|                      | 5,89                       | 203,2 W                   | $34,50 \text{ J g}^{-1}$    |
|                      | 11,8                       | 353,6 W                   | $29,97 \text{ J g}^{-1}$    |
| $\dot{Q}_{w/p}$      | 2,95                       | 180,4 W                   | $61,15 \text{ J g}^{-1}$    |
|                      | 5,89                       | 309,9 W                   | $52,61 \text{ J g}^{-1}$    |
|                      | 11,8                       | 378,3 W                   | $32,06 \text{ J g}^{-1}$    |
| $\dot{Q}_{evap}$     | 2,95                       | 230,2 W                   | $78,03 \text{ J g}^{-1}$    |
|                      | 5,89                       | 332,8 W                   | $56,50 \text{ J g}^{-1}$    |
|                      | 11,8                       | 286,3 W                   | $24,26 \text{ J g}^{-1}$    |
| $\dot{M}_{evap}$     | 2,95                       | $94,0 \text{ mg s}^{-1}$  | 3.19%                       |
|                      | 5,89                       | $136,7 \text{ mg s}^{-1}$ | 2.32 %                      |
|                      | 11,8                       | $118,0 \text{ mg s}^{-1}$ | 1.00 %                      |

TABLE 5.2 – Moyenne des échanges thermiques sur 30 secondes en fonction du débit d'injection pour un spray mono-dispersé avec un diamètre de goutte constant de  $200 \mu\text{m}$ , 30 secondes après le déclenchement de l'aspersion.

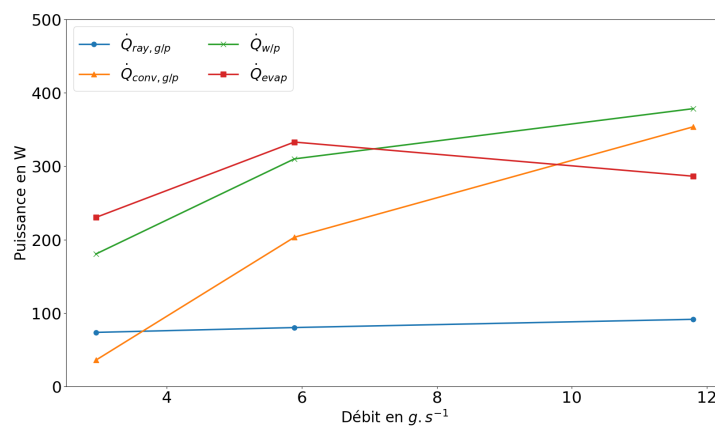


FIGURE 5.20 – Variation des échanges thermiques en fonction du débit.

autres phénomènes étudiés. Ce résultat s'explique facilement car le foyer n'est pas directement visible depuis le couloir et que les fumées ont une température d'environ  $100^{\circ}\text{C}$  au maximum. De manière générale, on constate que pour les deux débits les plus faibles les termes prédominants sont ceux liés à l'évaporation et aux échanges aux parois. La part convective des transferts de chaleur croit fortement avec l'augmentation du débit et devient plus importante que les échanges liés à l'évaporation pour le dernier débit. On observe également dans les résultats obtenus que les échanges thermiques augmentent en valeur brute avec le débit qu'il s'agisse de la part radiative, convective ou conductive. Par contre la masse évaporée est la plus élevée pour le débit médian et non pour le débit maximal. L'explication de ce phénomène est illustrée par la dernière colonne du tableau. Si l'on rapporte l'énergie absorbée au débit d'injection on remarque cette fois-ci que l'efficacité est inversement proportionnelle au débit. En effet, plus le débit est faible plus les échanges radiatifs et conductifs par quantité d'eau sont élevés, seuls les échanges convectifs diffèrent légèrement de cette règle avec un léger avantage pour le débit médian. Ainsi le pourcentage d'eau évaporée décroît avec l'augmentation du débit, l'efficacité triple lorsque l'on divise le débit par quatre. Cette différence est due à la nécessité de chauffer l'eau avant de pouvoir la vaporiser, il faut donc apporter une quantité d'énergie plus importante pour permettre la passage en phase gazeuse lorsque l'on augmente le débit. Or dans notre cas le terme source étant toujours le même, la quantité d'énergie à répartir sur la phase liquide est constante. On retrouve bien logiquement que l'évaporation maximale est obtenue pour le débit minimal, la masse d'eau évaporée reste très faible. Toutefois la quantité totale d'énergie absorbée est maximale pour le débit le plus haut, la baisse d'efficacité est compensée par l'augmentation d'eau injectée.

### 5.5.2 Effet du changement de diamètre

Dans cette partie le débit d'injection prescrit reste constant et le jet mono-dispersé. Le paramètre variable sera le diamètre de goutte utilisé pour décrire le spray. Trois diamètres de gouttes ont été retenus dans le cadre de cette étude : un diamètre de  $50\ \mu\text{m}$ , un diamètre de  $200\ \mu\text{m}$  proche de celui mesuré expérimentalement et un diamètre de  $1000\ \mu\text{m}$  pour estimer les effets des grosses gouttes. Le tableau 5.3 permet de montrer l'évolution des échanges radiatifs, convectifs et conductifs en fonction du diamètre prescrit. Les dernières lignes permettent quant à elles de quantifier la masse d'eau évaporée pour chaque cas.

Comme lors des simulations précédentes, on remarque sur la figure 5.21 que les échanges conductifs et ceux liés à l'évaporation restent toujours prédominants pour les deux diamètres les plus faibles. Toutefois, les échanges permettant l'évaporation décroissent rapidement lorsque l'on augmente le diamètre car la température interne de la goutte ne permet plus une évaporation complète. Ainsi les échanges conductifs deviennent largement prédominants pour le diamètre de goutte de  $1000\ \mu\text{m}$ . On observe également une évolution contre-intuitive des échanges radiatifs en fonction du diamètre de goutte. Dans les travaux menés sur la protection face au rayonnement thermique [16, 29] il a été montré que la diminution du diamètre de goutte, à quantité d'eau constante, permet une meilleure efficacité alors que nous trouvons l'inverse dans nos résultats. Une explication possible de ce phénomène est que les gouttes de plus petits diamètres vont atteindre un équilibre thermique avec les fumées plus rapidement et donc absorber de manière moins efficiente



## 5.6. Analyse des échanges thermiques au niveau des particules pour trois types d'injection 97

| Grandeur             | Diamètre en $\mu\text{m}$ | Résultats                | Résultats rapporté au volume d'une goutte |
|----------------------|---------------------------|--------------------------|---|
| $\dot{Q}_{ray,g/p}$  | 50                        | 3,5 W                    | 53,5 kW mm <sup>-3</sup>                  |
|                      | 200                       | 80,3 W                   | 19,2 kW mm <sup>-3</sup>                  |
|                      | 1000                      | 101,1 W                  | 0,024 kW mm <sup>-3</sup>                 |
| $\dot{Q}_{conv,g/p}$ | 50                        | 59,3 W                   | 906,0 kW mm <sup>-3</sup>                 |
|                      | 200                       | 203,2 W                  | 48,5 kW mm <sup>-3</sup>                  |
|                      | 1000                      | 29,4 W                   | 0,007 kW mm <sup>-3</sup>                 |
| $\dot{Q}_{w/p}$      | 50                        | 269,0 W                  | 4110,0 kW mm <sup>-3</sup>                |
|                      | 200                       | 309,9 W                  | 74,0 kW mm <sup>-3</sup>                  |
|                      | 1000                      | 250,9 W                  | 0,06 kW mm <sup>-3</sup>                  |
| $\dot{Q}_{evap}$     | 50                        | 460,2 W                  | 7031,3 kW mm <sup>-3</sup>                |
|                      | 200                       | 332,8 W                  | 79,5 kW mm <sup>-3</sup>                  |
|                      | 1000                      | 72,8 W                   | 0,017 kW mm <sup>-3</sup>                 |
| $\dot{M}_{evap}$     | 50                        | 190,1 mg s <sup>-1</sup> | 2904,5 g s <sup>-1</sup> mm <sup>-3</sup> |
|                      | 200                       | 136,7 mg s <sup>-1</sup> | 32,6 g s <sup>-1</sup> mm <sup>-3</sup>   |
|                      | 1000                      | 29,5 mg s <sup>-1</sup>  | 0,007 g s <sup>-1</sup> mm <sup>-3</sup>  |

