



HAL
open science

Étude expérimentale et numérique des interactions entre dispositifs d'évacuation naturelle de fumées et de chaleur et systèmes d'extinction automatique à eau

Nicolas Trevisan

► To cite this version:

Nicolas Trevisan. Étude expérimentale et numérique des interactions entre dispositifs d'évacuation naturelle de fumées et de chaleur et systèmes d'extinction automatique à eau. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Lorraine, 2018. Français. NNT : 2018LORR0093 . tel-01902664

HAL Id: tel-01902664

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01902664>

Submitted on 23 Apr 2019

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

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



AVERTISSEMENT

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

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

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

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

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

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

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



Université de Lorraine
Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée - UMR 7563
Énergétique Mécanique et Matériaux - ED 409

Étude expérimentale et numérique des interactions entre dispositifs d'évacuation naturelle de fumées et de chaleur et systèmes d'extinction automatique à eau

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 19 avril 2018

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine
(spécialité Mécanique-Énergétique)

par

Nicolas Trévisan

Composition du jury

<i>Rapporteurs :</i>	Thomas ROGAUME Olivier VAUQUELIN	Professeur, Université de Poitiers, Laboratoire Pprime Professeur, Université d'Aix-Marseille, IUSTI
<i>Examineurs :</i>	Armelle MULLER Bernard PORTERIE	Directrice Études et Recherche, CNPP Professeur, Université d'Aix-Marseille, IUSTI
<i>Directeurs :</i>	Zoubir ACEM Pascal BOULET	Maître de conférences, Université de Lorraine, LEMTA Professeur, Université de Lorraine, LEMTA
<i>Invité :</i>	Grégoire PIANET	Responsable Modélisation, CNPP

Remerciements

Ce travail de recherche a été réalisé en collaboration entre le CNPP et le Laboratoire d'Énergie et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA).

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma gratitude aux membres du jury. Je suis extrêmement reconnaissant à Thomas Rogaume et Olivier Vauquelin d'avoir été les rapporteurs de mon travail. Merci également à Bernard Porterie pour l'avoir examiné.

Au CNPP, j'ai intégré le Département Feu et Environnement sous la direction d'Armelle Muller. Je la remercie chaleureusement pour m'avoir permis de réaliser cette aventure. Au sein du service Étude et Modélisation, j'ai eu le très grand plaisir de travailler sous la direction de Grégoire Pianet et de pouvoir profiter de ses connaissances techniques et culturelles.

Au cours de ces trois années, j'ai eu la chance de partager un bureau au CNPP avec deux individus remarquables. Alexandre Jenft, mon prédécesseur qui a ouvert la voie. Sans lui, une grande partie de ce travail aurait un aspect bien différent. Ses qualités humaines et organisationnelles ont été d'une aide précieuse. Ses claques derrière la tête l'ont été tout autant. Pierre-Nicolas Mauger, dont la rigueur et le sens critique m'ont aidé à prendre du recul sur mon travail à de nombreuses occasions. Bon, par contre, les festivals de métal... plus jamais !

Au sein de ce même service, je tiens également à remercier Romain Morlon (accessoirement ancien collègue du LEMTA), Dina Khessassi, Matthieu Vandewalle et Stéphanie Maetz. Merci également à Quang Dong, avec qui j'ai pu avoir des discussions enrichissantes tant sur la programmation et que sur les mangas.

Merci à Arnaud Breton, responsable du service expérimentation, de m'avoir donné les moyens de m'amuser sur des installations rarement accessibles au monde de la recherche. Dans ce service, j'ai une pensée toute particulière pour Anne Aulard : tu fais du bon boulot ! Merci à Michel Porquet pour tous ses conseils et l'aide précieuse qu'il m'a apporté lors des campagnes expérimentales. Merci également à Augustin Mayunga qui a fait un super boulot lors de la seconde campagne expérimentale et dont la voix de ténor nous manque déjà. Enfin, merci à François Robert et Christophe Breton pour leur aide et leur disponibilité.

D'une manière générale, je souhaite remercier toutes les personnes du DFE et du CNPP que j'ai dû à un moment ou un autre ~~embêter~~ solliciter et qui m'ont toujours répondu avec bienveillance.

Au sein du LEMTA, mes premiers remerciements sont naturellement adressés à Pascal Boulet, mon directeur de thèse. Lorsque je suis allé le voir il y a cinq ans pour un banal problème d'emploi du temps, je n'imaginais pas que cela me conduirait jusqu'ici. Au cours de ces années, j'ai pu profiter de sa grande patience (oh oui...), son humanité, sa pédagogie et sa patience (oui, vraiment).

Merci à Zoubir Acem de m'avoir accepté comme premier padawan. Sa bienveillance, sa bonne humeur permanente et son investissement font partie des choses qui vous motivent au quotidien. En plus parfois il offre des dinosaures.

Bien qu'il n'ait pas contribué directement à cette thèse, Anthony Collin a toujours été présent. Je lui dois ma première rencontre en tête à tête avec le feu. Merci à Rabah Mehaddi pour toutes les discussions que l'on a pu avoir ainsi que pour les cours particuliers sur les écoulements des fumées.

Toujours pour le LEMTA, je ne peux pas oublier Irène Léonard pour ... tout. Profite bien de ta retraite méritée! Un très grand merci également à Valérie Reichhart et Ludovic Buhler pour leur efficacité. Merci à Alexandre Labergue et tout le service technique du LEMTA pour les efforts déployés afin de me permettre de réaliser des mesures de granulométrie.

Ces trois années ont également été l'occasion de cotoyer un certain nombre d'autres doctorants/stagiaires. En premier lieu je tiens à remercier chaleureusement l'américano breton Alexis Marchand. Merci pour ta gentillesse, ton soutien et ton coaching sur DOTA2 et SC2. Je te remercie un peu moins pour les chansons à la con qui restent dans la tête. Tout pareil pour Jonathan Gerardin et ses playlists étonnantes. Merci également à Samia, Giacomo, Aurélien, Lucas, Giovanni, Blandine, Mathilde, Waseem et tous ceux que j'oublie forcément.

Au-delà de la thèse elle-même, je souhaite remercier ici des personnes qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à ce parcours (liste non exhaustive). Merci à Andy, Maxime Maxime & Maxym, Tarek, Adrien, Mazigh, Maximilien, Malongo, San Marco, Kusadasi, Aurélie, Loïc et Edith, Juliette et Charlotte. Un très grand merci à Nadine et Bernard pour leur hospitalité.

Je ne peux bien évidemment pas oublier de remercier ma famille qui m'a toujours soutenu et supporté (dans tous les sens du terme). Enfin, merci à toi Ida qui fait mon bonheur au quotidien, tout simplement.

« Pif Paf Pouf »
Pascal Boulet

« Do. Or do not. There is no try. »
Yoda

Table des matières

Table des figures	xi
Liste des tableaux	xix
Introduction	1
Chapitre 1 Synthèse bibliographique concernant l'interaction entre sprinkleurs et désenfumage naturel	3
1.1 La lutte contre l'incendie	4
1.2 Les installations fixes	4
1.3 Les sprinkleurs	6
1.3.1 Historique	6
1.3.2 Temps de réponse d'un sprinkleur	7
1.3.3 Propriétés du spray	9
1.3.4 Les différents types de sprinkleurs	9
1.4 Le désenfumage	11
1.5 La cohabitation d'un point de vue physique : Etat de l'art jusqu'en 2001	13
1.5.1 Arguments <i>en faveur</i> d'une utilisation conjointe du sprinklage et du désenfumage	15
1.5.2 Arguments <i>contre</i> une utilisation conjointe du sprinklage et du désenfumage	16
1.5.3 Conclusion de Beyler et Cooper	19
1.6 Travaux plus récents	20
1.7 La cohabitation d'un point de vue réglementaire	20

1.7.1	Réglementations relatives aux systèmes sprinkleurs	20
1.7.2	Réglementations relatives au désenfumage	21
1.7.3	Utilisation conjointe du désenfumage et de l'aspersion	22
1.8	Conclusions	24
Chapitre 2 Campagne d'essais à moyenne échelle		27
2.1	Objectifs et plan	27
2.2	Dispositif expérimental	28
2.2.1	Local d'essais	28
2.2.2	Désenfumage	29
2.2.3	Aspersion	30
2.2.4	Foyer	31
2.2.5	Métrologie	31
2.2.5.1	Mesures de températures	32
2.2.5.2	Mesures des vitesses d'écoulement	34
2.2.5.3	Mesure de débit d'eau au sprinkleur	34
2.2.5.4	Autres mesures	35
2.3	Résultats expérimentaux	35
2.3.1	Influence du désenfumage sur l'activation du premier sprinkleur	39
2.3.1.1	Objectifs	39
2.3.1.2	Détermination du temps de référence d'activation du sprinkleur, t_{ref}	39
2.3.1.2.1	Défauts des sprinkleurs	42
2.3.1.2.2	Conditions extérieures	44
2.3.1.2.3	Mouvements aérauliques	44
2.3.1.3	Utilisation du désenfumage	46
2.3.2	Influence du désenfumage sur les niveaux de température et la visibilité .	48
2.3.3	Synthèse des résultats expérimentaux	66

2.4	Étude numérique	67
2.4.1	Préparation des simulations numériques	67
2.4.1.1	Local d'essais et conditions aux limites	67
2.4.1.2	Maillage	69
2.4.1.3	Modélisation du système d'aspersion	71
2.4.1.4	Foyer	73
2.4.2	Cas de validation numérique	74
2.4.3	Analyse de scénarios comparatifs	81
2.5	Bilan	86
2.5.1	Résultats expérimentaux	86
2.5.2	Résultats numériques	87
Chapitre 3 Campagne d'essais à grande échelle		89
3.1	Objectifs et plan	89
3.2	Dispositif expérimental	90
3.2.1	Local d'essais	90
3.2.2	Désenfumage	91
3.2.3	Aspersion	92
3.2.4	Foyers	92
3.2.4.1	Feux de bac	93
3.2.4.2	Feux de palettes	95
3.2.5	Métrologie	97
3.3	Résultats expérimentaux	99
3.3.1	Liste des essais	99
3.3.2	Feux de bac	102
3.3.2.1	Foyer positionné entre les exutoires	102
3.3.2.1.1	Utilisation du désenfumage après déclenchement de l'aspersion	102

3.3.2.1.2	Utilisation du désenfumage avant déclenchement de l'aspersion	107
3.3.2.2	Foyer positionné sous un exutoire	111
3.3.2.2.1	Utilisation du désenfumage après déclenchement de l'aspersion	112
3.3.2.2.2	Utilisation du désenfumage avant déclenchement de l'aspersion	115
3.3.3	Feux de palettes	122
3.3.3.1	Utilisation du désenfumage après déclenchement de l'aspersion .	122
3.3.3.2	Utilisation du désenfumage avant déclenchement de l'aspersion .	124
3.3.4	Autres mesures	125
3.3.5	Synthèse des résultats expérimentaux obtenus	128
3.4	Étude numérique	129
3.4.1	Préparation des simulations numériques	129
3.4.1.1	Local d'essais et conditions aux limites	129
3.4.1.2	Foyers	130
3.4.1.3	Aspersion et désenfumage	130
3.4.1.4	Maillage	131
3.4.2	Validation numérique	132
3.5	Conclusions	142
Chapitre 4 Modélisation de configurations réelles et ouverture à l'ingénierie		145
4.1	Présentation des simulations	145
4.2	Modélisation d'un entrepôt de stockage	148
4.2.1	Analyse des résultats des simulations des 4 scénarios étudiés	150
4.2.1.1	Temps d'activation et nombre de sprinkleurs activés	150
4.2.1.2	Température des éléments sensibles des cinq premiers sprinkleurs	151
4.2.1.3	Température des sprinkleurs dans le canton adjacent	155

4.2.1.4	Quantité de chaleur extraite par les exutoires	157
4.2.1.5	Quantité de matière extraite par les exutoires	159
4.2.2	Scénarios alternatifs	162
4.3	Modélisation d'un centre commercial	167
4.3.1	Analyse des résultats des simulations des 4 scénarios étudiés	169
4.3.1.1	Temps d'activation et nombre de sprinkleurs activés	169
4.3.1.2	Température des éléments sensibles des cinq premiers sprinkleurs	173
4.3.1.3	Quantité de chaleur transmise aux cantons adjacents	174
4.3.1.4	Quantités de chaleur et de matière extraites par les exutoires . .	175
4.4	Conclusions	178
	Conclusions et perspectives	181
	Bibliographie	185

Table des figures

1.1	Vue schématique éclatée d'un sprinkleur et code couleur des températures d'activation de l'élément sensible [7].	7
1.2	Processus d'atomisation d'un spray de sprinkleur [8].	7
1.3	Éléments sensibles extraits de 3 sprinkleurs différents. De gauche à droite $RTI = 55 (\text{m} \cdot \text{s})^{1/2}$, $T_{act} = 68^\circ\text{C}$; $RTI = 108 (\text{m} \cdot \text{s})^{1/2}$, $T_{act} = 68^\circ\text{C}$; $RTI = 108 (\text{m} \cdot \text{s})^{1/2}$, $T_{act} = 93^\circ\text{C}$ (à droite)	9
1.4	Schématisme des différences entre sprinkleurs pendants et sprinkleurs debouts.	10
1.5	Observation d'un milieu stratifié.	12
2.1	Vue extérieure du local d'essais de la première campagne expérimentale.	28
2.2	Maquette de transformateur et banc de brouillard d'eau présents dans le local d'essais.	29
2.3	Exutoire installé sur le local d'essais à moyenne échelle.	30
2.4	Photographie du brûleur à fioul	32
2.5	Masse de fioul imbrûlé se déposant sous le spray au cours d'un essai.	33
2.6	Position des éléments de métrologie dans le local d'essais (vue de dessus).	34
2.7	Évolution de la température mesurée à proximité du sprinkleur 6 pendant les essais de répétabilité.	41
2.8	Dispositif (armature + sprinkleurs) du test du bain d'huile.	43
2.9	Évolution de la température de l'ampoule d'un sprinkleur pour différentes valeurs de vitesse d'écoulement.	45

2.10	Évolution de la température mesurée à proximité du sprinkleur 6 pendant les essais avec ouverture du désenfumage préalable au déclenchement de l'aspersion (HRR = 400 kW).	47
2.11	Évolution de la température mesurée à proximité du sprinkleur 6 pendant les essais avec ouverture du désenfumage préalable au déclenchement de l'aspersion (foyer de 800 kW).	49
2.12	Observations de la stratification des fumées à 180 s pour HRR = 400 kW (à gauche) et HRR = 800 kW (à droite).	50
2.13	Comparaison de la visibilité pour différents temps d'activation du DENFC (HRR = 400 kW).	51
2.14	Comparaison de la visibilité pour deux temps d'activation du DENFC différents (HRR = 800 kW). À gauche : désenfumage après aspersion. À droite : désenfumage avant aspersion.	52
2.15	Estimation de l'évolution de la hauteur libre de fumée pour 3 scénarios différents (foyer de 400 kW).	53
2.16	Profils de température à différents instants pour 3 scénarios. En bleu : ouverture de l'exutoire 60 s après aspersion. En orange : ouverture de l'exutoire 60 s avant aspersion. En rouge : essai sans désenfumage.	56
2.17	Visualisation des variations de température dans les 3 scénarios présentés en figure 2.16. Les barres d'histogrammes représentent la différence $T(t) - T(t - 60\text{ s})$ à plusieurs instants successifs de $t = 120\text{ s}$ à $t = 480\text{ s}$. Le sprinkleur se déclenche à $t = 180\text{ s}$.	57
2.18	Profils de température à différents instants pour 2 scénarios différents (foyer de 800 kW). En bleu : ouverture de l'exutoire 60 s après aspersion. En orange : ouverture de l'exutoire 60 s avant aspersion.	59
2.19	Températures mesurées à 3.5 m du sol au niveau de l'arbre de thermocouples 3, pour différents temps de déclenchement du désenfumage (HRR = 400 kW). En bleu : ouverture de l'exutoire entre 60 s et 150 s. En rouge : ouverture de l'exutoire entre 210 s et 300 s. En gris : ouverture de l'exutoire à 180 s. En noir : essai sans désenfumage. En orange : essai sans désenfumage ni aspersion.	60
2.20	Températures mesurées à 3.5 m du sol au niveau de l'arbre de thermocouples 4, pour différents temps de déclenchement du désenfumage (HRR = 400 kW).	61
2.21	Températures mesurées à 1.75 m du sol au niveau de l'arbre de thermocouples 4, pour différents temps de déclenchement du désenfumage (HRR = 400 kW).	62
2.22	Températures mesurées à 1.0 m du sol au niveau de l'arbre de thermocouples 4, pour différents temps de déclenchement du désenfumage (HRR = 400 kW).	63

2.23	Températures mesurées à 3.5 m, 1.75 m et 1.0 m du sol au niveau de l'arbre de thermocouples 4, pour deux temps de déclenchement du désenfumage ($HRR = 800 \text{ kW}$).	64
2.24	Modèle numérique du local d'essais utilisé sur FDS.	68
2.25	Sensibilité de la conductivité thermique λ : température au niveau du sprinkleur (a) et dans l'exutoire (b)	68
2.26	Analyse de sensibilité à la valeur de la conductivité thermique λ : température à 350 cm, 175 cm et 50 cm au niveau de l'arbre de thermocouples 4.	69
2.27	Évolution de la température à 3.5 m à proximité du foyer (a) et au niveau du sprinkleur (b), pour différentes tailles de maille.	71
2.28	Représentation des angles caractérisant la géométrie d'un spray de sprinkleur sous FDS	72
2.29	Visualisation de deux empreintes de spray différentes pour un même débit d'eau.	73
2.30	Inflammation du spray de fioul (400 kW). De gauche à droite : $t = 0 \text{ s}$ (seule la flamme de propane est visible), $t = 0.4 \text{ s}$, $t = 1.2 \text{ s}$ et $t = 2 \text{ s}$	74
2.31	Comparaison expérimental/numérique : Température à une hauteur de 350 cm au niveau de l'arbre 1.	75
2.32	Comparaison expérimental/numérique : Température à 350 cm du sol au niveau des arbres 3 et 4.	76
2.33	Comparaison expérimental/numérique : Température au voisinage du sprinkleur 6.	77
2.34	Comparaison expérimental/numérique : Température des fumées extraites par l'exutoire.	78
2.35	Comparaison expérimental/numérique : Atténuation du signal de l'opacimètre installé à 190 cm du sol dans le plan de la porte servant d'arrivée d'air.	79
2.36	Comparaison expérimental/numérique : Vitesse moyenne de l'écoulement dans la section de l'exutoire.	80
2.37	Évaluation de la quantité de chaleur extraite par l'exutoire lors de l'essai 52.	81
2.38	Quantité de chaleur extraite par l'exutoire au cours du temps pour deux scénarios différents ($HRR = 400 \text{ kW}$)	82
2.39	Quantité de chaleur extraite par l'exutoire au cours du temps pour deux scénarios différents ($HRR = 800 \text{ kW}$)	83

2.40	Débit massique de suie extrait par l'exutoire au cours du temps pour deux scénarios différents ($HRR = 400$ kW)	84
2.41	Débit massique de suie extrait par l'exutoire au cours du temps pour deux scénarios différents ($HRR = 800$ kW)	85
3.1	Vue extérieure du hall d'essais numéro 3 (CNPP)	90
3.2	Vue 3D du hall d'essai de la seconde campagne expérimentale	91
3.3	Positions des trois exutoires installés sur le plafond mobile. Sur cette photo, les capots des exutoires ne sont pas présents.	92
3.4	Schéma d'implantation des têtes de sprinkleur sous le plafond mobile (le Nord est en haut).	93
3.5	Développement d'un feu de bac de fioul (essai n°18). De gauche à droite : t_0 (début de l'allumage), $t_0 + 60$ s (fin de l'allumage) et $t_0 + 120$ s.	94
3.6	Comparaison des HRR calculés lors d'essais avec et sans aspersion.	95
3.7	Évolution des HRR calculés à partir de la perte de masse pour tous les essais bac.	96
3.8	Développement d'un feu de palettes (essai n°23). De gauche à droite : t_0 (fin de l'allumage), $t_0 + 60$ s, $t_0 + 120$ s et $t_0 + 180$ s.	96
3.9	Évolution de la température mesurée à 2 m au dessus du foyer de palettes pour différents essais.	98
3.10	Observation de l'effet de l'aspersion sur le foyer en fonction du type de combustible utilisé.	99
3.11	Positions et temps d'activation des sprinkleurs lors des essais avec ouverture des exutoires après aspersion (bac positionné entre les exutoires).	103
3.12	Évolution de la température mesurée à proximité du premier sprinkleur activé lors des essais avec bac de fioul positionné entre les trois exutoires.	104
3.13	Évolution de la température mesurée à proximité des sprinkleurs SD11, SD15 et SD16 lors de l'essai numéro 3.	105
3.14	Évolution des températures mesurées dans les trois exutoires lors de l'essai 3 (ouverture des exutoires 120 s après déclenchement de l'aspersion).	106
3.15	Représentation schématique de la première (en bleu), seconde (en vert) et troisième (en rouge) couronnes de sprinkleurs.	108

3.16	Évolution des températures moyennes des première, seconde et troisième couronnes de sprinkleurs autour du foyer lors de l'essai 3.	109
3.17	Positions et temps d'activation des sprinkleurs lors des essais avec ouverture des exutoires avant aspersion (bac positionné entre les exutoires)	110
3.18	Évolution de la température mesurée à proximité du premier sprinkleur s'étant déclenché lors des essais avec ouverture des exutoires avant activation du premier sprinkleur (bac de fioul positionné entre les exutoires).	111
3.19	Évolution de la température moyenne mesurée sous le plafond lors des essais avec ouverture des exutoires avant et après aspersion (bac positionné entre les exutoires).112	
3.20	Effet de l'aspersion sur le foyer lors de l'essai 10. De gauche à droite : avant aspersion ; 60 s après aspersion ; 120 s après aspersion.	112
3.21	Influence du sprinkleur SD10 sur le foyer de l'essai 15. À gauche : avant aspersion. À droite : quelques minutes après l'activation de l'aspersion.	113
3.22	Évolution de la température mesurée à proximité du sprinkleur SD10 lors des essais avec ouverture des exutoires après aspersion (bac de fioul positionné sous l'exutoire 1).	114
3.23	Évolution de la température mesurée dans le DENFC 1 lors des essais avec déclenchement du désenfumage après aspersion (bac positionné sous l'exutoire 1).	115
3.24	Évolution des températures mesurées dans les exutoires 2 et 3 au cours des essais avec activation du désenfumage après aspersion (bac de fioul positionné sous l'exutoire 1).	116
3.25	Évolution des températures mesurées au niveau du sprinkleur SD10 lors des essais avec ouverture des exutoires avant aspersion (bac sous l'exutoire 1).	117
3.26	Évolution de la température mesurée au niveau de l'exutoire situé au droit du foyer lors des essais avec déclenchement du désenfumage avant activation de l'aspersion.118	
3.27	Évolution de la température moyenne sous le plafond lors des essais avec ouverture des exutoires avant aspersion (bac positionné sous l'exutoire 1).	119
3.28	Carte des températures mesurées au niveau du plafond mobile lors de deux essais avec foyer positionné sous l'exutoire 1.	121
3.29	Positions et temps d'activation des sprinkleurs lors des essais avec ouverture des exutoires après aspersion (feux de palettes).	123
3.30	Évolution de la température mesurée à proximité du sprinkleur SD14 lors des essais avec ouverture des exutoires après aspersion (feux de palettes).	124

3.31	Évolution de la température mesurée au niveau du sprinkleur SD14 et ajustée temporellement.	125
3.32	Superposition des températures mesurées à proximité du sprinkleur SD14 lors de tous les essais utilisant le foyer de palettes.	126
3.33	Comparaison visuelle de la quantité de fumée accumulée au niveau du plafond entre un essai sans désenfumage (à gauche) et avec désenfumage (à droite). . . .	127
3.34	Modèle 3D du hall d'essais utilisé lors de la seconde campagne expérimentale. . .	129
3.35	Comparaison entre le HRR déterminé expérimentalement lors de l'essai 6 et le HRR calculé par FDS.	131
3.36	Évolution du degré de finesse du maillage avec le temps et avec la variation de puissance du foyer.	132
3.37	Comparaison entre la température mesurée au niveau du sprinkleur SD14 et celle calculée par FDS lors de l'essai 6.	133
3.38	Comparaison entre la température mesurée au niveau des sprinkleurs SD15 et SD19, avec celles calculées par FDS lors de l'essai 6.	134
3.39	Comparaison entre la température mesurée au niveau du DENFC 1 et celle calculée par FDS lors de l'essai 6.	135
3.40	Comparaison entre la température mesurée au niveau des DENFC 2 et 3 et celle calculée par FDS lors de l'essai 6.	136
3.41	Comparaison entre la température moyenne déterminée expérimentalement au niveau du plafond et celle prédite par FDS.	137
3.42	Évolution du rapport des quantités de chaleur extraite par les exutoires et sortant par les bords du canton sur le HRR du foyer.	138
3.43	Évolution de la quantité de chaleur extraite par chaque exutoire.	139
3.44	Evolution de la quantité de chaleur extraite par les exutoires lors de l'essai 17. . .	140
3.45	Évolution des débits massiques de suies extraits par les exutoires au cours de l'essai 6.	141
4.1	Évolution du HRR pour les quatre foyers types proposés dans le guide du LCPP. . .	146
4.2	Exemple de stabilisation du HRR après activation du cinquième sprinkleur. . . .	148
4.3	Modèle numérique vu du dessus de la cellule de l'entrepôt de stockage.	149

4.4	Visualisation du développement du foyer dans la cellule de stockage à deux instants différents.	149
4.5	Évolution avec le temps du nombre de sprinkleurs déclenchés dans les quatre scénarios étudiés.	151
4.6	Position des sprinkleurs situés au voisinage du foyer.	153
4.7	Évolution de la température de l'élément sensible du sprinkleur 68.	153
4.8	Évolution de la température des éléments sensibles des sprinkleurs 69, 83, 84 et 54.	154
4.9	Évolution de la température moyenne des éléments sensibles des sprinkleurs du second canton pour les quatre scénarios étudiés.	155
4.10	Évolution de la quantité de chaleur transférée du canton 1 vers le canton 2 pour les quatre scénarios étudiés.	156
4.11	Évolution du rapport entre la puissance extraite par les exutoires et le HHR du foyer.	158
4.12	Quantité d'énergie extraite par les exutoires au cours du temps.	159
4.13	Débits volumiques extraits par les exutoires.	160
4.14	Évolution de la masse de suie accumulée dans le bâtiment.	161
4.15	Évolution du nombre de sprinkleurs activés dans les simulations alternatives.	163
4.16	Évolution de la puissance des foyers des simulations alternatives.	164
4.17	Évolution du rapport entre puissance extraite et HRR dans les simulations alternatives.	165
4.18	Évolution de l'énergie extraite par les exutoires dans les simulations alternatives.	166
4.19	Évolution de la quantité de suie présente dans le bâtiment dans les simulations alternatives.	166
4.20	Plan du centre commercial et position des principaux éléments.	167
4.21	Visualisation du foyer pleinement développé.	168
4.22	Evolution avec le temps du nombre de sprinkleurs déclenchés dans les quatre scénarios étudiés.	169
4.23	Position et numéro de tous les sprinkleurs déclenchés au cours des quatre différents scénarios.	171

4.24	Evolution du HRR dans les quatre scénarios différents.	172
4.25	Observation du foyer à 300 s et 480 s dans le scénario 2. Les fumées sont désactivées pour permettre de distinguer les zones de flammes.	172
4.26	Évolution de la température des éléments sensibles des sprinkleurs 29, 30, 28 et 31	173
4.27	Quantité de chaleur transmise du canton Nord-Est au canton Nord-Ouest dans les quatre scénarios.	174
4.28	Quantité de chaleur transmise du canton Nord-Est au canton Sud-Est dans les quatre scénarios.	175
4.29	Évolution du rapport entre la puissance extraite par les exutoires et le HRR du foyer.	176
4.30	Quantité d'énergie extraite par les exutoires au cours du temps.	177
4.31	Évolution de la quantité de suie présente dans le bâtiment.	178

Liste des tableaux

1.1	Liste des études expérimentales analysées par Beyler et Cooper.	14
2.1	Liste des essais réalisés lors de la première campagne expérimentale.	38
2.2	Liste et caractéristiques des essais relatifs au temps d'activation du sprinkleur .	40
2.3	Temps et température d'activation du sprinkleur lors des essais de répétabilité .	42
2.4	Temps de déclenchement des sprinkleurs dans le bain d'huile thermostatée	43
2.5	Conditions extérieures lors des essais 13, 14, 18 et 29	44
2.6	Liste des essais avec activation du désenfumage avant t_{ref} (HRR = 400 kW). . .	46
2.7	Liste des essais avec activation du désenfumage avant activation automatique du sprinkleur (foyer de 800 kW)	48
2.8	Propriétés thermiques des matériaux utilisées en données d'entrée des simulations FDS [4, 55]	67
2.9	Caractéristiques des maillages utilisés lors de l'étude de sensibilité à la taille de maille.	70
2.10	Données d'entrée pour le modèle de combustion simple de FDS.	73
2.11	Conditions expérimentales et temps d'activation du sprinkleur et du désenfumage lors de l'essai 52.	74
3.1	Liste des essais réalisés dans le hall 3 dans le cadre de la seconde campagne expérimentale. (E) : Foyer positionné entre les exutoires. (S) : Foyer positionné sous l'exutoire 1.	101

3.2	Liste des essais réalisés avec ouverture du désenfumage à différents instants après déclenchement du premier sprinkleur, dans le cadre des essais avec le foyer bac positionné entre les exutoires.	102
3.3	Temps d'activation des seconds sprinkleurs lors des essais réalisés avec ouverture des exutoires après déclenchement du premier sprinkleur (bac positionné entre les exutoires).	104
3.4	Liste des essais réalisés avec ouverture du désenfumage à différents instants avant déclenchement du premier sprinkleur, dans le cadre des essais avec le foyer bac positionné entre les exutoires.	109
3.5	Liste des essais réalisés avec ouverture du désenfumage à différents instants après déclenchement du premier sprinkleur (bac positionné sous l'exutoire 1).	113
3.6	Liste des essais réalisés avec ouverture du désenfumage à différents instants avant déclenchement du premier sprinkleur (bac positionné sous l'exutoire 1).	116
3.7	Liste des essais réalisés avec ouverture du désenfumage à différents instants après déclenchement du premier sprinkleur (palettes).	122
3.8	Liste des essais réalisés avec ouverture du désenfumage à différents instants avant déclenchement du premier sprinkleur (feux de palettes).	124
3.9	Propriétés des matériaux utilisées en données d'entrée des simulations FDS [55], [4].	130
4.1	Caractéristiques des foyers types imposés par le LCPP.	147
4.2	Temps d'activation des différents sprinkleurs dans les quatre scénarios étudiés.	152
4.3	Temps d'activation et numéros des différents sprinkleurs activés dans les quatre scénarios.	170

Introduction

Le désenfumage permet d'évacuer la chaleur et les fumées en début d'incendie. Son principal objectif est donc de rendre possible l'évacuation des personnes. Ses deux autres objectifs sont d'éviter ou retarder l'embrassement généralisé et de faciliter l'action des services de secours. Le rôle des systèmes d'extinction automatique à eau est de contrôler la propagation d'un foyer par aspersion, voire de parvenir à l'extinction de ce foyer dans certains cas. Si chacun des systèmes pris indépendamment est relativement bien maîtrisé, la coexistence de ces deux systèmes dans un compartiment pose des problèmes d'interactions qui à ce jour n'ont toujours pas pu être rigoureusement évalués, comme en atteste l'absence de consensus entre les différents acteurs tels que les concepteurs, les autorités, les organismes de contrôle et les centres techniques.

En finançant cette thèse, le GIF (groupement des fabricants installateurs de matériels coupe-feu et d'évacuation des fumées) a demandé au CNPP d'apporter des éléments concrets permettant de confirmer ou d'infirmer certains des arguments récurrents rencontrés lorsque le sujet de l'interaction entre ces deux systèmes est abordé. Un partenariat a été développé entre le CNPP et le LEMTA pour réaliser cette étude à travers une double approche expérimentale et numérique. Des campagnes d'essais inédites totalisant plus d'une centaine d'expériences à grande échelle ont été réalisées afin de recueillir des données expérimentales servant ensuite à construire des cas de validation pour des simulations numériques.

Ce mémoire est scindé en quatre parties. Le premier chapitre sert d'introduction et décrit le contexte de l'étude. Tout d'abord, une première partie présente le principe de fonctionnement des deux systèmes de sécurité, ainsi que leurs rôles respectifs en cas d'incendie. La partie suivante aborde les éventuels effets d'interactions pouvant se produire lorsque les deux dispositifs sont utilisés conjointement dans une installation. Cette description se fait à travers l'analyse d'un article de référence (*Interaction of Sprinklers with Smoke and Heat Vents*, C. Beyler et L. Cooper, 2001 [1]), servant de base à cette étude. Ensuite, un point est fait sur les pratiques réglementaires en vigueur actuellement en France concernant la mise en place des deux dispositifs dans une installation de sécurité. Enfin, le chapitre débouche sur une description de la démarche choisie pour réaliser cette étude.

Le chapitre 2 présente la première campagne expérimentale et numérique réalisée dans le cadre de cette étude. On y retrouve dans un premier temps une description des moyens expérimentaux disponibles ainsi qu'une présentation des 71 essais réalisés dans un bâtiment de 110 m² sur le site de Vernon du groupe CNPP. On procède ensuite à l'analyse des principaux résultats obtenus en se focalisant en premier lieu sur les essais expérimentaux puis sur les simulations numériques d'un certain nombre d'essais sélectionnés. Les résultats numériques sont également

confrontés aux données expérimentales afin d'évaluer la capacité du code de calculs FDS (Fire Dynamics Simulator) développé par le National Institute of Standards and Technology (NIST, USA) à reproduire les effets observés lors des essais. Enfin, des bilans d'énergie et de masse ont pu être réalisés à partir des données fournies par FSD afin d'estimer l'influence réciproque que peuvent avoir les deux dispositifs de sécurité l'un sur l'autre.

Le chapitre 3 présente la seconde campagne expérimentale réalisée dans le cadre de cette étude. Il est structuré selon le même plan que le chapitre précédent. Il commence donc avec une description des moyens expérimentaux et une présentation des 27 essais réalisés dans un hall de 900 m² situé également sur le site de Vernon du groupe CNPP. L'analyse des résultats expérimentaux est scindée en deux sections en fonction du type de combustible utilisé. La première concerne les essais utilisant un bac de fioul. Dans la seconde, le foyer est constitué de palettes en bois. De même que pour le chapitre 2, ce chapitre s'achève sur une présentation des simulations numériques réalisées à partir des essais.

Partant des éléments de validation évalués aux chapitres 2 et 3, le chapitre 4, purement numérique, propose ensuite des simulations numériques de scénarios incendie réalisés dans deux bâtiments existants de très grandes dimensions. Le premier est un entrepôt de stockage de 2550 m². Le second est un centre commercial dont la surface au sol est de 4300 m². Le but de ces simulations est d'estimer l'influence réciproque des deux systèmes dans une configuration réelle à travers l'analyse de grandeurs clés déterminées dans les deux chapitres précédents.

La conclusion en fin de mémoire revient sur les questions posées sur l'interaction des deux systèmes. Elle présente un ensemble de conclusions issues des travaux de la thèse et propose un ensemble de perspectives pour la suite à donner à cette étude.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique concernant l'interaction entre sprinkleurs et désenfumage naturel

L'incendie est le résultat d'une combustion non maîtrisée, se propageant et dont l'ampleur et les conséquences peuvent être très importantes. Dans les cas les plus dramatiques, des décès sont malheureusement à déplorer. En juin 2017, l'incendie spectaculaire de la tour Grenfell à Londres a provoqué la mort de 79 personnes et a nécessité l'hospitalisation de 74 autres résidents. Les premières enquêtes réalisées par les autorités britanniques mettent en cause le dysfonctionnement d'un réfrigérateur situé au quatrième étage de la tour. En l'espace de quelques dizaines de minutes, et malgré l'intervention rapide des pompiers londoniens, le foyer s'est développé et est rapidement devenu hors de contrôle en se propageant au reste du bâtiment, pour finalement aboutir à ce dramatique bilan.

Lors de différentes fouilles archéologiques sur des vestiges datant du néolithique, des traces d'incendie ont été découvertes. De cette époque lointaine à nos jours, l'Histoire est émaillée d'incendies de grande ampleur. La destruction par les flammes de la bibliothèque d'Alexandrie, l'incendie du Reichstag, le ravage de Rome ou le drame de Grenfell ont en commun d'avoir acquis leur "notoriété" par la destruction d'un symbole ou par le grand nombre de victimes occasionnées. Les conséquences d'un incendie ne se limitent cependant pas à un simple bilan humain. Les conséquences économiques, directes ou indirectes, d'un incendie peuvent également être catastrophiques. Lorsqu'un bâtiment de production ou de stockage est ravagé par les flammes, il n'est pas rare que cela aboutisse à des périodes de chômage technique voire à un dépôt de bilan de l'entreprise concernée. Dans la majorité des incendies, le foyer peut être maîtrisé avant qu'il n'ait pu se propager et prendre de l'importance. Une étude menée par le CNPP pour la Fédération Française de l'Assurance (FFA, ex FFSA) a montré que dans près de 95 % des cas, un incendie est contrôlé par moins de 5 têtes de sprinkleurs [2]. Les dégâts directement occasionnés par les flammes ne sont cependant pas nécessairement les plus coûteux. Les suies et les composants toxiques libérés par le foyer sont corrosifs. Leur transport et leur dépôt à l'intérieur du volume du bâtiment où s'est déclaré l'incendie peuvent engendrer d'importants problèmes de corrosion et nécessitent des travaux de nettoyage dont le coût peut dépasser celui directement imputable

au feu.

1.1 La lutte contre l'incendie

Comme présenté précédemment, la croissance d'un feu non contrôlé est de nature très rapide (fréquemment représentée par des modèles quadratiques). Quelques minutes suffisent pour passer d'un simple feu de corbeille à un incendie de grande ampleur. En fonction de la phase dans laquelle se trouve le foyer au moment de sa détection, les moyens nécessaires à son contrôle ne sont pas les mêmes.

Si le départ de feu est détecté à ses premiers instants, un simple verre d'eau ou le dessous d'une semelle peuvent suffire à l'éteindre.

Si le foyer est aperçu légèrement plus tard, l'utilisation d'extincteurs à main risque d'être nécessaire pour éteindre le feu. Cette action, bien que pouvant paraître anodine, est déjà bien plus complexe et risquée que l'étape précédente. Pour commencer, cela requiert la présence d'un extincteur à proximité du foyer ainsi que la connaissance de cette localisation par les témoins du départ de feu. Ensuite, il est nécessaire que ces témoins fassent preuve de sang-froid et/ou aient un minimum de formation sur la manipulation des extincteurs. Il est fréquent que les pompiers se rendant sur un sinistre incendie constatent la présence d'un ou plusieurs extincteurs au sol, toujours pleins, dans la zone proche du départ de feu. Les témoins ont eu le réflexe de s'en saisir mais ont été incapables de s'en servir.

Dans le cas où le foyer s'est encore un peu plus développé, la plupart des Établissements Recevant du Public (ERP) et la majorité des installations industrielles sont équipés de RIA (Robinetts d'Incendie Armés) afin de permettre l'attaque du feu, pour l'éteindre ou le contenir, avant l'arrivée des services de secours. Il s'agit de tuyaux semi rigides alimentés en eau et munis de robinets diffuseurs. De même que les extincteurs, ces dispositifs sont supposés pouvoir être utilisés par n'importe quelle personne.

Si l'utilisation des moyens précédents n'a pas permis d'éteindre le feu, seuls les pompiers intervenant sur le sinistre ou les équipiers de seconde intervention (présents dans certains sites industriels) auront les moyens et la formation nécessaires pour espérer stopper l'incendie.

1.2 Les installations fixes

Ces méthodes de lutte nécessitent toutes une intervention humaine directe. Le temps écoulé entre les premiers instants du sinistre et le moment où il est détecté (que ce soit par un témoin ou par un dispositif de détection autonome) conditionne l'efficacité de ces moyens de lutte. Très rapidement les moyens disponibles sur place seront insuffisants pour contenir ou éteindre le foyer et seule l'intervention des services de secours permettra d'en venir à bout. En moyenne, les secours mettent entre 10 et 20 min pour se rendre sur les lieux d'un sinistre [3]. Ce temps peut être nettement plus long dans des zones isolées.

Pour minimiser le temps entre la détection d'un feu et l'action entreprise pour le maîtriser, des moyens de lutte fixes ont été développés.

Actuellement, il existe différents types d'installations fixes de lutte contre l'incendie, en fonction de la nature du risque, du type d'établissement ou de la configuration des lieux. Ces installations comprennent trois catégories principales.

Les installations d'extinction automatique à gaz sont généralement employées dans des locaux électriques ou informatiques clos (data center) où l'utilisation d'eau causerait plus de dégâts que l'incendie en lui-même. L'extinction est réalisée soit par étouffement (le comburant est remplacé par un gaz inerte) soit par effet d'inhibition (la réaction de combustion est bloquée par un gaz inhibiteur).

Des installations d'extinction automatique à mousse sont utilisées dans des entrepôts de stockage de grand volume ou de stockage de liquides inflammables. Lorsqu'un incendie est détecté, un mélange d'eau et d'émulseur est injecté dans un générateur de mousse. La mousse formée remplit ensuite le volume de stockage et permet d'isoler la surface combustible de l'oxygène présent dans l'air ainsi que de stopper l'évaporation de combustible.

Enfin, la troisième catégorie d'installation fixe de lutte contre l'incendie regroupe les dispositifs d'aspersion. Dans ces installations, lorsqu'un incendie est détecté, de l'eau est pulvérisée sous forme de spray sur la zone sinistrée. Il existe deux classes de dispositifs d'aspersion : les systèmes brouillard d'eau et les installations de type sprinkleur. La distinction entre ces deux classes réside dans les caractéristiques de la pulvérisation, et plus particulièrement dans la taille moyenne des gouttes constituant le spray.

Dans le cas du brouillard d'eau, l'eau est injectée à une pression allant d'une dizaine de bars à plus de cent bars à travers une buse permettant une atomisation en très fines gouttelettes. Le référentiel CEN/TS 14972 définit comme brouillard d'eau toute pulvérisation ayant un diamètre $D_{v,0.9}$ (diamètre des gouttes constituant 90 % du volume cumulé) inférieur à 1 mm. Plus ce diamètre sera faible, plus la surface totale d'échange entre la phase gazeuse et l'eau pulvérisée sera importante, facilitant ainsi son évaporation. Les mécanismes d'extinction associés au brouillard d'eau sont donc principalement le refroidissement de la flamme par absorption de chaleur et la privation d'oxygène [4].

En contre-partie, plus les gouttes seront petites, plus leur quantité de mouvement et capacité de pénétration des flammes seront faibles. Pour des foyers suffisamment puissants, les forces de flottabilité du panache sont suffisamment importantes pour entraîner les gouttes et les empêcher d'atteindre et de refroidir la surface combustible.

Dans un système sprinkleur, les gouttes possèdent des diamètres caractéristiques nettement supérieurs. Dans son étude sur les caractéristiques des sprays de sprinkleur, Sheppard [5] a montré que la valeur du diamètre de Sauter moyen D_{32} (défini d'après l'équation 1.1, où D_i correspond au diamètre de la i ème goutte) s'étale sur un intervalle allant de 300 μm à près de 6000 μm (contre généralement moins de 200 μm dans le cas du brouillard d'eau). À la sortie du sprinkleur, les gouttes de grandes dimensions vont avoir une trajectoire quasi balistique et seront en mesure d'atteindre la surface de combustible plus facilement que celles de faible diamètre. Cette fois-ci, le principal mécanisme d'extinction est donc le refroidissement du combustible.

Toutefois, un spray de sprinkleur est polydisperse et est donc constitué également d'une quantité non négligeable de gouttes de petites tailles. Toujours dans cette étude, Sheppard a pu conclure que si la majorité du volume d'eau est contenu dans des gouttes de grand diamètre, la majorité des gouttes formant le spray a un diamètre moyen inférieur à 250 μm . Ces gouttes de plus petites tailles sont donc susceptibles de s'évaporer rapidement, contribuant ainsi à refroidir la phase gazeuse.

$$D_{32} = \frac{\sum_i D_i^3}{\sum_i D_i^2} \quad (1.1)$$

Dans le cadre de notre étude, seules les installations de type sprinkleur sont étudiées.

1.3 Les sprinkleurs

1.3.1 Historique

En 1806 à Londres, John Carey dépose le brevet du premier système sprinkleur [6]. Il s'agissait alors d'un réseau de tuyaux raccordés à une cuve d'eau surélevée. Un système de cordes et de poulies maintenait la vanne de la cuve fermée. Si une corde prenait feu et brûlait, la vanne s'ouvrait automatiquement, permettant à l'eau de s'écouler dans les tuyaux. Quelques années plus tard, en 1809, le système a été amélioré par William Congreve en ajoutant un morceau de bismuth ayant le rôle de fusible thermique. En 1812, Congreve améliore encore son dispositif et celui-ci est installé au *Royal Theater* de Drury Lane à Londres. Dans cette version, une cuve de 95 m³ d'eau sous pression (à 6 bars) est raccordée à un réseau de tuyaux percés fixés aux plafonds des différentes pièces du théâtre. Chaque branche du réseau est fermée par une vanne dont l'ouverture manuelle permet à l'eau de s'écouler sur la zone désirée. Il faudra attendre 1852 et un brevet déposé par William MacBay pour voir apparaître le premier réseau de protection sprinkleur automatique ressemblant à nos réseaux actuels. Dans cette configuration, une installation sprinkleur est constituée d'un réseau de canalisations (généralement installées au plafond) dont les branches débouchent sur des buses scellées par du latex et sont reliées à une réserve d'eau ou au réseau hydraulique de la ville.

Durant les décennies suivantes, beaucoup d'améliorations ont été apportées aux buses installées sur les canalisations. Divers modèles de fusibles thermiques ont été développés afin d'améliorer le déclenchement de l'aspersion. L'activation inopinée ou la non activation des buses étaient alors des problèmes récurrents. En 1922, la société Grinnell présente un nouveau modèle de fusible constitué d'une ampoule en verre remplie d'un liquide (souvent un alcool) se dilatant sous l'effet de la chaleur. Cette ampoule maintient en place un obturateur scellant la buse de sprinkleur, comme représenté sur la figure 1.1. Lorsque la température dépasse un seuil critique, les forces exercées par le liquide sur l'ampoule sont suffisantes pour provoquer sa rupture. Une fois l'ampoule brisée, l'obturateur est éjecté et l'eau sous pression contenue dans le réseau est libérée par l'orifice du sprinkleur sous forme de jet. Ce jet vient alors impacter le diffuseur du

sprinkleur et se fragmente pour former un spray selon le processus d'atomisation présenté sur la figure 1.2.

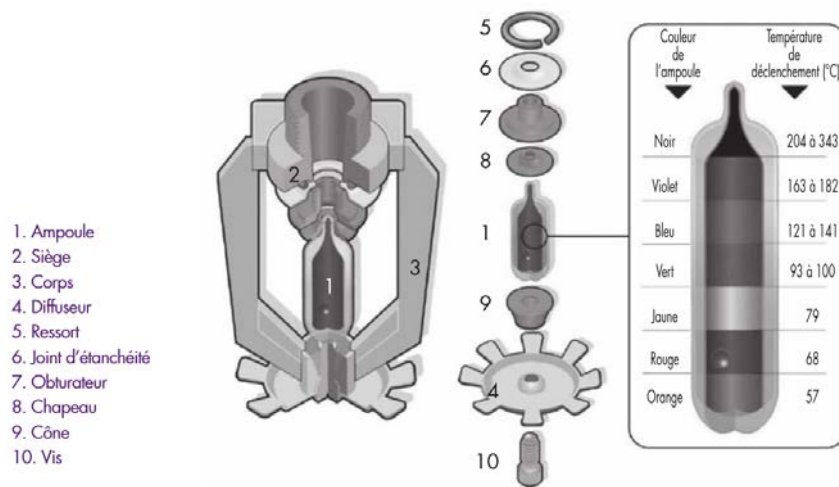


FIGURE 1.1 – Vue schématique éclatée d'un sprinkleur et code couleur des températures d'activation de l'élément sensible [7].

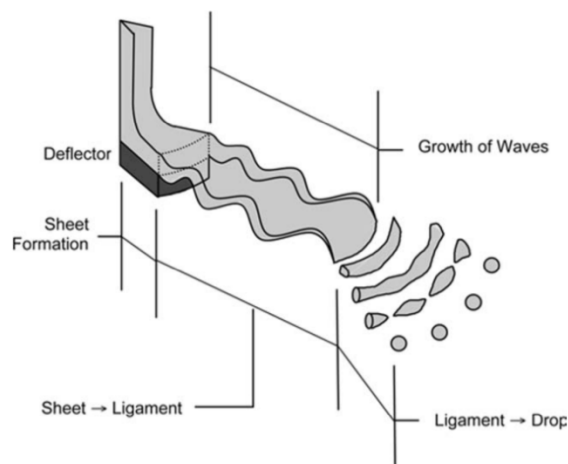


FIGURE 1.2 – Processus d'atomisation d'un spray de sprinkleur [8].