TABLE 5.3 – Moyenne des échanges thermiques sur 30 secondes en fonction du diamètre de goutte pour un spray monodispersé avec un débit de 5,89 g s<sup>-1</sup>, 30 secondes après le déclenchement de l'aspersion.

le rayonnement. Si l'on regarde les échanges convectifs on observe qu'ils sont similaires pour les deux plus petits diamètres ce qui conduit bien à une température moyenne plus élevée pour les plus petites gouttes. Ce phénomène n'est pas visible dans les travaux cités précédemment car le spray est situé à distance de la source d'émission et ne peut donc pas s'évaporer. Cette explication est corroborée par le fait que la masse d'eau évaporée est supérieure pour le diamètre le plus petit ce qui indique bien un échauffement plus important des gouttes. De plus lorsque l'on rapporte les grandeurs mesurées au volume d'une goutte injectée, dernière colonne du tableau 5.3, on retrouve bien que la diminution du diamètre de goutte facilite les échanges thermiques avec l'environnement.

## 5.6 Analyse des échanges thermiques au niveau des particules pour trois types d'injection

Dans cette partie le diamètre de goutte et le débit sont considérés comme constants, seuls la position de la buse et l'angle d'injection varient. Les trois configurations d'injection étudiées avec la maquette sont reprises dans le tableau 5.4.

On remarque sur la figure 5.22 que l'action de type sapeur-pompier est celle permettant d'absorber le plus d'énergie au total. En effet, une injection ascendante inclinée permet d'augmenter le temps de séjour dans la couche chaude et également la surface de contact entre les gouttes et les parois. Le plafond est impacté sur une plus grande zone avec ce mode d'injection comparé aux injections verticales. Les échanges aux parois,  $\dot{Q}_{w/p}$ ,

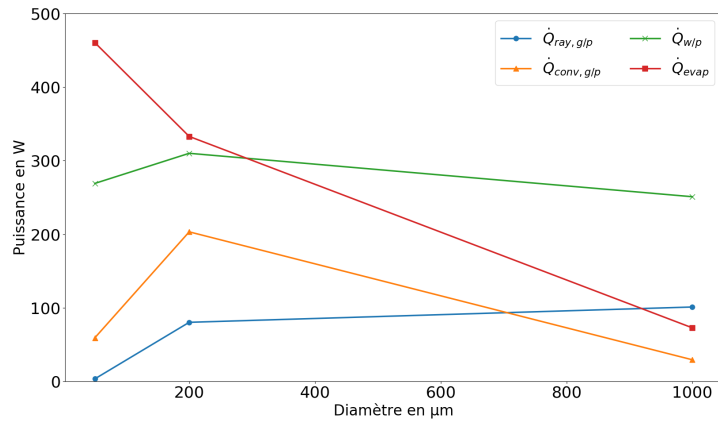


FIGURE 5.21 – Variation des échanges thermiques en fonction du diamètre de goutte.

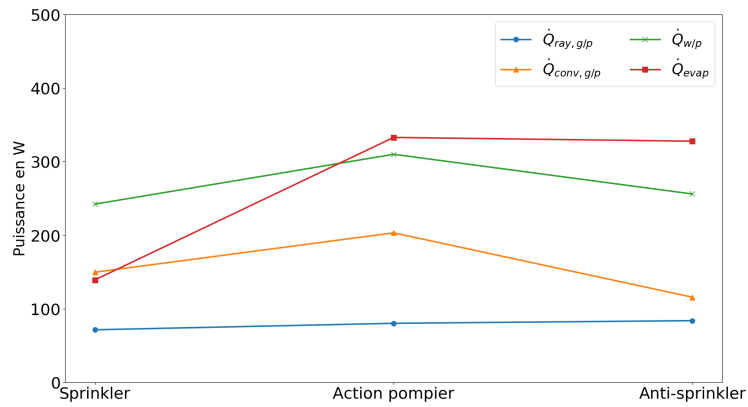


FIGURE 5.22 – variation des échanges thermiques en fonction du type d'injection.

| Grandeur             | Type d'injection | Résultats                |
|----------------------|------------------|--------------------------|
| $\dot{Q}_{ray,g/p}$  | Sprinkler        | 71,5 W                   |
|                      | Action pompier   | 80,3 W                   |
|                      | Anti-sprinkler   | 83,9 W                   |
| $\dot{Q}_{conv,g/p}$ | Sprinkler        | 149,7 W                  |
|                      | Action pompier   | 203,2 W                  |
|                      | Anti-sprinkler   | 115,8 W                  |
| $\dot{Q}_{w/p}$      | Sprinkler        | 242,2 W                  |
|                      | Action pompier   | 309,9 W                  |
|                      | Anti-sprinkler   | 256,0 W                  |
| $\dot{Q}_{evap}$     | Sprinkler        | 139,3 W                  |
|                      | Action pompier   | 332,8 W                  |
|                      | Anti-sprinkler   | 327,7 W                  |
| $\dot{M}_{evap}$     | Sprinkler        | 56,9 mg s <sup>-1</sup>  |
|                      | Action pompier   | 136,7 mg s <sup>-1</sup> |
|                      | Anti-sprinkler   | 134,0 mg s <sup>-1</sup> |

TABLE 5.4 – Moyenne des échanges thermiques sur 30 secondes en fonction de l'angle d'injection pour un spray monodispersé avec un diamètre de goutte constant de 200  $\mu\text{m}$  et un débit de 5,89  $\text{g s}^{-1}$ , 30 secondes après le déclenchement de l'aspersion.

sont donc 20 % supérieurs pour l'action ascendante inclinée. De plus, la quantité d'eau totale évaporée est similaire entre les deux injections ascendantes, soit 2,4 plus importante que pour l'injection en mode sprinkler. Les injections ascendantes permettent bien d'augmenter les échanges thermiques entre les gouttes et le milieu gazeux ou les parois. Le type d'injection le plus efficace trouvé lors des simulations si l'on cherche à optimiser les échanges est une injection ascendante continue avec un angle de 45°.

## 5.7 Conclusions et discussion

Nous avons pu montrer dans ce chapitre qu'un bilan massique ou énergétique peut être réalisé dans une zone de calcul définie. Les modifications nécessaires du code source pour permettre la sélection de la zone d'intérêt ont été identifiées et documentées. Un travail semblable a également permis de trouver l'ensemble des capteurs à utiliser pour effectuer les bilans. Ce travail pourra servir de base pour d'autres études qui chercheront à décrire plus précisément des échanges massiques ou énergétiques sur une partie de simulation.

L'étude paramétrique effectuée sur le diamètre de goutte du spray, le débit et la position d'injection a permis de montrer l'intérêt d'une injection ascendante inclinée dans la configuration d'étude. Cette configuration a été choisie car elle correspond à une situation de progression d'un binôme de sapeurs-pompiers jusqu'au foyer. Les conclusions sur le diamètre de goutte et le débit sont plus limitées. En effet, nous avons pu retrouver que les échanges rapportés au débit ou au volume d'une goutte sont maximaux pour les valeurs les plus faibles de ces paramètres mais que l'énergie moyenne maximale absorbée sur le

domaine considéré ne correspond pas forcément à ce choix de paramètre.

Par ailleurs les simulations n'ont malheureusement pas pu être réalisées avec le débit calorifique le plus élevé, correspondant au bac de 90 mm de diamètre, car le logiciel produit d'importantes ré-inflammations ne correspondant pas à la réalité des expérimentations. Il a donc fallu utiliser les expérimentations avec le second bac, 65 mm de diamètre, qui ne permet pas d'atteindre des niveaux thermiques élevés. Seules quelques simulations atteignent les 100 °C en partie haute. L'étude des échanges thermiques entre la phase gazeuse et les particules est donc limitée par le faible taux d'évaporation. Les études futures devront être effectuées dans une géométrie qui permet au foyer d'être plus puissant tout en évitant les ré-inflammations dans la zone d'étude. Un autre avantage d'augmenter la température des fumées est de se positionner dans le domaine de validité du domaine d'évaporation du logiciel. En effet, le modèle d'évaporation implémenté a été comparé à des résultats expérimentaux par Beji et Merci [76]. Les résultats montrent que le domaine de validité du modèle utilisé correspond à des températures d'air comprises entre 300 et 800 °C. Les écarts des mesures sur les temps de vie entre les simulations et les expérimentations sont alors de 7%. Toutefois ces écarts augmentent fortement lorsque l'on étend la plage de température, pour des températures de 100 à 800 °C la valeur de l'écart est de 31%. Les auteurs prévoient d'ailleurs d'effectuer des modifications pour mieux prendre en compte les températures plus faibles.

Dans le cas présenté dans cette thèse nous nous situons clairement dans la zone où le modèle d'évaporation ne permet pas de décrire correctement les phénomènes. Les résultats obtenus ne peuvent pas être directement utilisés mais nous avons pu montrer la faisabilité des bilans massique et énergétique sur une zone précise d'une simulation. Si l'on souhaite obtenir des valeurs plus réalistes, le développement ou la modification du modèle d'évaporation doivent être réalisés pour être valables à des températures aussi basses.

# Conclusion et perspectives

## 1 Résultats opérationnels

Les travaux présentés s'inscrivent directement dans la continuité de l'approche performantielle. Cette nouvelle démarche cherche à optimiser l'utilisation de l'eau et la façon de la projeter afin d'améliorer l'efficacité d'extinction mais surtout la protection des intervenants. Ainsi il a été montré en amont de ces travaux de thèse que le débit d'eau n'est pas le critère prépondérant pour les lances à incendie mais que la façon de projeter permet d'améliorer de manière conséquente les capacités opérationnelles des moyens mobiles d'extinction. La thèse a eu pour objectif de permettre de démontrer qu'un outil utilisant une nouvelle technologie de brouillard d'eau peut-être utilisé en toute sécurité par les sapeurs-pompiers.

Une première série d'essais a permis d'obtenir les caractéristiques géométriques des deux jets étudiés et, pour la première fois sur une lance à incendie diphasique, la taille et la vitesse des gouttes tout le long du jet. Cette mesure, qui n'avait encore jamais été réalisée, permet de savoir que les deux jets produits actuellement par la lance diphasique peuvent être considérés comme des brouillards de classe 2, avec un  $D_{V90} < 400 \mu\text{m}$ . Ces résultats permettront également de modéliser et d'étudier la pénétration des gouttes dans une zone réactive ou non et le refroidissement provoqué par le jet si besoin. Cette première étape a nécessité de revoir l'ensemble des protocoles existants depuis l'approche performantielle pour les adapter au système diphasique. Grâce à ces essais nous connaissons les dimensions minimales des jets diphasiques utilisés. Les écarts observés sur la géométrie des jets entraînent également des différences sur la capacité des sprays à protéger un intervenant du rayonnement thermique. Ainsi les deux jets diphasiques assurent une protection supérieure face au rayonnement que la meilleure des lances classiques testées lors de la dernière campagne de mesure sur une zone d' $1 \text{ m}^2$  autour du porteur avec des valeurs d'atténuation de 90% pour le spray le plus efficace. Le jet produit par la buse plate reste plus efficace que le jet classique pour une surface jusqu'à  $2,7 \text{ m}^2$  autour du centre du jet. Au-delà de cette surface la lance actuelle, par la forme en corolle de son jet, est plus efficace. Les mesures ont été réalisées dans l'axe du jet et ne permettent pas de connaître l'efficacité de la protection lors d'une autre utilisation en particulier si la lance diphasique est positionnée parallèlement à la source pour couvrir une plus grande zone. L'ensemble des mesures obtenues dans cette première partie d'essai a permis de continuer l'étude du système diphasique car la condition de sécurité pour les sapeurs-pompiers est satisfaite.

La deuxième partie des essais a permis la mesure de l'efficacité de l'outil lors de feux sous-ventilés et lorsqu'il est manié par des sapeurs-pompiers et non plus positionné sur

un support. Une fois encore l'ensemble des protocoles a été repensé pour permettre la comparaison entre deux lances n'utilisant pas la même technologie sur deux configurations différentes. Cette seconde partie a permis de montrer que le système diphasique permet d'avoir une action de refroidissement immédiate sur une distance plus importante que la lance actuelle qui n'agit que sur une zone restreinte (environ dix mètres pour la lance diphasique contre seulement 4 mètres pour la lance actuelle). Toutefois le niveau de refroidissement maximal obtenu avec la lance classique est supérieur à celui obtenu avec la lance diphasique. Un nouveau type d'action du spray a également pu être mis en avant lors de ces essais : un refroidissement persistant lors de la progression des intervenants. Cet effet est extrêmement important car il assure un cheminement plus facile et surtout plus sécurisé pour les sapeurs-pompiers. Ce phénomène est uniquement obtenu lors de l'utilisation pendant plusieurs secondes du jet diphasique mais disparaît lorsque la durée d'ouverture est de l'ordre d'une seconde.

Ces travaux ont permis de démontrer la plus value qu'apporte le système diphasique par rapport aux lances actuelles avec un débit d'eau divisé par 5. Les résultats ont déjà été présentés à la communauté des sapeurs-pompiers lors du colloque des sciences appliquées aux sapeurs-pompiers en 2022. Actuellement trois engins-pompes équipés du système diphasique sont utilisés en à Paris, Marseille et Lyon dans le cadre d'une expérimentation sur feux réels. Des développements supplémentaires de l'outil sont également étudiés avec une version spéciale pour les feux de forêt, des essais d'utilisation sur des feux électriques ou encore des lances adaptées aux feux de grande puissance. Cette rupture technologique permet effectivement d'ouvrir un grand nombre d'évolutions possibles sur l'ensemble des interventions concernant l'incendie.

L'essentiel du travail sur la lance diphasique a pu être réalisé dans le temps de la thèse mais certains points nécessitent encore d'être approfondis. En particulier la configuration cave doit encore être analysée pour permettre de déterminer si les effets observés dans le couloir peuvent être également observés dans une autre configuration. Des mesures d'atténuation perpendiculairement au jet peuvent également être effectuée pour compléter la cartographie d'atténuation déjà réalisée pour connaître la capacité de protection lors d'une utilisation de la lance comme une lance queue de paon.

## 2 Résultats académiques

Les essais en maquette ont permis d'identifier les paramètres les plus influents sur les interactions entre un spray et les fumées. Nous avons pu montrer que le changement de pression d'alimentation influe très peu sur les phénomènes de brassage et de refroidissement dans la gamme des pressions testées, de 4 à 8 bars. Au contraire une augmentation de la pression, et donc du débit, conduit à une augmentation des températures en partie basse à cause d'un brassage plus important sans refroidir d'avantage la couche de fumée en partie supérieure. Le paramètre le plus influent est évidemment l'angle d'injection et la position de la buse lors du déclenchement du spray. La position correspondant à une utilisation proche de celle des sapeurs-pompiers est celle permettant le refroidissement le plus efficace en amont et en aval du spray. Cette action provoque également un brassage qui ramène des fumées en partie basse et provoque un réchauffement de cette zone. Dans

cette position l'augmentation de la pression d'alimentation entraîne une modification des conditions thermiques en amont en provoquant un brassage plus important et donc une hausse significative de la température.

Cette étude expérimentale a été complétée par des simulations numériques grâce au logiciel Fire Dynamics Simulator. Certaines modifications du code ont été effectuées afin de réaliser des bilans massique et énergétique qui ne peuvent être mesurés expérimentalement. De plus, ces bilans peuvent être effectués sur une partie seulement du domaine et non plus sur la totalité. Cette capacité peut permettre par exemple, dans le cadre d'une future étude, d'estimer les effets proches de l'injection ou à distance séparément. Il s'agit donc d'une première étape qui permettra d'étudier de façon plus approfondie les techniques d'aspersion en fonction de paramètres tels que la pression, la granulométrie ou encore l'angle d'ouverture du spray.