1.3.2 Temps de réponse d'un sprinkleur

Le temps que va mettre un sprinkleur à se déclencher en présence d'une source de chaleur est lié aux propriétés de l'ampoule et du liquide qu'elle contient. Lors de leur fabrication, les ampoules sont remplies de liquide puis chauffées. Ensuite, deux techniques différentes peuvent être employées [9]. Dans la première, on laisse refroidir l'ensemble afin de laisser rentrer une petite quantité d'air avant de sceller l'ampoule. En modifiant la fraction d'air piégée dans l'ampoule, il est possible de déterminer la température que doit atteindre le liquide pour que la pression qu'il va exercer sur le verre soit suffisante pour le briser. La seconde méthode consiste à sceller l'ampoule lorsque la température du liquide atteint une valeur proche de la température d'activation souhaitée. Lorsque sa température va diminuer, le volume qu'occupe le liquide

va diminuer également, laissant place à une bulle de vapeur. De nouveau exposée à une forte chaleur, la bulle de vapeur se résorbera avec l'augmentation de la température puis finira par totalement disparaître lorsque le liquide occupera tout le volume de l'ampoule.

Le choix de la température d'activation dépend du risque auquel le sprinkleur va être exposé. Dans des zones d'activité où la température ambiante peut être très élevée, des températures d'activation élevées (jusqu'à 343 °C) seront privilégiées afin d'éviter tout déclenchement inopiné des sprinkleurs. En France, il est fréquent de trouver des sprinkleurs se déclenchant à 68 °C dans les ERP. Afin de différencier ces sprinkleurs, les liquides contenus dans les ampoules sont colorés suivant les recommandations 6.2.5.1 du guide NFPA 13 [10]. Ce code couleur est visible sur la figure 1.1.

Il est important de noter que la température d'activation du sprinkleur (ou plutôt de son élément sensible) est différente de la température du environnement. Cette confusion est souvent source d'erreur dans l'interprétation de résultats. Il est tout à fait possible qu'un fusible calibré à 68 °C se trouve dans une atmosphère à plus de 100 °C, sans que celui-ci ne se déclenche. En 1988, Heskestad a proposé un modèle permettant de calculer l'évolution de la température T_l d'un élément sensible plongé dans un écoulement [11]. Cette évolution est décrite par l'équation (1.2) faisant intervenir la vitesse \mathbf{u} et la température T_g de l'écoulement autour de l'ampoule.

$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{\sqrt{|\mathbf{u}|}}{RTI} (T_g - T_l) - \frac{C}{RTI} (T_l - T_m) - \frac{C_2}{RTI} \beta |\mathbf{u}| \quad (1.2)$$

Le second terme du membre de droite correspond aux échanges thermiques entre l'élément sensible et sa monture à la température T_m . Le coefficient C est une constante propre à chaque sprinkleur et dont la valeur est déterminée expérimentalement.

Enfin, le troisième terme traduit le refroidissement de l'élément sensible par les gouttes d'eau issues d'éventuels autres sprinkleurs : β étant la fraction volumique d'eau dans la phase gazeuse et C_2 une constante valant $6 \times 10^6 \text{ K}/(\text{m/s})^{1/2}$ [12].

Dans chacun des termes, le paramètre RTI (*Response Time Index*) correspond au temps de réponse de l'ampoule sprinkleur, défini par l'équation (1.3). Ce paramètre s'exprime en $(\text{m} \cdot \text{s})^{1/2}$ et n'est donc pas homogène à un temps. Il sert à caractériser à quelle "vitesse" l'élément sensible atteindra sa température de déclenchement. Les termes m , C et A correspondent respectivement à la masse de l'élément sensible, sa capacité calorifique et sa surface exposée à l'écoulement. Le terme h désigne le coefficient d'échange par convection entre l'élément et le milieu environnant. D'après le guide NFPA13, tout sprinkleur ayant une valeur de RTI inférieure à $50 (\text{m} \cdot \text{s})^{1/2}$ est considéré comme étant à réponse rapide tandis qu'une valeur supérieure à $80 (\text{m} \cdot \text{s})^{1/2}$ correspond à une réponse standard. Il est possible de modifier la valeur de ce paramètre en faisant varier la taille de l'élément sensible. Plus son épaisseur sera fine, moins il faudra de temps pour que le sprinkleur se déclenche, pour une même température d'activation. Le choix du RTI dépend du type de risque pour lequel l'installation est dimensionnée. Différentes combinaisons de RTI et de température d'activation sont possibles (comme représenté sur la figure 1.3).

$$RTI = \tau u^{1/2} = \frac{mC}{hA} \cdot u^{1/2} \quad (1.3)$$

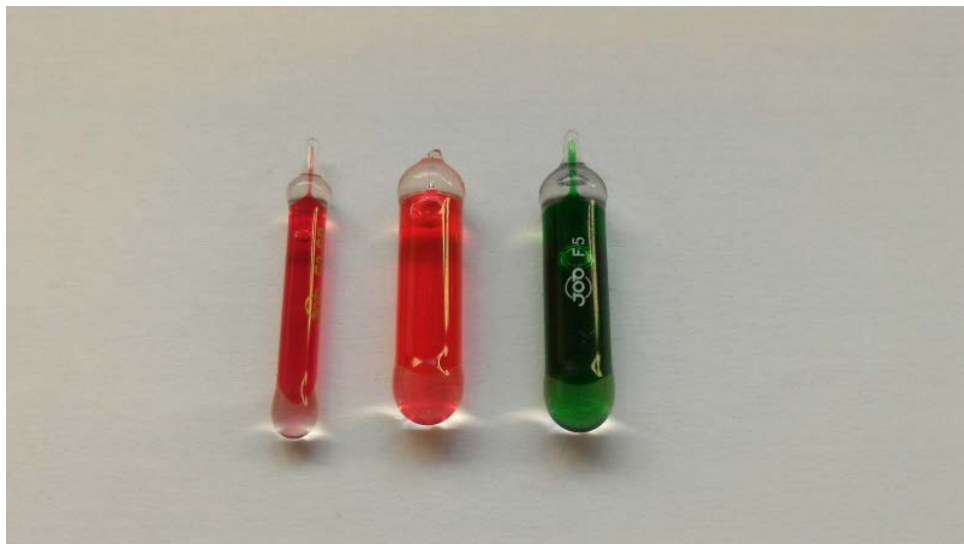


FIGURE 1.3 – Éléments sensibles extraits de 3 sprinkleurs différents. De gauche à droite $RTI = 55 (\text{m} \cdot \text{s})^{1/2}$, $T_{act} = 68^\circ\text{C}$; $RTI = 108 (\text{m} \cdot \text{s})^{1/2}$, $T_{act} = 68^\circ\text{C}$; $RTI = 108 (\text{m} \cdot \text{s})^{1/2}$, $T_{act} = 93^\circ\text{C}$ (à droite)

1.3.3 Propriétés du spray

En plus de la température d'activation et de l'indice RTI, un sprinkleur est caractérisé par un coefficient de débit k . Ce paramètre permet de définir la pression p qu'il est nécessaire d'appliquer au niveau d'une tête de sprinkleur afin d'obtenir le débit d'eau Q souhaité, d'après la relation 1.4. Ce coefficient s'exprime en $\text{L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1/2}$. Plus sa valeur sera élevée, plus le débit possible par tête de sprinkleur sera important. Ce coefficient peut prendre des valeurs allant de $50 \text{L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1/2}$ (pour de faibles risques) jusqu'à plus de $242 \text{L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1/2}$ (risques très élevés nécessitant une grande quantité d'eau).

$$Q = k\sqrt{p} \quad (1.4)$$

1.3.4 Les différents types de sprinkleurs

En fonction du type de risque pour lequel est conçue l'installation d'extinction automatique, différents types de sprinkleurs sont employés. Ces différents sprinkleurs sont caractérisés par autant de jeux de paramètres T_{act} , RTI et coefficient k .

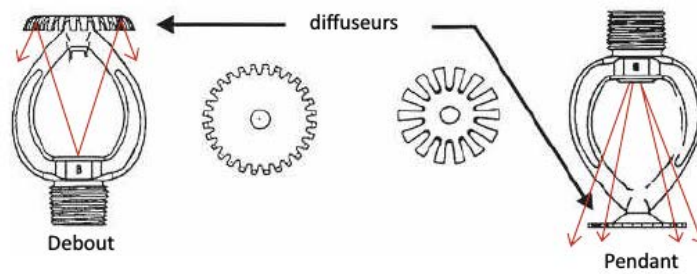


FIGURE 1.4 – Schématisation des différences entre sprinkleurs pendants et sprinkleurs debouts.

Les sprinkleurs conventionnels Ces types de sprinkleurs sont de moins en moins utilisés. Leur particularité est qu'ils projettent de l'eau à la fois vers le haut et vers le bas. L'objectif était d'avoir une tête délivrant de l'eau sur une surface de combustible tout en protégeant également la toiture en l'aspergeant avec 30 % à 60 % du volume total d'eau délivré par le sprinkleur.

Les sprinkleurs sprays Les sprinkleurs sprays sont très ressemblant aux sprinkleurs conventionnels à la différence que plus de 90 % de l'eau est projetée vers le bas afin d'atteindre la surface de combustible. Ce type de sprinkleur est maintenant préféré car il présente une efficacité de contrôle supérieure à celle des sprinkleurs conventionnels. Dans les installations classiques, ces sprinkleurs sont orientés vers le bas. L'eau est donc directement projetée sur le foyer. Dans certains cas, notamment lorsqu'il existe des risques de gel, les canalisations sont initialement remplies d'air sous pression. Lorsque le fusible du sprinkleur se rompt, l'air est chassé et l'eau peut s'écouler dans les canalisations. Dans ce type d'installations, les têtes de sprinkleurs sont positionnées au-dessus des canalisations et sont orientées vers le haut. La forme du diffuseur de ces sprinkleurs est conçue pour que l'eau l'impactant soit redirigée vers le bas. Les différences entre ces types de sprinkleurs sont présentées schématiquement sur la figure 1.4.

Habituellement, les sprinkleurs sprays ont des coefficients k compris entre $57 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1/2}$ et $115 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1/2}$. Dans certaines situations, des sprinkleurs avec un orifice plus large peuvent être utilisés. Cette catégorie de tête est appelée ELO pour Extra Large Orifice et possède un coefficient k allant jusqu'à $160 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1/2}$. La température de déclenchement de ces sprinkleurs peut aller de 57°C à 343°C . Les temps de réponses sont divisés en trois catégories :

- Standard : $80 < \text{RTI} < 200$;
- Spécial : $50 < \text{RTI} < 80$;
- Rapide : $\text{RTI} < 50$.

Les sprinkleurs ESFR Les sprinkleurs ESFR (Early Suppression Fast Response) sont des sprinkleurs possédant un temps de réponse rapide et un coefficient k élevé. Ils sont conçus pour protéger des installations présentant un risque de propagation de feu rapide. Leur objectif est de se déclencher très rapidement et de délivrer beaucoup d'eau pour limiter le développement du foyer. Leur température d'activation est comprise entre 68°C et 93°C . Leur coefficient de débit

doit être au minimum supérieur à $200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1/2}$. Pour s'assurer un temps de réponse rapide, leur RTI est nécessairement inférieur à $50 (\text{m}\cdot\text{s})^{1/2}$.

Les sprinkleurs CMSA Les sprinkleurs CMSA (Control Mode Specific Application) sont conçus pour délivrer des gouttes de grand diamètre (D_{32} de l'ordre de 2 mm) afin de pouvoir pénétrer plus facilement le panache thermique de foyers puissants. La température de déclenchement de ces sprinkleurs est de 68°C , 93°C ou 141°C . Trois coefficients k sont possibles : $160 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1/2}$, $240 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1/2}$ ou $280 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1/2}$.

Afin de ne pas multiplier le nombre de variables dans notre étude, nous avons choisi de n'utiliser que des sprinkleurs sprays de réponse standard ($RTI = 108 (\text{m}\cdot\text{s})^{1/2}$) et possédant une température d'activation de 68°C . Toutefois, certaines simulations numériques ont été réalisées en ajoutant des capteurs simulant le temps de réponse d'un sprinkleur à réponse rapide.

1.4 Le désenfumage

Lors d'un incendie, les produits de combustion sont entraînés vers le haut par le panache du foyer sous l'action des forces de flottabilité. Après avoir impacté le plafond, ils vont se propager latéralement et remplir le volume du local dans lequel le sinistre se développe. Rapidement, deux zones distinctes sont observables. En partie haute du local, les gaz de combustion et les fumées chaudes s'accumulent, leur masse volumique étant inférieure à celle de l'air environnant plus frais. La présence de suies dans les fumées rend cette couche opaque. Plus proche du sol, une couche transparente est constituée d'air frais non vicié. L'interface entre ces deux zones est appelée hauteur libre de fumées (ou hauteur de fumées). Un exemple de milieu stratifié est présenté sur la figure 1.5. On observe clairement l'existence de deux zones distinctes (une couche opaque en partie haute et une couche transparente près du sol).

Cette stratification optique étant contrôlée par des phénomènes thermiques, elle s'accompagne également d'une stratification des températures avec la hauteur. Les températures les plus chaudes sont rencontrées au niveau du plafond tandis qu'à proximité du sol, les niveaux de température restent proches des conditions ambiantes initiales (tout du moins pendant les premières minutes de l'incendie).

En l'absence de feu, la température est relativement homogène avec la hauteur (il peut cependant y avoir une différence de plusieurs degrés celsius entre le sol et le plafond dans des locaux de grande hauteur). Dans les premiers instants après le début de l'incendie, les fumées chaudes se propagent au niveau du plafond, augmentant ainsi la température à cette hauteur. Plus bas, la température reste identique à la température initiale. Lorsque aucune action n'est entreprise sur le foyer et en l'absence d'ouverture, les fumées s'accumulent en partie haute et la couche chaude s'épaissit avec l'apport continu de produits de combustion par le foyer, faisant diminuer la hauteur libre.

Par leur caractère opaque, la présence de fumées réduit la visibilité à l'intérieur d'un local et pénalise fortement les conditions d'évacuation de personnes piégées dans cet environnement.



FIGURE 1.5 – Observation d'un milieu stratifié.

En forte concentration, la perte de visibilité peut être totale, rendant alors impossible toute orientation dans le milieu. Cette perte de visibilité est également pénalisante pour les services de secours intervenant sur le sinistre. En cas d'inhalation, les fumées peuvent être responsables de brûlures internes et les gaz de combustion toxiques libérés par le foyer peuvent rapidement avoir des effets incapacitants voire mortels. Dans un incendie, la première cause de mortalité est due à l'inhalation de ces produits de combustion [13].

Le désenfumage est l'action d'évacuer d'un bâtiment les gaz et fumées chauds ainsi que la chaleur générée par le foyer et s'accumulant avec le temps. Bien qu'il n'ait pas d'action directe sur le foyer, et n'est donc pas un dispositif d'extinction, le désenfumage peut permettre de limiter la propagation du sinistre à des zones non directement impactées par le foyer originel. En effet, lors d'un incendie de grande ampleur, les fumées chaudes vont rapidement emplir le volume où se trouve le départ de feu, puis, si aucune action n'est entreprise, se propager naturellement à des zones adjacentes jusque là épargnées. La température de ces produits de combustion pouvant atteindre plusieurs centaines de degrés Celsius, de nouveaux foyers peuvent ainsi se déclarer au contact de matières combustibles.

Le désenfumage contribue à limiter ces risques. En évacuant les gaz et fumées chauds, les niveaux de température sont réduits, limitant ainsi les contraintes thermiques auxquelles sont exposées les structures et les personnes. Cette extraction des fumées permet également de maintenir une couche d'air frais en partie basse, favorisant l'évacuation des personnes présentes et facilitant la progression des services de secours. Enfin, elle permet de cantonner les fumées à des zones réduites, minimisant l'impact des fumées potentiellement corrosives sur les installations.

Le désenfumage peut être réalisé naturellement ou mécaniquement. Dans le second cas, les fumées sont extraites par un système de ventilation mécanique constitué de bouches d'extraction positionnées en partie haute et connectées à des ventilateurs. L'air extrait est remplacé par de l'air frais provenant d'amenées naturelles (portes, fenêtres, ouvrants de façade...) ou mécaniques (ventilateurs). L'utilisation de cette méthode permet également de créer des zones d'attente sécurisées en les mettant artificiellement en surpression afin d'empêcher les fumées d'y pénétrer.

Dans une installation de désenfumage naturel, l'extraction des fumées est réalisée par tirage thermique. Si la pression à l'intérieur d'un compartiment est supérieure à la pression extérieure, un écoulement allant de l'intérieur vers l'extérieur va se créer naturellement à travers une ouverture communiquant entre les deux milieux. Cette ouverture peut être verticale (ouvrant de façade, fenêtre ou porte) ou horizontale (exutoire). De même que pour le désenfumage mécanique, le volume d'air extrait doit être remplacé par de l'air frais provenant d'amenées d'air mécaniques ou naturelles. À la différence du désenfumage mécanique, le désenfumage naturel ne peut pas être piloté. Le débit d'air extrait dépend directement de la différence de température (et de pression) entre l'intérieur et l'extérieur du local, au niveau de l'ouverture.

Dans le cas de notre étude, seul le désenfumage naturel à travers des ouvrants horizontaux est étudié. Par la suite, ces exutoires seront désignés sous le terme DENFC (Dispositifs d'Evacuation Naturelle de Fumées et de Chaleur).

1.5 La cohabitation d'un point de vue physique : Etat de l'art jusqu'en 2001

Comme évoqué précédemment, les systèmes d'aspersion de type sprinkleur et les DENFC ont chacun un rôle important à jouer dans la sécurité incendie. Bien qu'ayant des moyens d'actions différents, ils contribuent tous deux à améliorer la sécurité des personnes et des biens en cas d'incendie. Considérés séparément, ces dispositifs sont relativement bien maîtrisés. Cependant, leur cohabitation au sein d'une même installation reste à ce jour un problème complexe et les interactions réciproques d'un système sur l'autre sont encore à l'étude.

Dans un article publié en 2001, Craig Beyler et Leonard Cooper [1] répertorient toutes les études ayant été menées sur les interactions entre désenfumage naturel et systèmes sprinkleurs depuis les années cinquante. Dans cet article, les auteurs analysent 13 études expérimentales à grande échelle sur le sujet, réparties entre 1954 et 1998, ainsi que 34 articles de prise de position basés sur l'analyse de ces essais. L'ensemble des études expérimentales analysées ainsi que leurs principales caractéristiques sont reportées dans le tableau 1.1.

Le premier constat fait par les auteurs est qu'il existe une grande divergence dans les résultats obtenus et plus encore dans les conclusions qui en ont été tirées. Par exemple, sur certains essais, des études concluent sur le caractère positif de l'utilisation conjointe des deux systèmes tandis que d'autres, au contraire, n'y voient que des effets négatifs. Ces oppositions révèlent bien la nature très complexe du problème.

Pour structurer leur étude, les auteurs ont identifié à partir de la littérature de l'époque différents arguments régulièrement avancés par chacun des "camps" se positionnant sur le sujet. Il est toutefois important de noter que la majorité des études analysées ont été réalisées aux États-Unis où l'utilisation du sprinklage est très développée. Le débat ne porte donc pas sur l'opposition *sprinkleurs* Vs. *désenfumage* mais plutôt sur *sprinkleurs seuls* Vs. *sprinkleurs et désenfumage*. Bien que ce travail date du début des années 2000, les positions sur le sujet ont très peu évolué et certains de ces arguments sont encore avancés aujourd'hui.

Nom de l'étude	Année	Désenfumage	Cantonnement	Sprinkleurs	Dimensions	Foyer
ARF ¹ - Reduced-Scale Vent Tests [14]	1954	Exutoires	Oui	Oui	Échelle 1/8	Bac (13.6 MW)
FMRC ² - Tests on Vents, Curtains and Sprinklers [15]	1956	Exutoires	Oui	Oui	700 m ² × 10 m	Spray (~10 MW)
FRS ³ - Fire vent Research [16, 17]	1960	Exutoires	Oui	Oui		
UL ⁴ - Tests on Effects of Vents on Sprinklered Fires [18]	1964	Exutoires	Oui	Oui	324 m ² × 5 m	Stockage de cartons
Colt Int. - Portsmouth Fire Tests [19]	1966	Exutoires	Oui	Simulés	198 m ² × 8 m	
FMRC - Rubber Tire Fire Test [20]	1970	Ouvrants	Non	Oui		Stockage de pneumatiques
FMRC - Report on Rack Storage Tests [21]	1971	Ouvrants	Non	Oui		Stockage en racks
FMRC - Model Study of Venting Performance in Sprinklered Fires [22]	1974	Exutoires	Oui	Simulés	929 m ² × 9 m	Stockage de cartons ; Bac (~20 MW)
FMRC - Stored Plastics Test Program [23]	1975	Ouvrants	Non	Oui		Stockage de matières plastiques
IITRI ⁵ - Full-Scale Vent/Sprinkler Research Tests [24-26]	1980	Exutoires	Oui	Oui	175 m ² × 5.2 m	Brûleur à propane (3.5 MW) ; 20 palettes en bois
Ghent Tests [27-30]	1989	Exutoires	Oui	Oui	900 m ² × 10 m	Bac (5.4 MW à 13 MW)
FMRC - Tests of Protection of Warehouse Retail Occupancies [31-33]	1994	Exutoires	Partiel	Oui (ELO)		Stockage en racks
UL - Sprinkler, Vent, Draft Curtain Fire Tests [34, 35]	1998	Exutoires	Oui	Oui (ELO)	900 m ² × 7.6 m	Spray (5 MW et 10 MW) ; Stockage en racks

TABLEAU 1.1 – Liste des études expérimentales analysées par Beyler et Cooper.

1. ARF : Armour Research Foundation
2. FMRC : Factory Mutual Research Corporation
3. FRS : Fire Research Station
4. UL : Underwriters Laboratories
5. IITRI : Illinois Institute of Technology Research Institute

1.5.1 Arguments *en faveur* d'une utilisation conjointe du sprinklage et du désenfumage

Dans un premier temps, les auteurs identifient et présentent les arguments plaçant pour une utilisation conjointe des deux systèmes. Ces arguments sont listés et commentés ci-dessous.

Amélioration de la visibilité. Le principal rôle du désenfumage est d'évacuer des fumées d'un bâtiment afin, notamment, d'améliorer la visibilité. Il est donc logique que les défenseurs de l'utilisation du désenfumage s'appuient sur cet argument.

Comme expliqué précédemment, l'absence d'ouverture dans un local a pour conséquence le remplissage total du volume où se déclare un incendie. Ce remplissage est plus ou moins rapide en fonction des dimensions du volume ainsi que de la puissance du foyer. En l'absence de perturbation ce remplissage va s'effectuer du haut vers le bas, la strate de fumées s'épaississant progressivement jusqu'à atteindre une épaisseur égale à la hauteur du local.

Lorsqu'un système d'aspersion se déclenche, une destratification des fumées peut être observée. Dans le cas des sprinkleurs, Bullen [36] explique que les effets de traînée du spray sont la cause principale de cet entraînement des fumées vers le bas. Il note toutefois que le refroidissement des gaz par le spray doit également contribuer à cette destratification. Dans des travaux plus récents, Chow *et al.*[37], Li *et al.*[38], Tang *et al.*[39-41] et Zhang *et al.*[42, 43] ont confirmé ces hypothèses, numériquement et expérimentalement, et ont ainsi pu mettre en évidence l'importance du refroidissement et des propriétés géométriques et granulométriques des sprays sur la destratification. Li *et al.*[44] définit un critère de stabilité de la couche de fumées basé sur le rapport des effets de traînée D et de ceux de flottabilité B . Il constate que l'augmentation de la pression au sprinkleur augmente les effets de destratification de manière quasi-linéaire.

En diminuant la quantité de fumées à l'intérieur du local, le désenfumage réalisé par les exutoires permettrait ainsi de limiter la destratification conséquente au déclenchement de l'aspersion. Aucune des études analysées par Beyler et Cooper ne mentionne une dégradation des conditions de visibilité lors de l'utilisation de désenfumage en supplément de l'aspersion. Bien que la notion de visibilité soit difficilement quantifiable et n'ait pas fait l'objet de mesures précises, il a fréquemment été conclu de manière qualitative que le désenfumage permettait d'améliorer les conditions de visibilité par rapport aux essais qui en étaient dépourvus. Lors des essais FMRC (1956) (cf. tableau 1.1), en l'absence de désenfumage, la perte de visibilité était totale 6 minutes après l'allumage du foyer. Dans des tests avec utilisation du désenfumage, l'ouverture des exutoires a permis d'améliorer ces conditions de visibilité, malgré le déclenchement des sprinkleurs. Cette amélioration des conditions était particulièrement significative dans les cantons adjacents à celui où était localisé le foyer. De même, dans les essais Colt (1966) et FMRC (1970) l'utilisation du désenfumage a, dans le premier cas, permis aux pompiers d'intervenir plus facilement sur le foyer et, dans le second cas, a contribué à augmenter le délai avant perte totale de visibilité, le faisant passer de 13 min à 20 min.

D'après ces conclusions, le désenfumage permettrait de retarder la baisse de visibilité consécutive à l'aspersion, favorisant ainsi l'évacuation des personnes et facilitant l'intervention des services de secours. Toujours d'après ces études, l'utilisation du désenfumage aurait permis

d'améliorer les conditions de visibilité dans les zones voisines aux cantons où étaient localisés les foyers.

Réduction du transport des produits de combustion. Les observations précédentes sur la visibilité sont également transposables au transport des produits de combustion. Lors de l'ouverture des exutoires, une partie de ces produits est extraite du bâtiment. Leur concentration ainsi que leur propagation dans les zones adjacentes sont donc nécessairement réduites. Toutefois, très peu d'essais ont été instrumentés pour analyser les concentrations en espèces toxiques dans les zones impactées par les foyers et dans les cantons voisins.

Diminution du nombre total de sprinkleurs activés. Le désenfumage permettrait de réduire le nombre total de sprinkleurs déclenchés. Cet argument est une conséquence de l'argument précédent. En évacuant des produits de combustion à température élevée et en limitant ainsi leur propagation dans le bâtiment, le désenfumage contribue à limiter l'élévation de température en partie haute de zones distantes du foyer. Si cette élévation de température était suffisamment importante, de nouvelles têtes de sprinkleurs pourraient s'activer dans des régions non impactées par le feu. Cette utilisation d'eau supplémentaire pourrait alors mettre en défaut l'installation sprinkleur et engendrerait des dégâts supplémentaires dans une zone non sinistrée par le feu.

Lors des essais FMRC de 1956, il a été constaté une légère diminution du nombre total de têtes de sprinkleurs déclenchées lors des essais avec désenfumage. Le même constat a été effectué lors des essais UL de 1964. Dans deux configurations expérimentales différentes, l'utilisation du désenfumage a contribué à réduire le nombre de sprinkleurs activés par rapport aux essais réalisés sans exutoire. Durant l'étude réalisée à Gand en 1989, une diminution du nombre total de sprinkleurs activés a été observée avec l'augmentation du nombre d'exutoires ouverts.

Lors des essais FMRC de 1974, des résultats plus mitigés ont été obtenus. Dans cette étude, deux types de foyers ont été utilisés. Lors des essais utilisant un bac de fioul, le nombre de sprinkleurs activés a été réduit lorsque le désenfumage a été utilisé en complément de l'aspersion. À l'inverse, pour les essais utilisant un stockage de carton, ce nombre a augmenté. Lors des essais IITRI (1980) il n'a pas été observé d'influence significative du désenfumage sur le nombre total de sprinkleurs activés, quel que soit le type de combustible employé.

En se basant sur les résultats de ces études, Beyler et Cooper considèrent qu'il n'y a pas suffisamment d'éléments pour conclure sur la contribution du désenfumage dans la limitation du nombre de sprinkleurs activés.

1.5.2 Arguments *contre* une utilisation conjointe du sprinklage et du désenfumage

Après avoir listé et étudié les arguments en faveur de l'utilisation conjointe des deux systèmes, les auteurs analysent les arguments opposés. Ces arguments sont listés et commentés ci-dessous.

Puissance du foyer L'un des arguments récurrents allant contre l'utilisation conjointe des deux solutions de sécurité est que l'activation du désenfumage risque d'augmenter le HRR (Heat Release Rate) du foyer, conduisant à accélérer son développement et sa propagation. Lorsque les exutoires sont ouverts, de l'air frais va être apporté au domaine par les arrivées d'air du bâtiment. Cet apport de comburant au niveau du foyer est susceptible d'alimenter le foyer et ainsi d'améliorer la combustion.

Lors des essais FMRC de 1974, il a été observé que la concentration en oxygène à hauteur d'homme lors des essais sans désenfumage était de l'ordre de 18 % contre 21 % lors des essais avec utilisation du désenfumage. Durant les essais FMRC réalisés l'année suivante et utilisant un foyer composé de stockage de matières plastiques, les concentrations en oxygène mesurées à la base du foyer étaient également de l'ordre de 18 % à 21 % en fonction des essais. Des concentrations similaires ont été mesurées lors des essais IITRI.

En 1970, des essais FMRC ont utilisé des stockages de pneumatiques comme foyer. Lors d'un de ces essais, les ouvrants du bâtiment ont été maintenus fermés et le système sprinkleur a été mis en application. Après 60 minutes, les ouvrants ont été ouverts puis refermés 57 minutes plus tard. À cet instant, la concentration en oxygène était alors de 21 % contre 19 % au moment de l'ouverture. 27 minutes après ouverture des ouvrants, le foyer s'est emballé et la température sous plafond, stable jusqu'à cet instant, a alors augmenté très rapidement.

En analysant ces résultats, il est difficile d'évaluer l'influence réelle du désenfumage sur la puissance du foyer. Bien que les essais réalisés dans le cadre de ces études soient de grande échelle (certains étaient cependant à échelle réduite), les géométries restent loin des dimensions de véritables entrepôts et il semble peu réaliste que la concentration en oxygène puisse chuter suffisamment pour avoir une influence significative sur la croissance du foyer (en l'absence de désenfumage).

Dans leur article, Beyler et Cooper citent différents travaux ([45-48]) permettant de justifier que l'augmentation de la concentration de dioxygène de 18 % à 21 % n'entraîne qu'une augmentation de 10 % à 30 % de la puissance du foyer.

Beyler et Cooper concluent donc que le désenfumage ne peut pas être responsable d'un apport de comburant suffisant pour avoir une influence significative sur la dynamique du foyer. Dans une lettre de 1992 adressée à l'éditeur de Fire Technology [49], Gunnar Hesktestad considère cependant que l'affirmation des auteurs est fautive et que l'une de leur citation indique une augmentation de 29 % à 66 % du taux de combustion pour la même élévation de concentration en oxygène.

Temps de réponse des sprinkleurs. L'argument le plus fréquemment avancé contre l'utilisation du désenfumage dans des installations protégées par sprinkleur est le risque de retard d'activation des sprinkleurs. En faisant ce pourquoi il est conçu, le désenfumage va extraire une certaine quantité de chaleur du bâtiment sinistré. Cette évacuation va contribuer à limiter l'élévation de température de la couche de fumées chaudes. Les sprinkleurs se déclenchant grâce à un fusible thermique, cette limitation de l'élévation de température pourrait induire un retard d'activation, et, dans le pire des cas, une non activation d'un ou plusieurs sprinkleurs. Le risque

conséquent à ce retard est donc que le foyer prenne suffisamment d'ampleur pour ne plus être contrôlable par les sprinkleurs et qu'il cause davantage de dégâts.

Concernant ce point, Beyler et Cooper, après analyse des études, concluent que les données expérimentales ne permettent pas d'attribuer des retards d'activation des sprinkleurs à l'utilisation du désenfumage en dehors de la configuration particulière où le foyer est positionné directement sous un exutoire.

Lors des essais de feux de stockage en rack (FMRC 1971), le désenfumage a provoqué un retard d'activation du premier sprinkleur lors de deux essais (comparés à un essai sans désenfumage). Cependant, il est précisé que la dynamique du foyer était différente lors de l'essai sans désenfumage, ce qui pourrait expliquer ces résultats. Lors des études IITRI, Gand et UL (1998), des essais ont été réalisés avec ouverture des exutoires au moment de l'allumage du foyer. À l'issue de ces tests, il n'a pas été observé de retard significatif du temps d'activation du premier sprinkleur. Lors d'une conférence en 1992, Gustafsson [50] a commenté l'analyse des résultats des essais de Gand et a montré que durant les essais avec désenfumage, un certain nombre de sprinkleurs situés à proximité du foyer ne se sont pas déclenchés ou se sont déclenchés avec un retard important. À l'opposé de Beyler et Cooper, il conclut que le désenfumage a systématiquement eu une influence négative sur le temps de réponse des sprinkleurs.

Lorsque le foyer était situé directement sous un exutoire, des essais réalisés lors de l'étude UL (1998) ont montré qu'il pouvait y avoir un retard d'activation de la première couronne de sprinkleurs. Ces essais étaient réalisés avec une ouverture automatique des exutoires, commandée par des fusibles thermiques.

Nombre de sprinkleurs activés. En considérant que le désenfumage peut être responsable d'un retard d'activation des sprinkleurs, certains avancent l'hypothèse qu'il contribuerait également à l'augmentation du nombre total de sprinkleurs déclenchés. En effet, le délai d'activation des sprinkleurs permettrait au foyer de croître et d'atteindre une taille et une puissance plus importantes qu'en l'absence de désenfumage. En conséquence, les niveaux de température pourraient être plus élevés et, au final, un plus grand nombre de sprinkleurs se déclencherait.

Cet argument est cependant contradictoire avec l'affirmation précédente, considérant que le désenfumage permettrait de réduire le nombre de sprinkleurs déclenchés en diminuant les niveaux de température dans un compartiment. Les auteurs concluent donc qu'il n'y a pas suffisamment d'éléments permettant d'infirmer ou de confirmer ces hypothèses.

Il est également parfois reproché au désenfumage d'être responsable de "saute de sprinkleurs". Ce terme désigne des situations dans lesquels des sprinkleurs éloignés du foyer se déclenchent alors que des têtes situés à proximité (voire au dessus) de la zone impactée par les flammes restent fermées.

Coût supplémentaire d'une installation de désenfumage. Le dernier argument avancé contre l'utilisation conjointe des deux dispositifs est davantage un argument financier que physique. La mise en place d'un système de désenfumage dans un bâtiment de grandes à très grandes

dimensions représente un coût financier et des contraintes techniques pouvant être considérables. Des questions se posent sur la pertinence d'un tel investissement si l'efficacité du désenfumage est fortement réduite lorsque l'aspersion se déclenche.

Ces considérations financières n'ont pas été analysées lors des différentes études et les auteurs ne concluent donc pas sur ce point particulier. Cet argument est cependant encore d'actualité de nos jours où les politiques sont à la réduction des coûts.

1.5.3 Conclusion de Beyler et Cooper

À l'issue de leur article, les auteurs concluent que l'utilisation du désenfumage n'a pas d'impact négatif sur les performances des installations sprinkleurs. Ils considèrent que le désenfumage n'est pas responsable de délais d'activation des premiers sprinkleurs et n'a pas d'influence sur le nombre total de sprinkleurs déclenchés. Ils concèdent cependant que dans la configuration particulière où le foyer se trouverait directement sous un exutoire, il y aurait un risque de retard d'activation du premier sprinkleur. Enfin, le désenfumage permettrait de réduire de manière significative la propagation des produits de combustion dans les cantons ou bâtiments adjacents, permettant ainsi de faciliter l'évacuation des personnes, l'intervention des secours et réduisant les dégâts imputables aux fumées chaudes.

Des commentaires supplémentaires doivent cependant être apportés à cette étude.

- Les études expérimentales analysées par Beyler et Cooper ont nécessité des moyens techniques et humains importants afin de réaliser des essais instrumentés à grande échelle. Les coûts engendrés par de tels essais sont élevés et leur nombre est donc souvent réduit. Ce faible nombre d'essais pose un problème de répétabilité et de reproductibilité des résultats. Dans certaines études, la multiplication des phénomènes étudiés a encore accentué ce problème de répétabilité. Les essais se réduisent ainsi à du *one-shot*, permettant difficilement de tirer des conclusions.
- Des compromis ont dû être fait lors de certaines études. Dans certains cas, des feux de bacs ou des sprays de liquide combustibles ont été utilisés. Ces types de foyers présentent l'intérêt de posséder une bonne répétabilité. En contre partie, l'aspersion n'a que très peu d'influence sur eux et certains phénomènes physiques rencontrés dans de vrais incendies ne sont pas rencontrés (interaction eau/surface et extinction). À l'inverse, des foyers tels que des stockages en rack sont plus proches de véritables configurations mais ont l'inconvénient de présenter une faible répétabilité (rapportée au petit nombre d'essais) à cause de leur complexité et de leur coût plus élevé.
- Bien que l'honnêteté scientifique des études ne soit pas remise en question, il est important de considérer les forts enjeux économiques associés à cette problématique. Étant donné les surfaces importantes des entrepôts de stockage, le coût des solutions de protection (système sprinkleur ou désenfumage) peut être conséquent. Dans l'optique de réduire ces coûts, il est compréhensible de privilégier un dispositif plus qu'un autre, d'autant plus si une utilisation conjointe produit des effets néfastes démontrés (ce qui n'est pas avéré à ce stade).
- Bien que ces études expérimentales soient considérées de grande ou très grande échelle, elles restent cependant à des échelles relativement distantes de la taille d'un grand nombre

d'entrepôts de stockage.

- L'article de Beyler et Cooper a été publié en 2001. Les premières études analysées remontent à 1956 et les dernières à 1998. Depuis, des évolutions techniques et réglementaires ont eu lieu, mettant en cause dans une certaine proportion la pertinence de certains essais. Par exemple, dans certaines études le désenfumage était réalisé uniquement par des ouvrants de façade. De nos jours (tout du moins en France), une telle solution de désenfumage est rare. De plus, le cantonnement des fumées n'était pas systématique, empêchant ou retardant la formation d'une couche de fumée, ce qui diffère des pratiques actuelles.

1.6 Travaux plus récents

Depuis les essais UL réalisés par McGrattan en 1998, à notre connaissance aucune étude expérimentale à grande échelle n'a été réalisée sur le sujet.

Dans des travaux cités précédemment portant sur l'interaction entre un spray et une strate de fumées chaudes, Li *et al.*[51] ont étudié (à échelle du laboratoire) l'effet de l'entraînement des fumées par un sprinkleur sur les vitesses d'écoulement à travers un exutoire horizontal. Dans cette étude, il a été constaté que l'augmentation de la pression du réseau sprinkleur (et donc du débit d'eau, d'après l'équation (1.4)) entraîne une diminution des vitesses mesurées dans la section de l'exutoire, allant jusqu'à être nulle dans un cas critique.

1.7 La cohabitation d'un point de vue réglementaire

1.7.1 Réglementations relatives aux systèmes sprinkleurs

En France, le code du travail impose à un employeur de *prendre les mesures nécessaires pour que tout commencement d'incendie puisse être rapidement et efficacement combattu* (Article R.4227-28) et que *l'établissement soit équipé [...] d'installations fixes d'extinctions automatiques* (Article R.4227-30). Si l'installation de sprinkleur n'est pas une obligation, il existe cependant certains cas où cela le devient.

Certaines Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) peuvent se voir imposer un tel système de protection. Cette dénomination désigne toutes les installations pouvant présenter un danger pour les personnes, pour la nature et l'environnement ou encore pour le patrimoine. Derrière cette appellation se trouvent environ 500 000 établissements en France dont l'activité peut être très variée, allant de l'élevage à l'exploitation de carrière ou encore des usines de production aux entrepôts de stockage⁶. Afin de différencier les installations en fonction de leur activité, une nomenclature utilisant 4 chiffres a été définie.

6. Chiffres au 31 décembre 2014, fournis par l'Inspection des Installations Classées : <http://www.installationsclassées.developpement-durable.gouv.fr/Chiffres-cle-de-l-Inspection.html> (visité le 26 sept. 2017)

- 1xxx : Relative aux substances (11xx - Toxiques ; 12xx - Comburantes, 13xx - Explosives, 14xx - Inflammables, 15xx - Combustibles ...);
- 2xxx : Relative aux activités (21xx - Activité agricole, 22xx - Agroalimentaire, 23xx - Textile ...);
- 3xxx : Relative aux activités polluantes (3120 - Raffinage du pétrole, 3310 - Production de ciment, 3510 - Traitement de déchets dangereux ...);
- 4xxx : Relative aux installations classées SEVESO (41xx - Toxique, 42xx - Explosives, 43xx - Gaz ...).

Seules les rubriques 1432, 1530 et 1435 font l'objet d'une obligation d'installation d'un système de protection sprinkleur. Dans les faits cependant, beaucoup d'autres rubriques sont systématiquement équipées d'installation d'extinction automatique à eau.

Dans les Établissements Recevant du Public (ERP), le paragraphe premier de l'article MS.25 du *Règlement de sécurité contre l'incendie relatif aux établissements recevant du public* stipule qu'un système sprinkleur peut être exigé dans tout ou partie d'un établissement. Dans le cas particulier des ERP de type M (centre commerciaux), si la surface totale excède 3000 m², la mise en place d'un réseau de protection sprinkleur est obligatoire, en respectant la norme NF-EN-12845 relative à la conception, l'installation et la maintenance de ces systèmes.

En dehors de ces cas particuliers, l'installation d'une protection par sprinkleur est généralement demandée par les assurances de l'exploitant d'une installation. Le choix du référentiel d'application revient à l'assureur. En France, la majorité des systèmes sprinkleurs sont dimensionnés en suivant les recommandations de la norme NF-EN-12845 ou du référentiel APSAD R1. Il est cependant également possible d'utiliser d'autres référentiels tels que le NFPA-13, FM datasheet 2.0 ou encore CEA-4001.

Tous ces textes prévoient le domaine d'application dans lequel les sprinkleurs peuvent être utilisés, le nombre et la position des têtes ou encore les débits d'eau à délivrer en fonction de la classe de risque de l'activité protégée.

1.7.2 Réglementations relatives au désenfumage

La réglementation française concernant le désenfumage est importante. Dans les bâtiments industriels, elle repose sur les textes suivants :

- Article R.4216-13 à 16;
- Article R.4216-26 à 27;
- Article R.4216-29;
- Arrêté du 5 août 1992;
- Circulaire DRT n°95-07 du 14 avril 1955.

Ces textes imposent que les locaux de plus de 300 m², les locaux aveugles ou en sous-sol de plus de 100 m², les escaliers, les cages d'ascenseur enclouées et les bâtiments dont le sol du dernier niveau est à plus de 8 m du sol doivent être désenfumés. En cas d'utilisation de

désenfumage naturel, la surface utile de l'installation de désenfumage⁷ doit être au minimum égale à 1/100ème de la superficie au sol du local désenfumé.

Dans le cas particuliers des rubriques 1510 (stockage de matières, produits ou substances combustibles), 2662 (stockage de polymères) et 2663 (stockage de pneumatiques), des dispositions particulières sont imposées par arrêtés, relatifs à ces rubriques. Elles impliquent notamment que la surface utile de l'installation de désenfumage soit au moins égale à 2% de la superficie du canton désenfumé.

La réglementation en matière de désenfumage dans les ERP est définie par le chapitre IV du *règlement de sécurité contre l'incendie relatif aux établissements recevant du public* approuvé par l'arrêté du 25 juin 1980. Le paragraphe DF1 précise l'objet du désenfumage. Il s'agit principalement d'extraire une partie des fumées et des gaz de combustion afin de maintenir praticables les cheminements destinés à l'évacuation du public. Il peut également contribuer à limiter la propagation de l'incendie et à faciliter l'intervention des secours.

La mise en œuvre du désenfumage afin d'en assurer l'exécution est décrite dans l'Instruction Technique (IT) 246. Celle-ci décrit le dimensionnement de l'installation, les règles d'implantation et rappelle les objectifs de sécurité prévus par l'article DF1. Dans certaines configurations (patios ou atrium), elle est remplacée par l'I.T. 263.

Il est possible qu'une installation de désenfumage soit dimensionnée selon un référentiel tiers (par exemple APSAD R17 ou NPFA 204) à la condition que les exigences réglementaires soient respectées.

1.7.3 Utilisation conjointe du désenfumage et de l'aspersion

Comme vu précédemment, l'utilisation de chaque système est très bien définie, que ce soit par des réglementations ou par des recommandations. Toutefois, il n'existe que très peu de règles relatives à l'utilisation conjointe des deux dispositifs de sécurité.

Dans le référentiel APSAD R1 (paragraphe 13.3.7.5), il est recommandé de ne pas installer de sprinkleur directement au droit d'un exutoire. Lorsque la configuration fait qu'il n'est pas possible de faire autrement, l'ajout de plaque ou de coupelle de retenue de chaleur est conseillé. Il s'agit d'une obstruction positionnée au dessus de l'élément sensible du sprinkleur, sensée retenir des fumées chaudes et permettant au sprinkleur de se déclencher plus rapidement qu'en son absence. Cependant, l'efficacité de tels dispositifs ne semble pas prouvée (d'après des essais réalisés au CNPP). Toujours d'après ce référentiel, les exutoires doivent systématiquement pouvoir être ouverts grâce à un dispositif manuel. Si les exutoires sont dotés de fusibles thermiques, il faut que leur température d'activation soit supérieure à celle des sprinkleurs utilisés et que leur ouverture soit individuelle. Lorsque l'ouverture est asservie à un système de détection incendie, le désenfumage par canton est recommandé. Il est toutefois mentionné que dans ce cas, le désenfumage est susceptible de compromettre l'efficacité du sprinkleur en dehors des cas particuliers

7. La surface utile correspond à la surface physique d'un ouvrant multipliée par un coefficient aérodynamique (rapport du débit effectif et du débit théorique).

d'ERP de type O⁸, U⁹, R¹⁰ dotés d'internats, L¹¹ (si plus de 3000 personnes), P¹² et S¹³ de première catégorie.

Les préconisations du référentiel américain NFPA 13 sont similaires. L'utilisation d'exutoires de toiture est autorisée à la condition que la température d'activation de leur fusible thermique soit supérieure à celle des sprinkleurs utilisés. Dans le cas particulier où l'installation sprinkleur est équipée de têtes ESFR, les fusibles thermiques des DENFC doivent posséder un indice RTI supérieur à celui des sprinkleurs. Ce choix repose sur les résultats d'essais mentionnés dans les annexes C.6. de ce référentiel. Au cours de deux essais réalisés avec désenfumage, le nombre total de sprinkleurs activés a augmenté de 87.5% à 91% par rapport à un test de référence sans désenfumage. Il est cependant intéressant de noter que ces essais ont été réalisés avec des ouvertures latérales et non des exutoires de toiture. La pertinence de ce choix ainsi que le nombre d'essais (3 au total) peuvent nous amener à nous interroger sur la validité de ces recommandations.

Le référentiel NFPA 204, régissant l'utilisation du désenfumage, est légèrement plus fourni sur ces problèmes d'interactions. Dans les paragraphes A.11.1 et A.11.2 il est rappelé que ce sujet est toujours du domaine de la recherche et que, par conception, un système de désenfumage ne doit pas impacter l'efficacité d'une installation sprinkleur, tel que défini dans la section 12.1.1 du référentiel NFPA 13. La section F.3 des annexes de ce référentiel est dédiée aux interactions entre sprinkleurs et désenfumage naturel. La première partie de cette annexe rappelle les principales études qui ont été menées sur le sujet ainsi que leurs conclusions respectives (ces études font parties de celles analysées par Beyler et Cooper). L'accent est mis sur les fortes divergences de conclusions obtenues d'une étude à l'autre. En conclusions de ces résultats, des lignes directrices de principes d'installation de systèmes de désenfumage sont établies. Ces recommandations sont spécifiquement établies pour faciliter la cohabitation avec des installations sprinkleurs dimensionnées selon le référentiel NFPA 13. De nouveau, il est spécifié que l'utilisation du désenfumage ne doit pas pénaliser le temps de réponse des sprinkleurs ni la demande totale en eau (c.-à-d. le nombre de sprinkleurs activés). Il est également recommandé de prendre en compte le refroidissement des gaz par l'aspersion dans le calcul théorique de la température de couche chaude utilisée pour dimensionner le système de désenfumage. De même, les études de dimensionnement devraient prendre en considération les mouvements des fumées entraînées en partie basse par les effets de traînée du sprinkleur. Enfin, il est conseillé d'ouvrir simultanément tous les exutoires lors de l'activation du désenfumage afin d'améliorer son efficacité.

FM Global publie également des référentiels qui sont appliqués fréquemment dans de nombreux pays anglo-saxons (et plus occasionnellement en France). Dans le référentiel relatif aux installations sprinkleurs (FM Datasheet 2-0), il est expressément stipulé qu'il ne faut pas installer de désenfumage automatique dans des locaux protégés par sprinkleur. En cas de conflit avec des réglementations locales, il est recommandé d'utiliser des températures d'activation des exutoires supérieures à 182 °C et de positionner des sprinkleurs à réponse rapide sous les DENFC.

8. Hôtels et autres établissements d'hébergement

9. Établissements de soin

10. Établissements d'éveil, d'enseignements, de formation, centres de vacances, centres de loisirs sans hébergements

11. Salles d'auditions, de conférences, de réunions, de spectacles ou à usages multiples

12. Salles de danse et salles de jeux

13. Bibliothèques et centres de documentation

L'emploi d'exutoires ouverts manuellement est toléré. Le référentiel FM Datasheet 1-10 dédié aux interactions entre sprinkleurs et désenfumage stipule qu'il est préférable de ne déclencher le désenfumage que lorsque le système sprinkleur est parvenu à contrôler le feu (c.-à-d. au moins à stabiliser sa puissance). Ces recommandations sont basées sur les résultats des essais FMRC de 1970 réalisés dans une configuration à échelle 1/12 d'un bâtiment de 4500 m² et de 9 m de haut. De même que les référentiels précédents, celui-ci préconise d'ouvrir conjointement tous les exutoires lorsque le désenfumage est activé. Il précise toutefois que le coût engendré par la mise en place d'un tel dispositif serait élevé par rapport au gain d'efficacité de l'installation. Dans une section consacrée aux feux d'entrepôts de matières combustibles, il est recommandé d'employer une technique dite *button up* où les arrivées d'air et les exutoires sont maintenus fermés jusqu'à l'arrivée des pompiers. Durant ce laps de temps, le système sprinkleur est censé contrôler efficacement le foyer. Ce principe est fortement contesté par de nombreux services de secours à travers le monde et est rarement respecté.