A l'inverse la partie sur la modélisation des interactions entre un spray et les fumées peut être complétée sur plusieurs aspects. Tout d'abord le modèle d'évaporation utilisé dans le logiciel FDS ne permet pas de décrire précisément l'ensemble des phénomènes mis en jeu. Un important travail est nécessaire afin de coder un modèle plus réaliste d'évaporation dans le code de calcul si une étude précise des phénomènes doit être menée par la suite. Ce type d'étude est particulièrement intéressante à réaliser pour trouver les paramètres permettant d'améliorer l'efficacité du refroidissement d'un spray. Une fois ce travail effectué une étude adaptée à une utilisation proche de celle des sapeurs-pompiers pourra être réalisée : un spray utilisé par impulsion, et non plus en continu, à l'entrée du couloir puis dans le couloir. L'objectif d'une telle étude serait d'optimiser les actions de lance en déterminant la granulométrie, la vitesse de sortie, le débit ou le temps d'ouverture pour différents cas afin de trouver des lois générales gouvernant les interactions entre un spray et des fumées en mouvement pour une application ascendante inclinée.





# Bibliographie

- [1] W. Schäfer and C. Tropea. The time-shift technique for measurement of size and velocity of particles. In *European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, 2011.
- [2] P. Grimwood and C. Barnett. Fire-fighting flow-rate. 2005.
- [3] P.L. Lamballais and F. Gaviot-Blanc. Les besoins en eau dans la lutte contre les feux de locaux. Technical report.
- [4] S. Dembele, J. X. Wen, and J.-F. Sacadura. Experimental study of water sprays for the attenuation of fire thermal radiation. *Journal of Heat Transfer*, 123 :534–543, 2001.
- [5] A. Collin, S. Lechene, P. Boulet, and G. Parent. Water mist and radiation interactions : application to a water curtain used as a radiative shield. *Numerical Heat Transfer, Part A : Applications*, 57 :537–553, 2010.
- [6] C.C. Tseng and R. Viskanta. Absorptance and transmittance of water spray/mist curtains. *Fire Safety Journal*, 42 :106–114, 2007.
- [7] G. Parent, P. Boulet, R. Morlon, and E. Blanchard. Radiation attenuation and opacity in smoke and water sprays. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, pages 60–67, 2017.
- [8] M. Suzanne, F. Testa, Z. Acem, P. Boulet, and B. Coudour. Caractérisation de l'efficacité d'un moyen mobile d'extinction. page 149, 2018.
- [9] C. Maret, A. Chinal, D. Mathieu, M. Persoglio, T. Lefevre, J.F. Roure, G. Daveau, and S. Morizot. L'intervention des sapeurs pompiers lors des feux en volume clos ou semi ouverts. Technical report, Groupe de travail sur les accidents thermiques, 2000.
- [10] C. Keiser, P. Wyss, and R.M. Rossi. Analysis of steam formation and migration in firefighters' protective clothing using x-ray radiography. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 16 :217–229, 2010.
- [11] Y. Su, R. Li, G. Song, J. Li, and C. Xiang. Modeling steam heat transfer in thermal protective clothing under hot steam exposure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120 :818–829, 2018.
- [12] L. Zhai and J. Li. Prediction methods of skin burn for performance evaluation of thermal protective clothing. *Burns*, 41 :1385–1396, 2015.
- [13] L. Zhai, C. Adlhart, F. Spano, R. Innocenti Malini, A.K. Piątek, J. Li, and R.M. Rossi. Prediction of steam burns severity using raman spectroscopy on ex vivo porcine skin. *Scientific Reports*, 8 :6946, 2018.

- [14] H. Pennes. Analysis of tissue and arterid blood temperatures. *Journal of applied physiology*, 1 :93–122, 1948.
- [15] A. Collin, F. Gaviot-Blanc, F. Giroud, F. Magnolini, M. Suzanne, and A. Thiry-Muller. Référentiel technique "performance des systèmes d'extinction". Technical report, Direction générale de la sécurité civile, 2020.
- [16] A. Collin, M. Suzanne, F. Testa, P. Doelsch, Z. Acem, A. Thiry-Muller, D. Zeinali, G. Erez, Y. Moriau, L. Hardy, R. Mehaddi, G. Parent, and P. Boulet. Quantification of radiative attenuation provided by fire hose nozzles. *Fire and Materials*, page fam.3051, 2022.
- [17] P. Grimwood. *Euro firefighter 2 : firefighting tactics and fire engineer's handbook : a manual for fire commanders, fire design engineers, architects, students and building regulators*. 2017. OCLC : 1004974295.
- [18] J. Richard, J.P Garo, J.M Souil, J.P Vantelon, and V.G Knorre. Chemical and physical effects of water vapor addition on diffusion flames. *Fire Safety Journal*, 38 :569–587, 2003.
- [19] H.K. Chelliah, A.K. Lazzarini, P.C. Wanigarathne, and G.T. Linteris. Inhibition of premixed and non-premixed flames with fine droplets of water and solutions. *Proceedings of the Combustion Institute*, 29 :369–376, 2002.
- [20] A. Kim, B. Dlugogorski, and J. Mawhinney. The effect of foam additives on the fire suppression efficiency of water mist. In *Halon options technical working conference*, 1994.
- [21] R.K. Aicheos. Water vapour as an inerting agent. In *Halon options technical working conference*, 1997.
- [22] L. Qiu, Y. Zheng, Y. Hua, Y. Zhuang, Y. Qian, and X. Cheng. Effects of water vapor addition on the flame structure and soot formation in a laminar ethanol/air coflow flame. *Combustion Science and Technology*, 193 :626–642, 2021.
- [23] C.C. Ndubizu, R. Ananth, P.A. Tatem, and V. Motevalli. On water mist fire suppression mechanisms in a gaseous diffusion flame. *Fire Safety Journal*, 31 :253–276, 1998.
- [24] J.P. White, S. Verma, E. Keller, A. Hao, A. Trouvé, and A.W. Marshall. Water mist suppression of a turbulent line fire. *Fire Safety Journal*, 91 :705–713, 2017.
- [25] R. Ananth and R.C. Mowrey. Ultra-fine water mist extinction dynamics of a co-flow diffusion flame. *Combustion Science and Technology*, 180 :1659–1692, 2008.
- [26] A. Yoshida, K. Kashiwa, S. Hashizume, and H. Naito. Inhibition of counterflow methane/air diffusion flame by water mist with varying mist diameter. *Fire Safety Journal*, 71 :217–225, 2015.
- [27] E.J.P. Zegers, B.A. Williams, R.S. Sheinson, and J.W. Fleming. Dynamics and suppression effectiveness of monodisperse water droplets in non-premixed counterflow flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 28 :2931–2937, 2000.
- [28] T.S. Ravigururajan and M.R. Beltran. A model for attenuation of fire radiation through water droplets. *Fire Safety Journal*, 15 :171–181, 1989.