En faisant la synthèse de ces textes, on constate que la tendance actuelle est de privilégier le système d'aspersion au désenfumage. Lorsque le désenfumage doit être utilisé, il ne doit pas avoir la priorité sur les sprinkleurs. Cela se traduit par l'usage systématique de fusibles thermique ayant des températures d'activation supérieures à celles des sprinkleurs, quel que soit le référentiel. On se trouve ainsi parfois dans des situations dichotomiques où les exigences de sécurité imposent l'utilisation du désenfumage afin d'améliorer les conditions d'évacuation des personnes tout en préconisant l'utilisation prioritaire de l'aspersion (pouvant potentiellement dégrader ces mêmes conditions d'évacuation).

Très peu de textes justifient ces choix. Dans les faits, la vaste majorité de ces textes est basée sur la réglementation américaine et les référentiels NFPA. Ceux-ci s'appuient sur certaines séries d'essais analysées par Beyler et Cooper et dont le spectre d'étude allait au delà de simples considérations d'interactions entre sprinkleur et désenfumage. Le faible nombre d'essais (e.g. 3 essais pour 2 configurations différentes) et certains biais (ouvrants de façade simulant des exutoires) ne permettent pas de conclure de façon certaine sur les effets d'interaction entre les deux systèmes. Seul le référentiel NFPA 204 évoque la faible quantité de données fiables, empêchant de conclure sur le sujet.

1.8 Conclusions

Ce travail bibliographique nous a permis de présenter séparément les systèmes sprinkleurs et les dispositifs de désenfumage naturel ainsi que leurs rôles respectifs dans la sécurité incendie. Grâce à l'état de l'art réalisé par Beyler et Cooper, nous avons pu constater l'absence de consensus de la communauté incendie sur leur utilisation en cohabitation. Les avis sur le sujet sont fortement opposés et parfois contradictoires.

Depuis le début des années 2000, pour des raisons de coûts, la recherche s'est désintéressée du sujet et les positions se sont figées. Les pratiques actuelles, basées sur des essais réalisés avant les années 2000, consistent à privilégier les sprinkleurs sur le désenfumage et conduisent à des situations insolubles où les objectifs de sécurité des réglementations et les recommandations sont en opposition.

Avec le développement des moyens informatiques et l'amélioration des codes de simulations numériques, il semble maintenant possible d'apporter des éléments de réponse à ce problème. Pour cela, nous avons choisi de réaliser une étude numérique afin d'étudier les phénomènes d'interactions entre sprinkleur et dispositifs d'évacuation naturelle de fumées et de chaleur. Afin de s'assurer de la pertinence des résultats obtenus numériquement, il est nécessaire de les confronter avec des données expérimentales d'essais réalisés à grande échelle. Malheureusement, la plupart des résultats obtenus lors des études analysées par Beyler et Cooper sont aujourd'hui inaccessibles, manquent de répétabilité ou ne sont plus d'actualité (les pratiques ayant évoluées entre temps). De plus, les caractéristiques des essais ne sont pas suffisamment détaillées pour les simuler avec une bonne confiance.

Une partie de notre étude a donc été dédiée à la réalisation d'essais à moyenne et grande échelles afin de recueillir un maximum de données expérimentales et de construire des cas de validation pour les simulations numériques réalisées avec Fire Dynamic Simulator (FDS).

Chapitre 2

Campagne d'essais à moyenne échelle

2.1 Objectifs et plan

Lors de l'étude préliminaire, nous avons vu qu'il existe différentes typologies de bâtiments où sprinkleurs et systèmes de désenfumage naturel peuvent cohabiter. L'une de ces typologies correspondait à des bâtiments de grande surface au sol mais de faible hauteur sous plafond. Ce type de configuration est notamment caractéristique des centres commerciaux et des galeries marchandes. Lorsqu'un incendie se déclare dans un tel lieu, du fait de la faible hauteur sous plafond, les contraintes thermiques et toxiques à hauteur d'homme dépassent très rapidement les seuils admissibles réglementairement. La hauteur sous plafond étant faible, l'activation d'une tête de sprinkleur est susceptible d'entraîner une forte destratification thermique et optique, pénalisant alors fortement l'évacuation des personnes présentes dans l'établissement.

Pour étudier ces phénomènes et apporter des éléments de réponse aux questions soulevées dans l'article de Beyler et Cooper, nous avons réalisé une première campagne d'essais dans un bâtiment présentant ces caractéristiques.

Ce chapitre se découpe en 5 sections. La première partie de ce chapitre présente le dispositif expérimental et la métrologie associée. La liste des essais réalisés y est également présentée.

Les sections deux et trois sont consacrées à la présentation des résultats expérimentaux obtenus. Ces résultats sont scindés en deux parties distinctes, chacune associée à un objectif spécifique. Plus précisément, les résultats d'essais ayant pour but d'étudier l'influence du désenfumage sur le temps de réponse d'un sprinkleur sont analysés dans la section 2. La section 3 quant à elle est dédiée à l'analyse de l'influence du désenfumage sur les niveaux de température et sur la visibilité dans l'enceinte du local d'essais.

Les conclusions issues des deux parties précédentes serviront de transition pour présenter la section 4 et les simulations numériques qui découlent des essais réalisés.

Enfin, un bilan résumera les apports de cette première campagne.



FIGURE 2.1 – Vue extérieure du local d'essais de la première campagne expérimentale.

2.2 Dispositif expérimental

2.2.1 Local d'essais

Cette première phase expérimentale a été réalisée dans un local d'essais situé sur le plateau technique du CNPP, à Vernon et dont une vue extérieure est présentée sur la figure 2.1. Le bâtiment a une surface au sol de 108 m^2 ($12\text{ m} \times 9\text{ m}$). La toiture est constituée de deux pans en tôle ondulée avec une pente de 6.3° pour une hauteur maximale de 4 m au faîtage. Les murs Nord et Est sont en béton cellulaire de 20 cm d'épaisseur. Les murs Ouest et Sud sont constitués de tôles ondulées de 5 mm d'épaisseur, du même type que celles de la toiture. Sur ces façades se trouvent, respectivement, trois et deux fenêtres de $75\text{ cm} \times 90\text{ cm}$ avec des montants en bois. Elles sont occultées avec de la toile de verre afin de les protéger mais également de limiter les perturbations causées par les rayons du soleil sur les enregistrements vidéos des essais. Enfin, une double porte de $2.45\text{ m} \times 4\text{ m}$ est présente sur la façade Ouest (visible sur la figure 2.1). Cette porte est restée fermée pour la quasi-totalité des essais, l'arrivée d'air se faisant par une porte plus petite ($1\text{ m} \times 2\text{ m}$) située sur la façade Sud.

Ce bâtiment servant habituellement à des essais d'extinction de feux de transformateurs électriques par brouillard d'eau, une maquette à échelle 1 est présente en son centre, entourée par un portique sur lequel sont positionnées des buses. Cette installation est visible sur la figure 2.2.

Des simulations numériques préliminaires ont permis d'assurer que la présence de cette maquette n'avait pas d'incidence sur les résultats relatifs aux grandeurs que nous souhaitons analyser. Toutefois, dans un souci de représentativité, cette maquette a été prise en compte dans l'étude numérique et a donc été introduite dans les simulations réalisées, en tenant compte de ses caractéristiques géométriques et thermiques.



FIGURE 2.2 – Maquette de transformateur et banc de brouillard d'eau présents dans le local d'essais.

2.2.2 Désenfumage

L'I.T.-246 impose que, pour des locaux de moins de 1000 m^2 recevant du public, la surface utile des évacuations de fumées corresponde à $1/200$ (soit 0.5%) de la superficie au sol de l'établissement. Pour un bâtiment correspondant à notre typologie 1, le référentiel *APSA D R17* recommande d'avoir une surface d'exutoire égale à 1% de la surface au sol. Dans le cas de notre bâtiment d'essais, et afin de respecter les recommandations d'installation, cela équivaut à une surface d'évacuation égale à 1 m^2 . Ainsi, un exutoire de fumée d'une surface de 1 m^2 ($1\text{ m} \times 1\text{ m}$, figure 2.3) a été installé sur le pan Ouest de la toiture. La hauteur des montants de l'exutoire (la costière) est de 30 cm . Afin de résister à des essais successifs et aux contraintes thermiques associées, ses parois internes ont été renforcées par des plaques d'acier pour construction navale. Des bandes de feutre ignifugé ont également été ajoutées sur le contour du capot afin de limiter les fuites de fumées.

L'ouverture du DENFC est effectuée mécaniquement grâce à un système de treuil dont le boîtier de commande est installé sur la façade Ouest, à l'extérieur du bâtiment. L'ouverture totale de l'ouvrant est atteinte environ 3 secondes après son déclenchement. La fermeture totale de l'exutoire et son réarmement sont réalisés grâce à un treuil (manuel).

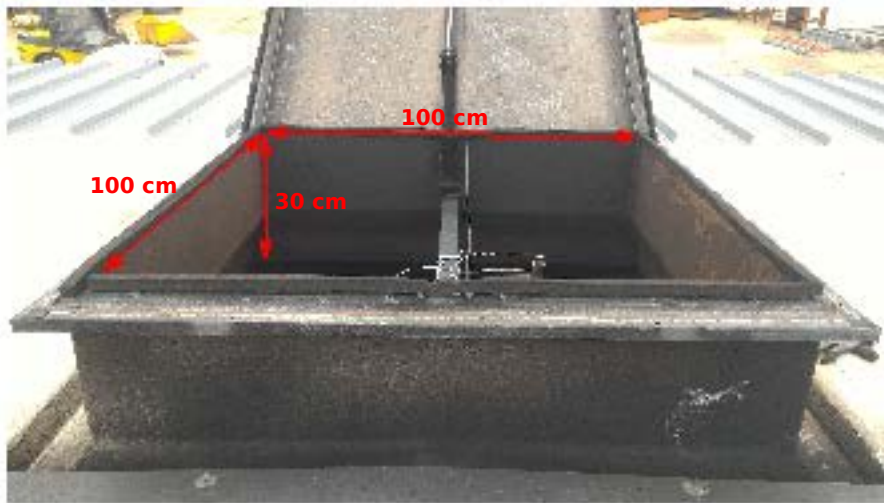


FIGURE 2.3 – Exutoire installé sur le local d'essais à moyenne échelle.

2.2.3 Aspersion

Le bâtiment est équipé d'un réseau de protection sprinkleur dimensionné selon le référentiel APSAD R1. Douze têtes de sprinkleurs sont réparties selon un maillage permettant d'avoir un espace entre chaque tête égal à 3 m. La position de ces têtes ainsi que le numéro qui leur est associé seront détaillés plus loin.

Les sprinkleurs utilisés dans le cadre de cette campagne ont été choisis de sorte à être représentatifs d'une installation ERP en France. Il s'agit de sprinkleurs pendants (c.-à-d. orientés vers le bas) avec un coefficient de débit $K = 81.2 \text{ L}/\text{min}/\text{bar}^{1/2}$ d'après le fabricant, un indice de temps de réponse $RTI = 108 (\text{m} \cdot \text{s})^{1/2}$ et une température d'activation $T_{act} = 68^\circ\text{C}$.

Lors de certains essais, l'activation du sprinkleur était manuelle. Pour ce faire, un câble métallique était enroulé autour de l'ampoule du sprinkleur afin de la briser à l'instant souhaité.

Le système de protection est alimenté en eau par un poteau incendie du réseau de protection incendie du CNPP, situé à quelques mètres du local d'essais et dont la pression délivrée est d'environ 11 bars. Afin de réduire cette pression mais aussi d'amortir les fluctuations pouvant se produire lors d'une sollicitation importante du réseau par d'autres activités du site, un régulateur de pression et un débitmètre sont installés entre le réseau de protection et le poteau incendie. Cette installation permet de régler le débit entrant avant et au cours de l'essai. Au cours de cette campagne, trois débits différents ont été utilisés, chacun correspondant à une classe de risque différente dans le référentiel APSAD R1 :

- $67.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (HHP 1)
- $90.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (HHP 2)
- $112.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (HHP 3)

Dans les essais présentés dans ce manuscrit, seul le sprinkleur numéro 6 a été utilisé. Cette position présente l'intérêt d'être au centre du local d'essai, entre la position du foyer et l'exutoire

(cas le plus générique rencontré en pratique).

2.2.4 Foyer

Pour cette première campagne d'essais, nous avons choisi un foyer de puissance modérée afin que la montée en température dans le bâtiment ne soit pas trop rapide et qu'une strate de fumée ait le temps de s'établir avant l'activation automatique des sprinkleurs. Ce foyer peu puissant et très fumigène peut être considéré comme un foyer pénalisant pour les critères de tenabilité liés aux conditions de visibilité.

Afin d'obtenir un tel foyer, nous avons utilisé un spray de fioul. L'efficacité d'un brûleur à fioul réside dans l'action d'atomiser le combustible traversant la buse en gouttelettes de très petit diamètre. Ce processus permet d'augmenter considérablement la surface d'échange entre le fioul et l'air et facilite son évaporation en gaz de combustion. Une fois sous forme de spray, il n'est plus nécessaire de préchauffer le fioul afin d'obtenir une flamme, une faible source d'énergie permet d'activer la combustion. Dans notre cas, une petite flamme de propane a servi de veilleuse afin d'initier et d'entretenir la combustion. Cette flamme étant de petite dimension (moins d'une dizaine de centimètres), sa puissance peut être négligée devant la puissance du foyer (ou HRR, pour *Heat Release Rate*, déterminée d'après l'équation (2.1)).

$$HRR = \chi \Delta H_c \dot{m}_{pyro} \quad (2.1)$$

Les valeurs de l'efficacité de la combustion χ ainsi que l'enthalpie de combustion ΔH_c ont été reprises des travaux de Jenft [4] ($\chi = 0.84$, $\Delta H_c = 42\,200 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$). Le débit de pyrolyse \dot{m}_{pyro} a été assimilé au débit de fioul injecté dans la buse. Après les premiers essais, un léger dépôt de fioul a cependant été observé sous la zone du spray. Un bac positionné sur une balance a donc été installé à cet endroit afin de recueillir les gouttes de fioul imbrûlé et ainsi estimer sa proportion. La figure 2.5 présente l'évolution de la masse de fioul recueilli avec le temps au cours d'un essai. Après 475 s, l'aspersion se déclenche et des gouttes d'eau viennent impacter le bac, les mesures ne sont donc plus exploitables. Ces essais montrent qu'environ 2.4 % du fioul injecté dans la buse n'est pas brûlé à sa sortie. Au cours de cette campagne, deux débits de fioul différents ont été testés afin d'obtenir des HRR théoriques de 400 kW et 800 kW.

Différentes positions de foyer ont été testées, mais seuls les résultats d'essais avec le brûleur installé au nord du local sont présentés dans ce document. Du fait de la présence de la maquette dans le bâtiment, le foyer n'a pas pu être utilisé directement sous l'exutoire.

2.2.5 Métrologie

La position des principaux éléments de métrologie est reportée sur la figure 2.6. La majorité des mesures consiste en des prises de température. Au total, près de 60 prises de mesures ont été réalisées à chaque essai.



FIGURE 2.4 – Photographie du brûleur à fioul

2.2.5.1 Mesures de températures

Les mesures de température sont effectuées à l'aide de thermocouples de type-K gainés (gaine en acier inoxydable, 1.5 mm de diamètre).

Afin de suivre l'évolution de la température avec la hauteur au cours des essais, 4 arbres de thermocouples ont été installés dans le local. Chacun de ces arbres est équipé de 11 thermocouples répartis à intervalles réguliers. Le plus bas est positionné à 50 cm du sol afin de mesurer la température de la strate d'air frais à proximité du sol. Ensuite, entre 100 cm et 300 cm, les thermocouples sont espacés de 25 cm. Enfin, la prise de mesure la plus haute est réalisée à 350 cm du sol.

Un premier arbre (n°1) est installé à proximité directe du foyer. L'élévation de température à cette position est une donnée importante pour la phase de validation numérique. Étant au voisinage des flammes, un bon accord entre les valeurs obtenues expérimentalement et celles obtenues numériquement permet d'être confiant sur la quantité d'énergie libérée par le foyer dans les simulations numériques. Cela permet également de vérifier que la puissance estimée du foyer expérimental est correcte.

Le second arbre de thermocouples (n°2) se trouve dans la zone impactée par le spray issu du sprinkleur 6. Grâce aux mesures de températures obtenues à cette position, il est possible d'observer la destratification thermique se produisant sous le sprinkleur lors de son activation. Les thermocouples n'étant pas protégés, les gouttes issues du sprinkleur peuvent s'y déposer, modifiant alors sa température. Ceci devra être pris en considération lors de l'analyse des résultats à cette position.

Un troisième arbre (n°3) est positionné au droit de l'exutoire. Enfin, le quatrième arbre (n°4) est situé à l'extrémité Sud du local d'essais. Cette position permet d'analyser l'évolution des

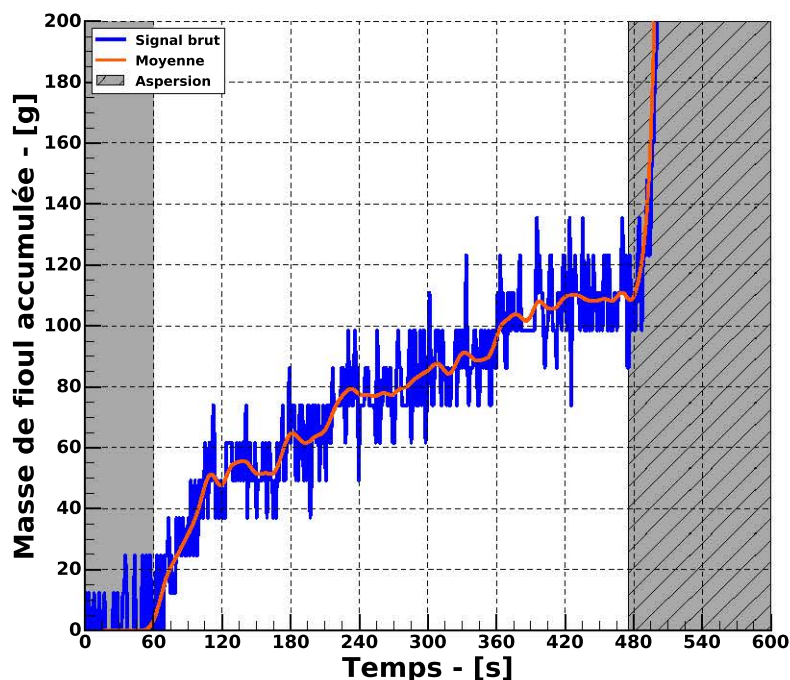


FIGURE 2.5 – Masse de fioul imbrûlé se déposant sous le spray au cours d'un essai.

températures dans le local à distance de toute source de perturbation. Le foyer se trouve à environ 9 m de cette position et les gouttes issues du sprinkleur n'atteignent pas les thermocouples répartis sur cet arbre.

En plus des mesures réalisées au niveau de ces arbres, des mesures ponctuelles sont effectuées à des endroits clés (détaillés plus loin). Afin de déterminer la température de la phase gazeuse s'écoulant autour de l'ampoule du sprinkleur au cours des essais et plus particulièrement à l'instant de son activation, un thermocouple est systématiquement positionné à proximité de l'élément sensible du sprinkleur. Ce thermocouple sert également d'indicateur de déclenchement du sprinkleur. Lorsque l'ampoule se brise, l'eau libérée vient directement impacter le thermocouple, faisant chuter brusquement sa température.

La température des gaz extraits par l'exutoire est mesurée grâce à deux thermocouples situés dans le plan à mi hauteur de l'exutoire.

Enfin, trois thermocouples sont installés à 100 cm, 150 cm et 190 cm du sol dans la section de l'arrivée d'air, au niveau de la face Sud du bâtiment.

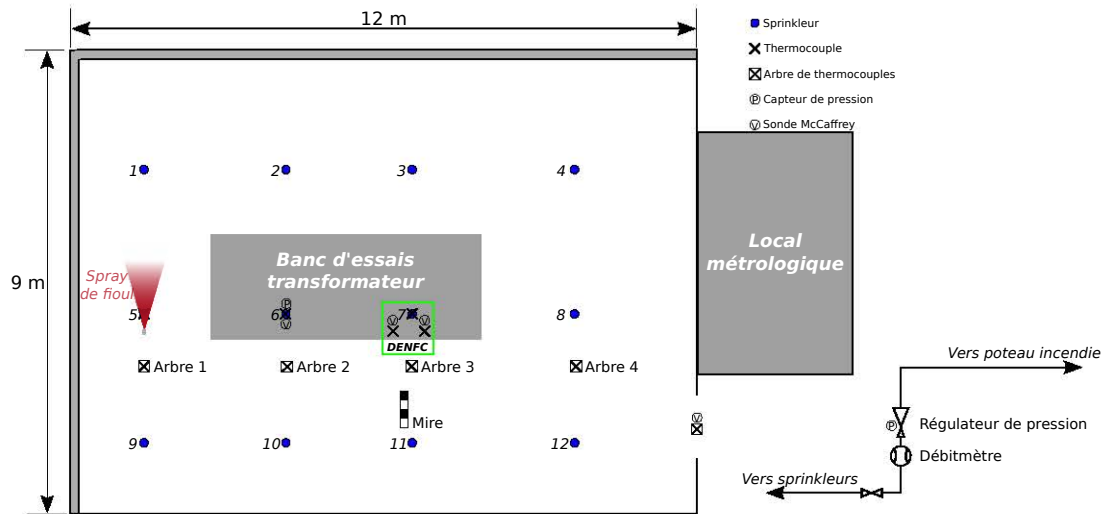


FIGURE 2.6 – Position des éléments de métrologie dans le local d’essais (vue de dessus).

2.2.5.2 Mesures des vitesses d’écoulement

Les mesures de vitesses d’écoulement de l’air et des fumées dans le local sont réalisées grâce à des sondes bidirectionnelles McCaffrey. Ces sondes présentent l’avantage d’être robustes et peu sensibles aux variations angulaires de l’écoulement [52]. Ces sondes sont particulièrement adaptées à une utilisation dans un environnement hostile chargé en suie contrairement aux tubes de Pitot dont les prises de mesure peuvent être facilement obstruées.

La vitesse v de l’écoulement est obtenue par la mesure de la différence de pression ΔP entre la pression dynamique et la pression statique, de part et d’autre de la sonde. Cette relation s’exprime par :

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2.2)$$

Pour notre utilisation, les fumées peuvent être assimilées à un gaz parfait de masse volumique ρ . Afin d’évaluer cette masse volumique, il est nécessaire de bien connaître la température des fumées environnant la sonde. Un thermocouple est donc systématiquement positionné à proximité des sondes McCaffrey.

Au cours de cette campagne, deux sondes de vitesse ont été installées dans la section de l’exutoire, à mi-hauteur de la costière (soit environ 15 cm sous le niveau du capot du DENFC). Lors de certains essais, une sonde supplémentaire a été positionnée à proximité du sprinkleur pour déterminer la vitesse de l’écoulement des fumées à cette position.

2.2.5.3 Mesure de débit d’eau au sprinkleur

Un débitmètre électromagnétique couplé au régulateur de pression mécanique a été utilisé pour mesurer le débit volumique d’eau libéré par le sprinkleur lors de son utilisation. En com-

plément, une prise de pression au niveau de la tête de sprinkleur a permis de recalculer ce débit en utilisant la formule 1.4.

2.2.5.4 Autres mesures

Une station météo a été utilisée lors de cette campagne pour indiquer la vitesse et l'orientation du vent, l'humidité et la température extérieures. Un thermohygromètre à main a également été utilisé afin de déterminer la température et le niveau d'humidité à l'intérieur du local avant chaque essai. Ces données sont principalement utilisées dans les simulations numériques pour définir les conditions initiales.

Des enregistrements vidéos ont été réalisés par trois caméras lors de chaque essai. L'une de ces caméras a spécifiquement été positionnée afin de filmer l'évacuation des fumées au niveau de l'exutoire (à l'extérieur du bâtiment). Les deux autres caméras ont été positionnées à différents endroits à l'intérieur du local, en fonction des essais réalisés.

Lors de certains essais, des mires passives (mire en bois peinte en noir et blanc) et actives (arbre de LEDs) ont été utilisées afin de suivre l'évolution de la hauteur de fumées.

Les temps des événements ont été déterminés par l'utilisation d'un chronomètre.

2.3 Résultats expérimentaux

Au cours de cette première campagne expérimentale, 71 essais ont été réalisés entre septembre 2015 et avril 2016. Ces essais peuvent être classés en plusieurs catégories, selon leurs objectifs :

- Les tests de qualification : cette catégorie regroupe tous les essais ayant pour but de se familiariser avec le dispositif expérimental et de tester la métrologie et les protocoles expérimentaux. Ces essais ne sont pas analysés dans ce document ;
- Les essais de répétabilité ;
- Les essais avec déclenchement automatique de l'aspersion ;
- Les essais avec déclenchement manuel de l'aspersion.

Le tableau 2.1 répertorie tous les essais qui ont été menés ainsi que leurs principales caractéristiques.

Numéro	HRR [kW]	Désenfumage	Aspersion	$t_{DENFC} - [s]$	$t_{spk} - [s]$	Commentaires
1	400	Oui	Non			Tests de vérification
2	400	Oui	Non			
3	400	Oui	Non			
4	400	Oui	Non			
5	400	Non	Automatique			Tests délai sprinkleurs
6	400	Oui	Automatique			
7	400	Oui	Automatique			
8	400	Oui	Automatique			
9	400	Oui	Automatique			
10	400	Oui	Automatique			
11	400	Oui	Automatique			
33	400	Non	Manuelle	-	180	Aspersion seule
21	400	Oui	Automatique	647	607	Essais arrivée d'air fermée
22	400	Oui	Non	200	-	
32	400	Non	Non	-	-	Essais de remplissage
37	400	Non	Non	-	-	
38	400	Non	Non	-	-	
45	400	Non	Non	-	-	
47	400	Non	Non	-	-	
67	800	Non	Non	-	-	
12	400	Oui	Non	0	-	Essai de remplissage/vidange
23	400	Oui	Non	242	-	
27	400	Oui	Non	840	-	
28	400	Oui	Non	236	-	
31	400	Oui	Non	357	-	
34	400	Oui	Non	600	-	
60	800	Oui	Non	0	-	
62	400	Oui	Non	0	-	

Numéro	HRR - [kW]	Désenfumage	Aspersion	t_{DENFC} - [s]	t_{spk} - [s]	Commentaires
13	400	Oui	Automatique	598	505	
14	400	Oui	Automatique	650	560	
15	400	Non	Automatique	-	613	
16	400	Oui	Automatique	605	513	
17	400	Oui	Automatique	660	610	
18	400	Oui	Automatique	618	504	Répétabilité sprinkleur
29	400	Oui	Automatique	600	524	
35	400	Oui	Automatique	700	403	
36	400	Oui	Automatique	640	452	
58	800	Oui	Automatique	360	173	
59	800	Oui	Automatique	201	144	
19	400	Oui	Automatique	240	-	
20	400	Oui	Automatique	300	-	
24	400	Oui	Automatique	360	-	
25	400	Oui	Automatique	420	-	
26	400	Oui	Automatique	480	448	
61	800	Oui	Automatique	120	122	
63	800	Oui	Automatique	118	124	
64	800	Oui	Automatique	118	123	
65	800	Oui	Automatique	60	143	Désenfumage avant aspersion automatique
66	800	Oui	Automatique	60	181	
68	400	Oui	Automatique	0	780	
69	800	Oui	Automatique	0	126	
70	800	Oui	Automatique	0	211	
71	800	Oui	Automatique	0	160	

Numéro	HRR - [kW]	Désenfumage	Aspersion	t_{DENFC} - [s]	t_{spk} - [s]	Commentaires
46	400	Oui	Manuelle	140	180	
49	400	Oui	Manuelle	120	180	
50	400	Oui	Manuelle	90	180	
51	400	Oui	Manuelle	60	180	Désenfumage avant aspersion contrôlée
52	400	Oui	Manuelle	120	180	
55	400	Oui	Manuelle	148	180	
57	800	Oui	Manuelle	118	180	
30	400	Oui	Manuelle	360	236	
39	400	Oui	Manuelle	300	180	
40	400	Oui	Manuelle	270	180	
41	400	Non	Manuelle	-	180	
42	400	Oui	Manuelle	240	180	Désenfumage après aspersion contrôlée
43	400	Oui	Manuelle	210	180	
44	400	Oui	Manuelle	300	180	
48	400	Oui	Manuelle	210	180	
56	800	Oui	Manuelle	240	180	
53	400	Oui	Manuelle	180	180	Désenfumage et aspersion simultanés
54	400	Oui	Manuelle	180	180	

TABLEAU 2.1 – Liste des essais réalisés lors de la première campagne expérimentale.

2.3.1 Influence du désenfumage sur l'activation du premier sprinkleur

2.3.1.1 Objectifs

Cette partie a pour but d'étudier l'influence du désenfumage sur le temps d'activation du premier sprinkleur. Pour cela des essais ont donc été réalisés avec ouverture de l'exutoire à différents instants avant rupture de l'ampoule du sprinkleur.

La liste des essais présentés dans cette section est reportée dans le tableau 2.2

Dans un premier temps, des essais de répétabilité ont été réalisés afin de déterminer le temps de référence d'activation du sprinkleur, en l'absence de désenfumage. Ensuite, de nouveaux essais ont été effectués avec ouverture de l'exutoire à différents instants avant ce temps de référence d'activation du sprinkleur. Ces tests ont été reproduits aussi bien avec le foyer de 400 kW que celui de 800 kW.

2.3.1.2 Détermination du temps de référence d'activation du sprinkleur, t_{ref}

Le protocole utilisé lors des essais de répétabilité est le suivant :

1. Démarrage de l'acquisition des données ;
2. Le foyer est allumé à t_0 , 60 s après le début de l'acquisition ;
3. Le sprinkleur se déclenche automatiquement à t_{spk} ;
4. Le désenfumage peut être déclenché à $t_{DENFC} > t_{spk}$ afin de recueillir des données supplémentaires pour la suite de la campagne.

Sept essais de répétabilité utilisant le foyer de 400 kW ont pu être exploités. L'évolution de la température mesurée à proximité du sprinkleur au cours de ces essais est reportée sur la figure 2.7.

Avant allumage du foyer, la température mesurée correspond à la température ambiante à l'intérieur du local d'essais. Les différences de température entre les essais à cet instant sont dues aux conditions extérieures.

Après allumage du foyer à t_0 , la température augmente, d'abord rapidement puis plus progressivement jusqu'à activation du sprinkleur. Durant cette phase on peut constater une bonne répétabilité entre les essais avec un écart à la moyenne inférieur à 3% après 120 s et jusqu'à activation du sprinkleur, et ce, malgré les différences de température initiale.

Lorsque la température de l'ampoule du sprinkleur atteint sa valeur seuil, celle-ci se brise, libérant l'eau du réseau sous pression. Cette eau impacte directement le thermocouple, faisant ainsi chuter la température mesurée et permettant de connaître précisément (au pas de temps d'acquisition près) le temps de déclenchement du système de protection.

Essai	HRR - [kW]	Scénario
13	400	
14	400	
15	400	
16	400	Détermination de t_{ref}
17	400	
18	400	
29	400	
19	400	$t_{DENFC} = 240 \text{ s} \leq t_{ref}$
20	400	$t_{DENFC} = 300 \text{ s} \leq t_{ref}$
24	400	$t_{DENFC} = 360 \text{ s} \leq t_{ref}$
25	400	$t_{DENFC} = 420 \text{ s} \leq t_{ref}$
26	400	$t_{DENFC} = 480 \text{ s} \leq t_{ref}$
58	800	Détermination de t_{ref}
59	800	Détermination de t_{ref}
61	800	$t_{DENFC} = 120 \text{ s} \leq t_{ref}$
63	800	$t_{DENFC} = 120 \text{ s} \leq t_{ref}$
64	800	$t_{DENFC} = 120 \text{ s} \leq t_{ref}$
65	800	$t_{DENFC} = 60 \text{ s} \leq t_{ref}$
66	800	$t_{DENFC} = 60 \text{ s} \leq t_{ref}$
70	800	Désenfumage toujours ouvert
71	800	Désenfumage toujours ouvert

TABLEAU 2.2 – Liste et caractéristiques des essais relatifs au temps d'activation du sprinkleur

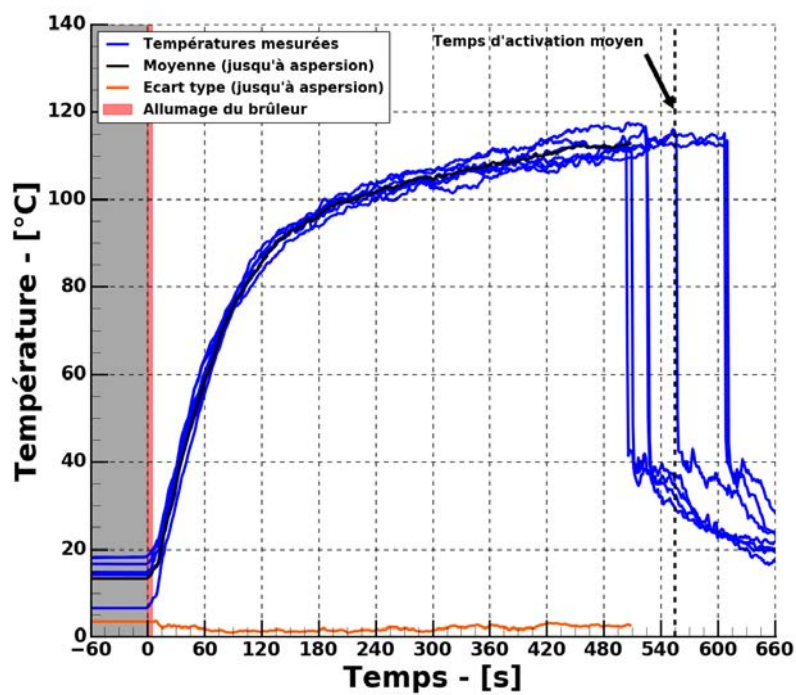


FIGURE 2.7 – Évolution de la température mesurée à proximité du sprinkleur 6 pendant les essais de répétabilité.

n°	t_{spk} [s]	T_{act} [°C]
13	508	112.1
14	560	114.6
15	613	113.4
16	513	111.7
17	610	115.0
18	524	115.1
29	525	116.6
Moyenne	550	114.1
Écart type	42	1.6

TABLEAU 2.3 – Temps et température d'activation du sprinkleur lors des essais de répétabilité

Ces temps ainsi que les températures (T_{act}) mesurées au niveau du sprinkleur au moment de son activation sont reportés dans le tableau 2.3. On constate que si cette température d'activation ne varie que très faiblement autour de sa moyenne, le temps de déclenchement peut être très différent d'un essai à l'autre avec un écart maximum de 105 s entre les essais 15 et 13.

Cette disparité des temps d'activation n'était pas attendue lors de la planification des essais. Afin d'expliquer ces écarts, différentes pistes ont été envisagées.

2.3.1.2.1 Défauts des sprinkleurs Les sprinkleurs utilisés dans cette étude ont été commandés chez le même constructeur et proviennent des mêmes lots. Il est toutefois possible que de légers défauts liés au process de leur conception existent. Des épaisseurs de verre, même légèrement différentes pourraient ainsi retarder plus ou moins significativement le temps de rupture de l'ampoule et donc le déclenchement de l'aspersion.

Des tests de plongée ont donc été réalisés afin de vérifier cette hypothèse.

Dans ces tests, 6 sprinkleurs sont fixés à une armature en laiton et une tige en métal est insérée dans leur embouchure. Une petite masse en laiton est fixée à l'extrémité de chacune des tiges afin de reproduire l'effet de la pression de l'eau sur l'obturateur. L'ensemble est alors plongé dans une cuve thermostatée remplie d'huile.

Lorsqu'une ampoule se brise, la chute de la masse active un interrupteur relié à un chronomètre, permettant ainsi de déterminer son temps d'activation. Une photo du dispositif est présentée sur la figure 2.8.

Un premier jeu de 6 sprinkleurs issus du même lot est testé. L'armature est immergée dans l'huile initialement à 20 °C. La consigne de chauffe de la cuve est ensuite réglée à 120 °C. Des thermocouples sont plongés dans la cuve afin de s'assurer que la température soit bien homogène dans le volume d'huile. Les temps de déclenchement des sprinkleurs sont reportés dans le tableau 2.4.

La tige insérée dans le sprinkleur positionné à l'emplacement 4 était légèrement tordue et



FIGURE 2.8 – Dispositif (armature + sprinkleurs) du test du bain d’huile.

Position	Temps de déclenchement - [s]	
	Série 1	Série 2
1	596	277
2	606	289
3	584	278
4	620	-
5	582	253
6	577	269
Moyenne	589	273
Écart type	11	13

TABLEAU 2.4 – Temps de déclenchement des sprinkleurs dans le bain d’huile thermostatée

appuyait sur les bords de l’armature. Son temps de déclenchement n’est donc pas pris en compte dans le calcul du temps moyen de rupture des ampoules.

Un second jeu de 5 sprinkleurs (aucun sprinkleur n’est installé à la position 4) est ensuite testé. Cette fois ci, la température de l’huile est initialement à 55 °C et on fixe de nouveau la température de consigne à 120 °C. Les temps de déclenchement des sprinkleurs pour cette seconde série sont également reportés dans le tableau 2.4.

La température initiale de l’huile contenue dans la cuve étant différente entre les deux séries, il est normal d’obtenir une différence de temps moyen d’activation. On note cependant que les écarts types autour de ces moyennes sont similaires dans les deux cas : 11 s et 13 s.

Les différences entre chaque sprinkleur, propres à leur fabrication, sont donc susceptibles d’induire des variations de temps d’activation dans des conditions similaires. Cependant, les valeurs des écarts observés lors des essais sur la figure 2.7 sont bien supérieures à celles obtenues lors de ces tests de vérification.

Essai n°	13	14	18	29
t_{spk} - [s]	508	560	524	525
T_0 - [°C]	18	18	17	6
T_{ext} - [°C]	17	16	15	4
P_{ext} - [mb]	1020	1076	996	1017
HR_{ext} - [%]	95	66	90	50

TABLEAU 2.5 – Conditions extérieures lors des essais 13, 14, 18 et 29

2.3.1.2.2 Conditions extérieures Les conditions extérieures ont également été envisagées comme origine à ces différences. La campagne expérimentale ayant été réalisée entre septembre 2015 et avril 2016, les conditions extérieures peuvent être sensiblement différentes entre les essais. De même, certains essais ont été réalisés en début de matinée lorsque d'autres ont été effectués en milieu d'après midi. Sur la figure 2.7, on peut notamment constater un écart de température ambiante de plus de 10 °C entre deux essais de répétabilité. Toutefois, après allumage du foyer les courbes de température se rejoignent rapidement et les écarts liés aux conditions initiales ne sont alors plus perceptibles. Pour s'en assurer, les conditions extérieures mesurées lors de 4 essais différents sont reportées dans le tableau 2.5

Le temps d'activation du sprinkleur varie de plus de 50 s entre les essais 13 et 14 alors que la température initiale est identique. À l'inverse, le sprinkleur s'est déclenché au même instant lors des essais 18 et 29 alors que la température initiale varie de plus de 10 °C entre ces essais.

Il semble donc peu probable que les variations de conditions extérieures entre les différents essais puissent être responsables à elles seules des écarts de temps de déclenchement observés.

2.3.1.2.3 Mouvements aérauliques Quelques instants après l'allumage du brûleur, le panache impacte le toit du local avec une composante verticale de vitesse de l'ordre de quelques mètres par seconde. Les fumées se propagent alors horizontalement sous le plafond dans toutes les directions en perdant de la vitesse. Sur leur chemin, elles se refroidissent progressivement et rencontrent des obstacles tels que des poutres et des chevrons.

Lorsqu'elles atteignent le sprinkleur, leur vitesse est de l'ordre du mètre par seconde et les fluctuations sont très importantes. En observant l'équation 1.2, on constate la présence d'un terme faisant intervenir la vitesse de l'écoulement gazeux autour de l'élément sensible du sprinkleur¹⁴. En négligeant les pertes par conduction de l'ampoule vers l'armature en laiton ainsi que l'effet de l'activation d'autres sprinkleurs, cette équation se simplifie et devient :

$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{\sqrt{|\mathbf{u}|}}{RTI} \cdot (T_g - T_l) \quad (2.3)$$

On considère que le foyer monte suffisamment vite en régime pour avoir un écoulement

14. Dans l'ensemble des essais, les sprinkleurs ont été installés de sorte que l'armature formée par les bras en laiton (cf. figure 1.1) soit perpendiculaire à la longueur du bâtiment (direction principale de l'écoulement après ouverture de l'exutoire) afin que l'ampoule soit toujours placée de la même manière dans l'écoulement.

établi instantanément et une vitesse d'écoulement autour de l'ampoule constante. En utilisant les données de la température mesurée à proximité du sprinkleur lors d'un essai de répétabilité (essai 15), on trace sur la figure 2.9 l'évolution de la température de l'ampoule, calculée avec l'équation 2.3, pour différentes valeurs de vitesses d'écoulement $|\mathbf{u}|$ autour du fusible allant de 0.1 m/s à 3 m/s avec un pas de 0.1 m/s.

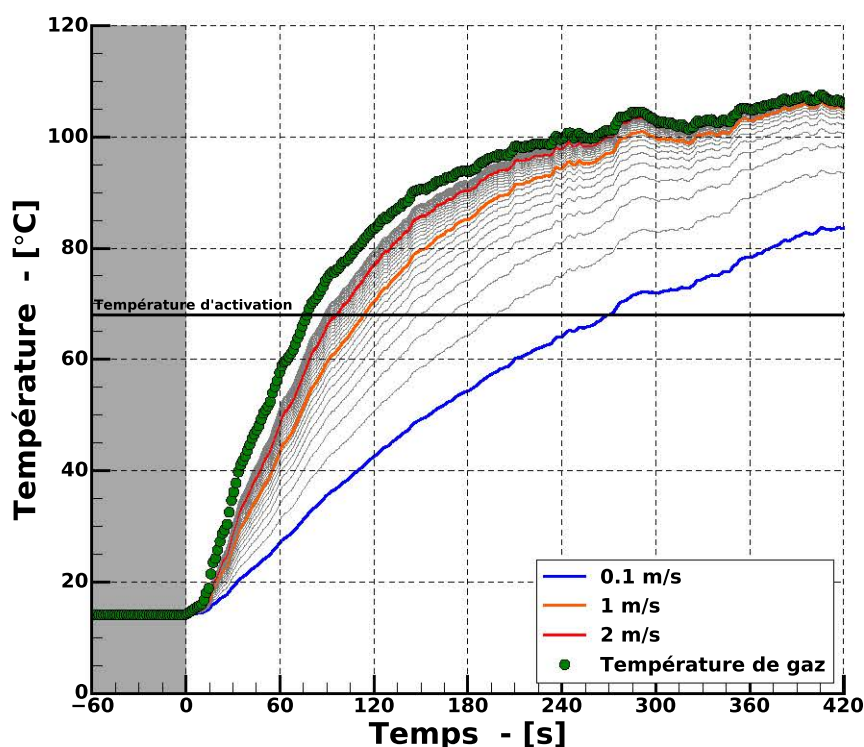


FIGURE 2.9 – Évolution de la température de l'ampoule d'un sprinkleur pour différentes valeurs de vitesse d'écoulement.

On constate que pour les faibles vitesses d'écoulement, une légère variation de cette vitesse peut induire un retard de plusieurs dizaines de secondes du déclenchement du sprinkleur. En prenant en compte également les transferts thermiques conductifs entre l'ampoule et l'armature du sprinkleur, ces écarts peuvent être encore plus importants et expliquent notamment la variabilité observée sur le temps d'activation du sprinkleur.

L'analyse détaillée de la variabilité du temps de réponse d'un sprinkleur dépasse le cadre de cette étude. En considérant ces écarts, il a été décidé d'utiliser le temps d'activation le plus court comme temps de référence. Le nombre d'essais étant limité, ce choix permet de réduire le risque d'une activation inopinée du sprinkleur avant ouverture de l'exutoire dans des scénarios où le désenfumage aurait dû être déclenché avant l'aspersion. Dans la suite de cette section, on utilisera : $t_{ref} = 508$ s.

Essai	t_{DENFC} - [s]	t_{spk} - [s]
19	240	-
20	300	-
24	360	-
25	420	-
26	480	448

TABLEAU 2.6 – Liste des essais avec activation du désenfumage avant t_{ref} (HRR = 400 kW).

2.3.1.3 Utilisation du désenfumage

En utilisant ce temps de référence défini en l'absence de désenfumage, des essais sont réalisés avec ouverture de l'exutoire à différents instants $t_{DENFC} \leq t_{ref}$. Le protocole suivi pour ces essais est le suivant :

1. Démarrage de l'acquisition des données ;
2. Le foyer est allumé à t_0 , 60s après le début de l'acquisition ;
3. L'exutoire est ouvert manuellement à un temps prédéfini à $t_{DENFC} \leq t_{ref}$
4. Le sprinkleur se déclenche automatiquement à t_{spk} (s'il y a déclenchement).

Cinq essais de ce type ont été réalisés. Les temps de déclenchement du désenfumage et d'activation du sprinkleur pour chacun de ces essais sont reportés dans le tableau 2.6.

Au cours des essais 19, 20, 24 et 25, le sprinkleur ne s'est jamais activé. Lors de l'essai 26, le sprinkleur s'est activé automatiquement *avant* l'ouverture de l'exutoire à un temps inférieur au temps de référence.

De même que pour les essais précédents, la température mesurée au niveau de la tête de sprinkleur a servi d'indicateur d'activation (ou de non activation) du sprinkleur. L'évolution de ces températures pour chaque essai est reportée sur la figure 2.10.

Sur cette figure, on peut constater que l'ouverture du désenfumage a systématiquement entraîné une diminution de la température mesurée au niveau du sprinkleur.

Une nouvelle série d'essais a été menée en utilisant un foyer développant un HRR de l'ordre de 800 kW. L'évolution de la température mesurée à proximité du sprinkleur lors de ces essais est reportée sur la figure 2.11. Deux premiers tests (58 et 59) ont été réalisés sans ouverture du désenfumage afin de déterminer de nouveau un temps de référence. Les temps de déclenchement du sprinkleur pour ces essais sont reportés dans le tableau 2.7. Comme précédemment, le temps de déclenchement le plus court a été retenu comme temps de référence, soit $t_{ref} = 144$ s. On peut constater que l'utilisation de ce foyer a pour conséquence des temps d'activation nettement plus courts que lors des essais précédents. Le foyer étant plus puissant, l'apport d'énergie supplémentaire contribue à augmenter plus rapidement la température des gaz dans le local. L'ampoule du sprinkleur étant baignée dans l'écoulement de gaz plus chaud, sa montée en température est également plus rapide.

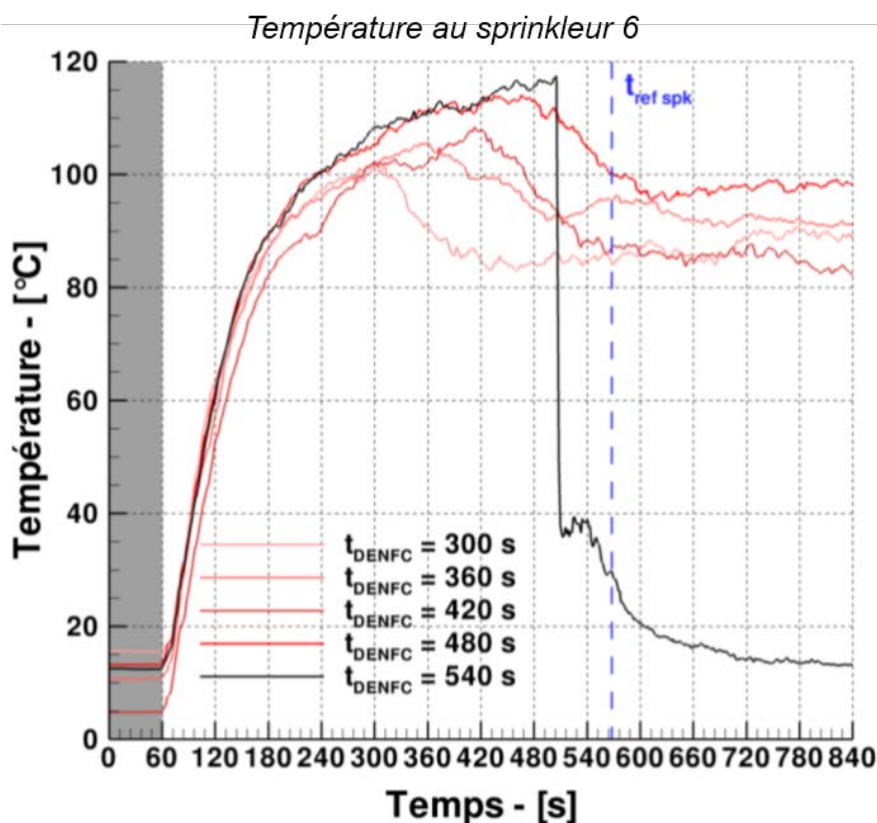


FIGURE 2.10 – Évolution de la température mesurée à proximité du sprinkleur 6 pendant les essais avec ouverture du désenfumage préalable au déclenchement de l’aspersion (HRR = 400 kW).

Ensuite, trois temps d’ouverture du désenfumage ont été utilisés : 0 s (2 essais), 60 s (2 essais) et 120 s (3 essais). Les temps d’activation du sprinkleur pour tous ces essais sont également reportés dans le tableau 2.7.

Contrairement à la série d’essais avec utilisation du foyer de 400 kW, le sprinkleur s’est toujours activé, quel que soit le temps de déclenchement du désenfumage.

Lorsque l’exutoire était ouvert pendant toute la durée de l’essai, l’activation du sprinkleur a eu lieu dans les deux cas après le temps de référence (un maximum de 67 s après le temps de référence). Au cours de ces essais, les températures maximales atteintes à proximité du sprinkleur étaient inférieures de plus de 20 °C aux températures mesurées lors des essais sans désenfumage. Après activation du foyer, la température augmente rapidement jusqu’à dépasser 100 °C après 60 s. En revanche, alors que la température continue à augmenter rapidement dans les essais sans désenfumage (40 °C supplémentaires en 2 min), cette augmentation est beaucoup plus modérée au cours de ces deux essais. L’exutoire étant ouvert, les fumées ne peuvent pas s’accumuler, ce qui limite l’élévation de température. Toutefois, les gaz s’écoulant autour du sprinkleur étant à une température nettement supérieure à celle de rupture de son élément sensible, ils parviennent à réaliser son déclenchement.

Lorsque l’ouverture de l’exutoire a été réalisée à $t_{DENFC} = 60 \text{ s}$ (soit une minute après

Essai	t_{DENFC} - [s]	t_{spk} - [s]
58	-	173
59	-	144
70	0	211
71	0	160
65	60	143
66	60	181
61	120	126
63	120	126
64	120	125

TABLEAU 2.7 – Liste des essais avec activation du désenfumage avant activation automatique du sprinkleur (foyer de 800 kW)

allumage du foyer), les temps d'activation du sprinkleur étaient similaires aux temps des essais sans utilisation de l'exutoire, tout en présentant également des niveaux de température inférieurs. Comme expliqué précédemment, il est probable que ces différences soient dues à la vitesse de l'écoulement autour de l'ampoule du sprinkleur. La vidange des fumées par l'exutoire crée un écoulement possédant une vitesse supérieure à celle des gaz se propageant sous le plafond lorsque l'exutoire est fermé. Cette différence de vitesse compense l'écart de température entre les deux séries d'essais et explique que les temps d'activation des sprinkleurs soient similaires.

Enfin, pour un déclenchement du DENFC à $t_{DENFC} = 120$ s (20 s avant t_{ref}), l'activation du sprinkleur a eu lieu moins de 10 s plus tard, dans tous les essais. Lors de ces essais, l'élévation de température dans le local est très rapide. Au moment où l'aspersion se déclenche (environ 2 min après allumage du foyer), la température est près de 150 °C à proximité du sprinkleur. De nouveau, l'ouverture de l'exutoire est responsable de la création d'un écoulement de vidange des fumées. Plus l'exutoire est ouvert tardivement, plus le gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment (moteur du tirage thermique) est élevé. La conjonction de niveaux de température élevés et d'une augmentation de la vitesse de l'écoulement est alors responsable de l'activation du sprinkleur avant t_{ref} .

2.3.2 Influence du désenfumage sur les niveaux de température et la visibilité

La seconde partie de cette étude expérimentale est dédiée à l'analyse de l'influence du désenfumage sur les niveaux de température et de visibilité à l'intérieur d'un local, lorsqu'il est activé avant ou après déclenchement de l'aspersion. Pour réaliser cette partie de l'étude, il est important de pouvoir comparer les conditions entre les différents essais et de limiter le nombre de paramètres variables. Nous avons vu dans la partie précédente que le temps d'activation du sprinkleur peut varier fortement d'un essai à l'autre. Pour cette nouvelle série d'essais, il a donc été décidé de déclencher manuellement le sprinkleur à un temps constant.

Pour cela, une fois le sprinkleur installé et le réseau mis sous pression, un fin câble métallique est enroulé autour de l'élément sensible du sprinkleur. Au temps désiré et grâce à l'utilisation d'un jeu de poulies, une traction sur ce câble entraîne la rupture immédiate de l'ampoule, libérant

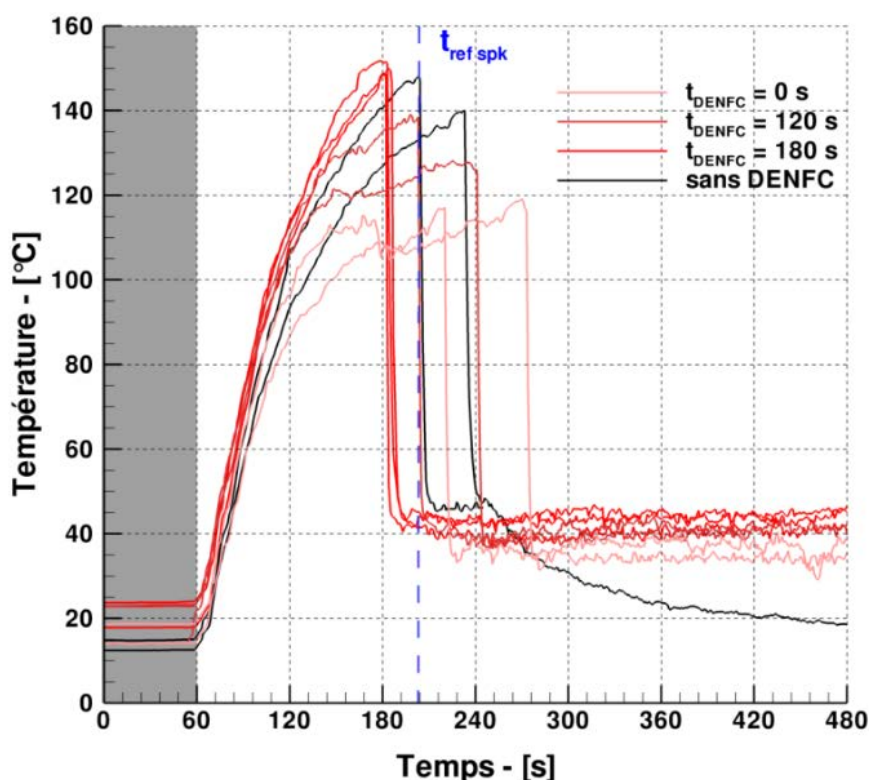


FIGURE 2.11 – Évolution de la température mesurée à proximité du sprinkleur 6 pendant les essais avec ouverture du désenfumage préalable au déclenchement de l'aspersion (foyer de 800 kW).

ainsi l'eau du réseau.

À la suite des premiers essais réalisés lors de cette campagne, il a été choisi d'activer le sprinkleur à $t_{spk} = 180$ s. A cet instant, une strate stable de fumées chaudes est déjà bien établie dans le local, comme on peut l'observer sur la figure 2.12. Grâce à l'utilisation de mires, la hauteur de l'interface entre la partie basse (libre de fumées) et la partie haute (enfumée) est estimée à 1.75 m. Il se trouve également que cet instant est proche du temps d'activation automatique du sprinkleur lors des essais réalisés avec le foyer de 800 kW.

Des essais ont tout d'abord été réalisés avec le foyer de 400 kW. L'exutoire a été ouvert à différents instants autour du temps d'activation du sprinkleur. Ces scénarios peuvent être regroupés en trois catégories :

- Désenfumage *avant* aspersion ($t_{DENFC} < t_{spk}$) : -120 s, -90 s, -60 s et -30 s ;
- Désenfumage et aspersion *simultanés* ($t_{DENFC} = t_{spk}$) ;
- Désenfumage *après* aspersion ($t_{DENFC} > t_{spk}$) : 30 s, 60 s, 90 s et 120 s.

Deux essais supplémentaires ont été conduits avec le foyer de 800 kW, l'un avec ouverture de l'exutoire 60 s *avant* aspersion, l'autre, 60 s *après*.



FIGURE 2.12 – Observations de la stratification des fumées à 180 s pour HRR = 400 kW (à gauche) et HRR = 800 kW (à droite).

Analyse de la visibilité d'après les observations vidéos

Sur la figure 2.13 sont reportées des captures des vidéos de certains essais. À chaque colonne est associé un essai avec un temps de déclenchement du désenfumage particulier. La première et la seconde colonne correspondent aux essais avec activation du désenfumage 60 s et 30 s avant aspersion. La troisième colonne correspond à un essai avec activation simultanée du désenfumage et de l'aspersion. Les deux colonnes suivantes présentent les essais avec ouverture de l'exutoire 30 s et 60 s après aspersion. Enfin, un essai sans utilisation du désenfumage est présenté dans la dernière colonne.

Chaque ligne renvoie à un instant de l'essai, $t = 0$ s correspondant à l'allumage du foyer et $t = 180$ s au déclenchement de l'aspersion. Jusqu'à $t = 120$ s, les conditions sont identiques pour tous les essais et une stratification des fumées est observée. Après ce temps, des différences sont observables entre les différents scénarios.

- $t_{DENFC} < t_{spk}$: dans ces cas, une augmentation de la hauteur libre sous fumées est observée avant le déclenchement de l'aspersion. Cette augmentation est d'autant plus importante que l'ouverture du DENFC est précoce. Lors de l'activation du sprinkleur, un brassage des fumées se produit, conduisant à une destratification des fumées. Néanmoins, les fumées continuant à être extraites par le DENFC, cette destratification est limitée et les conditions de visibilité restent satisfaisantes 2 min après aspersion.
- $t_{DENFC} = t_{spk}$: lors du déclenchement simultané du désenfumage et de l'aspersion, la destratification des fumées est légèrement plus marquée que dans le cas précédent, le volume occupé par les fumées dans le local étant plus important. Toutefois, la visibilité est conservée en partie basse durant le reste de l'essai malgré la présence plus importante de fumées diffuses.
- $t_{DENFC} > t_{spk}$: lorsque le DENFC est ouvert après activation du sprinkleur, la destratification est nettement plus importante et les fumées envahissent rapidement la partie basse du local au moment du déclenchement de l'aspersion. Après 2 min d'aspersion et malgré l'ouverture du DENFC, la visibilité n'est toujours pas retrouvée en totalité. Plus le temps entre l'activation du sprinkleur et l'ouverture de l'exutoire est long, plus la perte de visibilité est importante.
- Sans désenfumage : Les fumées ne peuvent s'évacuer que par la partie haute de la porte servant d'arrivée d'air. La visibilité ne fait que diminuer jusqu'à devenir nulle à 300 s.

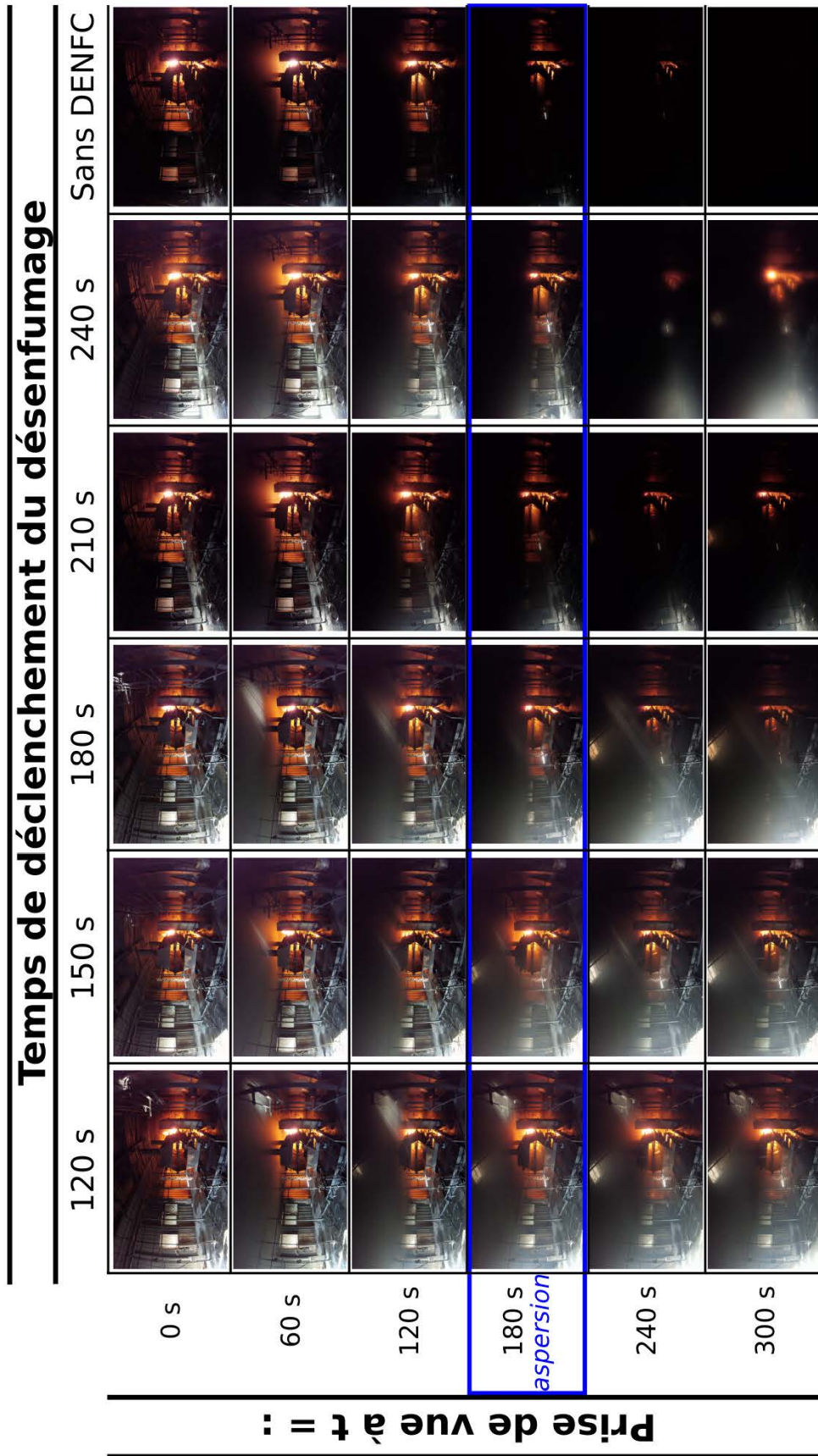


FIGURE 2.13 – Comparaison de la visibilité pour différents temps d’activation du DENFC ($HRR = 400 \text{ kW}$).

Les mêmes observations ont été faites lors des deux essais réalisés avec le foyer de 800 kW. De nouveau, des captures des vidéos de ces essais sont reportées sur la figure 2.14.

- Lorsque le désenfumage est réalisé 1 minute *après* aspersion, la destratification engendrée par le spray fait chuter la visibilité dans le local. Le foyer, malgré ses dimensions, n'est absolument pas visible à travers les fumées. Après ouverture de l'exutoire, la visibilité revient peu à peu mais reste fortement pénalisée 3 minutes après déclenchement du sprinkleur.
- Lors d'une ouverture du DENFC 1 minute *avant* activation du sprinkleur, de bonnes conditions de visibilité sont maintenues en partie basse du local et ce jusqu'à la fin de l'essai.

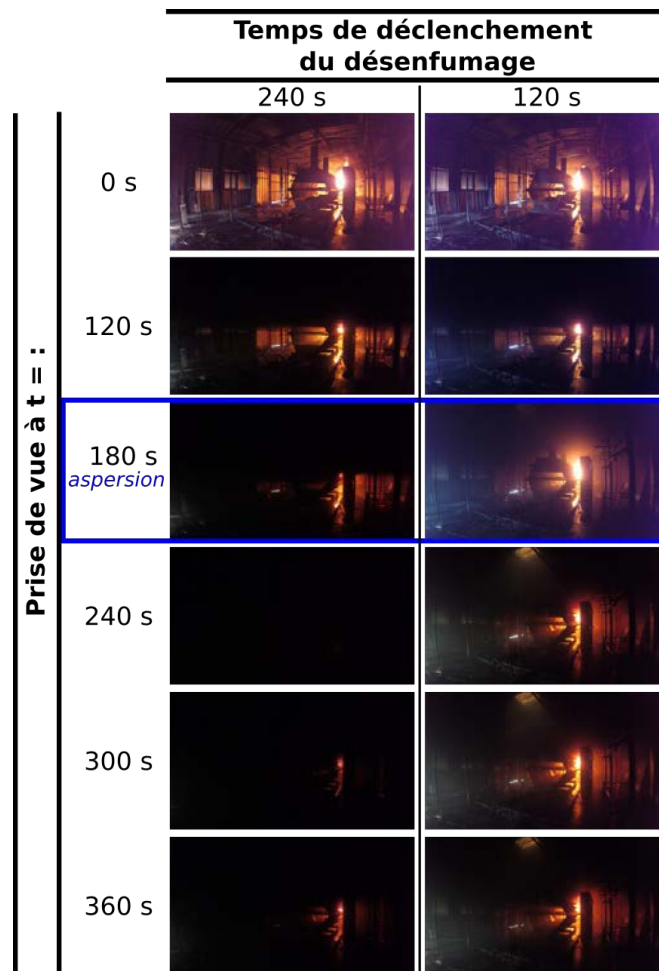


FIGURE 2.14 – Comparaison de la visibilité pour deux temps d'activation du DENFC différents ($HRR = 800 \text{ kW}$). À gauche : désenfumage après aspersion. À droite : désenfumage avant aspersion.

Analyse de la hauteur libre de fumée

Des données quantitatives de l'évolution de la hauteur de l'interface entre les fumées chaudes et l'air plus frais sont présentées sur la figure 2.15. Ces données sont obtenues par analyse des images d'une caméra observant une mire positionnée au centre du bâtiment. Trois scénarios sont analysés :

- $t_{DENFC} = t_{spk} - 60$ s (essai 52, en orange) ;
- $t_{DENFC} = t_{spk} + 60$ s (essai 41, en bleu) ;
- sans désenfumage (essai 42, en rouge).

La mire faisant 2.5 m de haut, aucune donnée sur la position de l'interface n'est disponible avant que la fumée n'atteigne cette hauteur. À partir de 50s, les premières fumées sont observables au sommet de la mire. Au fur et à mesure que les fumées emplissent le bâtiment et jusqu'à 120s, la hauteur de l'interface diminue de la même manière dans les trois scénarios, ce qui atteste de la bonne répétabilité des essais. À 120s, l'interface est estimée à 1.75 m et l'ouverture de l'exutoire est réalisée dans l'un des essais. On constate alors une remontée de la hauteur de l'interface. Elle atteint 2 m lors de l'activation de l'aspersion 60 s plus tard. Dans les autres scénarios, les fumées continuent de s'accumuler dans le local et la hauteur de l'interface diminue progressivement. Lorsque le sprinkleur se déclenche à 180s, la strate de fumées chaudes descend jusqu'à 1.5 m du sol dans ces essais, l'exutoire étant toujours fermé.

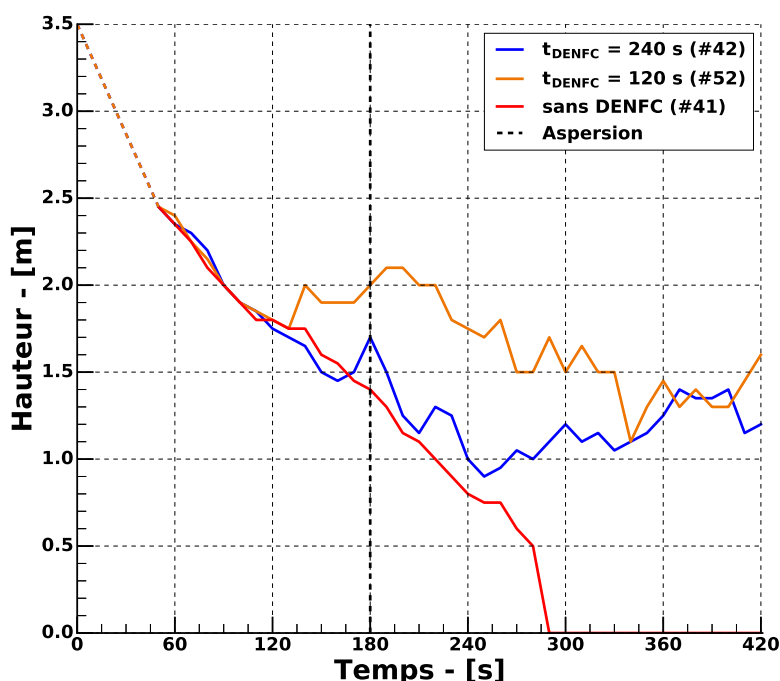


FIGURE 2.15 – Estimation de l'évolution de la hauteur libre de fumée pour 3 scénarios différents (foyer de 400 kW).

À 240 s, alors que l'aspersion est active depuis une minute, l'exutoire est finalement ouvert dans l'essai 41. À cet instant, l'interface de fumée est estimée à 1 m du sol. Cette action a pour conséquence une remontée progressive de l'interface, jusqu'à atteindre près de 1.5 m après 360 s. Dans l'essai où l'exutoire a été ouvert avant l'aspersion, le déclenchement du sprinkleur a été suivi d'une diminution progressive de la hauteur libre, jusqu'à tendre également vers une valeur proche de 1.5 m

S'il semble qu'aux temps longs l'interface entre les fumées chaudes et l'air plus frais se stabilise aux alentours d'une valeur commune, le chemin suivi pour y arriver est sensiblement différent.

Lorsque le désenfumage est activé avant l'aspersion, on constate une remontée de cette interface puis une diminution progressive jusqu'à atteindre la hauteur stationnaire. Lorsque l'exutoire est ouvert, le gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment est maximal. Les fumées sont alors évacuées à un débit relativement élevé. Cette évacuation de chaleur a pour conséquence une réduction des niveaux de température à l'intérieur du local. Couplé au déclenchement de l'aspersion et au refroidissement induit par le spray, le tirage thermique diminue progressivement, jusqu'à atteindre l'état stationnaire. Au contraire, lorsque le désenfumage est activé après l'aspersion, la hauteur libre de fumée va descendre jusqu'à un niveau plus bas (1 m du sol) avant de remonter très progressivement et de tendre vers ce même état stationnaire.

Dans le scénario sans désenfumage, la hauteur libre de fumée diminue progressivement depuis l'allumage du foyer jusqu'à un peu moins de 300 s. À partir de cet instant, la mire n'est plus visible.

Analyse des profils de température

Comme vu au chapitre 1, la stratification est induite par la différence de température (et donc de masse volumique) entre les fumées chaudes et l'air frais. Les profils de température déterminés au niveau de l'arbre de thermocouples le plus éloigné du foyer sont tracés sur la figure 2.16. Ces profils proviennent des trois essais présentés précédemment.

Sur chacune des figures, les cercles bleus correspondent aux températures mesurées lors de l'essai avec ouverture de l'exutoire à 240 s (essai 42) et les triangles oranges sont associés à l'essai avec déclenchement du désenfumage à 120 s (essai 52). Enfin, les carrés rouges représentent les mesures de température effectuées lors de l'essai de référence sans désenfumage (essai 41). Pour rappel, lors de ces trois essais, l'aspersion est déclenchée manuellement à 180 s.

Pendant les deux premières minutes, les conditions sont identiques dans les trois scénarios. La température ne fait qu'augmenter et une stratification thermique est observable. À 120 s les trois profils de température sont donc identiques. L'exutoire est alors ouvert dans l'un de ces essais.

À 180 s, lors de l'activation de l'aspersion, les profils de température issus des essais où l'exutoire est fermé sont toujours identiques alors qu'on note un refroidissement global au dessus de 1.25 m dans le cas où le désenfumage a été réalisé.

Une minute plus tard, on constate une diminution des températures mesurées dans les 3 essais. Ce refroidissement est lié à l'activation de l'aspersion. Les profils de température des deux essais où le désenfumage n'a pas eu lieu sont toujours identiques mais les températures sont moins élevées. Dans l'essai où le désenfumage a été déclenché avant aspersion, la température évolue quasi-linéairement avec la hauteur. Ces changements sont une conséquence du brassage lié à l'aspersion. À 240 s, l'exutoire est ouvert dans l'essai 42.

Entre 300 s et 480 s, le profil de température issu de l'essai avec ouverture de l'exutoire après aspersion se détache progressivement de celui de l'essai sans désenfumage, jusqu'à finalement se superposer à celui du scénario où l'exutoire a été ouvert le premier. Le profil de cet essai a atteint un état stationnaire vers 300 s et n'évolue plus jusqu'à la fin de l'essai.

Après 480 s, les profils ont des formes similaires mais dans le scénario sans désenfumage, les températures sont toutes supérieures, quelle que soit la hauteur.

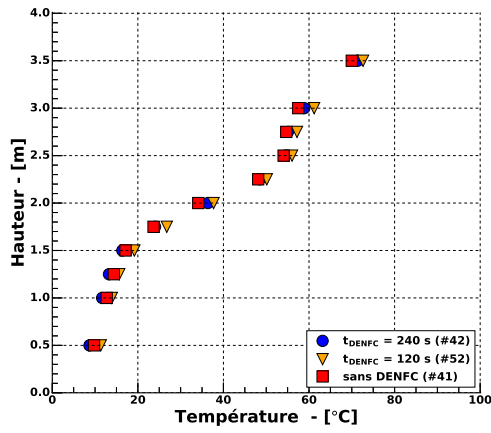
Pour analyser plus en détail l'évolution de ces températures, leurs variations sur des laps de temps d'une minute (pour ces mêmes essais) sont reportées sur les figures 2.17a à 2.17f. Sur chacune de ces figures, chaque barre d'histogramme correspond à la différence de température $T(t) - T(t - 60 \text{ s})$, pour une position de thermocouple le long de l'arbre.

Entre 60 s et 120 s, on constate bien une augmentation de température identique entre les essais. Entre 120 s et 180 s, on peut observer que le désenfumage a eu pour conséquence une diminution de température à mi hauteur et a contribué à limiter l'élévation de température en parties haute et basse du local. Dans les essais où l'exutoire est resté fermé, les températures n'ont fait qu'augmenter, quelle que soit la hauteur.

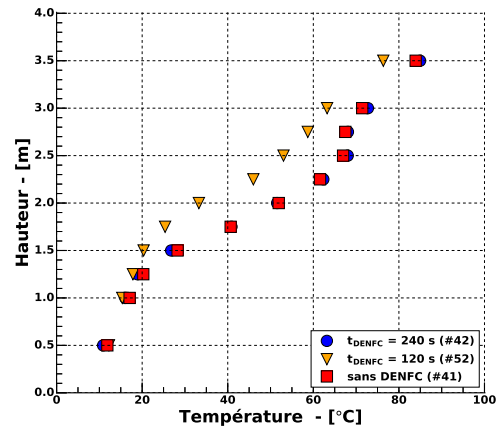
Après activation du sprinkleur, la température diminue fortement au dessus de 1.5 m dans les trois scénarios. On peut toutefois noter que le refroidissement est plus efficace en partie haute du local dans l'essai où l'exutoire a été ouvert préalablement au déclenchement de l'aspersion. En dessous de 1.5 m, la température continue d'augmenter dans les deux autres essais. Cette élévation de température en partie basse est liée au brassage des fumées chaudes causé par le sprinkleur. Le désenfumage ayant permis d'évacuer une grande quantité de fumées et de chaleur avant l'activation de l'aspersion, les effets thermiques de ce brassage sont réduits et on ne constate pas d'élévation de température lors de l'essai 52.

L'ouverture de l'exutoire après aspersion entraîne une forte diminution de température. Cette diminution est d'autant plus importante que l'on se trouve proche du plafond. Cela coïncide avec les observations faites sur la courbe 2.16d. Le profil de température de l'essai 52 ne va quasiment plus évoluer jusqu'à la fin de l'essai tandis que progressivement, celui de l'essai 42 va s'en rapprocher jusqu'à être identique à 480 s. Ce constat peut être fait en observant les figures 2.17e et 2.17f : les variations de température dans les trois essais tendent à se réduire, pour aboutir à un état stationnaire après 480 s.

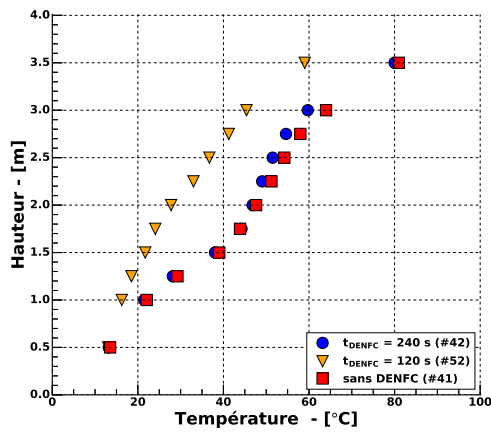
Des comportements similaires sont observés lors des essais réalisés avec le foyer de 800 kW. Les profils de température issus de deux scénarios différents sont reportés sur les figures 2.18a à 2.18d. Comme précédemment, les mesures proviennent de l'arbre de thermocouple le plus éloigné du foyer. Sur ces figures, les triangles rouges sont associés à un essai avec ouverture de l'exutoire 60 s avant aspersion (essai 57). Les cercles bleus correspondent aux données issues d'un essai



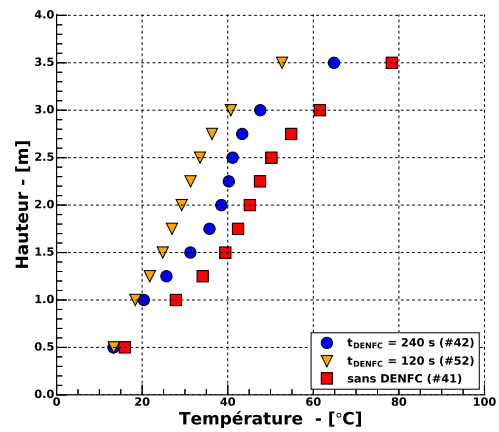
(a) $t = 120$ s



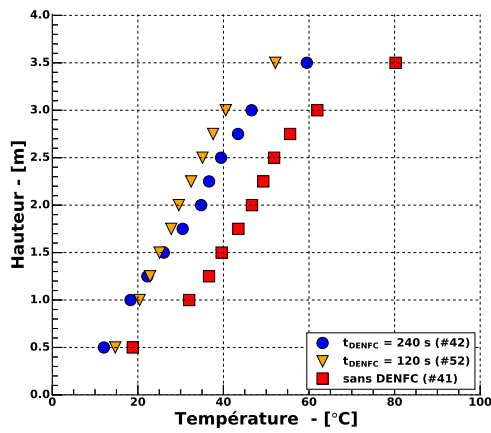
(b) $t = 180$ s



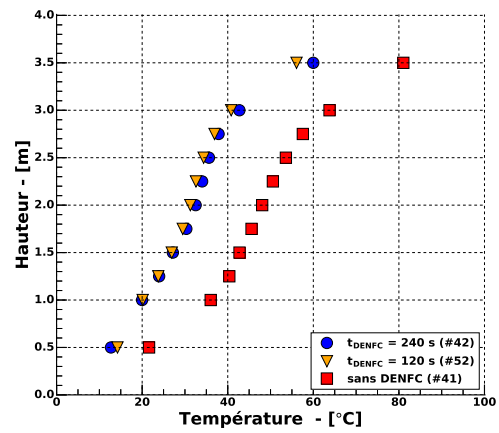
(c) $t = 240$ s



(d) $t = 300$ s



(e) $t = 360$ s



(f) $t = 480$ s

FIGURE 2.16 – Profils de température à différents instants pour 3 scénarios. En bleu : ouverture de l'exutoire 60s après aspersion. En orange : ouverture de l'exutoire 60s avant aspersion. En rouge : essai sans désenfumage.

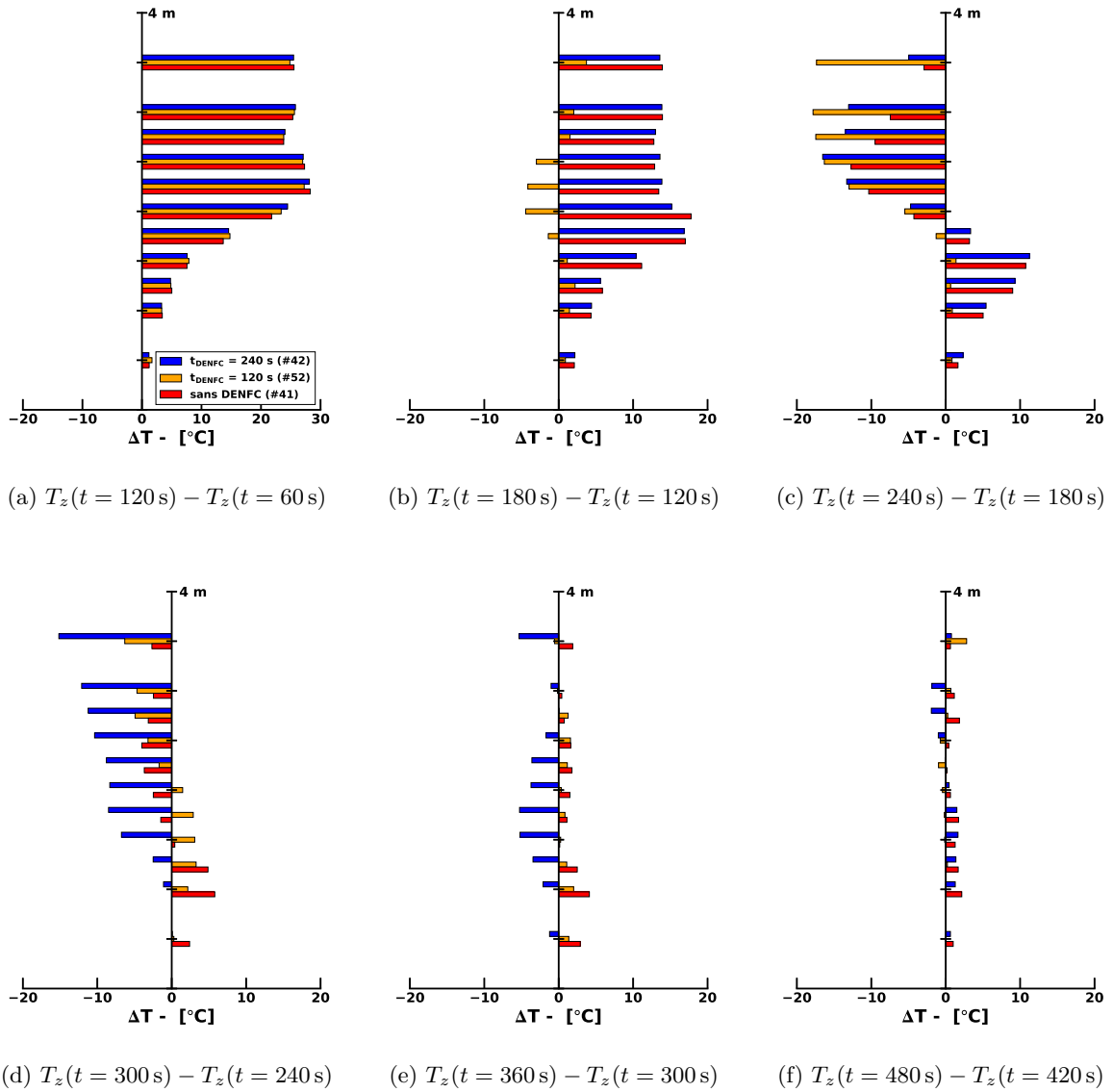


FIGURE 2.17 – Visualisation des variations de température dans les 3 scénarios présentés en figure 2.16. Les barres d’histogrammes représentent la différence $T(t) - T(t - 60 \text{ s})$ à plusieurs instants successifs de $t = 120 \text{ s}$ à $t = 480 \text{ s}$. Le sprinkleur se déclenche à $t = 180 \text{ s}$.

avec ouverture de l'exutoire 60 s après activation de l'aspersion (essai 56).

Dans un premier temps, les profils sont identiques (figure 2.18a). Ensuite, un refroidissement est observé lorsque l'exutoire est ouvert dans l'essai 57 (avant aspersion) alors que les températures continuent à augmenter dans l'essai 56 (figure 2.18b). Celles-ci atteignent alors plus de 60 °C à 1.5 m du sol lors du déclenchement de l'aspersion (pour rappel, dans les études ISI il est courant de considérer que lorsque la température à hauteur d'Homme (2 m) dépasse 40 °C, les objectifs de sécurité sont mis en défaut [53]).

Enfin, lorsque l'exutoire est ouvert dans l'essai 56, les températures diminuent jusqu'à atteindre un état stationnaire identique à celui de l'essai 57 après 480 s (figure 2.18d).

Ces résultats sont cohérents avec les observations réalisées en analysant les hauteurs de fumées à partir des enregistrements vidéos des essais. Aux temps longs, la hauteur de l'interface tend vers une valeur unique, quel que soit le chemin suivi. Si l'on se concentre uniquement sur ce paramètre pour déterminer la stratégie à adopter en situation d'incendie, il ne semble donc pas y avoir de différence. Toutefois, l'ouverture du désenfumage avant aspersion a permis de limiter la présence de fumées en partie basse du local après activation du sprinkleur. De plus, pour le foyer de 800 kW, le désenfumage précoce a permis de limiter l'élévation de température en partie basse. Ces deux paramètres pourraient être pénalisant pour l'évacuation de personnes.

Analyse de l'évolution des température avec le temps à différentes positions

En plus d'étudier la distribution des températures selon la hauteur, il est important d'observer l'évolution temporelle de ces températures à différentes positions clés, en fonction des scénarios.

Tout d'abord, intéressons nous aux températures aux points de mesures les plus hauts du local d'essais. Les températures mesurées à ces positions correspondent aux valeurs hautes atteintes par les fumées chaudes au cours des essais (en dehors de la zone de flamme et du panache du foyer).

Plus ces fumées seront chaudes, plus les contraintes thermiques auxquelles sont exposées les structures d'un bâtiment seront importantes. De plus, lors de l'activation de l'aspersion, ces fumées sont les premières à être entraînées vers la partie basse du local en conséquence du brassage créé par le spray. L'élévation des températures à hauteur d'Homme sera donc d'autant plus importante que les fumées présentes en partie haute seront chaudes. Enfin, si ces fumées chaudes se trouvent en contact avec un matériau combustible (suite à leur transport sous le plafond), il existe un risque qu'un nouveau foyer se déclare dans une zone initialement non impactée par le sinistre.

Sur les figures 2.19 et 2.20 sont reportées les températures mesurées à une hauteur de 3.5 m au niveau des arbres de thermocouples numéros 3 et 4 dans le cadre des essais réalisés avec le foyer de 400 kW. Les courbes bleues et rouges représentent les essais avec déclenchement du désenfumage avant et après aspersion. Chaque nuance de ces couleurs correspond à un scénario différent et est présentée dans la légende des figures. La courbe grise correspond à l'essai avec activation

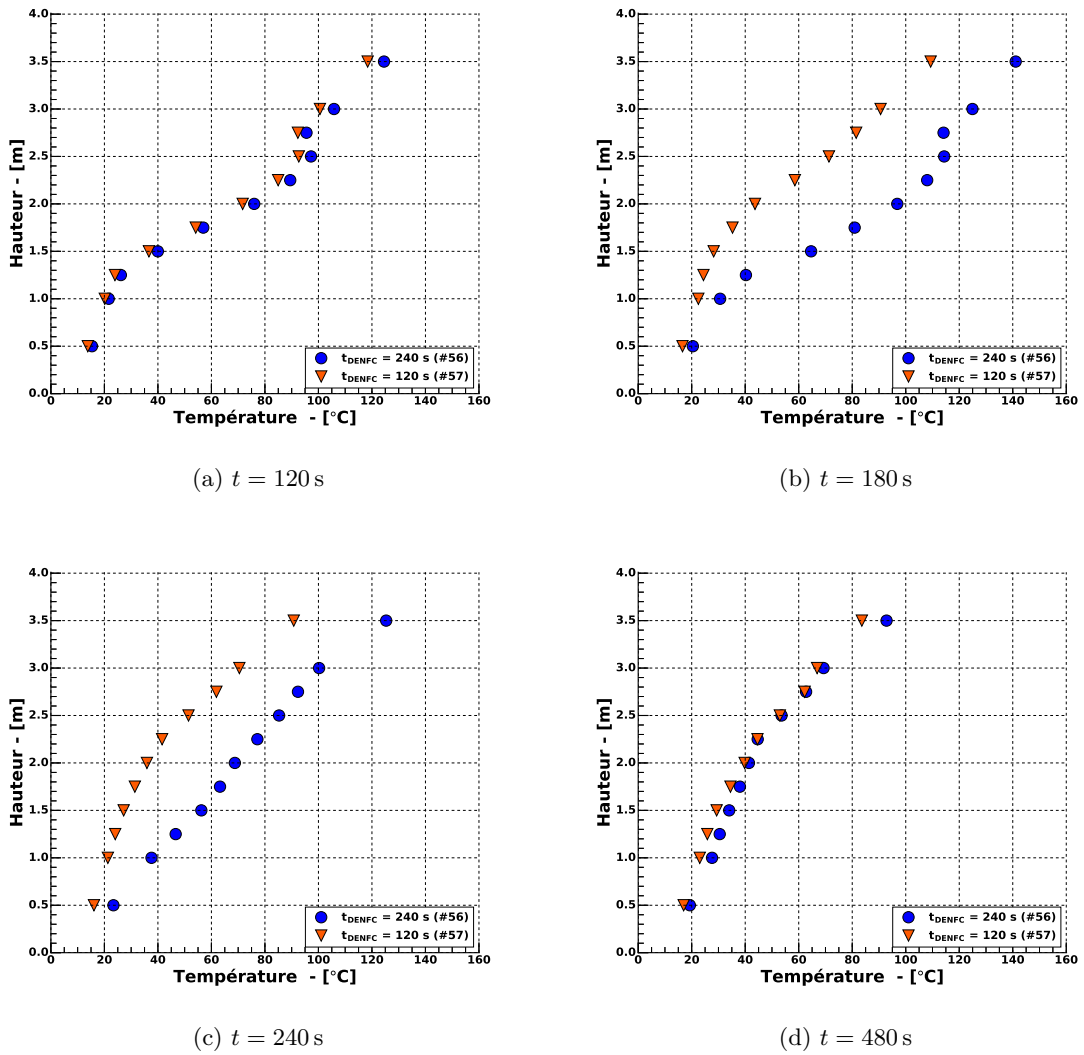


FIGURE 2.18 – Profils de température à différents instants pour 2 scénarios différents (foyer de 800 kW). En bleu : ouverture de l'exutoire 60 s après aspersions. En orange : ouverture de l'exutoire 60 s avant aspersions.

simultanée des deux dispositifs. La courbe noire représente l'évolution de la température lors d'un essai réalisé sans désenfumage. Enfin, la température mesurée lors d'un essai sans utilisation du désenfumage ni de l'aspersion est tracée en orange. Lors de cet essai le foyer s'est éteint avant 360s, très probablement par défaut d'oxygène. Au delà de cet instant, la courbe est représentée en pointillés.

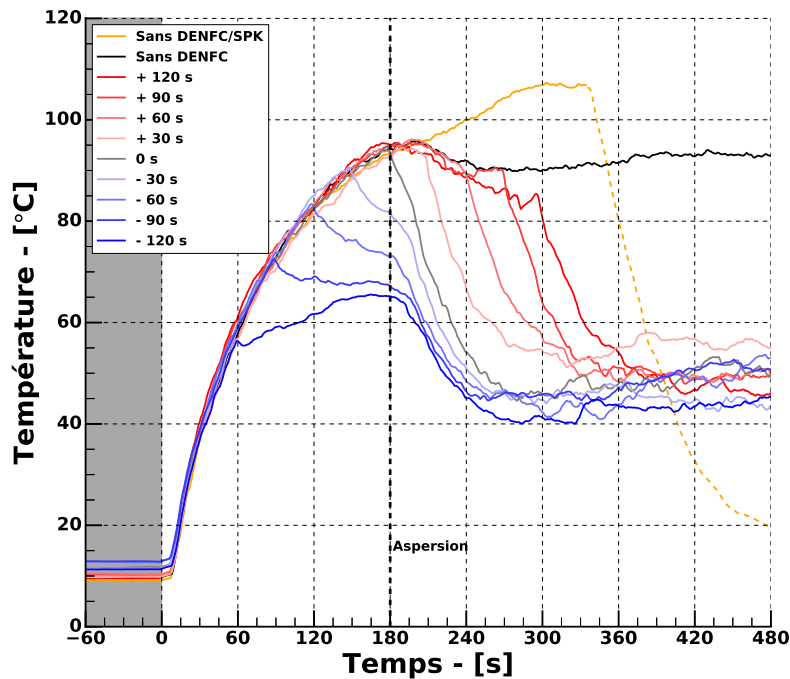


FIGURE 2.19 – Températures mesurées à 3.5 m du sol au niveau de l'arbre de thermocouples 3, pour différents temps de déclenchement du désenfumage (HRR = 400 kW). En bleu : ouverture de l'exutoire entre 60s et 150s. En rouge : ouverture de l'exutoire entre 210s et 300s. En gris : ouverture de l'exutoire à 180s. En noir : essai sans désenfumage. En orange : essai sans désenfumage ni aspersion.

Dans tous les essais, les évolutions des températures sont identiques les 60 premières secondes. Entre 60s et 180s, lorsque le désenfumage est déclenché, on note une diminution des températures mesurées au niveau de l'arbre 3. Cette diminution est d'autant plus rapide que l'exutoire est ouvert tardivement. Lorsqu'il est ouvert à 60s, la montée en température est fortement limitée mais on ne constate pas de refroidissement. Ce constat est fait également au niveau de l'arbre 4 pour tous les temps de déclenchement du désenfumage avant aspersion.

Le sprinkleur est ensuite activé à 180s. À cet instant, on constate une chute rapide des températures mesurées dans tous les essais où l'exutoire est ouvert, ainsi que dans l'essai avec déclenchement simultané de l'aspersion et du désenfumage.

Dans les autres essais, on observe une diminution progressive de la température à cette hauteur jusqu'à l'instant où l'exutoire est ouvert. Lorsque c'est le cas, la chute de température devient importante au niveau de l'arbre 3. Ces températures atteignent alors rapidement celles

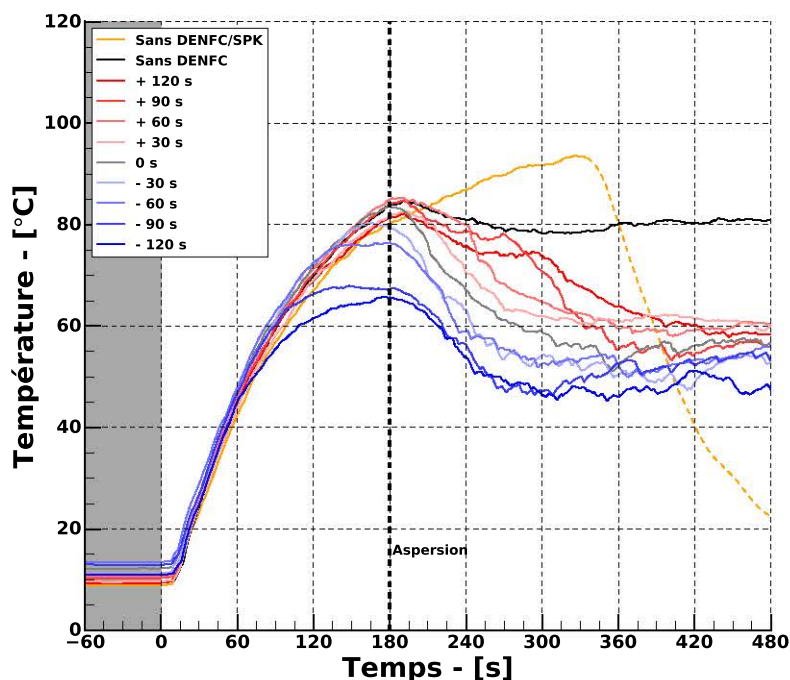


FIGURE 2.20 – Températures mesurées à 3.5 m du sol au niveau de l’arbre de thermocouples 4, pour différents temps de déclenchement du désenfumage (HRR = 400 kW).

des essais où l’exutoire était ouvert avant aspersion. Au niveau de l’arbre 4, le déclenchement du désenfumage après aspersion est également suivi d’une diminution de la température mais celle ci est moins marquée.

À partir de 480 s les températures de tous les essais ont atteint un état quasi-stationnaire. Au niveau de l’arbre 3, il n’y a plus de distinction nette entre les différents scénarios. Au niveau de l’arbre 4, les températures des fumées restent légèrement supérieures dans les essais avec ouverture de l’exutoire après aspersion.

En comparant la courbe noire de l’essai avec aspersion et sans désenfumage avec la courbe de l’essai sans utilisation d’aucun de ces systèmes, on peut constater que l’aspersion a permis de limiter l’élévation de température à la position des points de mesure. Toutefois, sans désenfumage, la pulvérisation d’eau n’a pas été en mesure de refroidir efficacement la partie haute et les niveaux de température sont restés élevés durant tout l’essai.