- [29] S. Lechêne. *Etude expérimentale et numérique des rideaux d'eau pour la protection contre le rayonnement thermique*. PhD thesis, Université Henri Poincaré, 2010.
- [30] P.J. DiNenno, R.L.P. Beyler, R.L.P. Custer, W.D. Walton, J.M. Watts, and National Fire Protection Association. The SFPE handbook of fire protection engineering. *Journal of Hazardous Materials*, 23 :348, 1990.
- [31] I. Roisman. Fundamentals of primary atomization. In *Spray and atomization course*, 2021.
- [32] C. Tropea. Secondary atomization. In *Atomization and spray course*, 2021.
- [33] R. Rioboo, M. Marengo, and C. Tropea. Outcomes from a drop impact on solid surfaces. *Atomization and sprays*, 11 :155–166, 2001.
- [34] C. Tropea. Spray atomization, transport and wall impact. In *Atomization and spray course*, 2021.
- [35] N. Ashgriz. Breakup and atomization models. In *Atomization and spray course*, 2021.
- [36] H.A. Miloud. *Fragmentation de métal liquide dans l'eau*. PhD thesis, Nancy Université, 2010.
- [37] T. Bourrilhon. *Tuyère diphasique à jet de brouillard*. PhD thesis, Université Joseph Fourier, 2009.
- [38] K. Prasad, G. Patnaik, and K. Kailasanath. A numerical study of water-mist suppression of large scale compartment fires. *Fire Safety Journal*, 37 :569–589, 2002.
- [39] R.G. Bill, R.L. Hansen, and K. Richards. Fine-spray (water mist) protection of shipboard engine rooms. *Fire Safety Journal*, 29 :317–336, 1997.
- [40] G. Back, B. Lattimer, C. Beyler, P. DiNenno, and R. Hansen. Full scale testing of water mist fire suppression systems for small machinery spaces and spaces with combustible boundaries. Technical report, US Coast Guard Research and Development Center, 1999.
- [41] G. Back, P. DiNenno, J.T. Leonard, and R.L. Darwin. Full scale testing of water mist fire suppression systems for navy shipboard machinery spaces : part 1 unobstructed spaces. Technical report, US Coast Guard Research and Development Center, 1996.
- [42] G. Back, P. DiNenno, J.T. Leonard, and R.L. Darwin. Full scale testing of water mist fire suppression systems for navy shipboard machinery spaces : part 2 obstructed spaces. Technical report, US Coast Guard Research and Development Center, 1996.
- [43] B. Yao, W. Fan, and G. Liao. Interaction of water mists with a diffusion flame in a confined space. *Fire Safety Journal*, 33 :129–139, 1999.
- [44] A. Jenft. *Étude des interactions entre phénomènes d'incendie et systèmes d'extinction à eau. Développement d'un module d'extinction dans le logiciel FDS*. PhD thesis, Université de Lorraine, 2018.
- [45] Z. Tang, Z. Fang, J.P. Yuan, and B. Merci. Experimental study of the downward displacement of fire-induced smoke by water sprays. *Fire Safety Journal*, 55 :35–49, 2013.

- [46] Z. Tang, J. Vierendeels, Z. Fang, and B. Merci. Description and application of an analytical model to quantify downward smoke displacement caused by a water spray. *Fire Safety Journal*, 55 :50–60, 2013.
- [47] Z. Tang, Z. Fang, and B. Merci. Development of an analytical model to quantify downward smoke displacement caused by a water spray for zone model simulations. *Fire Safety Journal*, 63 :89–100, 2014.
- [48] L.Y. Cooper. The interaction of an isolated sprinkler spray ,and a two-layer compartment fire environment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38 :679–690, 1995.
- [49] G. Heskestad. Scaling the interaction of water sprays and flames. *Fire Safety Journal*, page 14, 2002.
- [50] R.L. Alpert. Numerical modeling of the interaction between automatic sprinkler sprays and fire plumes. *Fire Safety Journal*, 9 :157–163, 1985.
- [51] C. Zhang and W. Chow. Numerical studies on the interaction of sprinkler and smoke layer. *Procedia Engineering*, 62 :453–462, 2013.
- [52] M. Beshir. *CFD Modeling of the Interaction between a Smoke plume and a Sprinkler Spray*. PhD thesis, Ghent University, 2017.
- [53] R. Mehaddi, A. Collin, P. Boulet, Z. Acem, J. Telassamou, S. Becker, F. Demeurie, and J.-Y. Morel. Use of a water mist for smoke confinement and radiation shielding in case of fire during tunnel construction. *International Journal of Thermal Sciences*, 148 :106156, 2020.
- [54] R. Meyrand. *Contribution à l'étude de l'usage du brouillard d'eau dans la lutte contre les incendies en tunnels ventilés longitudinalement*. PhD thesis, Ecole nationale Supérieure de Mécanique et d'Aéronautique, 2009.
- [55] J.B. Abbiss, T.W. Chubb, and E.R. Pike. Laser doppler anemometry. *Optics & Laser Technology*, 6 :249–261, 1974.
- [56] F. Durst, A. Melling, and J.H. Whitelaw. *Theorie und Praxis der Laser-Doppler-Anemometrie*. Springer-Verlag, 2013.
- [57] F. Durst, A. Melling, and J.H. Whitelaw. Principles and practice of laser-doppler anemometry. *NASA STI/Recon Technical Report A*, 76 :47019, 1976.
- [58] J.B. Simon, J.C. Debra, P. Kenneth, E.S. Samantha, and E.W. Helen. Particle size analysis by laser diffraction. *Geological Society, London, Special Publications*, 232 :63–73, 2004.
- [59] J.P. Mitchell, M.W. Nagel, S. Nichols, and O. Nerbrink. Laser diffractometry as a technique for the rapid assessment of aerosol particle size from inhalers. *Journal of aerosol medicine*, 19 :409–433, 2006.
- [60] W. Schaefer, C. Tropea, G. Wigger, and D. Eierhoff. Spray measurements with the time-shift technique. *Measurement Science and Technology*, 32 :105202, 2021.
- [61] L. Li, S. Rosenkranz, W. Schäfer, and C. Tropea. Light scattering from a drop with an embedded particle and its exploitation in the time-shift technique. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 227 :20–31, 2019.

- [62] L. Li, P.G. Stegmann, S. Rosenkranz, W. Schäfer, and C. Tropea. Simulation of light scattering from a colloidal droplet using a polarized Monte Carlo method : application to the time-shift technique. *Optics Express*, 27 :36388, 2019.
- [63] J. Sun, Z. Fang, Z. Tang, T. Beji, and B. Merci. Experimental study of the effectiveness of a water system in blocking fire-induced smoke and heat in reduced-scale tunnel tests. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 56 :34–44, 06 2016.
- [64] A. Ahsan. *Two Phase Flow, Phase Change and Numerical Modeling*. IntechOpen, Rijeka, Sep 2011.
- [65] J. Tissot, P. Boulet, A. Labergue, G. Castanet, F. Trinquet, and L. Fournaison. Experimental study on air cooling by spray in the upstream flow of a heat exchanger. *International Journal of Thermal Sciences*, 60 :23 – 31, 2012.
- [66] R. Mehaddi, P. Laboureur, A. Braconnier, P. Boulet, S. Haouari-Harrak, A. Collin, S. Becker, and J.-Y. Morel. Experimental characterization of a smoke flow in a small length corridor. *Fire Technology*, 56 :883–889.
- [67] S. Lechêne, Z. Acem, G. Parent, A. Collin, and P. Boulet. Radiative shielding by water mist : comparisons between downward, upward and impacting injection of droplets. *Journal of Physics : Conference Series*, 369 :012027, 2012.
- [68] S. Lechêne, Z. Acem, G. Parent, G. Jeandel, and P. Boulet. Upward vs downward injection of droplets for the optimization of a radiative shield. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54 :1689–1697, 2011.
- [69] M.J. Hurley, D.T. Gottuk, J.R. Hall Jr, K. Harada, E.D. Kuligowski, M. Puchovsky, J.M. Watts Jr, C.J. Wiecezorek, et al. *SFPE handbook of fire protection engineering*, volume 1. Springer, 2015.
- [70] H. Ingason and Y.Z. Li. Model scale tunnel fire tests with longitudinal ventilation. *Fire Safety Journal*, 45 :371–384.
- [71] J.G. Quintiere. Scaling applications in fire research. *Fire Safety Journal*, 15 :3–29.
- [72] E. Blanchard, R. Morlon, G. Parent, P. Fromy, P. Boulet, and D. Borgiallo. Experimental study of the interaction between water sprays and smoke layer. *Fire technology*, 54 :479–501, 2018.
- [73] R. Morlon, P. Boulet, G. Parent, S. Lechêne, E. Blanchard, C. Rebuffat, P. Fromy, J. P. Vantelon, and D. Borgiallo. Study of de-stratification and optical effects observed during smoke/mist interactions. *Fire Technology*, 51 :1231–1248.
- [74] K. McGrattan and G. Forney. Fire dynamics simulator (version 4) : : user’s guide. Technical report, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2004.
- [75] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, and K. Overholt. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3 : Validation. Technical report, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2016.
- [76] T. Beji and B. Merci. Assessment of the Fire Dynamics Simulator Modeling for the Heating and Evaporation of a Single Water Droplet at Moderate and High Temperatures. *Journal of Physics : Conference Series*, 1107, 2018.