Les températures mesurées à 175 cm du sol et 100 cm du sol, au niveau de l’arbre de thermocouple 4 sont reportées sur les figures 2.21 et 2.22. Ces hauteurs sont caractéristiques d’un humain en position debout ou à genoux. Pour rappel, cet arbre est positionné à distance de la zone d’impact du spray du sprinkleur. Les mesures effectuées à ces positions ne sont donc pas perturbées par un éventuel dépôt de gouttes d’eau issues de la pulvérisation.

En comparant les résultats, on peut observer que l’utilisation du désenfumage a permis de

diminuer les températures mesurées ou, dans le pire des cas, de limiter leur élévation à ces hauteurs.

À 1.75 m du sol, lorsque l'ouverture de l'exutoire a eu lieu à 60 s et 120 s, l'élévation de température a été limitée jusqu'à l'aspersion. Après l'activation du sprinkleur, le brassage des fumées chaudes a causé une élévation des températures mesurées jusqu'à une valeur asymptotique d'environ 30 °C. Pour les autres essais, le déclenchement du désenfumage a été responsable d'une diminution de la température d'autant plus rapide que l'ouverture du DENFC a eu lieu à un temps rapproché de l'activation de l'aspersion. En dehors des essais avec désenfumage à 240 s et 300 s, l'état stationnaire commun (autour de 30 °C) est atteint approximativement à 360 s.

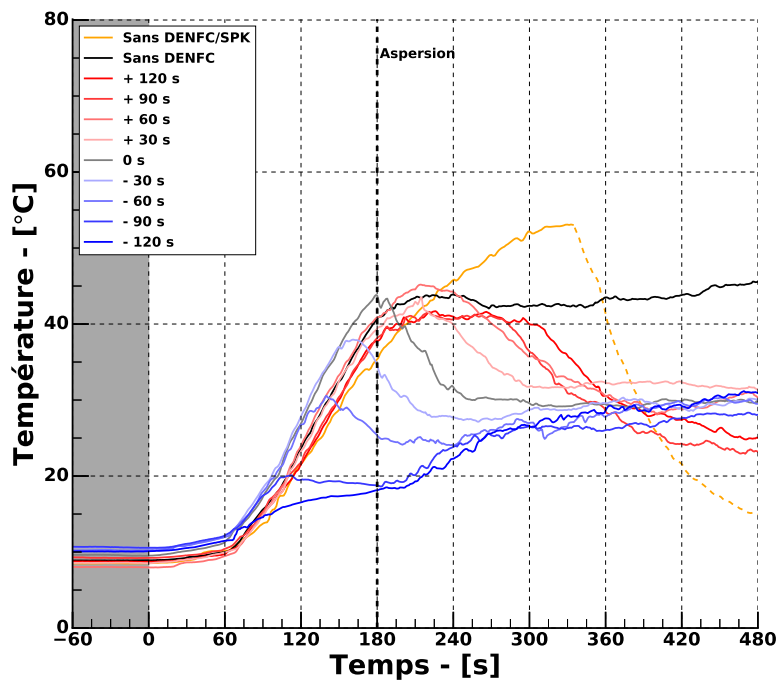


FIGURE 2.21 – Températures mesurées à 1.75 m du sol au niveau de l'arbre de thermocouples 4, pour différents temps de déclenchement du désenfumage (HRR = 400 kW).

À 1 m du sol, l'activation du désenfumage avant aspersion a permis de limiter à moins de 10 °C l'élévation de température. Lorsque l'exutoire a été ouvert après activation du sprinkleur, il a contribué à diminuer la température jusqu'à atteindre une valeur asymptotique (d'environ 20 °C) à 420 s, pour tous les essais. Pour les deux temps d'activation les plus tardifs, on peut noter qu'un retard de 30 s du temps de déclenchement du désenfumage a été responsable d'un décalage de près de 120 s dans l'établissement de l'état stationnaire. À cette hauteur et pour cette puissance de foyer, les variations de température sont très faibles mais des dynamiques sont tout de même observables.

Comme précédemment, deux essais réalisés avec le foyer de 800 kW sont maintenant présentés. Sur la figure 2.23 sont reportées les températures mesurées à différentes hauteurs lors de ces

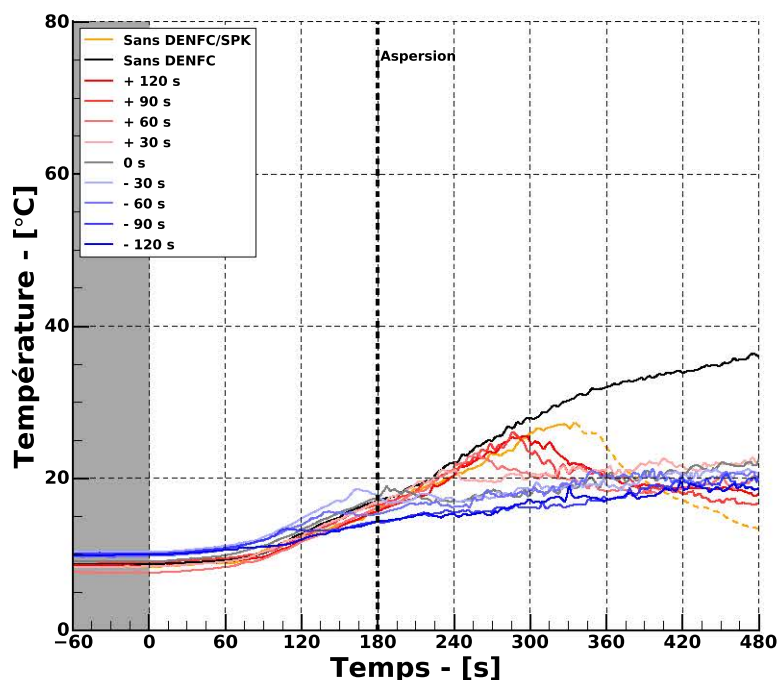


FIGURE 2.22 – Températures mesurées à 1.0 m du sol au niveau de l'arbre de thermocouples 4, pour différents temps de déclenchement du désenfumage (HRR = 400 kW).

deux essais. Les courbes bleues font référence à l'essai avec ouverture de l'exutoire à 240 s tandis que les courbes oranges sont associées à l'essai où le désenfumage a été déclenché à 120 s. Trois hauteurs différentes sont analysées : 3.5 m(cercles), 1.75 m(triangles) et 1.0 m(carrés).

Cette figure met en évidence les différences de dynamiques observables en fonction du scénario et de la hauteur dans le local.

À 120 s, la température atteint déjà 120 °C à 350 cm. L'ouverture de l'exutoire à cet instant dans l'un des scénarios a pour conséquence une diminution des températures mesurées à cette position (perte de 10 °C en une minute). Dans le second scénario, la température continue d'augmenter, jusqu'à atteindre plus de 140 °C lors du déclenchement de l'aspersion à 180 s. Une fois le sprinkleur activé, les températures chutent rapidement dans les deux scénarios. On peut toutefois constater que le refroidissement est légèrement plus efficace dans l'essai où l'exutoire était ouvert avant l'aspersion. La température diminue d'environ 20 °C en une minute contre un peu moins de 15 °C dans le cas où l'exutoire est encore fermé. Lorsque le désenfumage est enfin déclenché, on constate une accentuation du refroidissement jusqu'à atteindre un état stationnaire à environ 92 °C après 360 s. Dans le scénario où l'exutoire a été ouvert plus tôt, cet état stationnaire est observable à partir de 300 s à une valeur de température inférieure de 10 °C.

À 175 cm, la dynamique est légèrement différente dans l'essai avec ouverture de l'exutoire à 120 s. La température diminue après déclenchement du désenfumage, passant de 65 °C à 35 °C en une minute puis se stabilise autour de cette valeur jusqu'à la fin de l'essai. Dans le scénario

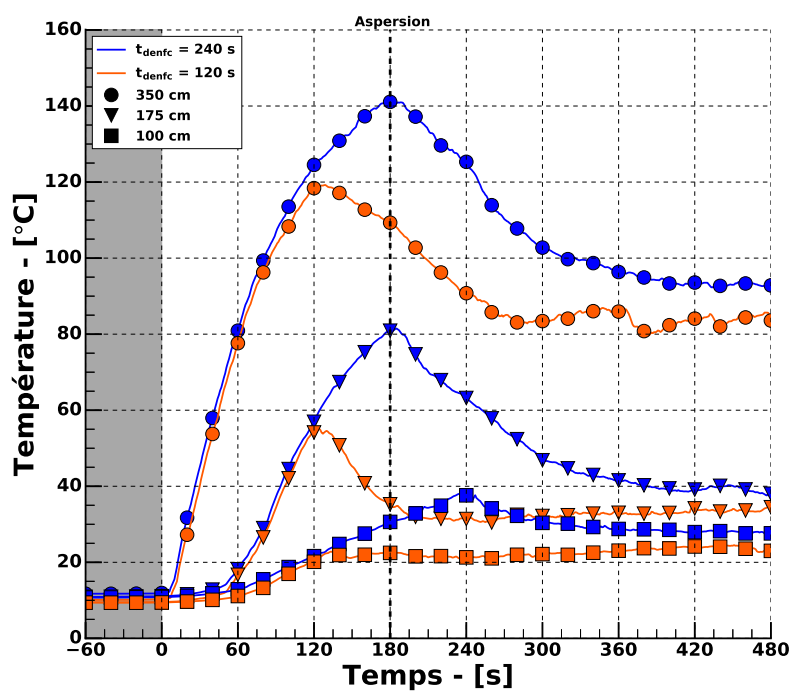


FIGURE 2.23 – Températures mesurées à 3.5 m, 1.75 m et 1.0 m du sol au niveau de l'arbre de thermocouples 4, pour deux temps de déclenchement du désenfumage (HRR = 800 kW).

où le désenfumage est ouvert après activation de l'aspersion, l'évolution de la température est qualitativement similaire à celle observée à 350 cm. La température commence à diminuer à partir de l'instant où l'aspersion est déclenchée et un état stationnaire autour de 40 °C est atteint à partir de 360 s.

Enfin, à 100 cm du sol, la dynamique d'évolution des températures est encore différente. L'ouverture du désenfumage avant le déclenchement de l'aspersion a limité l'élévation de température à un peu plus de 20 °C. Cette température va ensuite rester constante jusqu'à la fin de l'essai. Dans le scénario où l'exutoire est ouvert après aspersion, on observe une augmentation progressive de la température, jusqu'à atteindre près de 40 °C à 240 s. Contrairement aux deux autres hauteurs, le déclenchement du sprinkleur n'induit pas de refroidissement à cette position. Après ouverture de l'exutoire, la température diminue d'une dizaine de degrés en 2 minutes.

2.3.3 Synthèse des résultats expérimentaux

Les principaux résultats obtenus lors de cette première campagne expérimentale sont résumés ci-dessous.

Temps d'activation du sprinkleur

- L'ouverture de l'exutoire avant l'aspersion pour un foyer de faible puissance (400 kW) perturbe le déclenchement du sprinkleur qui ne s'est activé dans aucun essai ;
- Pour une puissance plus élevée (800 kW), le sprinkleur s'est toujours déclenché, sans retard significatif. Dans certains cas, le désenfumage a déclenché l'activation du sprinkleur.

Niveau de visibilité

- L'ouverture de l'exutoire avant l'aspersion permet de conserver un niveau de visibilité correct, même après déclenchement de l'aspersion ;
- L'ouverture de l'exutoire après l'aspersion permet d'améliorer la visibilité progressivement. Des fumées froides peu denses restent cependant présentes en partie basse.

Niveau de température

- L'ouverture de l'exutoire avant l'aspersion permet de limiter l'élévation de température à toutes les hauteurs ;
- L'ouverture de l'exutoire après aspersion permet de refroidir plus efficacement le local que lorsque l'aspersion est utilisée seule ;
- Aux temps longs, un état stationnaire de la température est atteint et ne dépend pas de la stratégie employée, lorsque les deux systèmes sont utilisés conjointement ;
- Les niveaux de température dans le local sont plus élevés lorsqu'un seul des deux dispositifs est utilisé.

Les analyses et les conclusions qui peuvent être tirées afin de répondre aux interrogations de l'article de Beyler et Cooper seront présentées dans la conclusion de ce chapitre.

2.4 Étude numérique

Dans un document publié en 1996 faisant un état de l'art sur ces problèmes d'interactions, Person et Ingason [54] misaient sur le développement futur des simulations numériques pour apporter des réponses sur le sujet.

Vingt ans après cet article, les progrès réalisés tant au niveau de la technologie informatique que des modélisations des phénomènes liés au feu sont conséquents. Aujourd'hui, l'utilisation de codes de calculs numériques permettant de modéliser ces phénomènes est devenue courante dans le milieu de la sécurité incendie et est même prescrite dans le cadre d'études d'ingénierie. Des logiciels CFD (Computational Fluid Dynamics) sont employés quotidiennement à l'échelle nationale et internationale dans le cadre d'études de désenfumage ou des reconstitutions de sinistres. Parmi ces logiciels, le plus fréquemment utilisé est probablement Fire Dynamics Simulator (FDS), développé par le NIST et employé dans le cadre de notre étude.

Comme présenté dans le premier chapitre de ce document, de nombreuses études expérimentales ont été menées depuis les années 50 sur le sujet des interactions entre sprinkleurs et désenfumage. Bien que parfois très complètes, ces études étaient toujours limitées par le coût financier que représente la réalisation d'essais à grande échelle. De fait, la principale lacune reportée par Beyler et Cooper dans leur article était la faible répétabilité des essais réalisés.

La modélisation des essais réalisés lors des campagnes expérimentales permet de créer un nouveau cas de validation pour l'utilisation de FDS. De plus, l'outil numérique rend possible l'accès à des données non mesurables expérimentalement (par raison de coût et/ou d'impossibilité technique), telles que les quantités de chaleur et de matière extraites par les exutoires.

2.4.1 Préparation des simulations numériques

2.4.1.1 Local d'essais et conditions aux limites

Le local d'essais de cette première campagne expérimentale a été reproduit sur FDS et une vue est présentée sur la figure 2.24. Les propriétés thermiques des matériaux utilisées en données d'entrée dans les simulations sont reportées dans le tableau 2.8.

Matériaux	ρ - [kg·m ⁻³]	C_p - [kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	λ - [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
Acier	7800	0.45	50
Béton	2100	1	0.58
Béton cellulaire	350	1	0.12
Bois	500	2.5	0.1
Verre	2500	0.75	1

TABLEAU 2.8 – Propriétés thermiques des matériaux utilisées en données d'entrée des simulations FDS [4, 55]

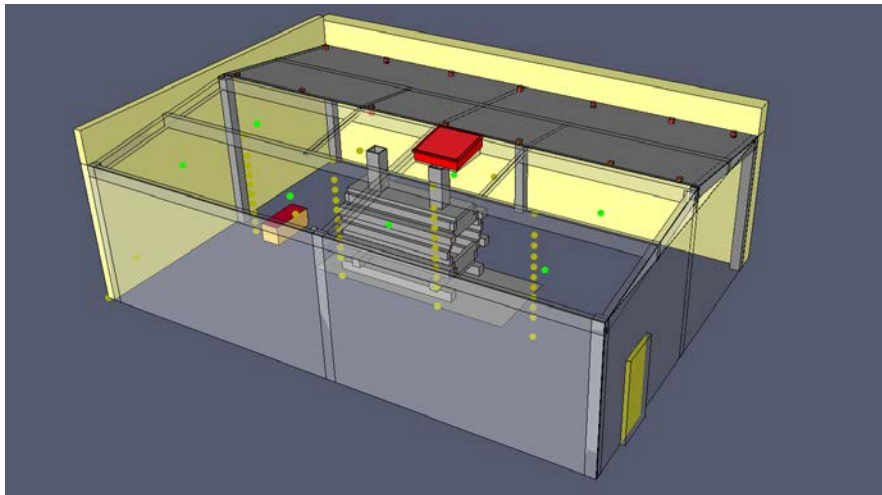


FIGURE 2.24 – Modèle numérique du local d'essais utilisé sur FDS.

Une analyse de paramétrique sur la conductivité thermique des matériaux a été réalisée. Trois cas ont été simulés. Dans les premières simulations, nous avons utilisé les valeurs de conductivité présentées dans le tableau précédent. Dans un second cas cette valeur a été doublée pour tous les matériaux. Enfin dans le dernier cas, la valeur de la conductivité a été divisée par deux. Les évolutions des températures à proximité du sprinkleur et dans la section de l'exutoire sont présentées sur les figures 2.25a et 2.25b, pour ces trois valeurs de conductivité thermique λ . On ne remarque pas d'influence significative de la conductivité sur les résultats obtenus à ces positions.

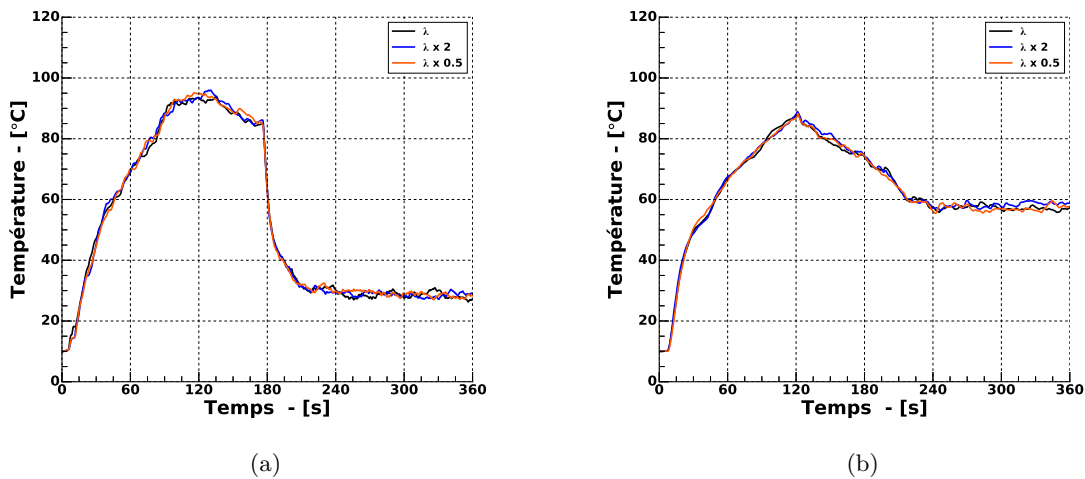


FIGURE 2.25 – Sensibilité de la conductivité thermique λ : température au niveau du sprinkleur (a) et dans l'exutoire (b)

L'évolution de la température au niveau de l'arbre de thermocouple 4, à trois hauteurs différentes est présentée sur la figure 2.26. Comme précédemment, on ne constate pas de différence notable dans les résultats en fonction de la conductivité thermique utilisée. La connaissance des conditions aux limites est très importante dans des applications en milieux confinés. Dans

notre cas, le volume du local d'essais semble suffisamment important pour qu'une connaissance approximative de ces conditions soit suffisante pour réaliser notre étude.

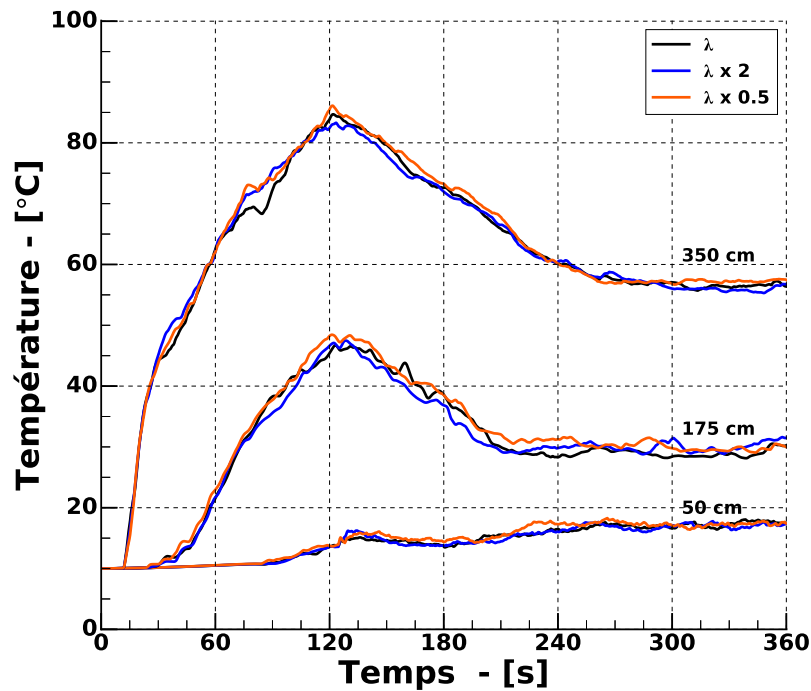


FIGURE 2.26 – Analyse de sensibilité à la valeur de la conductivité thermique λ : température à 350 cm, 175 cm et 50 cm au niveau de l'arbre de thermocouples 4.

A l'extérieur du bâtiment, des conditions aux limites *OPEN* sont utilisées. Ce type de surface correspond à une ouverture passive vers un milieu extérieur qui se trouve aux conditions ambiantes (définies par l'utilisateur). Au niveau de l'exutoire et de l'arrivée d'air, le maillage est prolongé de quelques mètres pour éviter que cette condition aux limites ne perturbe l'écoulement à travers ces ouvertures.

2.4.1.2 Maillage

L'étude de l'influence de la taille des mailles fait partie des premières analyses de sensibilité à mener. De manière générale, les mailles doivent être suffisamment petites pour que le degré de précision des résultats soit acceptable. En contre-partie, cette diminution en taille augmente le temps de calculs nécessaire à la réalisation d'une simulation. En fonction du type de phénomène étudié, un haut niveau de détail peut n'apporter qu'une infime amélioration dans la précision des résultats obtenus, nécessitant pour cela l'utilisation de moyens de calculs importants et pour une longue durée. Une analyse de sensibilité sur ce paramètre en début d'étude permet donc de déterminer les dimensions de mailles optimales pour obtenir un bon compromis entre temps de calculs et précision des résultats.

Une méthode employée couramment en ingénierie de sécurité incendie afin d'estimer, en première approche, une taille de maille raisonnable est d'utiliser la notion de diamètre caractéristique du foyer D^* défini par la relation 2.4.

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (2.4)$$

Dans cette expression, \dot{Q} est le *HRR* du foyer, g l'accélération de la pesanteur, ρ_∞ la masse volumique de l'air ambiant, T_∞ sa température et c_p sa capacité thermique.

À partir de cette valeur, il est courant [56] de considérer une valeur de taille de maille cubiques δx telle que :

$$4 < \frac{D^*}{\delta x} < 16 \quad (2.5)$$

Les bornes de cette inégalité peuvent être considérées comme générant, respectivement, un maillage grossier ou fin. Dans le cas de simulations utilisant un foyer de 400 kW, ces valeurs sont $\delta x_{min} = 4$ cm et $\delta x_{max} = 17$ cm. Pour la modélisation du foyer de 800 kW, ces bornes sont $\delta x_{min} = 5$ cm et $\delta x_{max} = 22$ cm. Une valeur fréquemment utilisée et offrant un bon compromis est $\delta x = 10$ cm. Afin de vérifier cela, des simulations faisant varier δx entre 5 cm et 20 cm ont été effectuées. Le tableau 2.9 répertorie les différentes caractéristiques des simulations menées dans le cadre de cette étude de sensibilité. En passant de mailles de 10 cm à des mailles de 5 cm, on multiplie le nombre de mailles par 8, faisant passer le temps de calculs d'un peu moins de deux jours à plus d'un mois.

Taille de maille δx - [cm]	Nombre de mailles	Temps de calculs - [h]
20	59 490	11
10	475 920	37
9	682 560	93
8	848 600	115
7	1 446 400	222
5	3 807 360	822

TABLEAU 2.9 – Caractéristiques des maillages utilisés lors de l'étude de sensibilité à la taille de maille.

Sur les figures 2.27a et 2.27b sont reportées les évolutions des températures calculées respectivement à 3.5 m du sol au niveau de l'arbre de thermocouples le plus proche du foyer et au niveau du sprinkleur, pour différentes tailles de maille. L'essentiel des écarts est observé avec les mailles de 20 cm. Si les résultats sont quasi-identiques à proximité du foyer pour toutes les autres tailles de mailles, on peut observer de légères différences de température et l'utilisation de mailles de 5 cm semble être à privilégier pour garantir la fidélité des résultats.

À titre de compromis, il a été décidé d'utiliser des mailles de 5 cm dans le maillage comprenant le foyer ainsi qu'au niveau du plafond et de l'exutoire, ceci afin d'avoir la description du panache

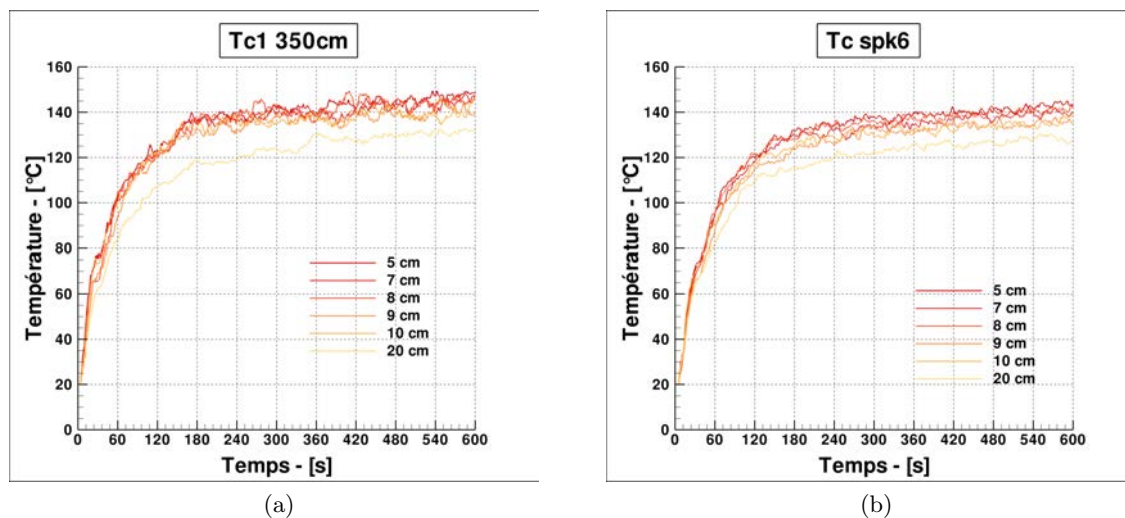


FIGURE 2.27 – Évolution de la température à 3.5 m à proximité du foyer (a) et au niveau du sprinkleur (b), pour différentes tailles de maille.

thermique la plus fine possible compte tenu des ressources informatiques disponibles. Ailleurs, et notamment en partie basse du local, des mailles de 10 cm sont utilisées.

2.4.1.3 Modélisation du système d'aspersion

La modélisation fine d'un spray est encore aujourd'hui un problème complexe. Une description complète nécessite des ressources de calculs importantes, s'accroissant avec le nombre de gouttes suivies et nécessitant des tailles de mailles relativement petites.

Pour représenter un spray, FDS utilise un modèle lagrangien où chaque particule ne représente pas une unique goutte mais un ensemble de gouttes. Une procédure de couplage permet ensuite de définir les propriétés moyennes du milieu gaz-gouttes. Cette méthode permet de réduire les temps de calculs de manière significative.

Comme présenté précédemment, l'évolution de la température d'un sprinkleur peut être calculée d'après l'équation 1.2. Cette équation est utilisée par FDS pour prédire le temps d'activation des sprinkleurs. Le RTI et le coefficient C caractérisant la dissipation de chaleur par conduction dans l'armature du sprinkleur sont renseignés en données d'entrée par l'utilisateur. Dans les simulations, nous avons utilisé une valeur de $RTI = 108 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{0.5}$ (donnée fournie par le constructeur des sprinkleurs) et de $C = 0.65 \text{ (m/s)}^{0.5}$ [57, 58].

Outre la possibilité de configurer les paramètres liés au temps de réponse du sprinkleur, il est également possible de définir les propriétés du spray lorsque le sprinkleur est déclenché. Tout d'abord, il est nécessaire de renseigner le débit d'eau injecté par chaque sprinkleur. Dans notre cas, ce paramètre est obtenu expérimentalement grâce à l'utilisation du débitmètre connecté au réseau sprinkleur. Dans les simulations présentées dans ce document, ce débit est pris égal à $110 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. Il faut ensuite gérer comment cette eau est délivrée par le sprinkleur. Par défaut,

les gouttes sont introduites dans le domaine de calculs à la surface d'une sphère de 5 cm de rayon (OFFSET), dont le centre correspond aux coordonnées du sprinkleur. Il est supposé qu'à cette position, la fragmentation du spray soit achevée et que les gouttes sont alors indépendantes les unes des autres. Pour déterminer la forme du spray, il est nécessaire d'indiquer les angles θ_1 et θ_2 entre lesquels les gouttes vont être introduites sur la surface de la sphère. Ces angles sont représentés sur la figure 2.28. Le choix de ce couple d'angle conditionne la répartition des gouttes dans l'espace, comme représenté sur les figures 2.29a et 2.29b. Sur ces figures sont visualisées les masses d'eau accumulées par unité de surface au sol du local d'essais pour deux jeux d'angles θ_1 et θ_2 . Dans les deux cas, un même volume d'eau a été injecté dans le local par un sprinkleur pendant 30 s. À l'issue des simulations, on constate que l'utilisation des angles $\theta_1 = 30^\circ$ et $\theta_2 = 80^\circ$ permet d'avoir une plus grande quantité d'eau distribuée au centre de la zone d'aspersion. Ce couple a été utilisé dans toutes les simulations réalisées dans cette étude. Il a été déterminé grâce aux données constructeurs ainsi que par des observations réalisées lors des essais préliminaires. Des simulations numériques supplémentaires faisant varier ces paramètres autour des valeurs choisies n'ont pas montré d'influence significative du choix des angles sur les résultats obtenus.

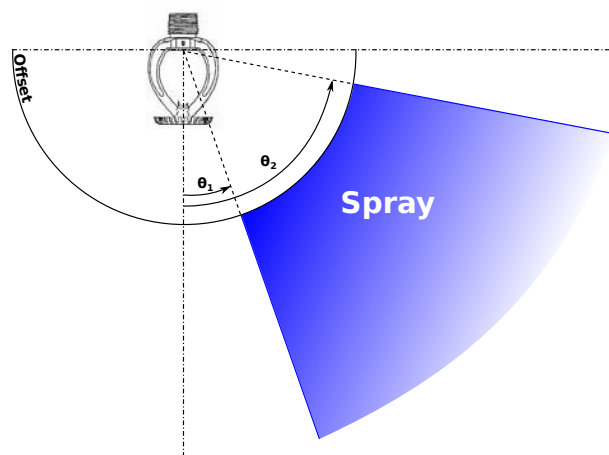


FIGURE 2.28 – Représentation des angles caractérisant la géométrie d'un spray de sprinkleur sous FDS

La fonction de distribution de tailles de gouttes utilisée dans le modèle de spray polydisperse de FDS est une combinaison d'une fonction de distribution log-normale et d'une fonction de Rosin-Rammler. Cette fonction hybride est définie par l'équation (2.6). Dans notre application, nous avons considéré un diamètre moyen $D_{v,50} = 800 \mu\text{m}$ et une déviation standard de la fonction de Rosin-Rammler $\gamma = 2.4$. La déviation de la fonction log-normale est calculée par FDS telle que $\sigma = \frac{1.15}{\gamma}$, afin d'avoir un raccordement lisse des deux fonctions à $D = D_{v,50}$. Les valeurs de ces paramètres sont issues des travaux de Sheppard [5].

$$F(D) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^D \frac{1}{\sigma D'} \exp\left(-\frac{[\ln(D'/D_{v,0.5})]^2}{2\sigma^2}\right) dD' & (D \leq D_{v,0.5}) \\ 1 - \exp\left(-0.693 \left(\frac{D}{D_{v,0.5}}\right)^\gamma\right) & (D > D_{v,0.5}) \end{cases} \quad (2.6)$$

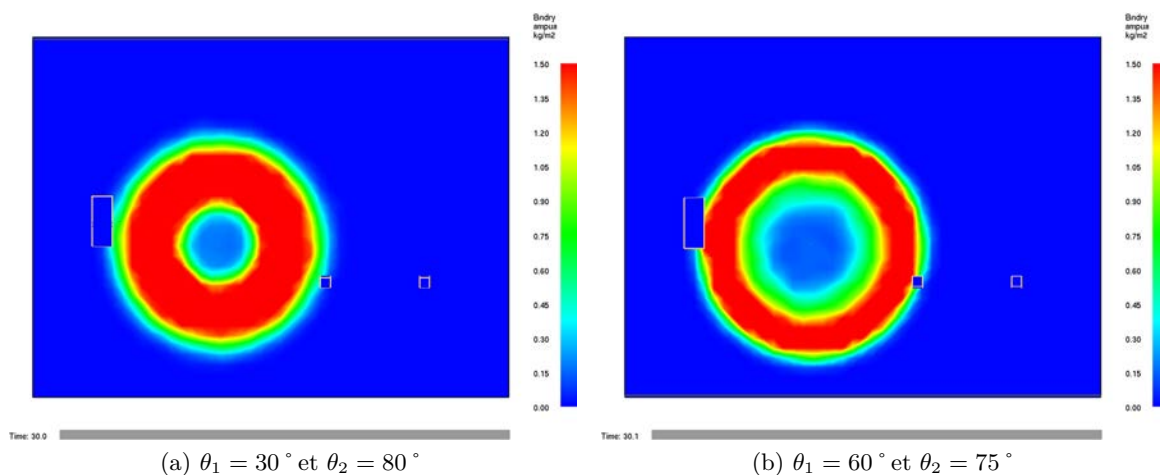


FIGURE 2.29 – Visualisation de deux empreintes de spray différentes pour un même débit d'eau.

Formule équivalente	ΔH_c - [kJ·kg ⁻¹]	Y_s - [g·g ⁻¹]	χ
C ₁₂ H ₂₃	42 200	0.05	0.8

TABLEAU 2.10 – Données d'entrée pour le modèle de combustion simple de FDS.

2.4.1.4 Foyer

Dans le cadre de notre étude, le foyer peut être assimilé à une source de chaleur et de suies. Cette représentation, bien que très simplifiée, permet de s'affranchir des problématiques de modélisation d'un spray de fioul et de sa combustion.

FDS permet de modéliser simplement ce type de foyer grâce à un modèle de combustion infiniment rapide, décrit dans [59]. Le brûleur est ainsi défini par un pavé dont la face supérieure, de 0.5 m de largeur pour 1.2 m de longueur, développe une puissance par unité de surface (HRRPUA ou Heat Release Rate Per Unit Area) exprimée en kW·m⁻². Les dimensions de cette surface ont été définies en se basant sur l'estimation visuelle du volume de flamme observé expérimentalement.

Les données physico-chimiques du fioul sont reprises des travaux de Jenft [4] et sont utilisées en données d'entrée. La formule chimique équivalente, la chaleur de combustion, la fraction massique de suies produites ainsi que le coefficient d'efficacité de la combustion sont reportés dans le tableau 2.10.

Comme on peut le voir sur la figure 2.30, le foyer atteint expérimentalement son régime nominal environ 1 s après allumage de la pompe. Numériquement, aucune fonction n'est donc introduite pour gérer la montée en puissance du foyer (comme cela serait le cas pour un bac) et les paramètres par défaut sont utilisés dans cette étude. Le foyer numérique atteint donc sa valeur nominale 1 s après le début de la simulation.



FIGURE 2.30 – Inflammation du spray de fioul (400 kW). De gauche à droite : $t = 0$ s (seule la flamme de propane est visible), $t = 0.4$ s, $t = 1.2$ s et $t = 2$ s

T_0 - [°C]	HR - [%]	P_0 - [Pa]	t_{denfc} - [s]	t_{spk} - [s]
10	80	1.0×10^5	120	180

TABLEAU 2.11 – Conditions expérimentales et temps d'activation du sprinkleur et du désenfumage lors de l'essai 52.

2.4.2 Cas de validation numérique

Dans cette partie, les résultats des simulations numériques de l'essai numéro 52 sont présentés et sont confrontés aux résultats expérimentaux. Pour rappel, lors de cet essai, le sprinkleur a été activé manuellement à 180 s et l'exutoire a été ouvert à 120 s. Le foyer de 400 kW est utilisé. Une validation graduelle a été réalisée afin d'aboutir à ces résultats (foyer seul, remplissage, remplissage/vidange, aspersion seule). Seuls les résultats de simulations totales sont présentées dans ce rapport.

Les conditions initiales de température, de pression atmosphérique et d'humidité relative à l'intérieur du bâtiment ont été mesurées lors de ces essais et sont utilisées en données d'entrée dans les simulations numériques. Ces conditions sont reportées dans le tableau 2.11.

Comme évoqué précédemment, l'objectif des simulations numériques est de pouvoir accéder à des grandeurs ne pouvant pas être déterminées expérimentalement, telles que la chaleur ou la concentration de suies extraites par l'exutoire au cours d'un essai. Ces grandeurs peuvent être directement obtenues comme données de sorties des simulations réalisées sur FDS. Toutefois, n'ayant pas de point de comparaison avec l'expérience pour ces grandeurs, il revient à l'utilisateur de s'assurer de la validité de ces résultats.

Pour s'assurer de cela, des confrontations entre les résultats des simulations numériques et ceux obtenus expérimentalement sont faites sur des mesures clés. Ces mesures sont, par exemple, les niveaux de températures en partie haute et basse du local et à différentes positions dans le local. Les températures au niveau du sprinkleur et dans la section de l'exutoire sont également des points de comparaisons intéressants pour la validation numérique.

Température à 350 cm au niveau de l'arbre 1 Le premier point de comparaison est la température à proximité du foyer, à 350 cm du sol au niveau de l'arbre de thermocouples 1.

L'évolution de cette température est représentée sur la figure 2.31.

Rapidement après allumage du foyer et jusqu'au déclenchement du désenfumage, la température calculée par FDS surestime de quelques degrés la température mesurée. Quelques secondes après l'ouverture de l'exutoire, la température calculée par FDS chute brutalement d'une quinzaine de degrés centigrades. Expérimentalement, cette chute de température n'est pas observée. On constate plutôt une stabilisation de la température à 110 °C jusqu'au déclenchement de l'aspersion.

Après cet instant, on observe une diminution importante des températures en raison du refroidissement induit par le spray. Un état stationnaire est atteint après 300 s dans les deux cas. On note toutefois que la valeur de la température expérimentale reste supérieure d'une dizaine de degrés à celle calculée numériquement par FDS.

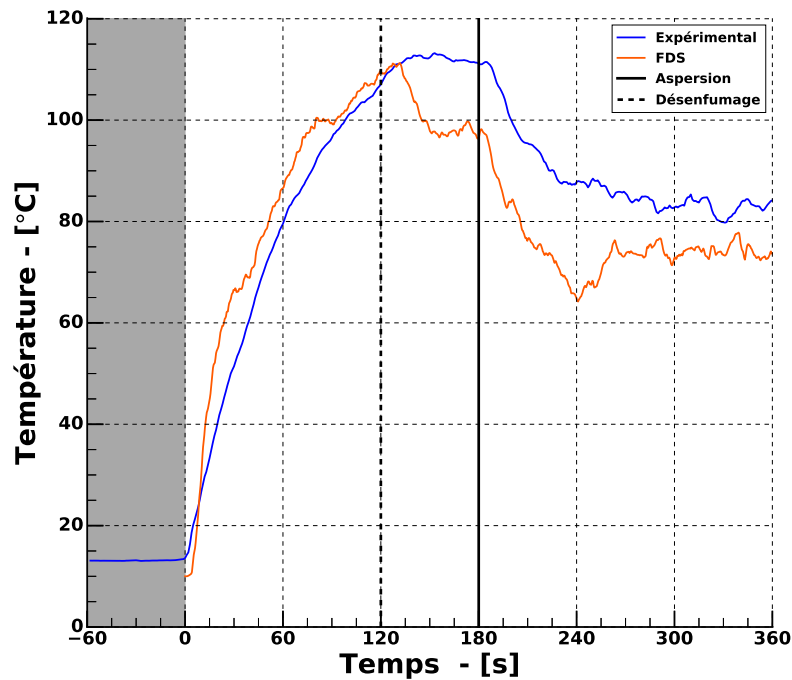
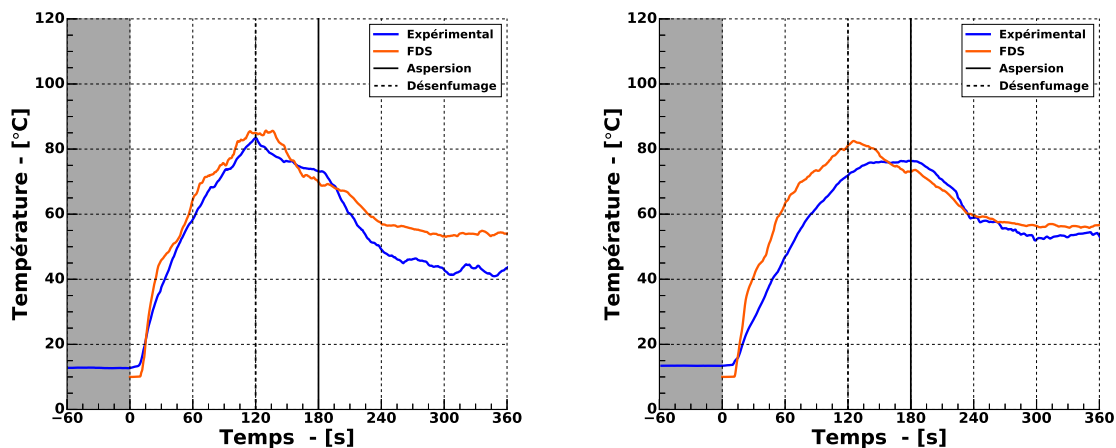


FIGURE 2.31 – Comparaison expérimental/numérique : Température à une hauteur de 350 cm au niveau de l'arbre 1.

En considérant les premiers instants (jusqu'au désenfumage) de la simulation, un bon accord est observé dans la dynamique de montée en température. Ensuite, FDS surévalue d'une dizaine de degrés le refroidissement produit par l'ouverture de l'exutoire. L'accord reste cependant tout à fait satisfaisant. Le refroidissement induit par l'aspersion est quant à lui bien reproduit. En effet, malgré un décalage provoqué par le refroidissement lié au désenfumage, les pentes des deux courbes sont similaires. Ces premiers résultats permettent de valider la puissance imposée numériquement à notre foyer.

Température à 350 cm au niveau des arbres 3 et 4 Les températures en partie haute du local, au droit de l'exutoire et au niveau de l'arbre de thermocouples 4 sont reportées sur les figures 2.32a et 2.32b. Au niveau de l'arbre 3, on constate un bon accord entre les résultats numériques et les mesures jusqu'au déclenchement du désenfumage. Ensuite, FDS semble sur-prédire légèrement le refroidissement provoqué par l'extraction des fumées chaudes mais les niveaux de température restent cependant similaires. Une fois l'aspersion activée, le refroidissement observé expérimentalement est plus important que celui prédit par FDS. À 360 s, la température calculée est supérieure de 10 °C à la température mesurée lors de l'essai.

Au niveau de l'arbre de thermocouples 4, les observations sont légèrement différentes. Entre le début de l'essai et le déclenchement du désenfumage, la température prédite par FDS est supérieure de près de 10 °C à celle observée expérimentalement. La température mesurée se stabilise vers 75 °C une fois l'exutoire ouvert. Le refroidissement prédit par FDS est plus important que celui observé expérimentalement. Lorsque l'état stationnaire est atteint, la différence de température entre numérique et expérimental est de l'ordre de quelques degrés.



(a) Arbre de thermocouple 3 (350 cm)

(b) Arbre de thermocouple 4 (350 cm)

FIGURE 2.32 – Comparaison expérimental/numérique : Température à 350 cm du sol au niveau des arbres 3 et 4.

Température au niveau du sprinkleur La température au voisinage du sprinkleur 6 est un second point de comparaison important dans notre étude. L'évolution de cette température est présentée sur la figure 2.33. Comme précédemment, on constate un bon accord entre les résultats numériques et les données expérimentales avant le déclenchement du désenfumage. L'élévation de température à cette position est observable au même instant expérimentalement et numériquement. La phase de croissance est ensuite parfaitement reproduite par FDS. De nouveau, on observe une légère sur-évaluation du refroidissement induit par l'ouverture de l'exutoire dans la simulation. La température calculée au voisinage du sprinkleur diminue tandis qu'expérimentalement, celle-ci reste constante jusqu'à la rupture de l'ampoule. Une fois le sprinkleur activé, la chute de température est instantanée dans les deux cas. Sur ce point particulier, bien que ce ne soit pas le cas sur cet exemple particulier, les différences entre FDS et les mesures peuvent

être très grandes. Expérimentalement, étant donné que le thermocouple se trouve très proche du sprinkleur, il est directement impacté par le spray. La température qu'il mesure est donc principalement celle de l'eau provenant du réseau hydraulique du CNPP (dont la température est assimilable à la température extérieure) et ayant cheminée quelques instants dans les canalisations du réseau sprinkleurs du bâtiment (exposées aux fumées chaudes). Numériquement, cette grandeur correspond à ce que mesurerait un thermocouple plongé dans un écoulement de fumées chaudes soudainement refroidies, sans qu'il n'y ait de dépôt de goutte sur l'élément de mesure. Les résultats peuvent donc être sensiblement différents.

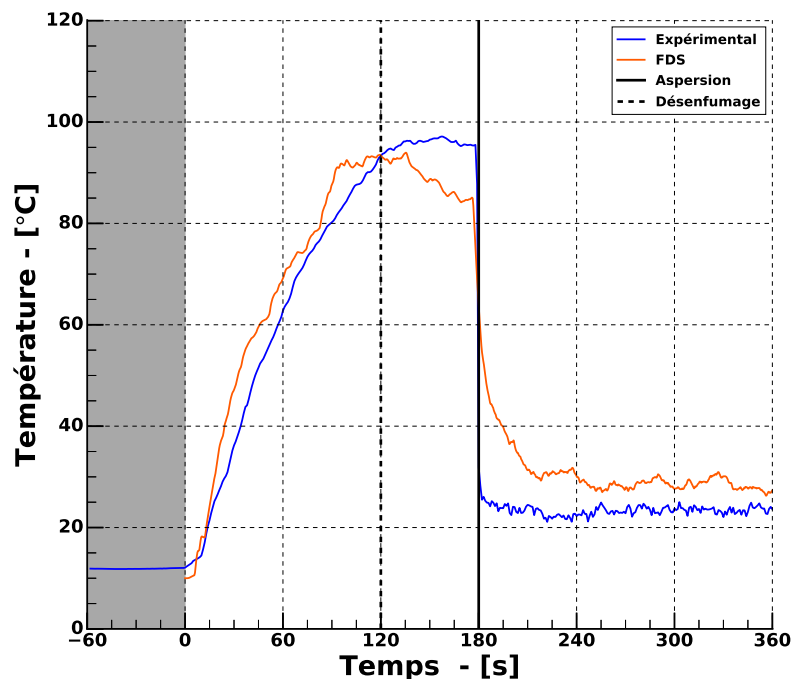


FIGURE 2.33 – Comparaison expérimental/numérique : Température au voisinage du sprinkleur 6.

Température dans l'exutoire On trace sur la figure 2.34 l'évolution de la température mesurée dans la section de l'exutoire, à mi-hauteur de la costière. Avant ouverture de l'exutoire, la température correspond à celle des gaz chauds accumulés au niveau de l'exutoire. Après son ouverture, un écoulement se forme et la température mesurée correspond alors à celle des gaz et fumées extraits du local.

Entre le début de l'essai et 240s (soit 1 minute après aspersions), l'écart relatif entre les valeurs numériques et expérimentales est inférieur à 10%. Lors de l'ouverture de l'exutoire, on note que les refroidissements sont similaires dans les deux cas et les niveaux de températures restent semblables jusqu'à la fin de l'essai.

L'évacuation de chaleur et de matière par l'exutoire est contrôlée par le tirage thermique et donc le gradient de température existant entre l'intérieur du bâtiment et le milieu extérieur. Un

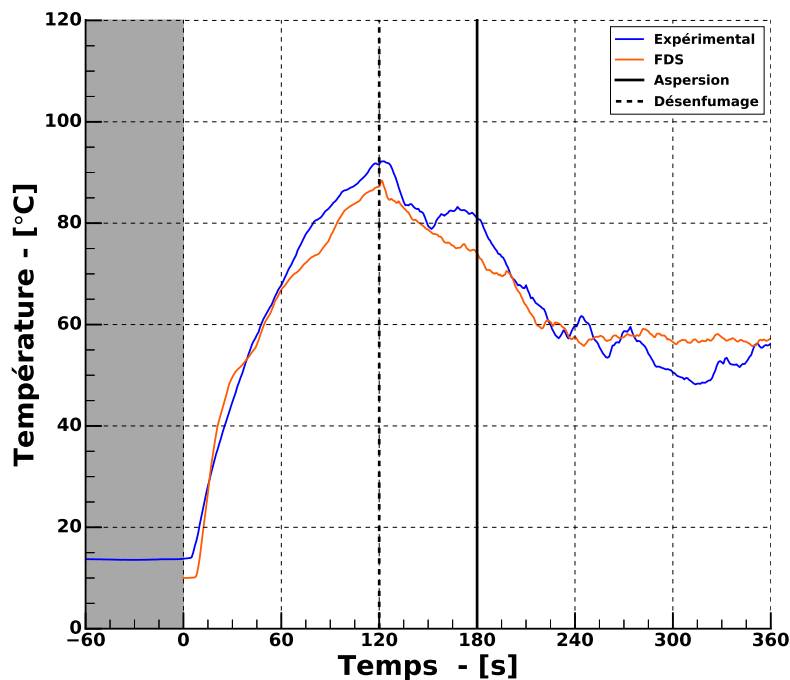


FIGURE 2.34 – Comparaison expérimental/numérique : Température des fumées extraites par l'exutoire.

bon accord des niveaux de température à cette position permet d'être confiant dans la capacité de FDS à prédire les quantités de chaleur et de matière extraites du local au cours du temps. Ce résultat est donc particulièrement important pour la validation de l'étude.

Vitesses Comme montré dans la section précédente, la vitesse de l'écoulement des fumées dans le bâtiment est une variable clé. Celle-ci influence notamment le temps d'activation du sprinkleur.

Il est donc important de s'assurer d'avoir un bon accord entre les résultats numériques et expérimentaux concernant cette grandeur. Expérimentalement, il n'a pas été possible de réaliser de mesure fiable de cette vitesse. Il est cependant possible de l'estimer de façon indirecte.

Lors des essais, un opacimètre laser était installé à 190 cm du sol dans la section de la porte servant d'arrivée d'air. Grâce à l'atténuation du signal consécutive au passage des fumées à travers le faisceau laser, il est possible de déterminer à quel instant les premières fumées atteignent la porte et s'échappent du local par la partie supérieure de l'amenée d'air.

Sur la figure 2.35 est représentée l'évolution de l'atténuation de ce signal au cours des deux premières minutes de l'essai. Expérimentalement, les premières fumées ont atteint l'opacimètre 22s après allumage du foyer contre 17s dans la simulation numérique. Ce résultat permet de vérifier que la dynamique des écoulements à l'intérieur du local est plutôt bien représentée par

FDS.

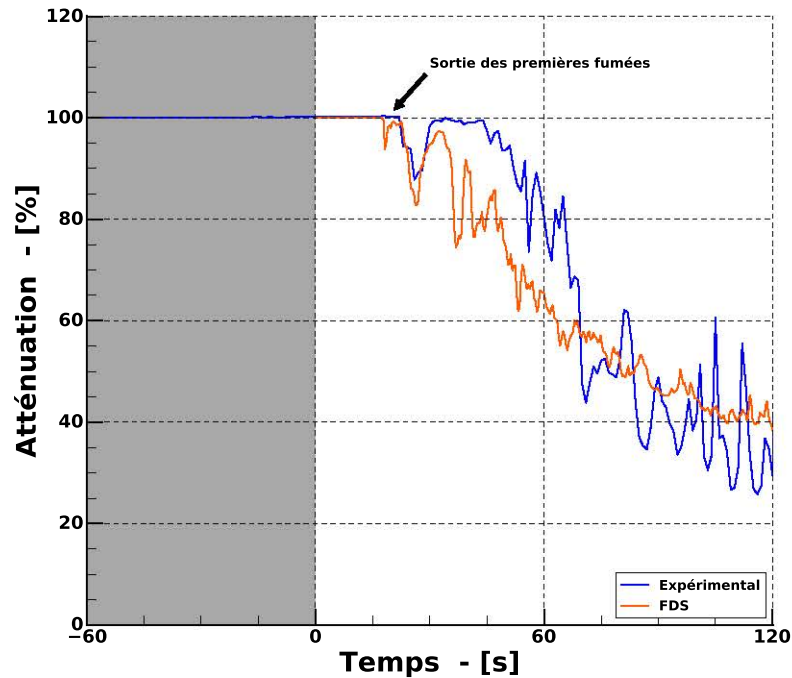


FIGURE 2.35 – Comparaison expérimental/numérique : Atténuation du signal de l'opacimètre installé à 190 cm du sol dans le plan de la porte servant d'arrivée d'air.

La comparaison des vitesses d'écoulement des gaz dans l'exutoire est présentée sur la figure 2.36. Expérimentalement, les mesures de vitesses sont très bruitées. L'écoulement se fait à travers une section large (un mètre carré), depuis un environnement chaud et turbulent vers un milieu extérieur pouvant être perturbé (par de la pluie ou du vent par exemple). Numériquement, le milieu extérieur est au repos et n'est soumis à aucune perturbation. Les vitesses d'extraction des fumées prédites par FDS sont donc beaucoup moins bruitées.

Le maximum de vitesse est atteint juste après l'ouverture de l'exutoire. À ce moment, les niveaux de température à l'intérieur du local sont maximums. Progressivement, la température diminue entraînant une diminution du tirage thermique et des vitesses des gaz. Après 240 s, un état stationnaire légèrement en dessous de $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ est atteint numériquement. La valeur moyenne de la vitesse mesurée à partir de cet instant et jusqu'à la fin de l'essai est égale à $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ avec un écart type de $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

L'amplitude des fluctuations des données expérimentales ne permet pas de conclure sur l'accord avec les données numériques. Toutefois, l'ordre de grandeur et la valeur moyenne de la vitesse de l'écoulement semblent être cohérents avec les données obtenues par FDS.

Débits Jusqu'à présent, les résultats numériques étaient comparés aux valeurs expérimentales obtenues lors de l'essai 52. Le bon accord entre ces résultats permet d'être confiant dans

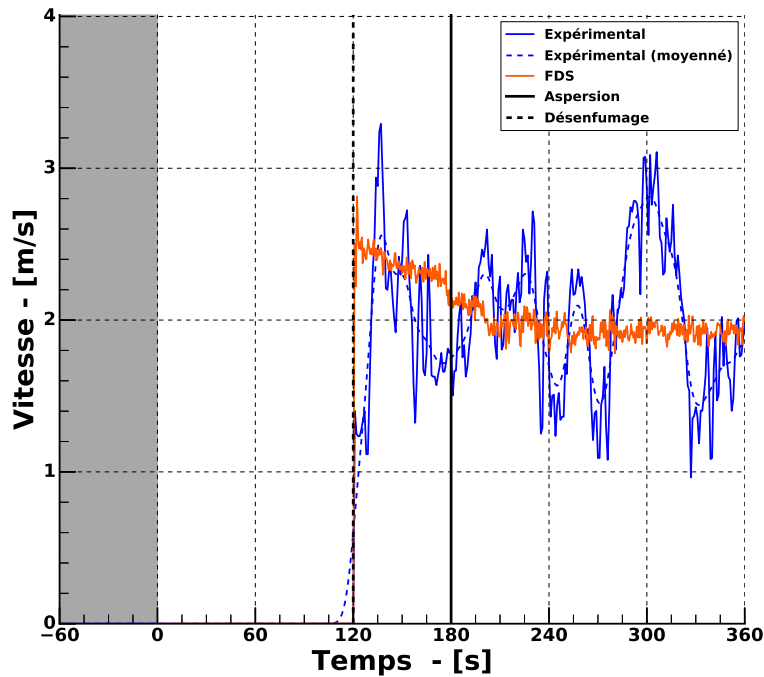


FIGURE 2.36 – Comparaison expérimental/numérique : Vitesse moyenne de l'écoulement dans la section de l'exutoire.

l'utilisation de l'outil numérique pour estimer les grandeurs non accessibles expérimentalement.

L'une de ces grandeurs est la quantité de chaleur \dot{Q}_{DENFC} extraite par l'exutoire au cours de l'essai. Afin de déterminer cette grandeur, il serait par exemple nécessaire de positionner une hotte calorimétrique au droit de l'ouvrant afin de recueillir les fumées. Si cette installation est possible pour des essais à l'échelle du laboratoire, les dimensions du local ne permettent pas de réaliser une telle installation.

Sur la figure 2.37 on représente l'évolution de cette grandeur prédite numériquement au cours du temps (en orange) ainsi que le HRR du foyer (en bleu).

Lors de l'ouverture de l'exutoire, cette puissance passe instantanément de 0 à une valeur maximale égale à 180 kW avant de diminuer progressivement jusqu'à activation de l'aspersion à 180 s. Cette dynamique est à mettre en parallèle avec les valeurs de vitesse et de température mesurées au niveau de l'exutoire. Avant le déclenchement du désenfumage, les fumées s'accumulent au niveau de l'exutoire. Avec le temps et ne pouvant pas s'évacuer du bâtiment, celles-ci s'échauffent progressivement. Lorsque l'exutoire est ouvert, ces fumées surchauffées sont évacuées rapidement, ce qui explique le pic de puissance observé, et sont remplacées par des fumées plus fraîches qui sont évacuées à leur tour.

Progressivement, les niveaux de température à l'intérieur du local diminuent. Cette évolution correspond à la phase de décroissance de la puissance extraite, avant déclenchement de

l'aspersion. Lorsque celle-ci est activée, on observe une diminution plus importante de la quantité de chaleur extraite par l'exutoire jusqu'à atteindre un minimum 30 s après activation du spray. Cette diminution est liée à la baisse de température à l'intérieur du local, influençant directement le tirage thermique.

Après 300 s, un régime stationnaire est atteint et environ un quart de la puissance libérée par le foyer est extraite du local à chaque instant. Malgré le refroidissement observé, le désenfumage reste donc efficace pour évacuer de la chaleur du bâtiment.

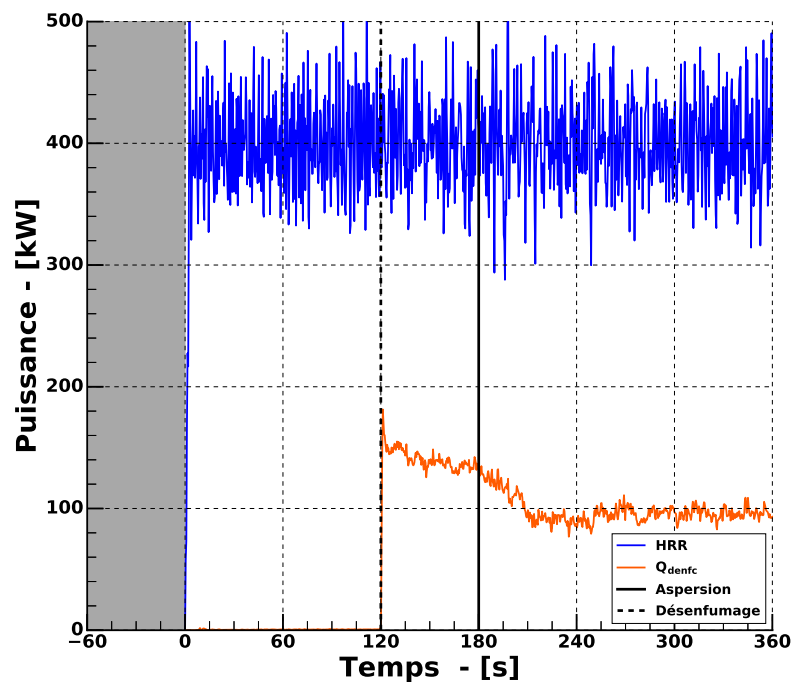


FIGURE 2.37 – Évaluation de la quantité de chaleur extraite par l'exutoire lors de l'essai 52.

2.4.3 Analyse de scénarios comparatifs

Compte tenu de l'accord satisfaisant entre les résultats expérimentaux et numériques, FDS peut alors être utilisé pour estimer les puissances ainsi que les quantités de suies extraites par l'exutoire, en fonction des scénarios étudiés.

Les conditions expérimentales restent proches de l'essai 52 utilisé au paragraphe précédent pour la validation. Le sprinkleur est déclenché à 180 s

Dans le cas d'une puissance de 400 kW, la figure 2.38 indique la puissance évacuée par l'exutoire pour un déclenchement du désenfumage avant et après aspersion. Dans les deux cas, la puissance évacuée est plus importante dans les instants qui suivent l'ouverture, puis elle décroît mais se stabilise à 25 % du HRR dans les deux cas, indépendamment de la stratégie d'ouverture,

avant ou après déclenchement de l'aspersion.

Dans le cas d'une puissance de 800 kW (figure 2.39), les conclusions sont les mêmes. Dans les deux cas, la quantité de chaleur extraite est maximale lors de l'ouverture de l'exutoire. Après une phase de décroissance cette valeur se stabilise à environ 28 % de la puissance dégagée par le foyer.

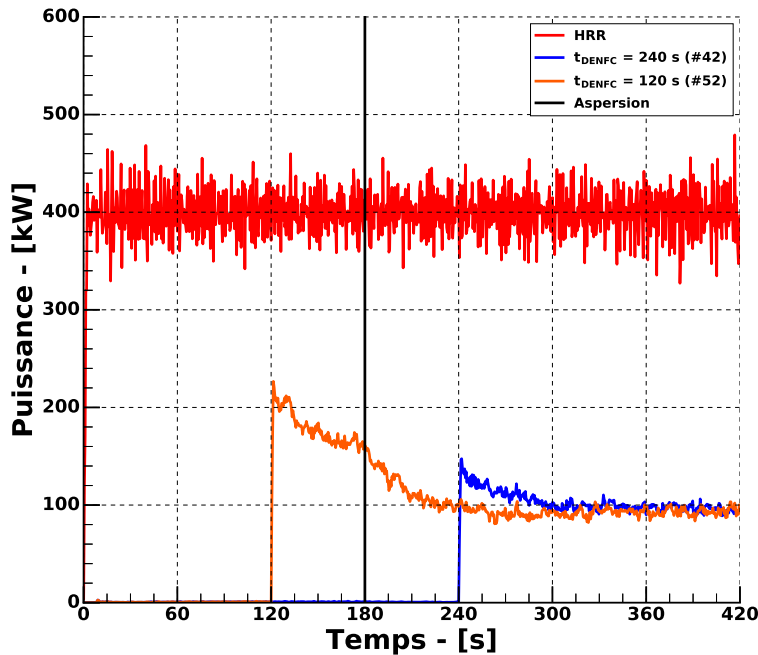


FIGURE 2.38 – Quantité de chaleur extraite par l'exutoire au cours du temps pour deux scénarios différents ($HRR = 400$ kW)

Pour les deux puissances de foyer testées, on constate que la puissance instantanée extraite au moment de l'ouverture de l'exutoire est supérieure lorsque celle-ci est réalisée avant le déclenchement de l'aspersion. Comme expliqué précédemment, le refroidissement produit par l'aspersion réduit légèrement l'efficacité du tirage thermique, diminuant ainsi les valeurs du débit de chaleur extrait.

Au total une énergie de 191 MJ est générée par le foyer de 400 kW sur la durée des simulations. Lorsque l'exutoire est ouvert avant l'aspersion, la quantité de chaleur extraite au cours de l'essai est de 40.1 MJ (soit 21 % de l'énergie totale produite par la combustion). Lorsque l'exutoire est ouvert après activation de l'aspersion, un total de 24.5 MJ est extrait (13 % de l'énergie produite par la combustion). Les mêmes rapports sont obtenus avec le foyer de 800 kW (respectivement, 23 % et 15 %). L'énergie totale extraite du local est bien sûr plus élevée lorsque l'exutoire est ouvert le plus tôt.

Intéressons nous maintenant à la quantité de suies extraite par l'exutoire en fonction du

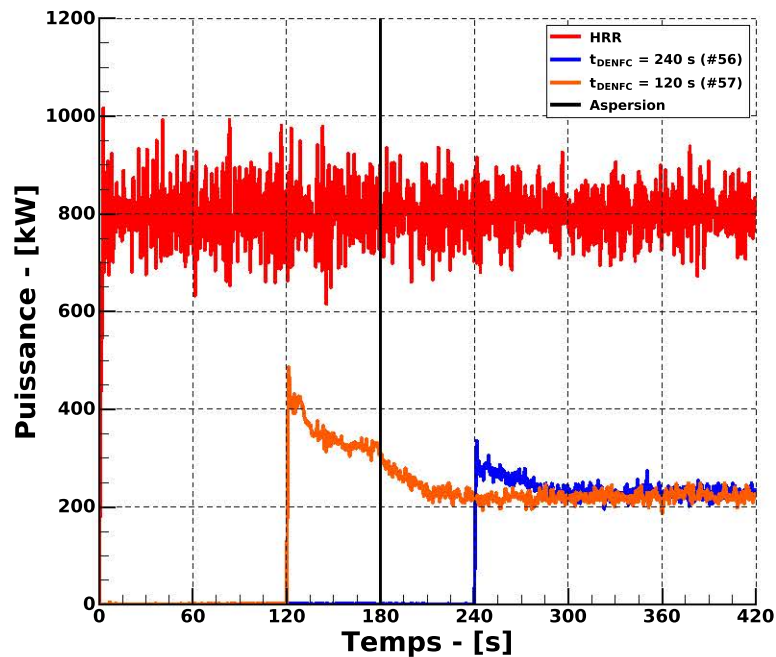


FIGURE 2.39 – Quantité de chaleur extraite par l'exutoire au cours du temps pour deux scénarios différents ($HRR = 800 \text{ kW}$)

scénario analysé. Dans le cas où le foyer de 400 kW est utilisé, la figure 2.40 représente l'évolution du débit massique de suies à travers l'exutoire au cours du temps. La courbe rouge correspond au débit massique de suies produites par le foyer au cours de l'essai. Pour les mêmes raisons que pour la quantité de chaleur, le débit extrait est maximal lors de l'ouverture de l'exutoire puis décroît progressivement jusqu'à atteindre une valeur stationnaire à 420 s . On peut noter que cette valeur stationnaire est plus élevée lorsque l'exutoire est ouvert après l'aspersion plutôt qu'avant. En effet, dans le premier cas cela correspond à environ 85% de la quantité de suie produite contre 75% dans le second cas.

Des résultats différents sont obtenus pour le foyer de 800 kW (figure 2.41). Dans ce cas, la valeur atteinte à l'état stationnaire est proche de 85% pour les deux scénarios.

Lorsque le foyer le moins puissant est utilisé, les niveaux de température de la couche chaude sont plus faibles que lors des essais avec le foyer de 800 kW . Comme présenté précédemment, l'ouverture de l'exutoire entraîne un refroidissement de la strate supérieure grâce à l'évacuation des gaz et fumées chauds du local. Lorsque l'exutoire est ouvert avant le déclenchement de l'aspersion, la réduction de la flottabilité des fumées est suffisamment importante pour que l'aspersion pénalise l'évacuation des fumées. Lors des essais avec le foyer de 800 kW , cet effet est toujours présent mais les niveaux de température supérieurs permettent de compenser plus efficacement le refroidissement induit par le sprinkleur, contribuant ainsi à une réduction mineure du débit de suies à travers l'exutoire.

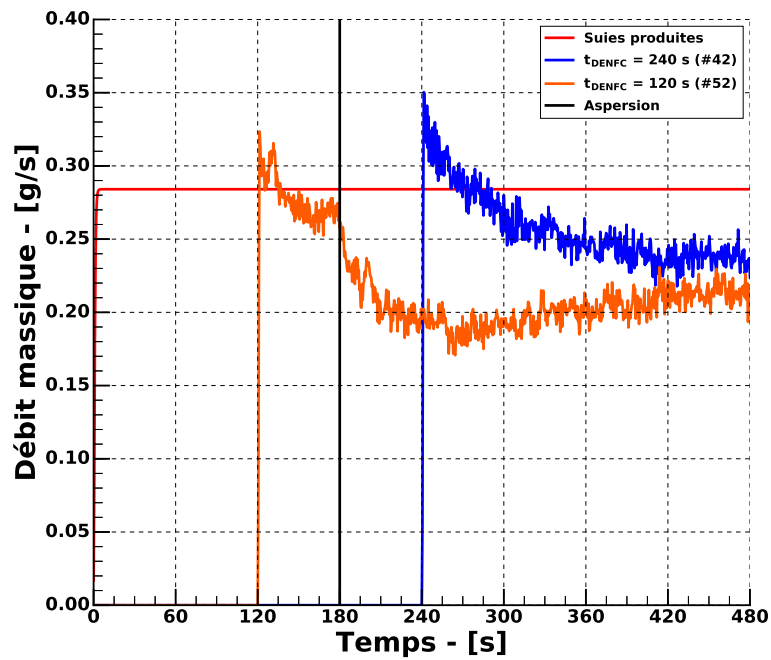


FIGURE 2.40 – Débit massique de suie extrait par l'exutoire au cours du temps pour deux scénarios différents ($HRR = 400$ kW)

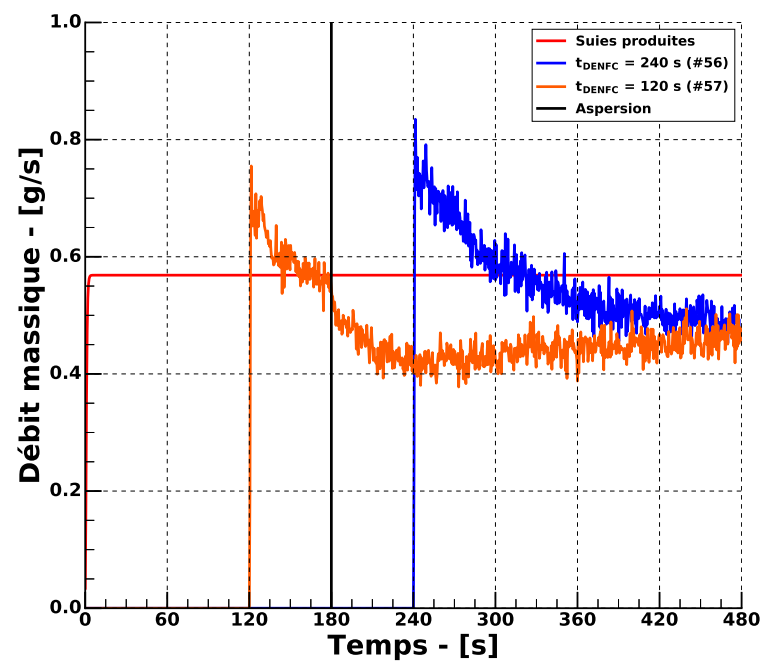


FIGURE 2.41 – Débit massique de suie extrait par l'exutoire au cours du temps pour deux scénarios différents ($HRR = 800$ kW)

2.5 Bilan

Cette première campagne expérimentale permet d'apporter des éléments de réponse aux questions posées sur l'utilisation conjointe des DENFC et sprinkleurs pour des applications en échelle intermédiaire (surface de 110 m², hauteur de 4 m et puissance de 400 kW et 800 kW).

2.5.1 Résultats expérimentaux

Influence du désenfumage sur le temps de réponse d'un sprinkleur

En l'absence de désenfumage, le temps de réponse d'un sprinkleur semblait être, a priori, un paramètre bien maîtrisé. Les essais réalisés au cours de cette campagne ont montré que dans une géométrie plus complexe qu'une tuyère ou qu'une salle de laboratoire, ce temps de déclenchement peut fortement varier, malgré des conditions expérimentales présentant une bonne répétabilité. Cette différence semble être liée essentiellement aux mouvements aérauliques à l'intérieur du bâtiment.

En considérant cette incertitude, il a été montré que dans notre configuration, l'ouverture de l'exutoire avant le déclenchement du sprinkleur pouvait entraîner un retard ou une non activation de ce dernier lorsque le foyer est de relativement faible puissance. En revanche, lorsqu'un foyer plus puissant est utilisé, il n'a pas été constaté de retard significatif du déclenchement du sprinkleur. Dans certains cas, lorsque la température à proximité du sprinkleur est suffisamment élevée, l'ouverture de l'exutoire a accéléré le déclenchement de l'aspersion.

L'analyse de ces résultats doit cependant prendre en compte la nature particulière de nos essais et du dispositif expérimental. L'utilisation d'un spray de fioul a permis d'obtenir une très bonne répétabilité de la montée en température dans le local au cours des essais. En contrepartie, ce foyer présente une cinétique particulière, peu représentative des foyers rencontrés lors de sinistres incendies en entrepôt ou en ERP. En effet, le régime stationnaire est atteint très rapidement après l'allumage du brûleur et reste constant jusqu'à la fin de l'essai. Ce type de foyer, semblable à un feu de fuite de gaz ou liquide inflammable sous pression, ne présente pas de phase de croissance propre à un feu de stockage, par exemple.

Il semble toutefois concevable d'assimiler le foyer de 400 kW à un feu de faible puissance ou un feu présentant une phase de croissance lente. Dans ce cas, il faudrait prendre en compte la croissance du foyer entre l'instant où l'exutoire est ouvert et la rupture de l'ampoule du sprinkleur. Une augmentation de la puissance du foyer entraînerait alors une réduction du retard d'activation du sprinkleur.

Influence du désenfumage sur les niveaux de température et de visibilité

Le faible bénéfice fourni par le désenfumage est une critique récurrente de l'utilisation d'une solution de désenfumage en complément d'une installation d'extinction fixe à eau.

Lors des essais, nous avons toujours observé une amélioration des conditions de visibilité lorsque le désenfumage a été utilisé. Lorsque son ouverture a été réalisée avant l'aspersion, le désenfumage a permis de conserver de bonnes conditions de visibilité tout au long de l'essai. Lorsque l'exutoire a été ouvert après l'aspersion, le désenfumage a permis d'améliorer la visibilité, même lorsque l'environnement était complètement destratifié.

L'utilisation du désenfumage a également eu un effet bénéfique sur les niveaux de température. À hauteur d'homme, il a permis de ne pas dépasser la valeur seuil de 60 °C lorsqu'il était ouvert avant l'aspersion. Lorsque le désenfumage a été réalisé après activation du sprinkleur, il a permis de diminuer progressivement les contraintes thermiques à cette hauteur. En partie haute, le désenfumage (réalisé avant ou après aspersion) est responsable d'un refroidissement important, réduisant ainsi les contraintes thermiques auxquelles sont soumises les structures.

Enfin, il a été observé qu'aux temps longs les distributions des températures avec la hauteur sont similaires, quel que soit l'instant d'activation du désenfumage.

2.5.2 Résultats numériques

Le second objectif de cette première campagne était de collecter des données expérimentales afin de créer un cas de validation et d'étudier la capacité de FDS à simuler les phénomènes observés expérimentalement.

Dans un premier temps, les résultats numériques et expérimentaux ont été comparés. Il ressort de cette confrontation que l'effet de refroidissement conséquent à l'ouverture du désenfumage est sur-évalué par FDS dans le cas de notre configuration expérimentale. Par contre, la comparaison montre globalement un accord satisfaisant. Les niveaux de température calculés numériquement sont cohérents avec les mesures réalisées et les dynamiques observées expérimentalement lors de l'activation de l'un ou l'autre des dispositifs sont parfaitement reproduites par FDS.

Le bon accord entre les résultats numériques et expérimentaux (principalement au niveau de l'exutoire), permet de justifier l'utilisation de FDS pour la détermination de grandeurs inaccessibles expérimentalement telles que la quantité de chaleur extraite par l'exutoire ou le débit massique en fonction de divers scénarios.

Chapitre 3

Campagne d'essais à grande échelle

3.1 Objectifs et plan

La première campagne expérimentale a permis de recueillir un grand nombre de données pour construire un cas de validation numérique sur FDS. Elle a également été l'occasion d'observer certains phénomènes d'interactions pouvant se produire lors de l'utilisation conjointe d'une solution de désenfumage naturel avec un système d'aspersion de type sprinkleur. Le bâtiment utilisé lors de ces essais étant relativement bas de plafond (4 m de hauteur maximale), le remplissage du volume par les fumées fut très rapide et la dégradation des conditions de visibilité était systématique. Bien que la puissance des foyers était adaptée aux dimensions du local (un HRR modéré à 400 kW et un plus puissant à 800 kW), elle reste relativement faible devant les puissances qui peuvent être rencontrées lors d'incendies.

Une seconde campagne expérimentale a donc été menée dans un hall d'essais de dimensions plus importantes où des foyers plus puissants ont pu être utilisés. Les objectifs et la démarche de cette seconde campagne sont similaires à ceux présentés dans le chapitre précédent. Dans un premier temps, des essais ont été conduits afin d'observer les interactions entre sprinkleur et désenfumage dans une installation de grande taille et de recueillir des données d'entrée pour les simulations numériques. La première partie de ce chapitre est consacrée à la description de l'installation expérimentale ainsi qu'à la présentation et à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus. Ensuite, les essais ont été reproduits sur FDS et les résultats obtenus ont été comparés aux données expérimentales. Les résultats des simulations d'un de ces essais seront présentés comme cas de validation dans la seconde partie de ce chapitre. Des simulations supplémentaires seront également commentées en utilisant FDS pour réaliser des bilans (de masse et d'énergie) aux exutoires, point clé de cette étude.

En conclusion de ce chapitre, une synthèse des apports de cette seconde campagne expérimentale et numérique est proposée.



FIGURE 3.1 – Vue extérieure du hall d'essais numéro 3 (CNPP)

3.2 Dispositif expérimental

3.2.1 Local d'essais

Les essais de cette seconde campagne expérimentale ont été réalisés dans le hall 3 du site du CNPP. Par ses dimensions, ce hall d'essais est unique en Europe et permet de réaliser des scénarios incendie à échelle réelle. Le bâtiment, visible sur la figure 3.1, est constitué d'une partie centrale de 600 m^2 et de 25 m de hauteur ainsi que de deux ailes de 125 m^2 et 190 m^2 faisant chacune 11 m de haut. Au centre de la zone principale se trouve une plate-forme en briques réfractaires de 64 m^2 sur laquelle les foyers sont positionnés afin de ne pas endommager la dalle en béton du hall. Cette "zone de feu" est surplombée par un plafond mobile de 280 m^2 ($15.6\text{ m} \times 18\text{ m}$) réglable en hauteur jusqu'à 12 m . Dans le cadre de notre étude, le plafond était positionné à 10 m du sol, hauteur fréquente pour des entrepôts de stockage. Une représentation 3D du hall est présentée sur les figures 3.2a et 3.2b.

Initialement, la périphérie du plafond mobile était équipée d'un écran de cantonnement d'une hauteur de 0.8 m . Pour être le plus proche possible d'une configuration réelle d'entrepôt, ce cantonnement a été prolongé jusqu'à 2 m , permettant ainsi la création d'une couche de fumée chaude de même hauteur. Cette valeur est imposée par la réglementation relative aux établissements relevant du code du travail. Ce cantonnement a été réalisé avec de la toile de verre ignifugée.

Pour éviter que les fumées sortant du canton ne s'accumulent et viennent perturber les essais, les exutoires du hall étaient systématiquement maintenus ouverts, formant au total une surface de désenfumage de plus de 90 m^2 .

La typologie de ce bâtiment est proche de celle d'entrepôts de stockage voire de certains grands centres commerciaux (et particulièrement leurs réserves). La grande hauteur sous plafond autorise des hauteurs de stockage de marchandises importantes, augmentant de fait la charge en combustible possible. Cependant, la surface du canton créé dans ce hall ne représente qu'une fraction de la surface de ceux que l'on peut rencontrer dans des installations de ce type. Rapidement après l'allumage des foyers, les premières fumées sortaient de la zone de cantonnement et étaient évacuées du bâtiment. Il faut donc voir cette zone d'essais comme la fraction d'un canton beaucoup plus grand. Dans ce cas, les premières fumées évacuées se seraient en réalité propagées sous le plafond jusqu'aux bordures du canton plus grand.

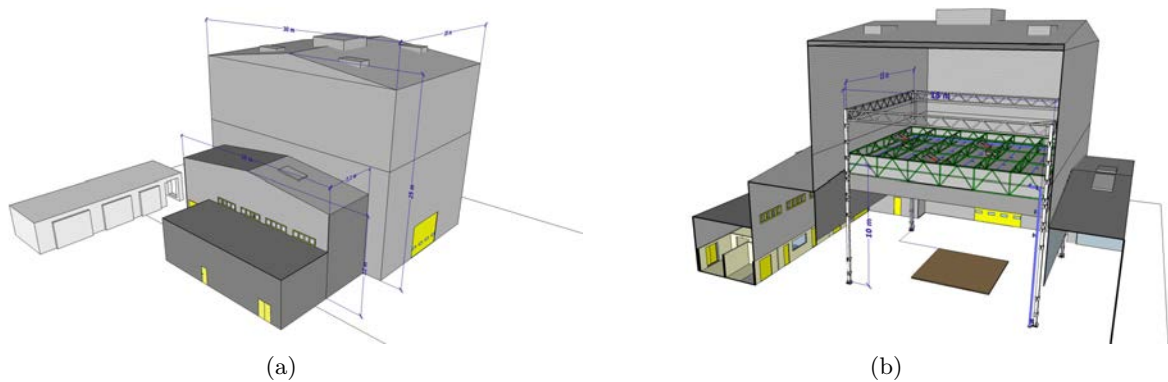


FIGURE 3.2 – Vue 3D du hall d'essai de la seconde campagne expérimentale

3.2.2 Désenfumage

Afin de réaliser le désenfumage du canton, trois exutoires de 1.4 m par 2 m ont été installés sur le plafond mobile. Leurs positions respectives ainsi que leurs références sont visibles sur les figures 3.3 et 3.4. Ils ont été positionnés de sorte que ni les structures métalliques du plafond mobile, ni les canalisations du réseau sprinkleur ne viennent perturber leur ouverture ou l'évacuation des fumées. La surface géométrique totale de l'ensemble est égale à 8.4 m^2 . En considérant un coefficient de performance de 0.65 (donnée fournie par le fabricant), la Surface Utile de l'Installation (S.U.I.) vaut alors 5.46 m^2 . En respectant la réglementation et en considérant la surface du canton formé, il conviendrait d'avoir une Surface Utile d'Installation de 5.40 m^2 . L'installation de désenfumage proposée est donc suffisante pour respecter les règles de dimensionnement en vigueur en France.

L'ouverture des exutoires est réalisée grâce à un réseau pneumatique constitué de tuyaux en cuivre de faible diamètre connectés au réseau d'air sous pression du hall d'essais et reliés aux vérins de chaque DENFC. La commande du dispositif d'ouverture est située au niveau du poteau Nord-Ouest du plafond mobile. Lorsque ce boîtier de commande est activé, l'air sous pression est envoyé dans les vérins et l'ouverture simultanée des exutoires se réalise. Le temps moyen entre le déclenchement du désenfumage et l'ouverture totale des trois exutoires est de 30 s. Ce temps a été déterminé en réalisant plusieurs cycles d'ouverture/fermeture des DENFC.

Afin de respecter la réglementation pour avoir une arrivée d'air frais en quantité suffisante, les portes du hall ont été entre-ouvertes systématiquement lors de l'activation du désenfumage.



FIGURE 3.3 – Positions des trois exutoires installés sur le plafond mobile. Sur cette photo, les capots des exutoires ne sont pas présents.

Le choix des portes à ouvrir dépendait des conditions météorologiques au moment de l'essai, notamment pour éviter que des bourrasques de vent ne viennent perturber le foyer. Malgré cela, l'ouverture des arrivées d'air a parfois provoqué une inclinaison du panache, déplaçant ainsi temporairement la zone d'impact des fumées au plafond. Cela s'est traduit par des fluctuations de température aux différents points de mesures.

3.2.3 Aspersion

Le plafond mobile est équipé d'un réseau sprinkleur dont un plan est représenté sur la figure 3.4. Il est constitué de 36 têtes de sprinkleurs dont 20 sont débitantes (SD1 à SD20). Les têtes positionnées sur les bordures (ST1 à ST16) sont des témoins, obturées par des bouchons en acier. La distance entre deux têtes de sprinkleur est de 3 m, comme recommandé par le référentiel R1. Les canalisations de ce réseau sont situées sur la face supérieure du plafond mobile et sont connectées au réseau incendie du CNPP, au niveau du sol. De même que pour la campagne précédente, un régulateur de pression a été utilisé afin de réduire la pression hydraulique en entrée (11 bars) et d'amortir les fluctuations du réseau.

Contrairement à la campagne expérimentale précédente, il n'a pas été possible de déclencher manuellement les sprinkleurs lors des essais. Dans tous les tests réalisés, l'activation était automatique et se produisait lorsque la température de l'ampoule atteignait la valeur seuil requise pour sa rupture. Les sprinkleurs utilisés étaient les mêmes que lors de la première campagne (spray pendant, $RTI = 108 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{0.5}$, $T_{act} = 68 \text{ }^\circ\text{C}$).

3.2.4 Foyers

Deux types de foyers différents ont été utilisés au cours de cette campagne, des feux de bacs et des feux de palettes.

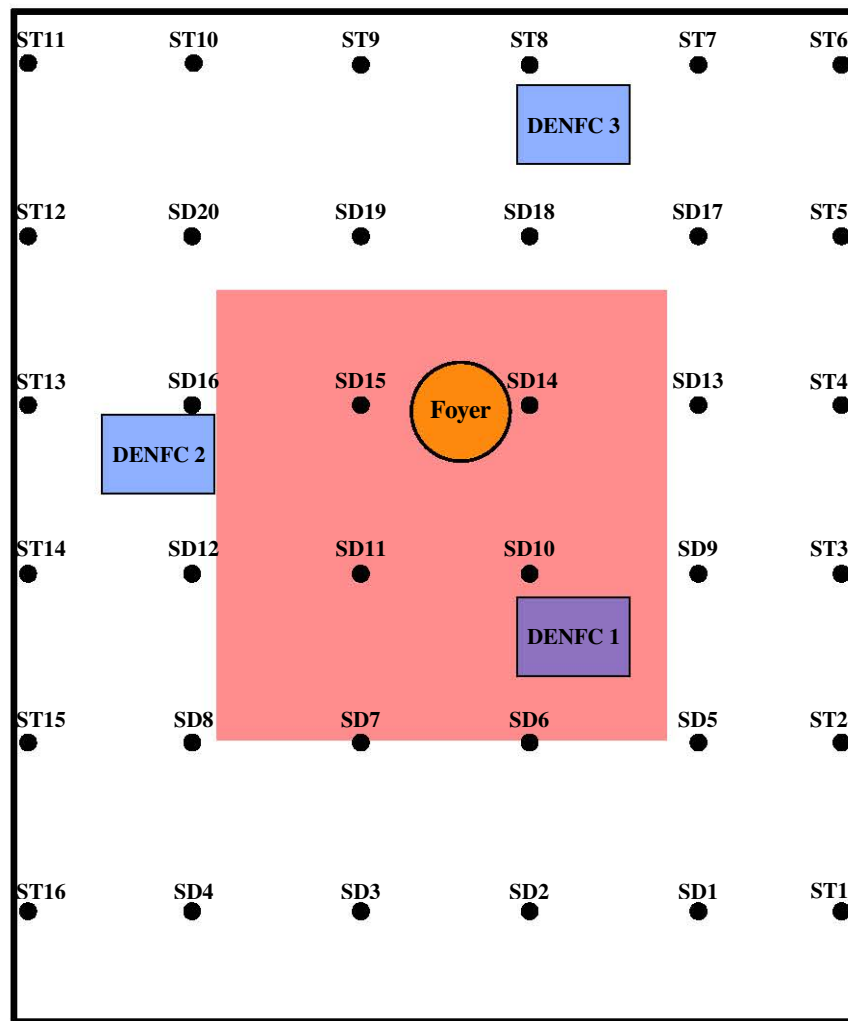


FIGURE 3.4 – Schéma d'implantation des têtes de sprinkleur sous le plafond mobile (le Nord est en haut).

3.2.4.1 Feux de bac

Des feux de bac ont été utilisés dans la première partie de la campagne expérimentale. Pour ces essais, 0.14 m^3 de fioul domestique sont déversés dans un bac circulaire en acier de 1.89 m de diamètre, permettant théoriquement une autonomie d'un peu moins de 20 min. L'allumage de la surface de combustible est réalisé à l'aide d'un brûleur à gaz industriel. En moyenne, la totalité de la surface de fioul est enflammée en moins d'une minute. Lors de deux essais, la faible température initiale du fioul, couplée à une baisse de pression du gaz dans le brûleur ont eu pour conséquence une période d'allumage de plusieurs minutes. Les résultats de ces essais ont été ajustés afin de prendre en compte ce retard. Le développement d'un foyer de ce type est observable sur la figure 3.5. À la fin de l'allumage, le foyer développe déjà une puissance de près de 2 MW et produit un panache important.

À la fin des essais, l'extinction du foyer est réalisée à l'aide d'une lance à incendie projetant un mélange d'eau et d'additif moussant, nécessitant l'intervention d'un technicien muni d'EPI. Le



FIGURE 3.5 – Développement d'un feu de bac de fioul (essai n°18). De gauche à droite : t_0 (début de l'allumage), $t_0 + 60$ s (fin de l'allumage) et $t_0 + 120$ s.

premier contact de l'émulseur avec le foyer produit systématiquement une boule de feu s'élevant de la surface jusqu'au plafond. Cette augmentation soudaine mais brève de la puissance a pour conséquence des élévations de températures au niveau de la zone d'impact du panache et dans son voisinage. Pour certains essais, des sprinkleurs supplémentaires se sont déclenchés lors de cette phase.

Le débit de perte de masse de fioul a été évalué grâce à une balance positionnée sous le bac, permettant de déterminer le HRR du foyer en utilisant la formule (2.1) présentée dans le chapitre précédent. Cette méthode de calcul est applicable jusqu'au déclenchement de l'aspersion. Une fois le sprinkleur activé, des gouttes du spray atteignent la surface de combustible et il n'est plus possible de déterminer la perte de masse due à l'évaporation du fioul. Ceci est illustré sur les figures 3.6a et 3.6b. Dans le cas de l'essai 17 (figure 3.6a), aucun sprinkleur ne s'est déclenché et la mesure de la perte de masse n'a pas été perturbée. On peut constater que la puissance augmente rapidement jusqu'à environ 3500 kW puis fluctue entre cette valeur et 4000 kW jusqu'à la fin de l'essai. Dans le second cas (figure 3.6b), un sprinkleur s'est déclenché à 146 s alors que le foyer atteignait 3500 kW. À partir de cet instant, le bac de combustible étant arrosé, la mesure de perte de masse n'est plus fiable. Il n'est alors plus possible de connaître la valeur de la puissance par cette méthode.

Les feux de bacs présentent une bonne répétabilité. L'évolution du HRR calculé par la méthode de perte de masse pour tous les essais utilisant le bac de fioul est reportée sur la figure 3.7a. Les valeurs non nulles à $t = 0$ s sont des conséquences de la méthode de calculs du HRR. Du fait de la précision de la balance utilisée (± 200 g), le signal de perte de masse est en "escalier". Sa dérivation a donc nécessité un lissage par une méthode de moyenne glissante centrée. En dehors de deux essais pour lesquels l'allumage a pris plus de temps, la dynamique d'évolution du HRR est similaire pour tous les autres essais. Pour s'en assurer, les signaux sont lissés avec une moyenne temporelle à fenêtre gaussienne glissante centrée et sont superposés (de manière arbitraire) sur la figure 3.7b. On observe une croissance rapide du foyer jusqu'à environ 3000 kW en une minute. Ensuite, la croissance est plus modérée jusqu'au déclenchement de l'aspersion. Les fortes fluctuations visibles sur la seconde moitié du graphe correspondent à l'impact des gouttes sur le bac et ne sont donc pas à prendre en compte.

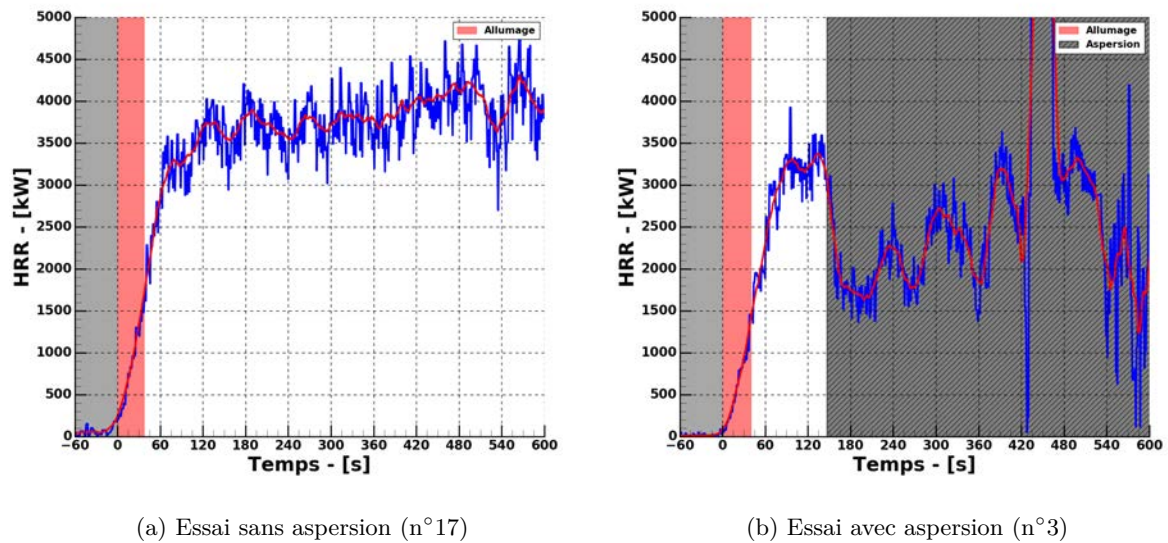


FIGURE 3.6 – Comparaison des HRR calculés lors d’essais avec et sans aspersion.

L’utilisation de ce type de foyer présente cependant quelques inconvénients. Une fois le foyer allumé, la montée en puissance est très rapide et la valeur maximale du HRR est atteinte en quelques minutes. Si des foyers de ce type sont parfois rencontrés lors d’incendies, ils ne correspondent cependant pas aux cas les plus courants. Il est en effet plus fréquent d’avoir des feux qui présentent d’abord une phase de développement plus ou moins longue au cours de laquelle la puissance du foyer augmente très peu. Cette première phase contribue à augmenter la température du combustible et à le dégrader localement, libérant des gaz de combustion inflammables. Lorsque les niveaux de température et de flux sont suffisants, une transition vers une phase d’accélération est alors observée. Comme son nom l’indique, il s’agit d’une période de croissance au cours de laquelle le foyer se propage rapidement. Cette phase s’accompagne d’une libération importante de chaleur et de fumées. La durée de ces deux phases dépend fortement des conditions environnantes et des propriétés des matériaux. Il n’est cependant pas rare que la phase de croissance intervienne plus de 5 min après l’allumage du foyer.

Ensuite, les systèmes sprinklers ne sont pas adaptés pour éteindre ou contrôler des feux de liquides combustibles. L’utilisation d’un bac de fioul ne permet pas de rendre compte des phénomènes de refroidissement de combustible et de génération de vapeur d’eau se produisant habituellement lorsqu’un sprinkleur se déclenche au dessus d’un foyer.

3.2.4.2 Feux de palettes

Afin d’observer les effets d’extinction évoqués précédemment, quelques essais ont été réalisés avec un foyer constitué de palettes en bois. Des tests préliminaires ont été effectués afin de déterminer le nombre de palettes et la configuration à utiliser. Au final il a été choisi de disposer 20 palettes réparties en deux piles de même taille séparées de 15 cm le long de leur plus grand côté. Des palettes Europe standards de 1.2 m de long et 0.80 m de large ont été utilisées. Contrairement

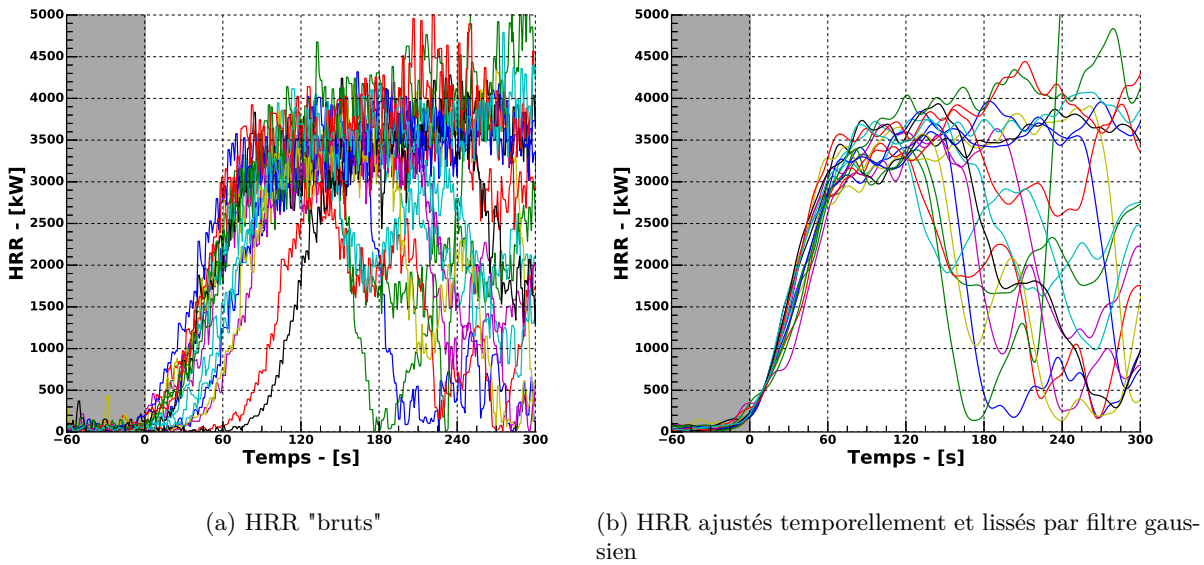


FIGURE 3.7 – Évolution des HRR calculés à partir de la perte de masse pour tous les essais bac.

aux feux de bacs, il n'a pas été possible de déterminer exactement la puissance de ce foyer. Dans des essais utilisant la même configuration, Arvidson [60] a déterminé que la puissance maximale atteinte par le foyer était d'environ 3800 kW. En utilisant les corrélations pour les feux de palettes disponible dans la littérature [61], la puissance maximale du foyer est estimée à 5600 kW.