# Annexe

# 1 Ensembles des mesures de granulométrie et de vitesse pour les coupes verticales

| Mesure \ $\Delta$ au centre | -0,50 m | -0,25 m | 0 m | 0,25 m | 0,50 m |
|-----------------------------|---------|---------|-----|--------|--------|
| $D_{V10}$                   | 82      | 99      | 72  | 77     | 71     |
| $D_{avg}$                   | 195     | 197     | 186 | 190    | 183    |
| $D_{V90}$                   | 306     | 309     | 307 | 311    | 304    |
| $V_{V10}$                   | 8       | 11      | 11  | 11     | 9      |
| $V_{avg}$                   | 12      | 15      | 15  | 15     | 13     |
| $V_{V90}$                   | 16      | 19      | 19  | 19     | 17     |

TABLE 1 – Mesures verticales pour la buse plate à 4 m.

| Mesure \ $\Delta$ au centre | -0,75 m | -0,50 m | -0,25 m | 0 m | 0,25 m | 0,50 m |
|-----------------------------|---------|---------|---------|-----|--------|--------|
| $D_{V10}$                   | 79      | 77      | 86      | 75  | 83     | 61     |
| $D_{avg}$                   | 208     | 205     | 213     | 206 | 208    | 224    |
| $D_{V90}$                   | 321     | 327     | 337     | 336 | 330    | 316    |
| $V_{V10}$                   | 4       | 7       | 8       | 7   | 8      | 7      |
| $V_{avg}$                   | 7       | 9       | 11      | 10  | 10     | 10     |
| $V_{V90}$                   | 10      | 12      | 14      | 13  | 13     | 13     |

TABLE 2 – Mesures verticales pour la buse plate à 6 m.

| Mesure \ $\Delta$ au centre | -0,25 m | 0 m | 0,25 m |
|-----------------------------|---------|-----|--------|
| $D_{V10}$                   | 75      | 91  | 87     |
| $D_{avg}$                   | 184     | 192 | 185    |
| $D_{V90}$                   | 301     | 399 | 279    |
| $V_{V10}$                   | 9       | 17  | 14     |
| $V_{avg}$                   | 12      | 22  | 19     |
| $V_{V90}$                   | 16      | 28  | 24     |

TABLE 3 – Mesures verticales pour la buse rond à 4 m.



## 2 Schéma détaillé des zones d'expérimentations

### 2.1 Schéma cave

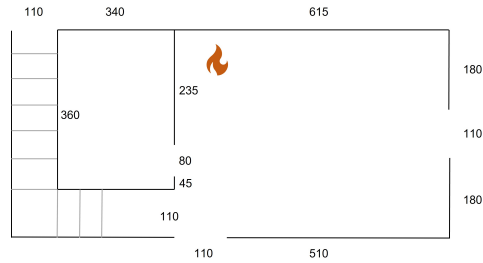


FIGURE 1 – Schéma avec les dimensions de la configuration cave.

### 2.2 Schéma couloir

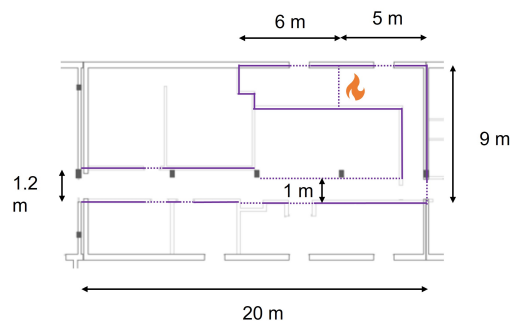
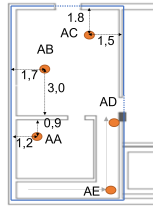
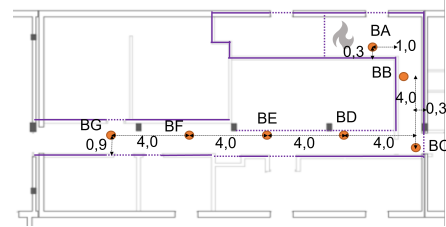


FIGURE 2 – Schéma avec les dimensions de la configuration couloir.

### 2.3 Positionnement des thermocouples horizontaux

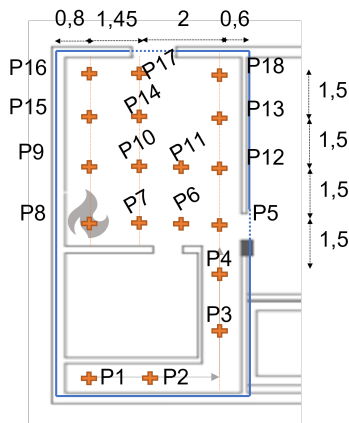


(a) Emplacements des arbres de thermocouple dans la configuration de contre tirage-vertical.

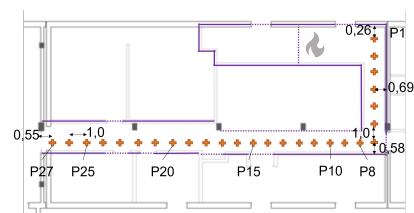


(b) Emplacements des arbres de thermocouple dans la configuration de contre tirage-horizontale.

FIGURE 3 – Emplacements des arbres de thermocouples dans les deux configurations étudiées.



(a) Emplacements des thermocouples horizontaux dans la configuration de contre tirage-vertical.



(b) Emplacements des thermocouples horizontaux dans la configuration de contre tirage-horizontale.

FIGURE 4 – Emplacements des thermocouples horizontaux dans les deux configurations étudiées.

## 2.4 Positionnement des thermocouples verticaux

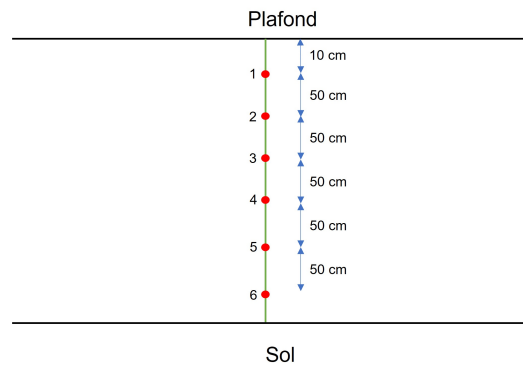


FIGURE 5 – Positions des thermocouples sur les arbres verticaux.

## 2.5 Dimensions des ouvrants

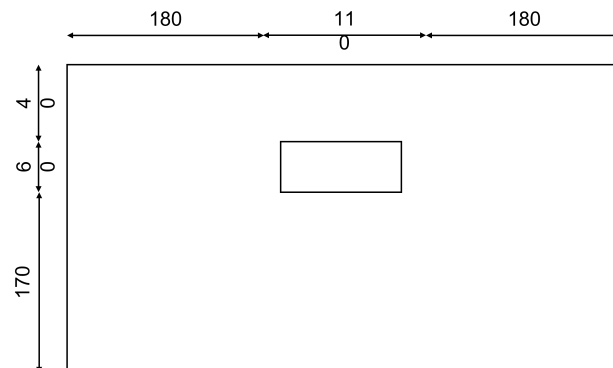


FIGURE 6 – Dimensions des soupiraux, ouvrant 3 pour la configuration en contre tirage vertical et 3 et 4 pour la configuration en contre tirage horizontal.



FIGURE 7 – Dimension de la porte d'accès pour la configuration en contre tirage vertical. La porte d'accès a les même dimensions pour la configuration en contre tirage horizontal.