Pour réaliser l'allumage du foyer, quatre baguettes de bois aggloméré de 1.5 m de long (section carré de 2 cm de côté) et imbibées de kérosène étaient insérées au niveau des deuxièmes palettes en partant du bas, à travers la largeur des piles. Au démarrage de l'essai, les deux extrémités des baguettes étaient allumées rapidement à l'aide d'un brûleur à gaz. Le temps nécessaire à l'allumage total des baguettes n'a jamais excédé plus de 15 s. Après l'allumage, le feu se propage d'abord le long des baguettes avant d'enflammer les palettes des niveaux inférieurs des deux piles. Ensuite, la surface de feu augmentant avec le temps, le feu se propage aux palettes supérieures et des effets de "cheminée" sont observables entre les lames. Lorsque les flammes atteignent le haut des piles de palettes, la croissance du foyer s'accélère rapidement. Les différentes étapes de ce développement sont visibles sur la figure 3.8.



FIGURE 3.8 – Développement d'un feu de palettes (essai n°23). De gauche à droite : t_0 (fin de l'allumage), $t_0 + 60$ s, $t_0 + 120$ s et $t_0 + 180$ s.

Cette série de photos permet également de mettre en avant l'un des inconvénients de ce type de foyer. Entre t_0 et $t_0 + 60$ s, la propagation est bien symétrique. Une minute plus tard, une dissymétrie est observable. Dans la pile de droite, les flammes dépassent de près de 50 cm la palette la plus haute alors qu'elles atteignent seulement cette palette dans la pile de gauche. L'évolution de la température mesurée à deux mètres au dessus du sol au droit du foyer lors de tous les essais utilisant les palettes est reportée sur la figure 3.9. Durant les deux premières minutes suivant l'allumage, le feu se propage progressivement des baguettes aux palettes les plus basses. La température mesurée reste proche de la température ambiante. Avec le développement du foyer, les palettes des niveaux supérieurs commencent à s'enflammer et la température augmente légèrement. Enfin, passé un certain stade, le développement s'accélère et les températures mesurées augmentent rapidement, dépassant 800 °C en moins d'une minute.

Sur les 7 essais réalisés avec ce foyer, 4 d'entre eux présentent une sortie des flammes par la face supérieure des palettes aux alentours de 240 s. Lors d'un essai, cette sortie est observable à partir de 300 s. Enfin, pour les deux derniers essais, cela s'est produit aux alentours de 150 s et 180 s après le début de l'allumage des baguettes. Il existe donc un écart de plus de 2 min sur ce temps entre deux essais. Compte tenu de la variabilité manifeste de la phase de développement du feu, ce type de foyer présente un faible degré de répétabilité.

Enfin, la modélisation réaliste d'un bûcher est une tâche complexe faisant l'objet de nombreuses recherches. S'il est possible d'en faire une représentation simplifiée en estimant sa puissance, la modélisation de son interaction avec un spray est encore hors de portée à l'heure actuelle.

La figure 3.10 permet de visualiser les différences entre les deux types de foyers utilisés. La combustion du fioul produit de grandes quantités de fumées très opaques alors que très peu de fumées sont visibles lors de la combustion des palettes. Une fois l'aspersion déclenchée, la puissance du feu de fioul ne semble pas être modifiée significativement. En revanche, une réduction est nettement observable durant les essais avec les palettes, accompagnée par une production de vapeur.

3.2.5 Métrologie

Comme lors de la première campagne expérimentale, l'essentiel des mesures effectuées a consisté en des prises de températures à différents endroits. Afin de suivre l'évolution de la température sous le plafond mobile et de détecter le déclenchement des sprinklers, des thermocouples gainés (Type-K à gaine en acier inoxydable de 2 mm de diamètre) ont été installés au niveau de chaque tête de sprinkleur. La distribution de ces points de mesure a permis de réaliser des cartes thermiques au niveau du plafond et de suivre la distribution des températures sous le plafond mobile. Trois thermocouples tressés (Type-K de 1 mm de diamètre) ont été positionnés dans la section de chaque exutoire afin de mesurer la température des gaz extraits. Sous ces DENFC pendent des chaînes de 2 m de long sur lesquelles ont été fixés des thermocouples tous les 20 cm. Des mesures de températures au droit du foyer ont été effectuées afin de servir de point de comparaison lors des simulations numériques. Ces points de mesures ont été répartis le long d'une chaîne de 8 m de long, allant de 2 m du sol jusqu'au plafond. L'intervalle entre les thermocouples est de 2 m du bas de la chaîne jusqu'à 8 m du sol puis de 50 cm jusqu'à 10 m. Enfin,

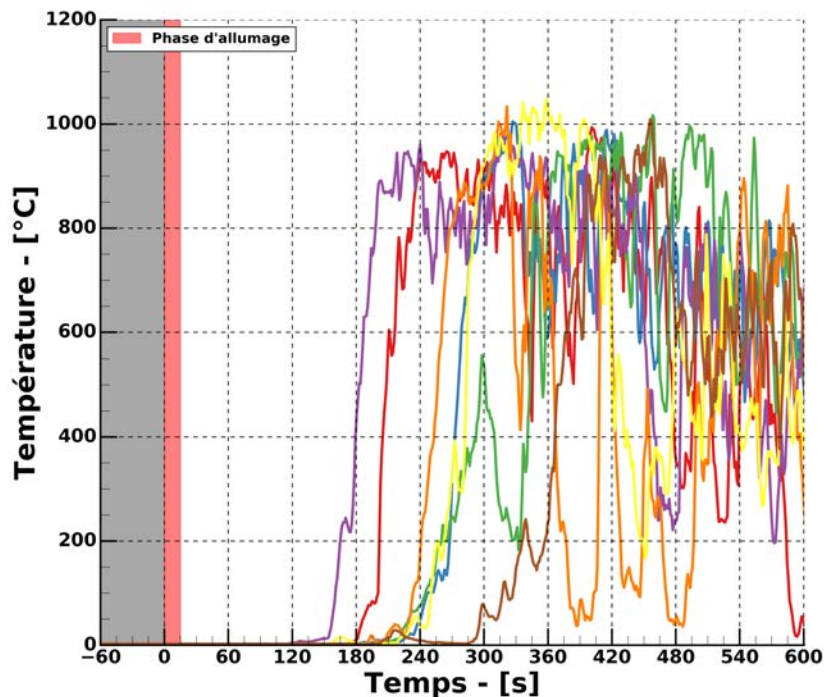


FIGURE 3.9 – Évolution de la température mesurée à 2 m au dessus du foyer de palettes pour différents essais.

une chaîne identique a été installée dans le coin Nord Ouest du plafond mobile afin de mesurer les conditions de température à distance du foyer et de la zone d'influence des sprinkleurs.

Comme expliqué dans la section précédente, le calcul du HRR lors des essais avec bac de fioul nécessite de connaître le débit de perte de masse de combustible. Une balance possédant une étendue de mesure allant de 0.2 kg à 600 kg a été positionnée sous le bac lors de tous les essais.

Le débit d'eau délivré par les sprinkleurs est contrôlé grâce à un régulateur de pression à clapets et un débitmètre électromagnétique situés à l'extérieur du hall. La différence de hauteur entre le sol et le plafond mobile (10 m) a été prise en compte dans les calculs de pression hydrostatique.

Contrairement à la campagne d'essais précédente et à l'issue de simulations numériques préliminaires, il a été décidé de ne pas utiliser de mire optique lors de ces essais. Compte tenu du volume du bâtiment et des foyers utilisés, il semblait en effet peu probable que les conditions de visibilité soient autant dégradées que lors des essais dans le local précédent.

Quatre caméras visibles (1 caméscope et 3 GoPro®) ont filmé les essais sous différents angles afin d'observer le développement des foyers et le comportement des fumées. Trois caméras IP supplémentaires ont été installées sur la face supérieure du plafond mobile, chacune filmant un

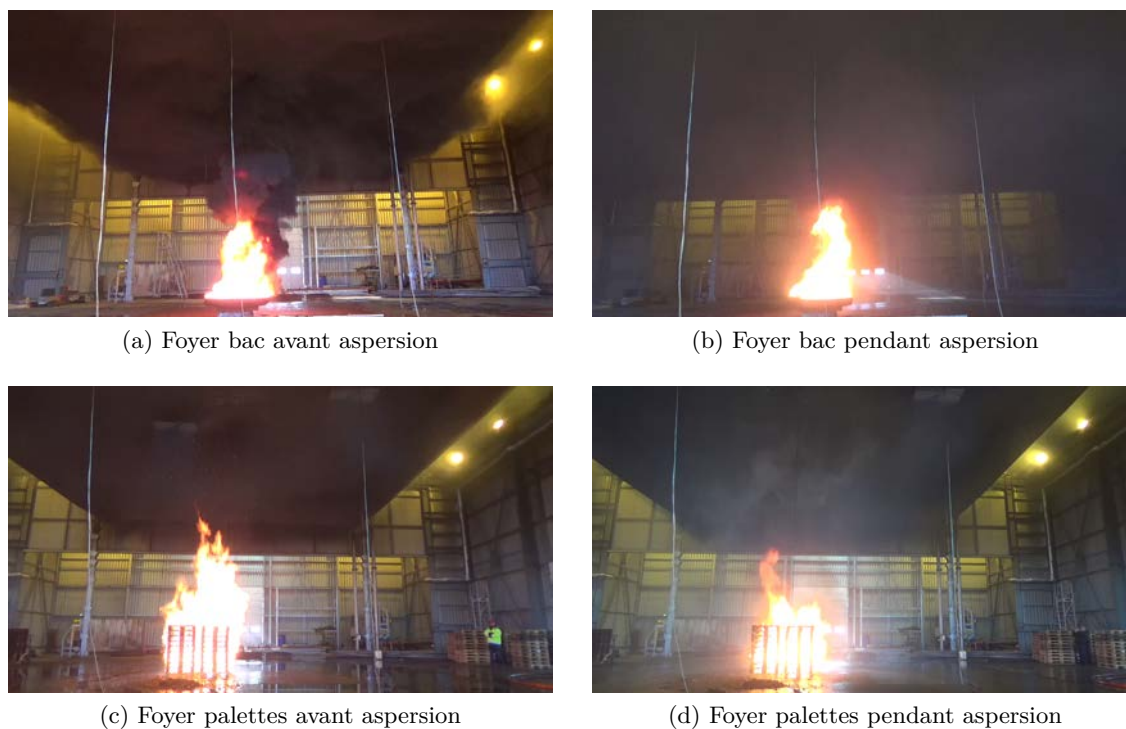


FIGURE 3.10 – Observation de l'effet de l'aspersion sur le foyer en fonction du type de combustible utilisé.

exutoire différent. L'objectif initial était de pouvoir utiliser les vidéos réalisées afin de déterminer la vitesse des fumées extraites par un traitement d'image. Il s'est avéré que le plafond mobile et les exutoires n'étaient pas totalement étanches et que les fumées s'échappant par ces fuites étaient suffisantes pour perturber les enregistrements et empêcher d'exploiter correctement les vidéos. Ces enregistrements ont cependant fourni des informations qualitatives sur les écoulements de fumées à travers les exutoires, notamment dans le cas des essais où les DENFC étaient maintenus ouverts depuis t_0 .

Comme lors de la campagne précédente, une station météo a été utilisée afin de recueillir les conditions de température, pression atmosphérique et humidité relative au cours des essais. Enfin, les événements ont été datés par deux observateurs munis de chronomètres.

3.3 Résultats expérimentaux

3.3.1 Liste des essais

À cette échelle, 27 essais ont été effectués et sont répertoriés dans le tableau 3.1. Sur la totalité de ces essais, 20 ont été réalisés avec un foyer bac et 7 avec un bûcher de palettes. Pour la moitié des essais bac, le foyer était positionné entre les 3 exutoires. Pour la seconde moitié, il a été installé directement au droit de l'exutoire numéro 1. Dans le cas des essais avec palettes,

le foyer était systématiquement positionné entre les 3 exutoires.

Trois types de scénarios ont été étudiés lors de ces essais :

- Ouverture des exutoires après activation automatique du premier sprinkleur ;
- Ouverture des exutoires avant un temps de référence d'activation du premier sprinkleur ;
- Ouverture des exutoires simultanément à l'activation automatique du premier sprinkleur ;

Un essai supplémentaire sans désenfumage a été réalisé avec le foyer bac, à titre de comparaison.

N°	Foyer	Scénario	t_{DENFC} - [s]	Nombre de sprinkleurs activés (t_{act} - [s])
1	Bac (E)	DENFC après aspersion (+ 60 s)	234	1 (174)
2	Bac (E)	DENFC après aspersion (+ 30 s)	232	3 (202; 347; 373)
3	Bac (E)	DENFC après aspersion (+ 120 s)	266	2 (146; 341)
4	Bac (E)	DENFC après aspersion (+ 90 s)	232	2 (142; 241)
5	Bac (E)	DENFC et aspersion simultanés	216	1 (216)
6	Bac (E)	DENFC avant aspersion (- 60 s)	80	3 (219; 447; 468)
7	Bac (E)	DENFC toujours ouverts	0	2 (282; 283)
8	Bac (E)	DENFC avant aspersion (- 30 s)	112	2 (325; 536)
9	Bac (E)	DENFC avant aspersion (- 90 s)	53	1 (304)
10	Bac (E)	DENFC après aspersion (+ 30 s)	187	2 (157; 230)
11	Bac (S)	DENFC après aspersion (+ 120 s)	361	1 (241)
12	Bac (S)	DENFC après aspersion (+ 60 s)	204	1 (144)
13	Bac (S)	Sans désenfumage	-	1 (217)
14	Bac (S)	DENFC et aspersion simultanés	197	1 (197)
15	Bac (S)	DENFC après aspersion (+ 30 s)	286	1 (256)
16	Bac (S)	DENFC après aspersion (+ 90 s)	330	1 (240)
17	Bac (S)	DENFC toujours ouverts	0	0
18	Bac (S)	DENFC avant aspersion (- 60 s)	131	0
19	Bac (S)	DENFC avant aspersion (- 30 s)	145	1 (461)
20	Bac (S)	DENFC toujours ouverts	0	0
21	Palettes	DENFC après aspersion (+ 60 s)	391	3 (331; 621; 624)
22	Palettes	DENFC et aspersion simultanés	271	1 (271)
23	Palettes	DENFC après aspersion (+ 120 s)	360	3 (240; 261; 267)
24	Palettes	DENFC toujours ouverts	0	2 (327; 327)
25	Palettes	DENFC après aspersion (+ 30 s)	365	2 (335; 367)
26	Palettes	DENFC avant aspersion (- 60 s)	305	3 (349; 392; 457)
27	Palettes	DENFC avant aspersion (- 30 s)	372	2 (424; 493)

TABLEAU 3.1 – Liste des essais réalisés dans le hall 3 dans le cadre de la seconde campagne expérimentale. (E) : Foyer positionné entre les exutoires. (S) : Foyer positionné sous l'exutoire 1.

3.3.2 Feux de bac

Comme indiqué dans le tableau précédent, le foyer bac de fioul a été utilisé lors des 20 premiers essais de cette campagne. Deux positions du foyer ont été étudiées. Dans la première configuration, le foyer était positionné sur la zone de feu, entre les trois exutoires. Ce cas constitue la configuration la plus probable lors d'un incendie. Dans une seconde partie, le même bac de fioul a été positionné directement sous l'exutoire 1 (le plus au Sud du hall) pour une nouvelle série d'essais. Cette configuration correspond au cas le plus défavorable identifié par Beyler et Cooper. Pour chaque position du foyer, des tests ont été réalisés avec ouvertures des exutoires avant et après aspersion afin d'observer un éventuel effet du désenfumage sur le temps d'activation du premier sprinkleur ou sur le nombre total de sprinkleurs activés.

3.3.2.1 Foyer positionné entre les exutoires

3.3.2.1.1 Utilisation du désenfumage après déclenchement de l'aspersion

Dans un premier temps, des essais ont été réalisés avec ouverture des exutoires à différents instants après l'activation du premier sprinkleur. De la même manière que lors de la campagne précédente, ce type d'essais permet : (1) d'étudier l'influence du désenfumage "tardif" sur les niveaux de température d'un environnement "sprinklé" et (2) de définir un temps de référence d'activation du premier sprinkleur, en l'absence de désenfumage. Le tableau 3.2 répertorie les principales caractéristiques de ces essais. Les temps indiqués entre parenthèses correspondent aux délais d'ouverture des exutoires par rapport à l'activation du premier sprinkleur.

La position et les temps d'activation de tous les sprinkleurs activés au cours de ces essais sont indiqués sur la figure 3.11. Les temps d'ouverture des exutoires sont également reportés sur cette figure. Au minimum un sprinkleur s'est déclenché lors de chacun des tests et un maximum de trois a été observé lors de l'essai numéro 2. Au cours de ce test, de fortes bourrasques de vent se sont engouffrées dans le hall à travers les portes, inclinant fortement les flammes et déplaçant la zone d'impact du panache du foyer sur le plafond mobile. Il s'agit du seul essai de cette série dans lequel le sprinkleur SD14 (le plus proche du foyer) ne s'est pas déclenché. Compte tenu de ces circonstances, un second essai avec ouverture des exutoires 30 s après activation du premier sprinkleur a été réalisé.

Essai	Nb de sprinkleurs	1er sprinkleur	t_{act} - [s]	T_{act} - [°C]	T_{max} - [°C]
1 (+60 s)	1	SD14	174	94.5	95.0
2 (+30 s)	3	SD15	198	92.4	96.5
3 (+120 s)	2	SD14	146	91.1	91.1
4 (+90 s)	2	SD14	142	81.6	100.3
5 (+0 s)	1	SD14	216	88.8	93.1
10 (+30 s)	2	SD14	157	95.6	97.1

TABLEAU 3.2 – Liste des essais réalisés avec ouverture du désenfumage à différents instants après déclenchement du premier sprinkleur, dans le cadre des essais avec le foyer bac positionné entre les exutoires.

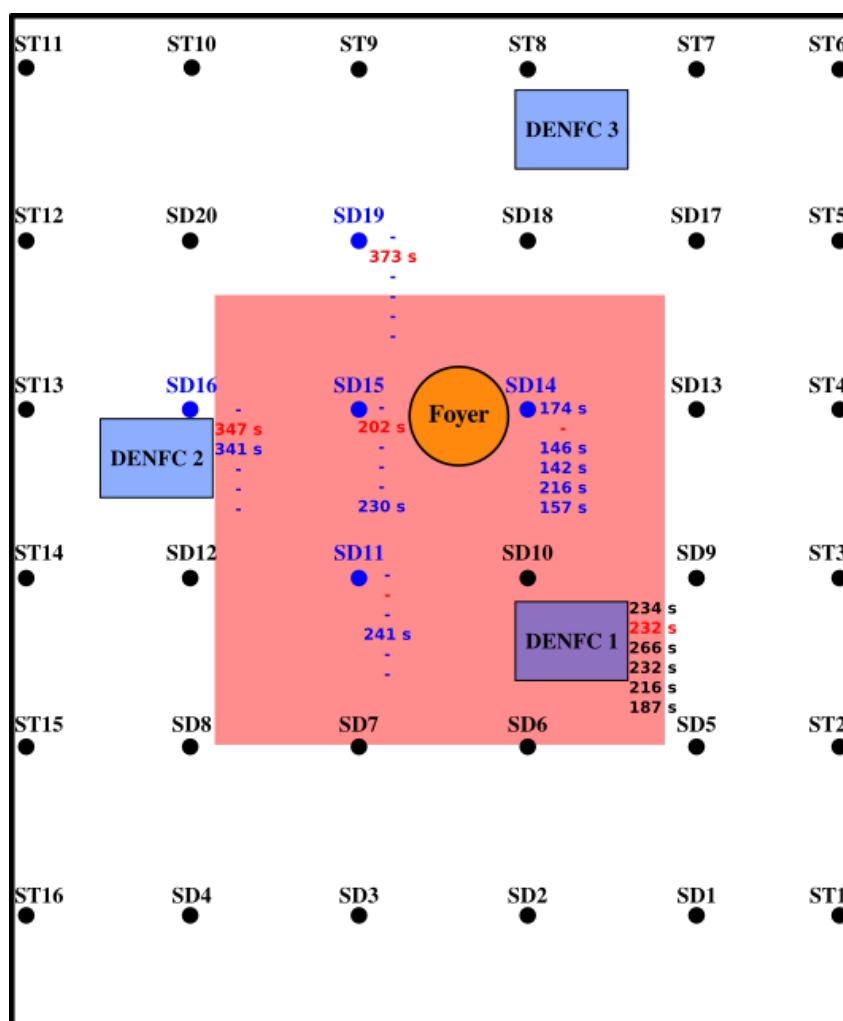


FIGURE 3.11 – Positions et temps d’activation des sprinkleurs lors des essais avec ouverture des exutoires après aspersion (bac positionné entre les exutoires).

L’évolution de la température mesurée au niveau du premier sprinkleur activé est tracée sur la figure 3.12 pour les différents essais. Les zones représentées en bleu correspondent à des intervalles de un et deux écarts types autour de la moyenne des temps d’activation du premier sprinkleur ($\bar{t}_{act} = 172\text{ s}$). De la même manière, les zones rouges correspondent à des intervalles de un et deux écarts types autour de la moyenne des températures mesurées au moment de l’activation du sprinkleur ($\bar{T}_{act} = 95\text{ °C}$). Ces écarts types valent respectivement 27 s et 3 °C . Au cours de ces essais, la montée en température au niveau du sprinkleur est rapide, passant de 20 °C à 80 °C en un peu plus d’une minute. Ensuite, l’évolution est plus modérée et les fluctuations de température deviennent importantes avec des amplitudes de plus de 10 °C , jusqu’à activation du sprinkleur. Cette activation ne coïncide pas nécessairement avec le maximum de température relevé. Il est important de se rappeler que le déclenchement d’un sprinkleur survient lorsque la température de son élément sensible atteint sa valeur de rupture et que cette température est différente de celle de l’écoulement dans lequel elle est plongée.

En ne tenant pas compte de l’essai 2, un second sprinkleur s’est déclenché automatiquement

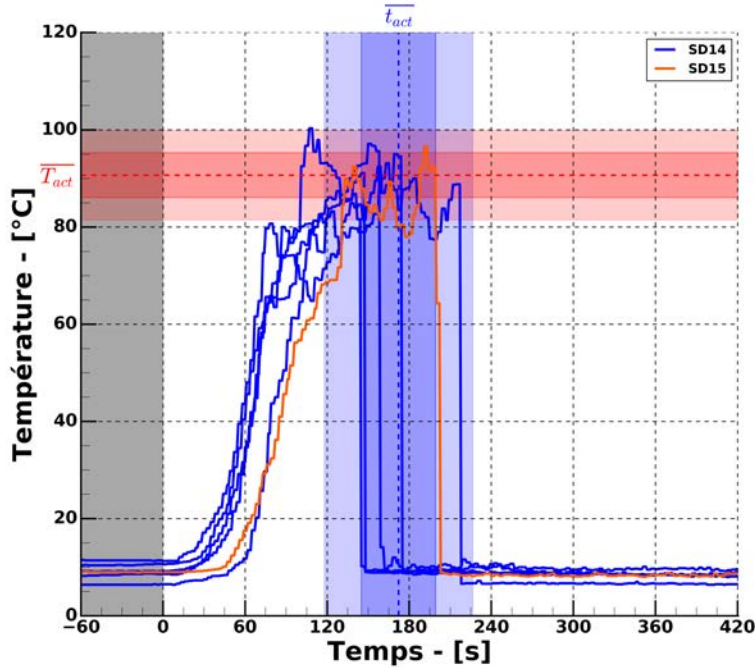


FIGURE 3.12 – Évolution de la température mesurée à proximité du premier sprinkleur activé lors des essais avec bac de fioul positionné entre les trois exutoires.

dans trois des cinq tests. Les numéros de ces sprinkleurs, leurs temps d'activation respectifs ainsi que les intervalles de temps entre les différents événements sont reportés dans le tableau 3.3. L'analyse de ces temps ne permet pas de montrer d'influence particulière du désenfumage sur le nombre total de sprinkleurs activés ni sur les temps d'activation des seconds sprinkleurs.

Essai	2nd Sprinkleur	t_{act} - [s]	T_{act} - [°C]	$\Delta t_{act,spk2-spk1}$ - [s]	$\Delta t_{act,spk2-denfc}$ - [s]
3 (+ 120 s)	SD16	341	92.9	195	75
4 (+ 90 s)	SD11	241	87.1	99	9
10 (+ 30 s)	SD15	230	71.7	73	43

TABLEAU 3.3 – Temps d'activation des seconds sprinkleurs lors des essais réalisés avec ouverture des exutoires après déclenchement du premier sprinkleur (bac positionné entre les exutoires).

Lors des essais 4 et 10, le second sprinkleur activé (respectivement SD11 et SD15) se trouvait dans une région proche du foyer (première couronne). Au contraire, lors de l'essai 3, le sprinkleur SD16 s'est déclenché sans que le sprinkleur SD15, pourtant situé entre le foyer et SD16, ne s'active. En comparant les températures mesurées à ces trois positions (voir figure 3.13), on constate que lors du déclenchement du premier sprinkleur, les températures aux têtes SD11 et SD16 sont identiques et légèrement en dessous de 80 °C. Au sprinkleur SD15 en revanche la température est plus élevée, la tête se trouvant plus proche du foyer. Une fois l'aspersion déclenchée, la température continue de monter légèrement au niveau des deux sprinkleurs les plus éloignés avant de diminuer au bout de 30 s. À ce moment, le refroidissement induit par l'aspersion

se fait ressentir et la température chute d'une quinzaine de degrés en une minute. Au niveau du sprinkleur SD15, la chute de température est plus brutale et est effective quelques secondes après le déclenchement de l'aspersion. À 240 s, les températures aux trois sprinkleurs sont identiques et de nouveau en augmentation jusqu'à l'ouverture des exutoires 30 s plus tard. Le déclenchement du désenfumage a pour conséquence une stabilisation des températures moyennes aux alentours de 80 °C tout en augmentant sensiblement leurs amplitudes d'oscillation. Ce phénomène est particulièrement important au niveau du sprinkleur SD15 avec des variations de près de 20 °C. À 341 s, le sprinkleur SD16 se déclenche alors que la température est identique à celle de SD15. Ayant subi des variations de températures plus faibles, l'élément sensible de SD16 a pu atteindre la température de rupture avant celui de SD15, pourtant plus proche du foyer. Une fois le second sprinkleur déclenché, la tête SD15 se trouve entre deux sprinkleurs en activité. La température à cette position chute alors à 40 °C, empêchant toute future activation avec ce foyer dont la puissance n'évoluera plus jusqu'à la fin de l'essai. Compte tenu des observations réalisées, il est probable que la conjugaison des perturbations produites par le premier sprinkleur et le déclenchement du désenfumage ait entraîné la non activation du sprinkleur SD15.

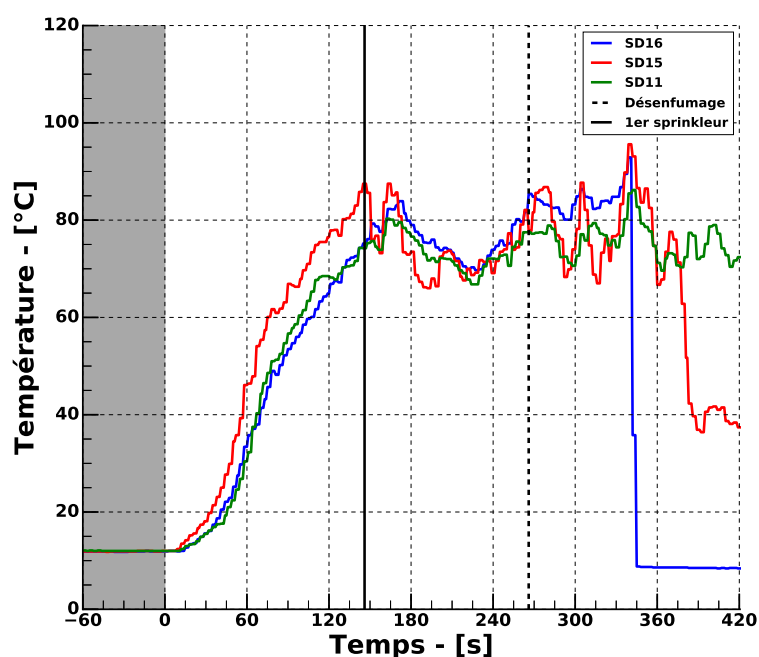


FIGURE 3.13 – Évolution de la température mesurée à proximité des sprinkleurs SD11, SD15 et SD16 lors de l'essai numéro 3.

Intéressons nous maintenant aux températures des gaz extraits par les exutoires. L'évolution de ces températures lors de l'essai 3 est représentée sur la figure 3.14. Jusqu'au déclenchement du premier sprinkleur, les températures sont identiques aux trois positions. Lors de l'activation de l'aspersion, la température subit une baisse de 20 °C au niveau de l'exutoire 1, le plus proche du foyer. Cette diminution est ressentie temporairement et de manière plus faible dans les exutoires 2 et 3 avec une réduction d'environ 10 °C en une minute avant de ré-augmenter jusqu'à 80 °C jusqu'au déclenchement du désenfumage. Lorsque cela se produit, la température baisse quelques

instants dans les exutoires 2 et 3 alors qu'elle reste constante au niveau du DENFC 1. Enfin, lorsque le second sprinkleur se déclenche (SD16), les températures aux exutoires 2 et 3 diminuent subitement avant d'osciller autour de 70 °C jusqu'à l'extinction manuelle du foyer réalisée à 420 s. À l'inverse, la température mesurée dans l'exutoire 1 augmente puis finit par fluctuer également autour de la même valeur que celles mesurées dans les deux autres ouvrants.

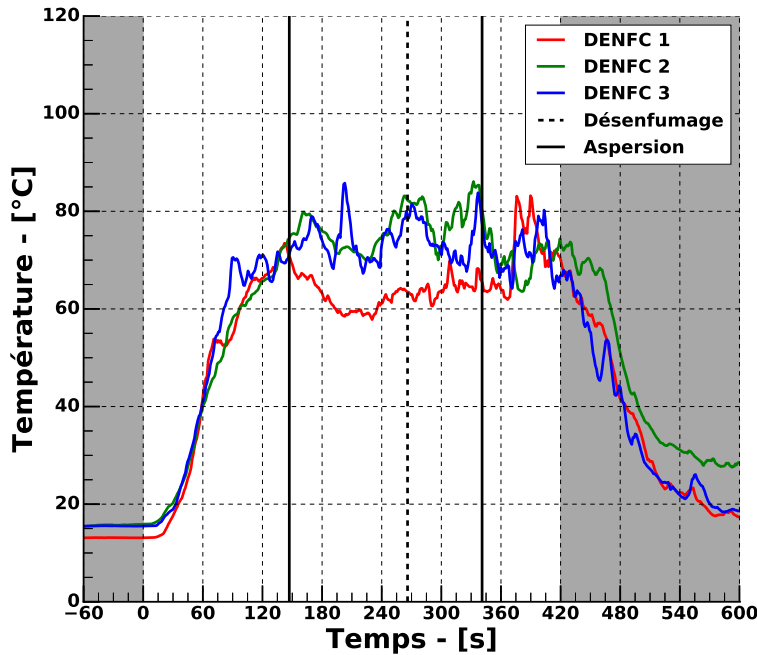


FIGURE 3.14 – Évolution des températures mesurées dans les trois exutoires lors de l'essai 3 (ouverture des exutoires 120 s après déclenchement de l'aspersion).

Ces résultats montrent que le refroidissement produit par le spray d'un sprinkleur est en mesure de réduire les températures au niveau des exutoires et ainsi de potentiellement diminuer l'efficacité de désenfumage d'un ouvrant. Cependant ce phénomène doit être relativisé. Lorsque le premier sprinkleur s'est déclenché, seul l'exutoire 1 positionné à la limite de l'enveloppe du spray d'eau a été sensiblement affecté. Les températures mesurées au niveau des deux autres exutoires n'ont pas été altérées de manière significative, permettant ainsi aux exutoires de conserver une certaine efficacité. On peut ainsi constater que le refroidissement généré par le sprinkleur n'est pas uniforme sous le plafond.

Une façon d'observer ce phénomène est d'étudier les températures moyennes mesurées au niveau des différentes couronnes de sprinkleurs. Cette dénomination désigne les sprinkleurs positionnés sur des cercles concentriques, centrés sur le foyer. Ainsi, la première couronne correspond aux sprinkleurs dans la proximité immédiate du foyer. Dans notre cas, lorsque le foyer est positionné entre les exutoires, cela correspond aux têtes SD10, SD11, SD14, SD15, SD18 et SD19. Cette première couronne est représentée en bleu sur la figure 3.15. Ensuite vient la seconde couronne (en vert), puis la troisième (en rouge) regroupant les sprinkleurs les plus éloignés du foyer.

L'évolution de ces températures moyennes, mesurées lors de l'essai 3, est reportée sur la figure 3.16. Comme on pouvait s'y attendre, jusqu'au déclenchement du premier sprinkleur la température moyenne de la première couronne (en bleu) est nettement supérieure à celles des deux autres couronnes, puisque la zone correspondante se trouve à proximité du foyer et de la zone d'impact du panache thermique sur le plafond. En s'éloignant légèrement de cette zone, les températures diminuent rapidement et ainsi les températures moyennes au niveau de la deuxième couronne et de la troisième couronne sont très proches. Lorsque le premier sprinkleur se déclenche, la température de la première couronne diminue rapidement, rejoignant les températures des deux autres couronnes. Afin de ne pas fausser les résultats, la température mesurée au niveau du premier sprinkleur n'est pas prise en compte, le thermocouple étant impacté par les gouttes du spray. Un refroidissement, plus faible, est également ressenti au niveau de la seconde couronne 30 s après activation de l'aspersion. La température moyenne de la troisième couronne n'est quant à elle que très peu affectée. Lors de l'ouverture des exutoires, la température de la première couronne chute d'une dizaine de degrés puis oscille jusqu'au déclenchement du second sprinkleur. Après cet instant, la température diminue jusqu'à environ 50 °C. Un refroidissement est également observable dans la zone de la seconde couronne, suivi d'une stabilisation de la température moyenne. Ce second sprinkleur (SD16) appartenant à la seconde couronne, les valeurs de température qu'il mesure ne sont plus prise en compte dans le calcul de moyenne après son activation. Avant que l'extinction ne soit réalisée, on constate que la température moyenne de la zone la plus éloignée du foyer se trouve être la plus élevée et a augmenté progressivement durant toute la durée de l'essai. Ces résultats confirment donc que la plus grande partie du refroidissement produit par l'aspersion est réalisée dans son voisinage immédiat. Un refroidissement global est observé sous le plafond, mais ses effets diminuent avec l'éloignement du foyer. Ces observations sont cohérentes avec celles réalisées à plus petite échelle lors de la campagne précédente.

3.3.2.1.2 Utilisation du désenfumage avant déclenchement de l'aspersion

Une seconde série d'essais a été réalisée avec ouverture des exutoires avant activation du premier sprinkleur. Pour ces essais, le bac de fioul est toujours positionné entre les DENFC. Comme lors de la campagne précédente, un temps de référence d'activation du premier sprinkleur a été déterminé en utilisant les valeurs obtenues lors des essais précédents. De nouveau, le temps de déclenchement de l'aspersion le plus court (142 s) a été utilisé comme référence afin de limiter le risque de déclenchement inopportun de l'aspersion avant l'ouverture des exutoires. Trois nouveaux essais ont été réalisés avec ouverture des exutoires 30 s, 60 s et 90 s avant ce temps de référence. Lors d'un quatrième essais, les exutoires ont été maintenus en position ouverte durant toute la durée du test. Le tableau 3.4 répertorie les principales caractéristiques de ces essais. La position et les temps des sprinkleurs activés sont présentés sur la figure 3.17, ainsi que les temps de déclenchement du désenfumage.

Lors de l'essai 9, un seul sprinkleur s'est déclenché contre 3 lors de l'essai 6. Deux sprinkleurs se sont activés pendant les essais 7 (sans désenfumage) et 8. L'évolution de la température mesurée pendant ces quatre essais à proximité du premier sprinkleur activé est tracée sur la figure 3.18. Les zones colorées en bleu et en rouge correspondent aux intervalles de deux écarts types autour de la moyenne des temps d'activation et, respectivement, de la moyenne des températures lors de l'activation. Ces moyennes correspondent à celles de la figure 3.12, déterminées lors des essais avec ouverture des exutoires après activation du premier sprinkleur. Cela permet de

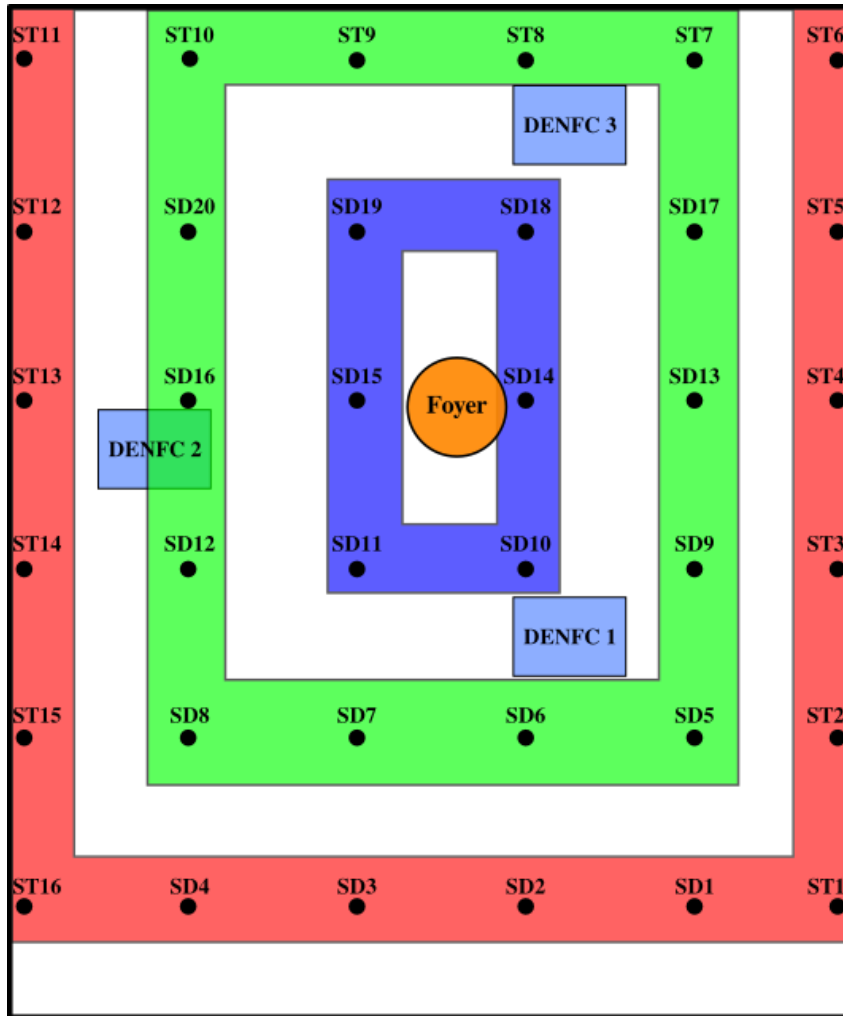


FIGURE 3.15 – Représentation schématique de la première (en bleu), seconde (en vert) et troisième (en rouge) couronnes de sprinklers.

visualiser l'effet du défenfumage déclenché avant l'aspersion.

Lors de l'essai 6 (-60 s), le premier sprinkleur s'est déclenché à un temps compris dans l'intervalle de deux écarts types à la moyenne des temps d'activation du sprinkleur de la série d'essais précédente. Dans les trois autres essais, le premier sprinkleur s'est déclenché bien au delà de cet intervalle, au plus tôt à 304 s (essai 9 avec ouverture des exutoires 90 s avant t_{ref}). En faisant la moyenne des températures mesurées à proximité des sprinklers lors de leur activation, on constate une légère diminution de cette valeur par rapport à celle obtenue lors de la série d'essais avec ouverture des exutoires après déclenchement du premier sprinkleur ($\bar{T}_{act,av} = 88.2$ °C contre $\bar{T}_{act,ap} = 90.6$ °C). Cette différence est cependant faible (devant les écarts types) pour considérer qu'il s'agit d'un refroidissement significatif.

Ces résultats semblent montrer que l'ouverture des exutoires avant l'activation du premier sprinkleur a induit un retard d'activation de ce dernier. Le nombre total de sprinklers activés ne semble cependant pas être significativement impacté par cette stratégie. Il n'a pas non plus

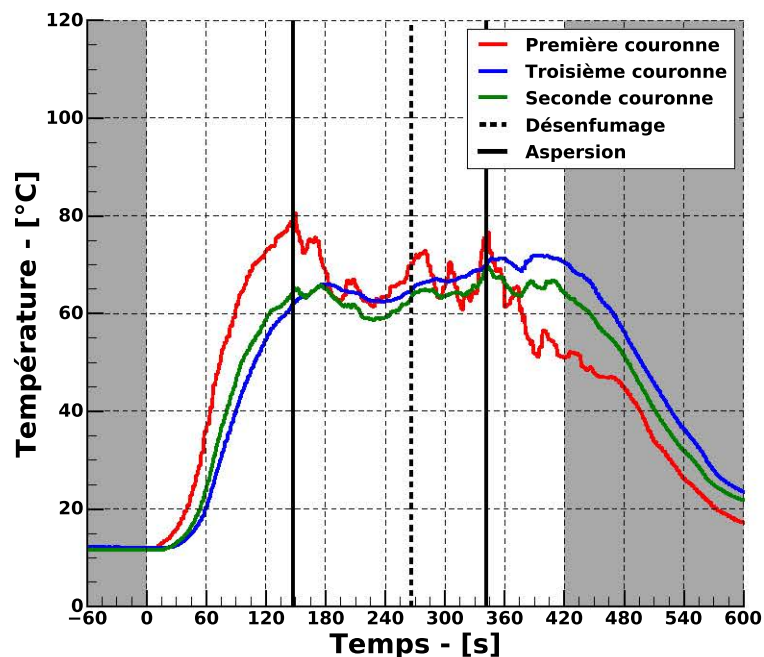


FIGURE 3.16 – Évolution des températures moyennes des première, seconde et troisième couronnes de sprinklers autour du foyer lors de l'essai 3.

été constaté de "saute de sprinklers", toutes les têtes déclenchées appartenant à la première couronne.

Afin d'estimer l'effet du désenfumage sur les niveaux de température sous le plafond, on trace sur la figure 3.19 l'évolution de la moyenne des températures mesurées au niveau des 36 sprinklers dans le cadre des essais avec ouverture des DENFC après aspersion (figure 3.19a) et avant aspersion (figure 3.19b). Sur ces figures, chaque essai et les événements associés à cet essai sont représentés. L'activation de chaque sprinkleur est représenté par un trait plein vertical tandis que le déclenchement du désenfumage par un trait en pointillé.

En ne tenant pas compte de l'essai 5 qui présente un léger retard dans la dynamique de

Essai	Nb de sprinklers	1er sprinkleur	t_{act} - [s]	T_{act} - [°C]	T_{max} - [°C]
6 (-60 s)	3	SD14	219	87.9	91.9
7 (toujours ouverts)	2	SD11	282	87.8	96.1
8 (-30 s)	2	SD15	325	91.9	92.0
9 (-90 s)	1	SD15	304	85.3	86.9

TABLEAU 3.4 – Liste des essais réalisés avec ouverture du désenfumage à différents instants avant déclenchement du premier sprinkleur, dans le cadre des essais avec le foyer bac positionné entre les exutoires.

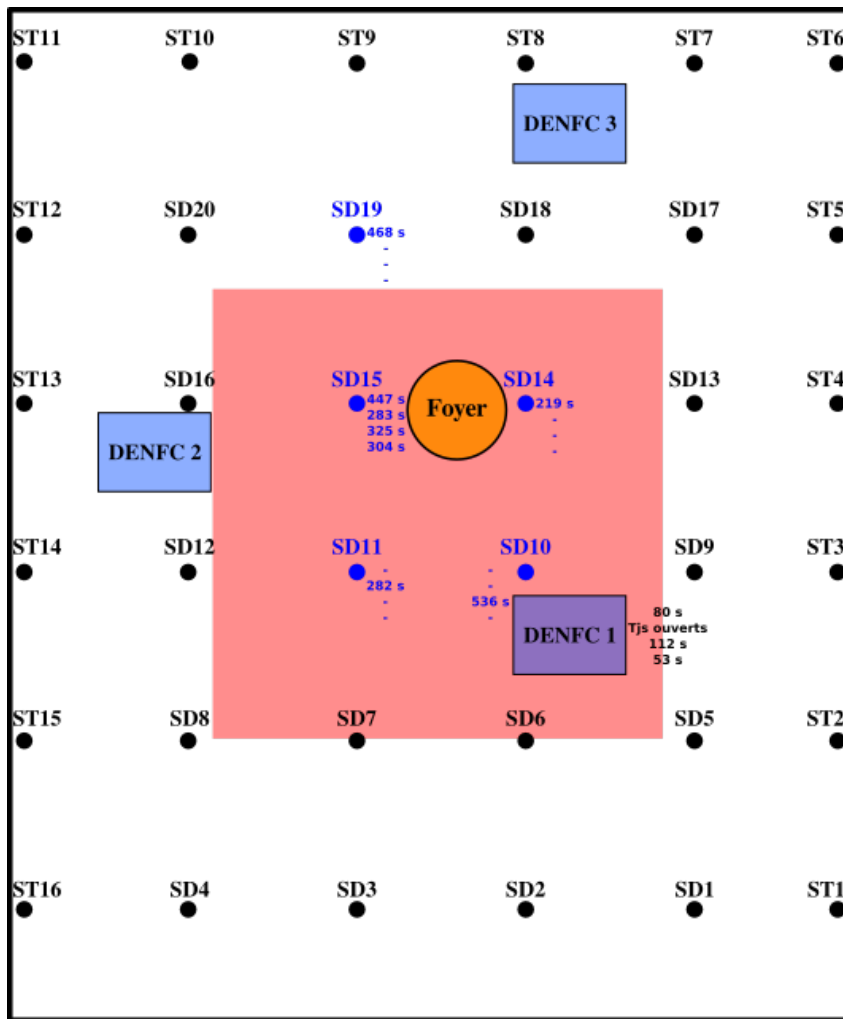


FIGURE 3.17 – Positions et temps d'activation des sprinkleurs lors des essais avec ouverture des exutoires avant aspersion (bac positionné entre les exutoires)

montée en puissance, la température moyenne au niveau du plafond était d'environ 60°C à 120s lors des essais avec ouverture des exutoires après activation du premier sprinkleur. Dans les essais avec déclenchement précoce du désenfumage, en ne tenant pas compte de l'essai 9, la température moyenne du plafond atteint 60°C à 180s, soit une minute plus tard que dans les essais précédents. Le désenfumage semble donc avoir contribué à limiter l'élévation moyenne de température sous le plafond mobile lors des premières minutes de ces essais.

Lors du déclenchement du premier sprinkleur, la moyenne des températures mesurées à tous les sprinkleurs est de 66°C lors des essais avec ouverture des DENFC après aspersion contre 65°C lors des autres essais. Une fois le sprinkleur activé, un refroidissement est observable dans la majorité des essais. En comparant les différentes valeurs de chute de température, on constate que le refroidissement semble plus important dans les essais où les exutoires étaient ouverts avant que le sprinkleur n'entre en action avec une différence de température moyenne de 14°C contre seulement 8°C dans le second cas.

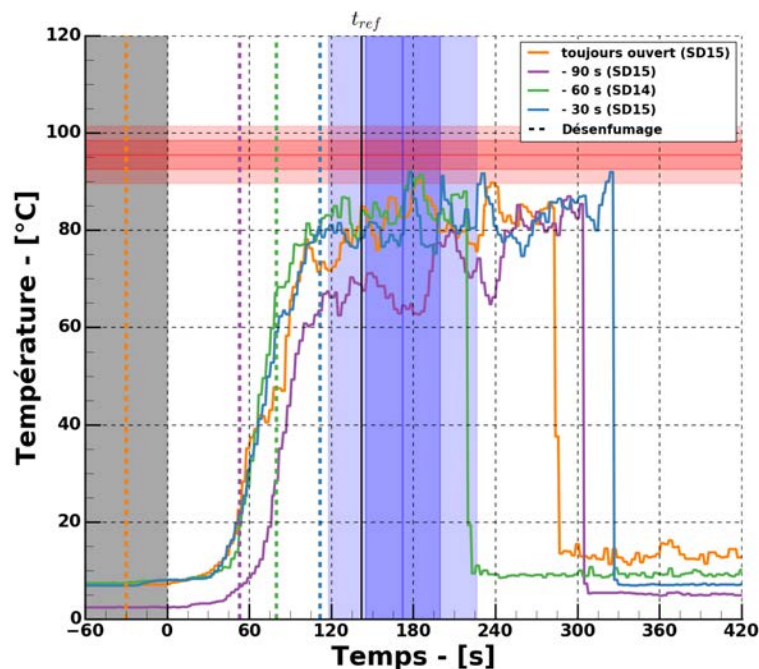


FIGURE 3.18 – Évolution de la température mesurée à proximité du premier sprinkleur s'étant déclenché lors des essais avec ouverture des exutoires avant activation du premier sprinkleur (bac de fioul positionné entre les exutoires).

Il est intéressant de noter le comportement de la température moyenne de l'essai 10. Durant ce test, les deux sprinkleurs les plus proches du foyer (SD14 et SD15) se sont déclenchés à un peu plus d'une minute d'intervalle. Comme on peut l'observer sur la figure 3.20, l'effet combiné de ces deux sprays a eu pour conséquence une forte réduction de la puissance du foyer et donc une réduction importante des températures mesurées au niveau du plafond.