## 3 Modification du code source de FDS

### Modification du code source de FDS dans le cadre de la thèse de Louis HARDY

#### Objectifs :

Les modifications ont pour but de permettre de réaliser des bilans énergétiques complets sur une zone choisie pour la phase gazeuse ou liquide. La valeur de sortie Q\_part renvoyée par défaut dans le fichier hrr.csv sera également détaillée en sa partie conductive, convective et échanges aux parois.

#### Point non traité :

Une tentative infructueuse a été réalisée pour obtenir la quantité d'eau injectée réelle et non prescrite mais n'a pas pu aboutir. Les bilans utiliseront donc la quantité théorique injectée et non réelle.

**Attention l'ensemble des modifications décrites par la suite ont été réalisées sur la version 6.7.6 de FDS et ne sont très probablement pas directement réutilisables sur d'autres versions.**

Création de la zone de sélection : cette zone correspond au volume dans lequel le bilan sera effectué, l'ensemble ou une partie du mesh peut-être sélectionné.

Création de la zone dans le fichier `init.f90` :

```
SUBROUTINE INITIALIZE_MESH_VARIABLES_1
```

```
ALLOCATE(M%BILAN_PART(0:IBP1,0:JBP1,0:KBP1),STAT=IZERO) ! Louis
CALL ChkMemErr('INIT','BILAN_PART',IZERO) ! Louis
```

#Allocation de la zone et vérification de la création

```
DO K=0,KBP1 !Louis
  DO J=0,JBP1 !Louis
    DO I=0,IBP1 !Louis
      M%BILAN_PART(I,J,K) = 1._EB !Louis
    ENDDO !Louis
  ENDDO !Louis
ENDDO !Louis
```

#Choix de la zone de contrôle. On peut régler en changeant les valeurs des boucles DO la zone sur laquelle les bilans seront effectués. La grandeur M%BILAN\_PART prend la valeur 1 sur la zone prescrite. Le bilan ne sera effectué en prenant uniquement en compte les cellules qui ont une valeur de M%BILAN\_PART égale à 1 et ignorera les autres.

Cette grandeur a également été rajoutée comme donnée de sortie utilisable par les fichiers, modification du fichier `data.f90` :

```
SUBROUTINE DEFINE_OUTPUT_QUANTITIES
```

```
OUTPUT_QUANTITY(121)%NAME = 'BILAN_PART'           !Louis!!!!!!!!!!!!!!
OUTPUT_QUANTITY(121)%UNITS = ''                   !Louis!!!!!!!!!!!!!!
OUTPUT_QUANTITY(121)%SHORT_NAME = 'bilan_part'     !Louis!!!!!!!!!!!!!!
```

Modification du fichier de sortie hrr.csv :

Plusieurs colonnes ont été rajoutées dans ce fichier pour obtenir les valeurs des grandeurs nécessaires au bilan.

Le tableau Q\_DOT sera retranscrit dans le fichier hrr.csv, il a d'abord fallu augmenter son nombre de colonnes dans le fichier `data.f90` (ici tableau de 26 colonnes) :

```
MODULE OUTPUT_DATA
```

```
INTEGER, PARAMETER :: N_Q_DOT=26                !Louis!!!!!!!!!!!!!!
```

Calcul des valeurs d'intérêt. Dans notre cas uniquement le fichier `part.f90` est concerné car nous cherchons les grandeurs liées aux échanges de chaleur sur les gouttes. Modification du fichier `part.f90` :

```
SUBROUTINE PARTICLE_MASS_ENERGY_TRANSFER
```

Deux endroits ont été modifiés car il existe une boucle en cas d'évaporation complète de la goutte d'eau et une autre s'il reste de l'eau en phase liquide.

Modification de la boucle en cas d'évaporation totale :

```
BOIL_ALL: IF (Q_DOT_RAD*DT_SUBSTEP > M_DROP*H_V) THEN ! boil it all
```

```
Q_DOT(7,NM) = Q_DOT(7,NM) - Q_RAD*WGT/DT           ! Q_PART
Q_DOT(3,NM) = Q_DOT(3,NM) + M_VAP*H_S_B*WGT/DT     ! Q_CONV
Q_DOT(2,NM) = Q_DOT(2,NM) + Q_RAD*WGT/DT           ! Q_RADI

IF (BILAN_PART(II,JJ,KK) == 1._EB) THEN           ! Louis (tout
evap par rayonnement uniquement)
  Q_DOT(20,NM) = Q_DOT(20,NM) + 0._EB             ! Energie
interne (pas d echange) de la goutte Louis
  Q_DOT(21,NM) = Q_DOT(21,NM) - Q_RAD*WGT/DT       ! echange
radiatif Louis
  Q_DOT(22,NM) = Q_DOT(22,NM) + 0._EB             ! echange
convectif (pas d echange) Louis
  Q_DOT(23,NM) = Q_DOT(23,NM) - H_V*M_VAP*WGT/DT   ! echange
evaporation Louis
  Q_DOT(24,NM) = Q_DOT(24,NM) + 0._EB             ! echange
paroi goutte (pas d echange) Louis
  Q_DOT(25,NM) = Q_DOT(25,NM) + M_VAP*WGT/DT       ! masse
evaporee Louis
END IF
```

Les calculs se font tous dans une boucle IF pour ne faire le bilan que donne la zone choisie et non sur l'ensemble de domaine :

```
IF (BILAN_PART(II,JJ,KK) == 1._EB) THEN
```

Dans le cas où la goutte s'évapore complètement la partie convective et conductive est nulle, seule la partie radiative intervient. Le calcul de la masse évaporée et de l'énergie de vaporisation nécessaire est également effectuée pour confirmer les bilans.

Si la goutte n'est pas complètement évaporée :

```
ELSE BOIL_ALL ! boil only some of the liquid
```

Les modifications apportées sont les suivantes :

```
Q_DOT(7,NM) = Q_DOT(7,NM) - (Q_CON_GAS + Q_CON_WALL + Q_RAD)*WGT/DT ! Q_PART
Q_DOT(3,NM) = Q_DOT(3,NM) + M_VAP*H_S_B*WGT/DT ! Q_CONV
Q_DOT(2,NM) = Q_DOT(2,NM) + Q_RAD*WGT/DT ! Q_RADII
Q_DOT(4,NM) = Q_DOT(4,NM) + Q_CON_WALL*WGT/DT ! Q_COND

IF (BILAN_PART(II,JJ,KK) == 1._EB) THEN ! Louis
  Q_DOT(20,NM) = Q_DOT(20,NM) + M_DROP*C_DROP*TMP_DROP_NEW*WGT ! Energie
interne de la goutte Louis
  Q_DOT(21,NM) = Q_DOT(21,NM) - Q_RAD*WGT/DT ! echange
radiatif Louis
  Q_DOT(22,NM) = Q_DOT(22,NM) - Q_CON_GAS*WGT/DT ! echange
convectif Louis
  Q_DOT(23,NM) = Q_DOT(23,NM) - H_V*M_VAP*WGT/DT ! echange
evaporation Louis
  Q_DOT(24,NM) = Q_DOT(24,NM) + Q_CON_WALL*WGT/DT ! echange
paroi goutte Louis
  Q_DOT(25,NM) = Q_DOT(25,NM) + M_VAP*WGT/DT ! masse
evaporee Louis
END IF
```

Dans ce cas les parties convectives et conductives sont calculées car il reste de l'eau en phase liquide. Le calcul est toujours effectué dans une boucle IF pour ne prendre en compte que le volume défini dans le fichier init.f90

La dernière modification consiste en l'écriture dans le fichier hrr.csv des données calculées. Pour cela le fichier `dump.f90` a été modifié dans :

```
SUBROUTINE INITIALIZE_GLOBAL_DUMPS(T,DT)
```

au niveau :

```
! Open heat release rate file (CHID_hrr.csv)
```

Les modifications sont les suivantes :

```
OPEN(LU_HRR, FILE=FN_HRR, FORM='FORMATTED', STATUS='REPLACE')
WRITE(TCFORM, '(A,I0,A)') "(,26 + 1 +N_TRACKED_SPECIES+N_ZONE_TMP, '(A, ', ',A)"
!Louis!!!!!!
WRITE(LU_HRR, TCFORM)
's', 'kW', 'kW', 'kW', 'kW', 'kW', 'kW', 'kW', 'kW', 'kW', 'kW', 'kW', 'kW', 'kW', &
'kW', 'kg/s', 'kg', ('kg/s', N=1, N_TRACKED_SPECIES), ('Pa', N=1, N_ZONE_TMP)
IF (N_ZONE_TMP > 0) THEN
WRITE(LU_HRR, TCFORM)
'Time', 'HRR', 'Q_RADI', 'Q_CONV', 'Q_COND', 'Q_DIFF', 'Q_PRES', 'Q_PART', 'Q_ENTH', &
'Q_TOTAL', 'EI_PART', 'Q_RAD_PART', 'Q_CONV_PART', 'Q_EVAP_PART', 'Q_WALL_PART', &
'M_EVAP', 'M_INJ', &
('MLR_ '// TRIM(SPECIES_MIXTURE(N)%ID), N=1, N_TRACKED_SPECIES), (TRIM(P_ZONE(N)%ID), N=
1, N_ZONE_TMP)
ELSE
WRITE(LU_HRR, TCFORM)
'Time', 'HRR', 'Q_RADI', 'Q_CONV', 'Q_COND', 'Q_DIFF', 'Q_PRES', 'Q_PART', 'Q_ENTH', &
'Q_TOTAL', 'EI_PART', 'Q_RAD_PART', 'Q_CONV_PART', 'Q_EVAP_PART', 'Q_WALL_PART', &
'M_EVAP', 'M_INJ', &
('MLR_ '// TRIM(SPECIES_MIXTURE(N)%ID), N=1, N_TRACKED_SPECIES)
ENDIF
ENDIF
```

Le nombre 26+1 correspond à la modification du nombre de colonne de `Q_DOT` via le paramètre `N_Q_DOT` changé dans `data.f90`. Le +1 correspond à la colonne temps qui vient en plus des valeurs calculées.

Les lignes suivantes servent à renseigner l'entête du fichier. Attention aux unités des différentes grandeurs car au moment de l'écriture une division par 1000 est réalisée par défaut pour passer de W en kW.



L'écriture des valeurs calculées est effectuée dans ici :

```
SUBROUTINE DUMP_HRR(T,DT
```

Via les commandes :

```
WRITE(TCFORM, '(A, I0, 5A) ')
"(", 27+N_TRACKED_SPECIES+N_ZONE_TMP, "(", FMT_R, ", ', ', ", FMT_R, ")")
IF (N_ZONE_TMP>0) THEN
  WRITE(LU_HRR, TCFORM)
  STIME, 0.001_EB*Q_DOT_TOTAL(1:8), 0.001_EB*SUM(Q_DOT_TOTAL(1:7)), &
    0.001_EB*Q_DOT_TOTAL(20:24), Q_DOT_TOTAL(25:26), &
  M_DOT_TOTAL(1:N_TRACKED_SPECIES), (P_ZONE_P(I), I=1, N_ZONE_TMP)
ELSE
  WRITE(LU_HRR, TCFORM)
  STIME, 0.001_EB*Q_DOT_TOTAL(1:8), 0.001_EB*SUM(Q_DOT_TOTAL(1:7)), &
    0.001_EB*Q_DOT_TOTAL(20:24), Q_DOT_TOTAL(25:26), &
  M_DOT_TOTAL(1:N_TRACKED_SPECIES)
```

Le chiffre 27 correspond comme précédemment au nombre de colonne du tableau Q\_DOT renseigné au début via N\_Q\_DOT.

```
WRITE(LU_HRR, TCFORM)
STIME, 0.001_EB*Q_DOT_TOTAL(1:8), 0.001_EB*SUM(Q_DOT_TOTAL(1:7)), &
  0.001_EB*Q_DOT_TOTAL(20:24), Q_DOT_TOTAL(25:26), &
  M_DOT_TOTAL(1:N_TRACKED_SPECIES), (P_ZONE_P(I), I=1, N_ZONE_TMP)
```

La ligne ci-dessus permet de remplir le fichier hrr.csv. En premier on retrouve la colonne du temps (STIME) puis :

```
0.001_EB*Q_DOT_TOTAL(1:8)
```

Renvoie les colonnes habituelles du fichier de sortie :

```
'HRR', 'Q_RADI', 'Q_CONV', 'Q_COND', 'Q_DIFF', 'Q_PRES', 'Q_PART', 'Q_ENTH'
```

La commande suivante calcule Q\_TOTAL qui est une vérification par FDS, les colonnes Q\_ENTH et Q\_PART doivent être égales :

```
0.001_EB*SUM(Q_DOT_TOTAL(1:7))
```

Remarque les données sont multipliées par 0.001 pour passer de W en KW. Jusqu'à présent aucune colonne supplémentaire n'a été insérée.

La commande :

```
0.001_EB*Q_DOT_TOTAL(20:24),
```

Permet d'écrire les valeurs calculées dans part.f90 :

'EI\_PART', 'Q\_RAD\_PART', 'Q\_CONV\_PART', 'Q\_EVAP\_PART', 'Q\_WALL\_PART'

Ces grandeurs sont également multipliées par 0.001 pour être en kW. Les deux grandeurs suivantes (`Q_DOT_TOTAL(25:26)`) sont des essais effectués pour obtenir la masse d'eau réellement injectée et non la prescrite. Ces deux colonnes ne sont pas multipliées par 0.001 pour rester en kg/s et en kg.

La suite n'a pas été modifiée, cela correspond au suivi des espèces simulées.

## Résumé

Cette thèse s'inscrit dans un ensemble de travaux ayant pour objectif d'étudier les matériels des sapeurs-pompiers et l'effet de leurs actions de lance sur leur environnement. Ce domaine d'étude est encore nouveau avec une première étape essentielle pour les travaux présentés dans ce manuscrit effectué en 2016 avec l'approche performantielle.

Nous proposons dans les trois premiers chapitres une étude comparative entre un nouveau matériel de lutte contre l'incendie, la lance diphasique, et les lances utilisées actuellement. Des expérimentations ont permis de déterminer les caractéristiques géométriques mais également l'évolution en fonction de la distance de la taille et de la vitesse des gouttes constituant le jet. Les deux derniers chapitres complètent cette approche par une étude à échelle intermédiaire des phénomènes d'interaction entre un spray et une couche de fumée en utilisant une approche couplé expérimentation/modélisation. Les essais en maquette serviront à vérifier la pertinence des simulations numériques du logiciel Fire Dynamics Simulator. L'approche numérique permet de quantifier les échanges thermiques entre le jet et le milieu environnant. Une perspective de ses travaux est l'utilisation des bilans énergétiques, qui ont été établi, pour chercher à optimiser le mode d'action des sapeurs-pompiers.

**Mots-clés:** Lance à incendie, sapeurs-pompiers, diphasique, CFD.

## Abstract

This thesis is part of work that aims to study firefighters' equipment and the effect of their fire hose actions on their environment. This field of study is still new with a first essential step for the work presented in this manuscript carried out in 2016 with the performantial approach.

In the first three chapters, we propose a comparative study between a new firefighting equipment, the twin-fluid hose, and the currently used hoses. Experiments have made it possible to determine the geometric characteristics and also the evolution of the size and speed of the drops making up the jet as a function of distance. The last two chapters complete this approach with an intermediate-scale study of the interaction phenomena between a spray and a smoke layer using a coupled experimental/modelling approach. The model tests will be used to verify the relevance of the numerical simulations of the Fire Dynamics Simulator software. The numerical approach makes it possible to quantify the heat exchange between the spray and the surrounding environment. One perspective of this work is the use of energy balances, which have been established, to seek to optimise the mode of action of firefighters.

**Keywords:** Fire nozzle, firefighters, twin-fluid, CFD.