3.3.2.2 Foyer positionné sous un exutoire

Pour la seconde phase de cette campagne, le bac de fioul est positionné directement sous l'exutoire numéro 1. Dix essais ont été réalisés dans cette configuration. Au cours de 5 de ces essais, les exutoires ont été ouverts après activation du premier sprinkleur. Dans quatre autres essais, les exutoires ont été ouverts à différents instants avant un temps de référence d'activation de l'aspersion. Enfin, un dernier essai a été réalisé sans désenfumage, à titre de comparaison.

Lors de ces essais, des difficultés d'allumage des foyers ont nécessité une légère modification du protocole expérimental. En effet, du fait des faibles températures initiales, il a parfois été nécessaire de préchauffer quelques instants (jusqu'à près de quatre minutes dans un cas) le combustible contenu dans le bac avant de parvenir à l'enflammer. Ce temps de préchauffage était variable en fonction des essais. En conséquence, le temps auquel le foyer était pleinement développé variait considérablement d'un essai à l'autre. Pour compenser ces décalages, le temps

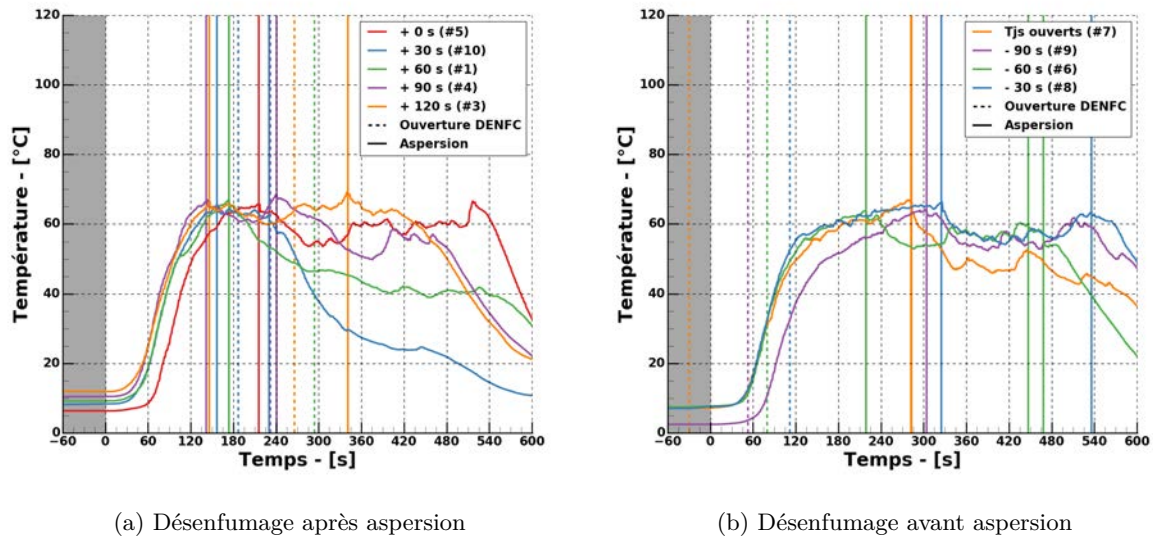


FIGURE 3.19 – Évolution de la température moyenne mesurée sous le plafond lors des essais avec ouverture des exutoires avant et après aspersion (bac positionné entre les exutoires).

t_0 a été considéré comme étant l'instant où la totalité de la surface de combustible était enflammée (précédemment, ce temps correspondait au début de l'allumage du bac). L'intégralité des résultats de cette série d'essais a donc été ajustée temporellement sur cette nouvelle origine.

3.3.2.2.1 Utilisation du désenfumage après déclenchement de l'aspersion

Les essais présentés dans cette partie sont listés dans le tableau 3.5. Les données de l'essai 13, sans désenfumage, sont présentées également dans ce tableau car elles constituent un temps supplémentaire pour le calcul du temps d'activation moyen du premier sprinkleur.



FIGURE 3.20 – Effet de l'aspersion sur le foyer lors de l'essai 10. De gauche à droite : avant aspersion ; 60 s après aspersion ; 120 s après aspersion.

Lors des essais 15 et 16, l'aspersion a eu un effet visible sur la puissance du foyer (figure 3.21). De la même manière que lors de l'essai 10, cette diminution apparente de la puissance s'est accompagnée d'une réduction des températures mesurées au niveau du plafond ainsi que de la quantité de suies produites.



FIGURE 3.21 – Influence du sprinkleur SD10 sur le foyer de l'essai 15. À gauche : avant aspersion. À droite : quelques minutes après l'activation de l'aspersion.

Au cours de ces essais, seul le sprinkleur SD10 s'est déclenché. Ce sprinkleur se trouve dans le coin Nord Ouest de l'exutoire, à quelques centimètres de l'ouvrant, et est donc positionné dans la zone d'impact du panache thermique sur le plafond. En comparaison au nombre de sprinkleurs déclenchés lors des essais réalisés avec le foyer positionné entre les exutoires, il semble que l'utilisation du désenfumage dans cette configuration particulière a limité le nombre de sprinkleurs activés en évacuant une grande quantité de chaleur par le DENFC 1.

Le temps moyen d'activation du sprinkleur est estimé à 130 s après la fin de l'allumage du foyer. La température moyenne mesurée lors de l'activation du sprinkleur est quant à elle estimée à 92.6 °C. Cette température est légèrement inférieure à celle obtenue lors des essais avec le bac positionné entre les exutoires (95 °C). La température mesurée lors de l'essai 16 n'a pas été utilisée lors du calcul de moyenne, le thermocouple ayant subi un dysfonctionnement durant ce test (l'indication du déclenchement du sprinkleur reste cependant fiable).

Essai	Nb de sprinkleurs	1er sprinkleur	t_{act} - [s]	T_{act} - [°C]	T_{max} - [°C]
11 (+120 s)	1	SD10	130	96.3	96.7
12 (+60 s)	1	SD10	90	92.0	93.5
13 (sans DENFC)	1	SD10	137	98.1	98.1
14 (+0 s)	1	SD10	117	85.4	87.0
15 (+30 s)	1	SD10	133	91.0	91.4
16 (+90 s)	1	SD10	175	80.5	80.5

TABLEAU 3.5 – Liste des essais réalisés avec ouverture du désenfumage à différents instants après déclenchement du premier sprinkleur (bac positionné sous l'exutoire 1).

L'évolution de la température mesurée à proximité du sprinkleur SD10 est présentée sur la figure 3.22. Le sprinkleur se trouvant au droit du foyer, la montée en température y est très rapide et présente une bonne répétabilité (en ne considérant pas l'essai avec le thermocouple défaillant).

L'évolution des températures mesurées dans l'exutoire situé au dessus du foyer est reportée

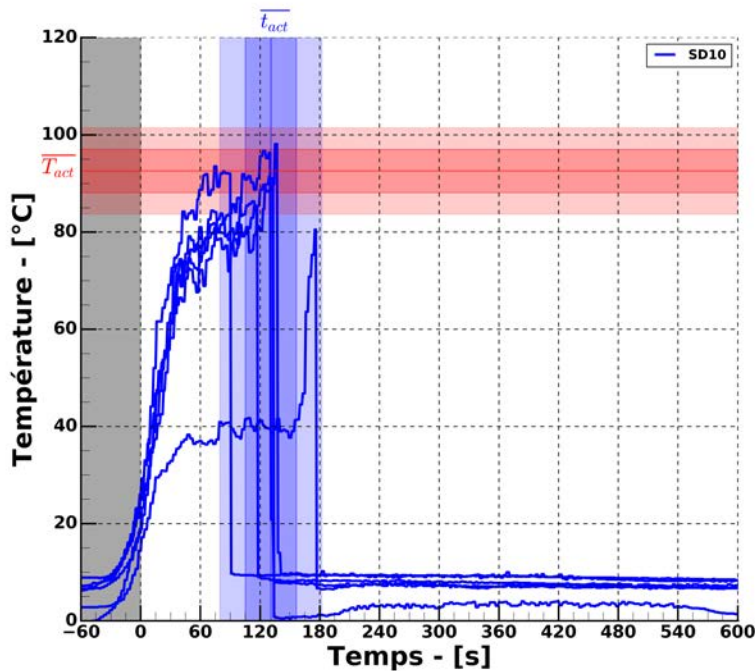


FIGURE 3.22 – Évolution de la température mesurée à proximité du sprinkleur SD10 lors des essais avec ouverture des exutoires après aspersion (bac de fioul positionné sous l'exutoire 1).

sur la figure 3.23a. Du fait de la faible distance séparant l'exutoire du sprinkleur SD10, on observe la même dynamique à ces deux positions. La température augmente très rapidement jusqu'à atteindre un maximum lorsque le sprinkleur se déclenche. L'exutoire étant au droit du foyer, les mesures de températures à cette position sont fortement bruitées à cause des fluctuations du panache thermique. Afin de faciliter la lecture des résultats, les signaux ont été traités sur la figure 3.23b avec une méthode de lissage. Lors de l'activation du sprinkleur, la température dans l'exutoire était supérieure à 95 °C. Lors des essais 11, 12 et 15, elle était supérieure à 100 °C. Dans tous les essais, la température chute brusquement lorsque l'aspersion est déclenchée, passant sous la barre des 40 °C en quelques secondes. Les thermocouples installés dans l'exutoire étant positionnés à une hauteur supérieure à celle du sprinkleur, ils ne sont pas impactés directement par le spray. L'origine de cette chute de température ne peut donc pas être attribuée à la projection d'eau sur l'élément de mesure. Ce refroidissement est la conséquence de l'absorption d'une quantité de chaleur par l'eau délivrée par le sprinkleur mais également de la perturbation du panache thermique par le spray. Une telle chute de température a pour conséquence directe une diminution de la flottabilité des gaz à cet endroit, phénomène moteur de l'évacuation des fumées par des dispositifs de désenfumage naturel. Si le désenfumage avait été réalisé uniquement par cet unique exutoire, l'installation aurait perdu en efficacité, le gradient de température à travers l'exutoire ayant été fortement réduit. Cela ne signifie pas pour autant que l'efficacité de l'ouvrant est nulle. Une partie des fumées et de la chaleur produites continue d'être extraite tant qu'il existe une différence de pression de part et d'autre de l'exutoire.

La présence de deux autres DENFC permet d'éviter une telle situation. L'évolution des tem-

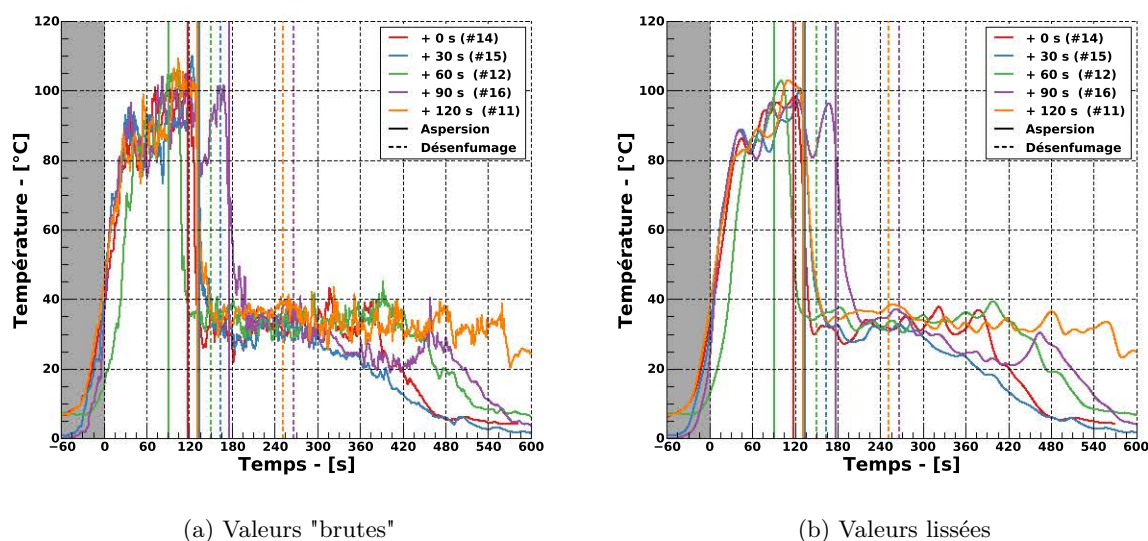


FIGURE 3.23 – Évolution de la température mesurée dans le DENFC 1 lors des essais avec déclenchement du désenfumage après aspersion (bac positionné sous l'exutoire 1).

températures mesurées dans leur section est reportée sur les figures 3.24a et 3.24b. À ces positions, l'effet de refroidissement induit par l'aspersion est nettement moins prononcé qu'à l'exutoire 1. Lorsque le sprinkleur est activé, la température est de l'ordre de 60 °C dans les deux ouvrants (70 °C lors de l'essai 11). Au niveau du DENFC 2, quelques secondes après le déclenchement du sprinkleur, les températures commencent à diminuer. Dans les essais 14 et 15, elle descend en dessous de 50 °C

Grâce à la distribution de la surface totale de désenfumage sur les trois exutoires, l'installation conserve une certaine efficacité globale malgré une diminution possible de l'efficacité de l'un de ses éléments. Ces résultats sont bien en cohérence avec les observations réalisées précédemment.

3.3.2.2.2 Utilisation du désenfumage avant déclenchement de l'aspersion

De nouveau des essais ont été réalisés avec ouverture des exutoires à différents instants avant que l'aspersion ne se déclenche. Pour cette série, la moyenne des temps d'activation du premier sprinkleur (recueillis pendant les essais 11 à 16 et présentés précédemment) a été choisie comme temps de référence ($t_{ref} = 130$ s). Les quatre essais menés sont listés dans le tableau 3.6 avec leurs principales caractéristiques. L'aspersion ne s'est déclenchée que lors de l'essai numéro 19, à 420 s soit près de 5 min après le temps de référence. Contrairement aux essais précédents, le sprinkleur qui s'est déclenché (SD9) n'est pas celui situé au droit du foyer (SD10). La moyenne des températures maximales mesurées au sprinkleur SD10 est inférieure de 10 °C à celle déterminée lorsque le désenfumage était ouvert après aspersion (83.1 °C contre 93.3 °C).

L'analyse des températures mesurées au niveau du sprinkleur SD10 (figure 3.25) met en évidence deux dynamiques d'évolution différentes. Lors des essais 18 et 19, les fumées s'accumulent

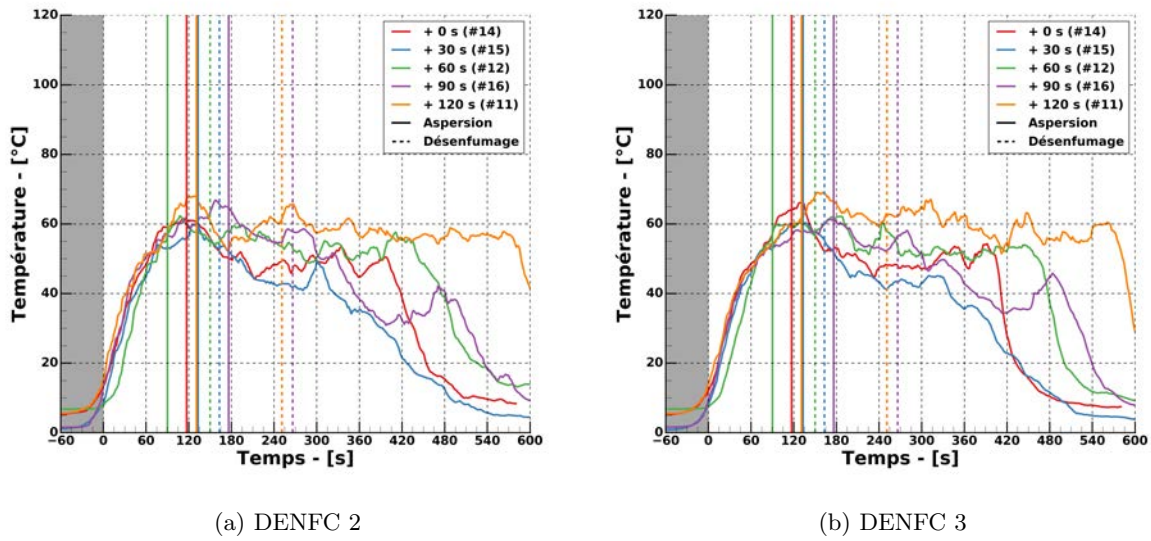


FIGURE 3.24 – Évolution des températures mesurées dans les exutoires 2 et 3 au cours des essais avec activation du désenfumage après aspersion (bac de fioul positionné sous l'exutoire 1).

Essai	Nb de sprinkleurs	1er sprinkleur	t_{act} - [s]	T_{act} - [°C]	T_{max} - [°C]
17 (toujours ouverts)	0	-	-	-	71.1
18 (-60s)	0	-	-	-	89.0
19 (-30s)	1	SD9	415	80.6	83.4
20 (toujours ouverts)	0	-	-	-	88.9

TABLEAU 3.6 – Liste des essais réalisés avec ouverture du désenfumage à différents instants avant déclenchement du premier sprinkleur (bac positionné sous l'exutoire 1).

au plafond pendant quelques instants avant l'ouverture des exutoires. Cela se traduit par une augmentation rapide de la température après allumage du foyer jusqu'à atteindre près de 90 °C lorsque le désenfumage est déclenché. Ensuite, une partie des fumées chaudes s'écoule à travers les DENFC et la température tombe alors jusqu'à 70 °C avant d'osciller autour de cette valeur jusqu'à la fin des essais, sans que le sprinkleur ne se déclenche. Cette baisse de température est plus rapide lors de l'essai 19 où l'exutoire a été ouvert le plus tardivement.

Lors des essais pendant lesquels les exutoires étaient toujours ouverts, en revanche, le panache du foyer s'écoulait librement à travers le DENFC 1 dès les premiers instants après l'allumage du foyer. L'enregistrement vidéo montre qu'une grande quantité de fumée est extraite à vitesse élevée par cet ouvrant rapidement après le début des essais. Cette évacuation précoce des fumées chaudes contribue donc à limiter l'accumulation d'énergie et l'élévation de température au niveau du plafond. La conséquence est donc une montée en température plus lente. Ainsi, 90 s après la fin de l'allumage du foyer, la température au niveau du sprinkleur se situe entre 60 °C et 70 °C et ce jusqu'à la fin de l'essai.

Au cours de l'essai 19, le sprinkleur SD9 (situé à 3 m à l'Est de SD10) s'est déclenché à

415 s. L'évolution de la température à cette position est également reportée sur la figure 3.25. Bien que cette température présente une première phase de croissance similaire à celle observée au sprinkleur SD10, 60 s après la fin de l'allumage du foyer, la température au sprinkleur SD9 n'est que de 66 °C contre 90 °C pour SD10. Après l'ouverture des exutoires, la température diminue jusqu'à descendre en dessous de 60 °C avant de remonter et d'osciller autour de 70 °C. Lorsque le sprinkleur finit par se déclencher, la température à son voisinage est du même ordre de grandeur que celle mesurée au sprinkleur SD10. Ce résultat indique que les niveaux de température au sprinkleur SD10 étaient suffisants pour permettre son activation. Il semble donc plausible que la non activation du sprinkleur SD10 soit due à des effets aérauliques locaux, comme observé au cours de la campagne expérimentale précédente. Ce sprinkleur se trouvant au bord de l'exutoire, lorsque celui ci est ouvert, l'écoulement des fumées à cette position s'effectue majoritairement selon la composante verticale. L'élément sensible du sprinkleur étant vertical également, les échanges convectifs entre l'ampoule et les fumées sont alors réduits lorsque cette configuration particulière se présente. Au niveau du sprinkleur SD9 (et de manière générale, au niveau des sprinkleurs adjacents), l'écoulement des fumées est principalement horizontal. Les échanges convectifs entre les fumées et l'ampoule du sprinkleur sont donc plus importants qu'au droit du foyer. Les niveaux de température à ces deux positions étant similaires (une fois le désenfumage activé), il est possible que ces phénomènes soient responsables de l'activation du sprinkleur SD9, avant le sprinkleur SD10.

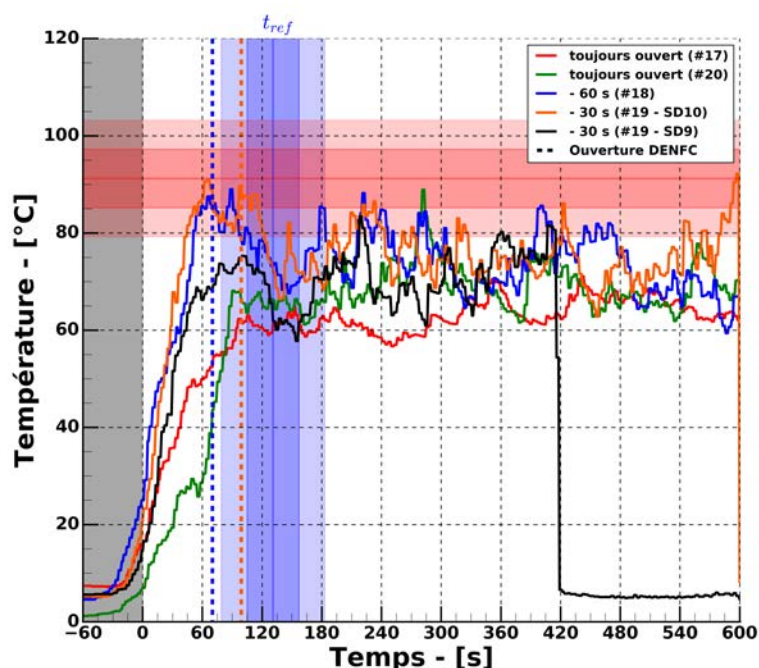


FIGURE 3.25 – Évolution des températures mesurées au niveau du sprinkleur SD10 lors des essais avec ouverture des exutoires avant aspersion (bac sous l'exutoire 1).

Au cours de ces essais, et comme constaté précédemment, lorsque les exutoires étaient ouverts après le déclenchement de l'aspersion, on observe des niveaux de température plus élevés au DENFC 1 qu'aux deux autres exutoires.

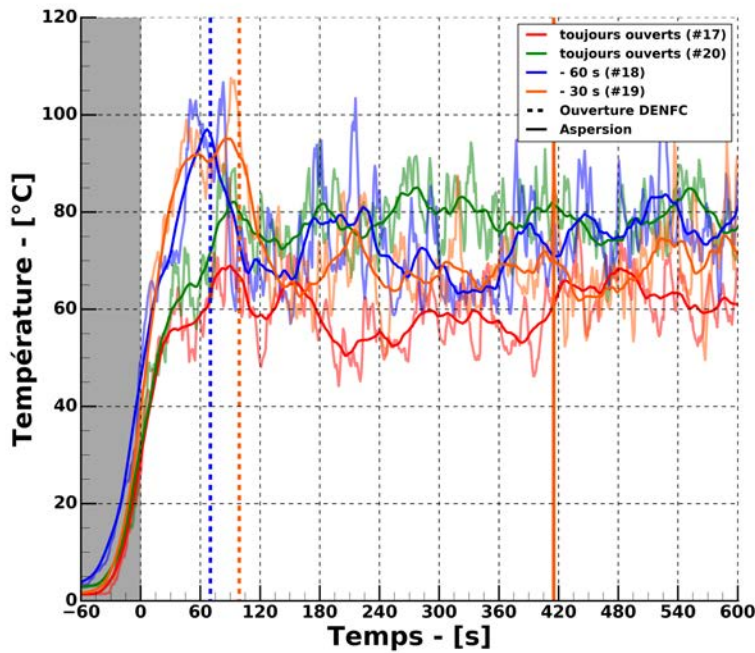


FIGURE 3.26 – Évolution de la température mesurée au niveau de l'exutoire situé au droit du foyer lors des essais avec déclenchement du désenfumage avant activation de l'aspersion.

L'évolution de la température moyenne sous le plafond mobile est tracée sur la figure 3.27. On constate que pour les quatre essais, cette température semble converger vers une valeur commune, qu'il y ait eu ou non activation de l'aspersion. Pour les deux essais lors desquels les exutoires ont été maintenus ouverts, une partie des fumées était évacuée en continu depuis l'allumage du foyer. En conséquence, l'accumulation des fumées et leur échauffement ont été limités.

Afin de visualiser les différences de distribution des températures sous le plafond mobile entre deux essais, on trace les contours de température à 10 m du sol sur la figure 3.28. Pour cela, les températures mesurées à chaque sprinkleur sont projetées sur un maillage représentant le plafond mobile puis une interpolation utilisant la méthode des splines de degré 2 est réalisée afin d'obtenir des contours de température. Dans les deux cas, le foyer se situe sous l'exutoire 1. La figure 3.28a (ligne du haut) correspond à un essai où les exutoires sont toujours ouverts. Sur la figure 3.28b, les exutoires sont ouverts 60 s après le déclenchement de l'aspersion.

- t_0 : Initialement, les deux cartes de température sont similaires. Dans les deux cas on commence à observer une élévation de température au droit du foyer (pour rappel, le temps t_0 correspond à la fin de l'allumage du foyer). En dehors de cette zone, les températures mesurées sont proches de la température initiale.
- $t_0 + 60\text{ s}$: L'élévation de température au droit du foyer est très prononcée dans l'essai 12. Le panache thermique impacte le plafond puis, les exutoires étant fermés, les fumées chaudes se propagent latéralement et provoquent une élévation de la température sur

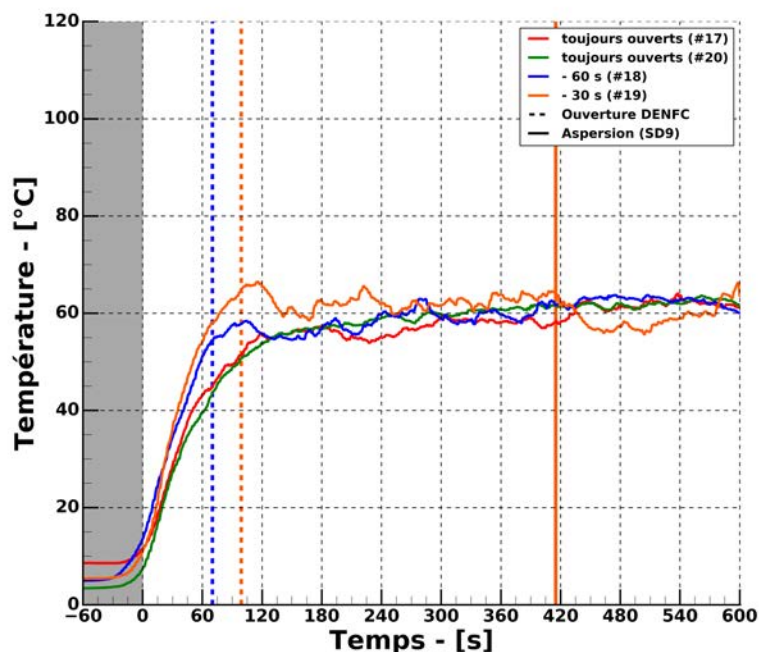
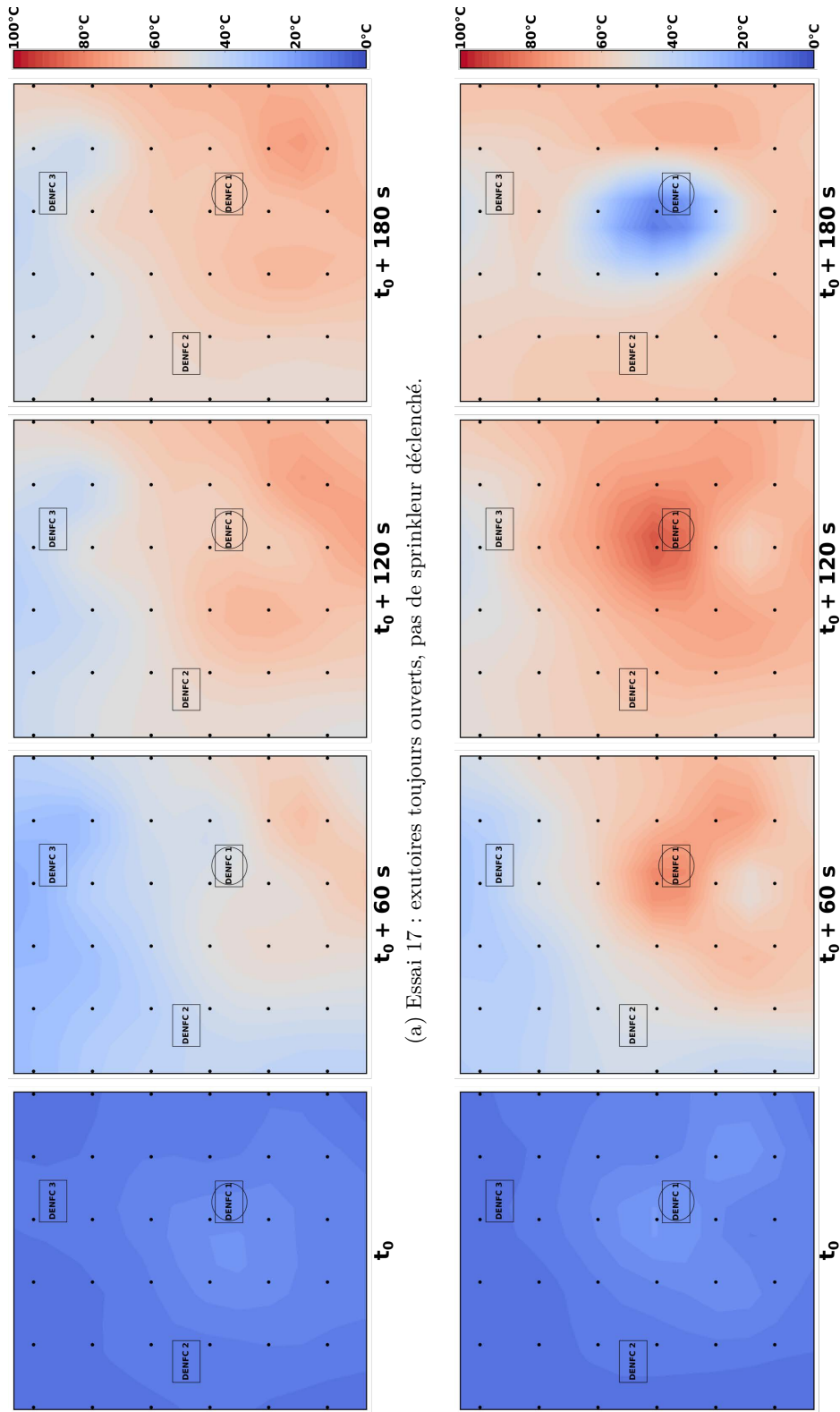


FIGURE 3.27 – Évolution de la température moyenne sous le plafond lors des essais avec ouverture des exutoires avant aspersion (bac positionné sous l'exutoire 1).

leur chemin. Cet échauffement décroît avec la distance au foyer. Dans l'essai 17, les températures sont visiblement plus faibles en tout point du plafond mobile. On note toutefois une légère élévation de température dans le coin Sud-Est du canton. La totalité des fumées ne peut pas être extraite par l'exutoire 1. Ce surplus se propage donc sous le plafond. Le coin Sud-Est étant le plus proche du foyer, les fumées chaudes sont rapidement accumulées à cet endroit, provoquant l'élévation de température constatée.

- $t_0 + 120\text{ s}$: La température au droit du foyer est très élevée dans l'essai 12 et la quasi totalité des points de mesure présente des températures supérieures à 60 °C . Une petite zone plus fraîche est visible au Nord de l'exutoire 3. Lors de l'essai 17, les niveaux de température restent globalement inférieurs à ceux de l'essai 12. Dans la partie Nord du canton, les températures restent faibles. Dans le coin Sud-Est, l'élévation de température constaté à 60 s s'est accentuée. Les températures à cette position sont proches de celles observées dans l'essai 12.
- $t_0 + 180\text{ s}$: Le refroidissement généré par le sprinkleur SD10 pendant l'essai 12 (déclenché à 137 s) est facilement identifiable. Dans une zone correspondant à peu près aux dimensions de l'enveloppe du spray, les températures sont en dessous de 40 °C . En dehors de cette zone, où le refroidissement est le plus efficace, on note une réduction globale des températures par rapport aux temps précédents. Cette diminution décroît avec la distance au sprinkleur. En effet, les bords du canton les plus éloignés du foyer n'ont pas été significativement affectés par le refroidissement du spray. Lors de l'essai 17, aucun sprinkleur ne s'est déclenché et les températures sont semblables à celles relevées à 120 s.

Ces résultats permettent de visualiser l'impact du désenfumage sur les températures au niveau du plafond. Déclenché tôt, il permet de limiter l'élévation de température dans des zones distantes du foyer en évacuant des fumées par les exutoires.



(a) Essai 17 : exutoires toujours ouverts, pas de sprinkleur déclenché.

(b) Essai 12 : exutoires ouverts 60s après déclenchement du premier sprinkleur (à $t_0 + 137$ s).

FIGURE 3.28 – Carte des températures mesurées au niveau du plafond mobile lors de deux essais avec foyer positionné sous l'exutoire 1.

3.3.3 Feux de palettes

La troisième et dernière série d'essais de cette campagne a été réalisée avec un foyer type feux de palettes, comme présenté au début de cette section. Ce foyer a uniquement été utilisé entre les trois exutoires, à la même position que le bac lors des essais 1 à 10. Sept essais ont été réalisés au total : quatre avec ouverture des exutoires après déclenchement de l'aspersion et trois avec ouverture des exutoires avant aspersion.

3.3.3.1 Utilisation du désenfumage après déclenchement de l'aspersion

Les temps d'activation, nombre et température d'activation des sprinkleurs lors des quatre premiers essais sont reportés dans le tableau 3.7. Pour ces essais, le sprinkleur SD14 s'est toujours déclenché en premier. Le nombre de sprinkleurs déclenchés par essai est compris entre 1 et 3. En observant leur position sur la figure 3.29, on constate que tous appartiennent à la première couronne de sprinkleurs, en dehors de SD6. Ce sprinkleur s'est déclenché tardivement lors de l'essai 21, quelques secondes après le sprinkleur SD11 et sans que le sprinkleur SD10 ne s'active.

Essai	Nb de sprinkleurs	1er sprinkleur	t_{act} - [s]	T_{act} - [°C]	T_{max} - [°C]
21 (+60 s)	3	SD14	331	103.9	103.9
22 (+0 s)	1	SD14	271	105.4	105.4
23 (+120 s)	3	SD14	240	119.5	119.5
25 (+30 s)	2	SD14	335	119.4	119.4

TABLEAU 3.7 – Liste des essais réalisés avec ouverture du désenfumage à différents instants après déclenchement du premier sprinkleur (palettes).

Comme expliqué en introduction de ce chapitre, les foyers de palettes ont été utilisés afin d'étudier un feu dont la puissance peut être réduite par l'effet du sprinkleur. Ce type de foyer présente cependant une mauvaise répétabilité de montée en puissance, principalement pendant la phase initiale de propagation du feu aux différents étages de palettes. Ces différences de dynamiques sont observables en analysant l'évolution des températures mesurées au niveau du premier sprinkleur activé (figure 3.30).

On constate que l'allumage des baguettes initiatrices est suivie d'une phase "couvante" où la température n'évolue quasiment pas au niveau du plafond. Pendant cette période, dont la durée varie d'une minute à plus de trois minutes, le feu se propage des baguettes aux étages inférieurs des palettes. Ensuite, la température augmente de façon exponentielle jusqu'à rupture de l'élément sensible du sprinkleur. Contrairement aux essais réalisés avec les bacs, la température est toujours en rapide augmentation lorsque le sprinkleur se déclenche, preuve que le foyer est toujours en phase de croissance. Les niveaux de températures mesurés à cet instant sont également supérieurs à ceux observés lors des essais bacs, avec un maximum de près de 120 °C lors des essais 23 et 25. Pour rappel, la température maximale mesurée lors des essais bac était de 100 °C.

Du fait de ces cinétiques différentes, il est difficile de comparer entre eux les résultats obtenus.

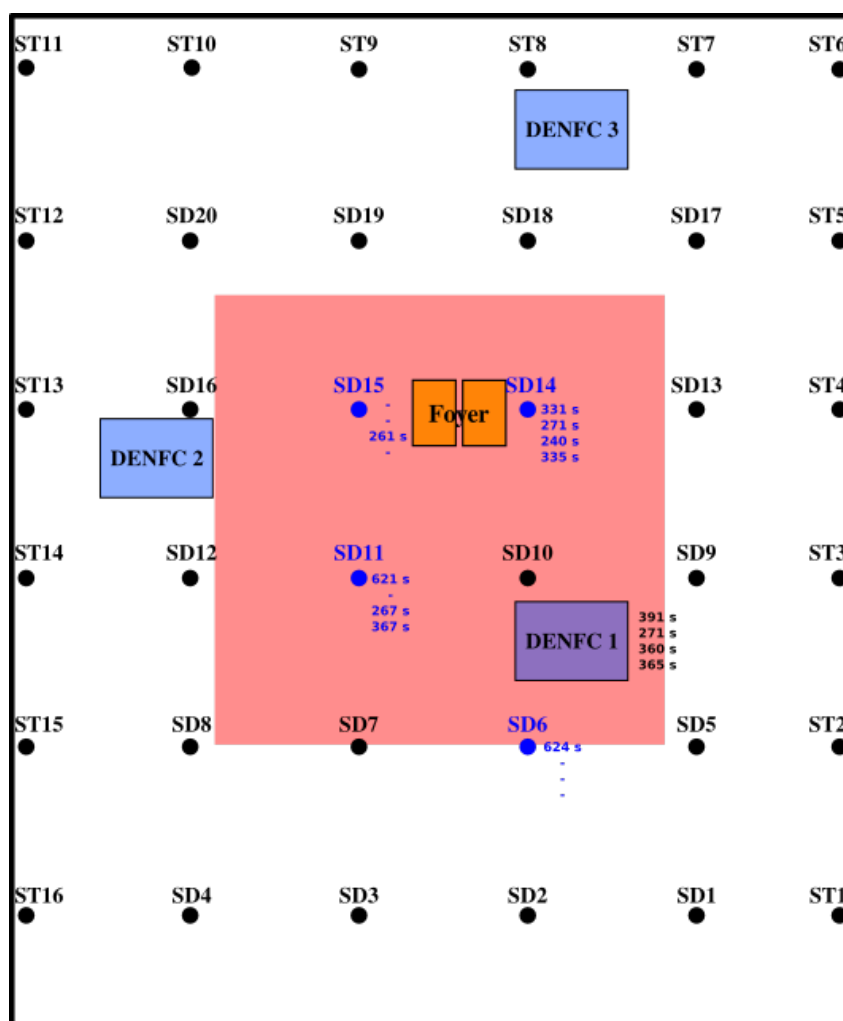


FIGURE 3.29 – Positions et temps d’activation des sprinkleurs lors des essais avec ouverture des exutoires après aspersion (feux de palettes).

Il est toutefois possible d’ajuster les différentes courbes en utilisant comme référence commune l’instant où le premier sprinkleur se déclenche. Cette opération a notamment été effectuée pour les températures mesurées au niveau du sprinkleur SD14, telles que présentées sur la figure 3.31. Cette modification permet de constater que la dynamique des températures lors de la phase de croissance rapide est très similaire pour tous les essais. La rupture du sprinkleur se produit près de trois minutes après le début de la phase de croissance rapide du foyer.

Afin de déterminer le temps de référence nécessaire à la conduite des essais avec ouverture des exutoires avant aspersion, il a été choisi de déterminer la température moyenne entre les essais atteinte à différents instants avant activation du premier sprinkleur. Ainsi, les exutoires ont été ouverts lorsque la température au niveau du sprinkleur SD14 a atteint 75 °C lors de l’essai 27 (désenfumage 30s avant aspersion). De la même manière, lors de l’essai 26 les exutoires ont été ouverts lorsque la température atteignait 50 °C (désenfumage 60s avant aspersion). Enfin, les ouvrants ont été maintenus ouverts durant toute la durée de l’essai 24.

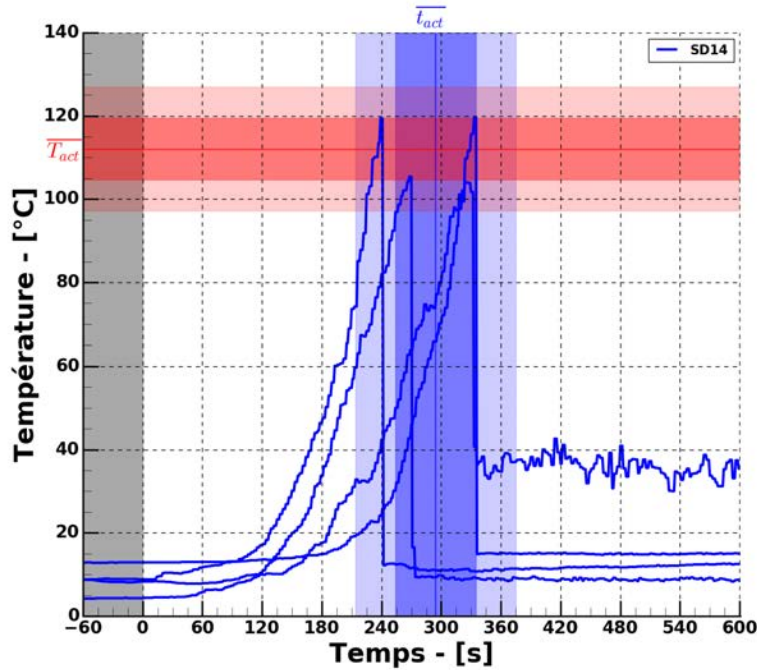


FIGURE 3.30 – Évolution de la température mesurée à proximité du sprinkleur SD14 lors des essais avec ouverture des exutoires après aspersion (feux de palettes).

3.3.3.2 Utilisation du désenfumage avant déclenchement de l'aspersion

Les caractéristiques de ces trois essais sont reportées dans le tableau 3.8.

Essai	Nb de sprinkleurs	1er sprinkleur	t_{act} - [s]	T_{act} - [°C]	T_{max} - [°C]
24 (toujours ouverts)	2	SD14	327	117	117.0
26 (-60 s)	3	SD14	349	116.7	116.7
27 (-30 s)	2	SD14	424	105.5	105.5

TABLEAU 3.8 – Liste des essais réalisés avec ouverture du désenfumage à différents instants avant déclenchement du premier sprinkleur (feux de palettes).

Lors de ces essais, au minimum deux sprinkleurs se sont déclenchés. Comme précédemment, le sprinkleur SD14, situé le plus proche du foyer a été le premier à s'activer. Au cours de l'essai 26, un sprinkleur de la seconde couronne s'est déclenché (SD9). Comme expliqué précédemment, la phase de croissance du foyer rend difficile la comparaison des résultats entre les deux séries d'essais, et notamment le temps de déclenchement du sprinkleur. Ainsi, les courbes sont ajustées sur le temps d'activation du sprinkleur SD14. Ces résultats sont ensuite comparés à ceux obtenus lors des essais avec ouverture des exutoires après déclenchement de l'aspersion. Cette comparaison est réalisée sur la figure 3.32.

On constate que les allures des courbes sont similaires, quel que soit le type de scénario

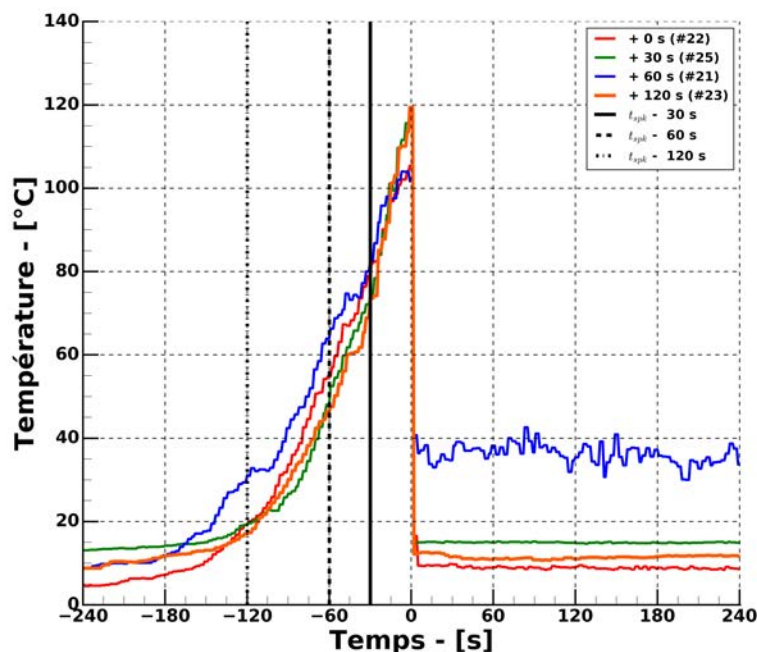


FIGURE 3.31 – Évolution de la température mesurée au niveau du sprinkleur SD14 et ajustée temporellement.

réalisé. Avec ce foyer, l'ouverture des exutoires avant déclenchement de l'aspersion ne semble pas avoir modifié la dynamique de température au niveau du sprinkleur. Les niveaux de température mesurés à proximité de la tête SD14 sont du même ordre que ceux obtenus lors des essais précédents. Contrairement aux feux de bac utilisés, les bûchers sont toujours en phase de croissance importante lors du déclenchement du premier sprinkleur.

3.3.4 Autres mesures

Au cours des essais réalisés lors de cette seconde campagne expérimentale, il n'a pas été observé d'élévation significative de la température mesurée par les thermocouples situés à hauteur d'homme, à distance du foyer. Compte tenu de la grande hauteur sous plafond et de la taille du foyer, les fumées rabattues au sol par le sprinkleur étaient à une température trop faible pour causer un réchauffement important à distance de la zone de spray. Les phénomènes constatés lors de la campagne précédente n'ont donc pas pu être observés dans les essais à plus grande échelle.

De même, il n'a pas été constaté de perte totale de visibilité comme cela a pu être le cas dans la géométrie précédente. Bien qu'étant très fumigène, le foyer fioul ne produisait pas un volume de fumée suffisant pour permettre l'enfumage total du hall lorsque les exutoires de ce dernier étaient ouverts. Des différences sont cependant observables sur la figure 3.33. Dans un cas (colonne de gauche), les exutoires sont maintenus fermés pendant la durée de l'essai. Dans le

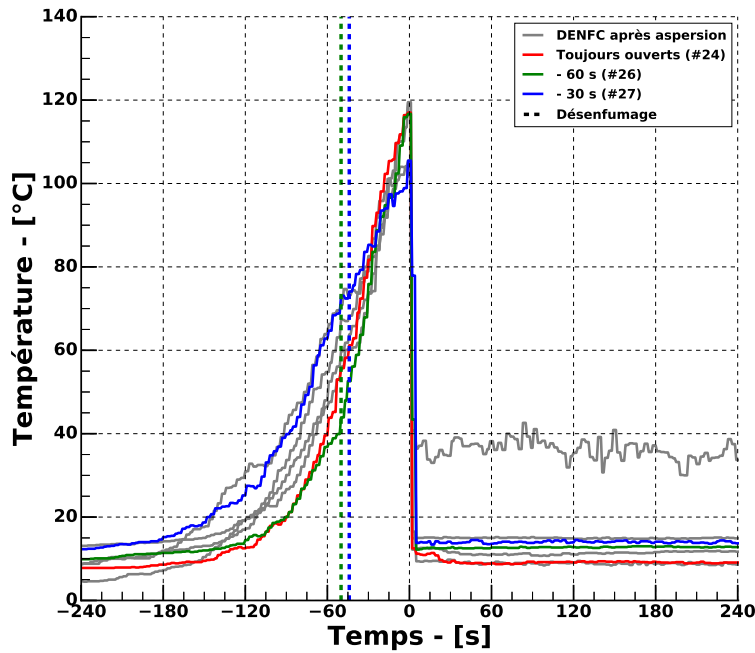
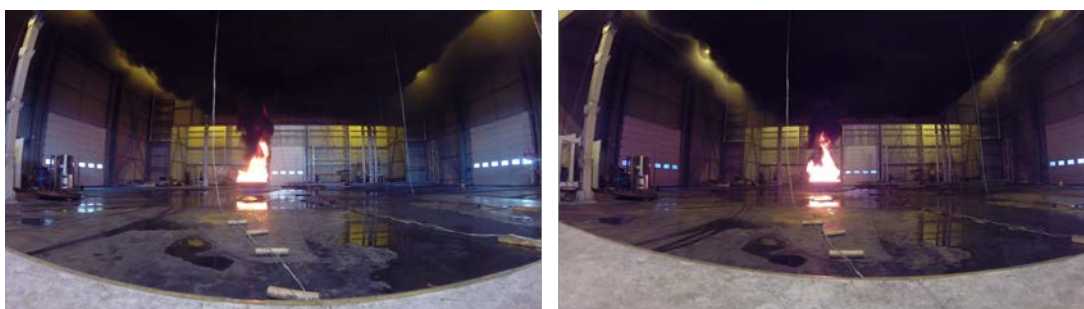


FIGURE 3.32 – Superposition des températures mesurées à proximité du sprinkleur SD14 lors de tous les essais utilisant le foyer de palettes.

second cas (colonne de droite), les exutoires sont ouverts en même temps que le déclenchement de l'aspersion. Sur la figure 3.33a, les deux cas sont identiques. Le foyer produit une grande quantité de fumée qui s'accumule dans le volume du cantonnement. Le trop plein déborde sous les écrans de cantonnement et est évacué par les exutoires du hall. Sur la figure 3.33b, l'aspersion est déclenchée depuis quelques secondes. Les exutoires sont en train de s'ouvrir sur l'image de droite. Les deux cas restent similaires. Lors de certains essais une descente locale du plafond de fumée au niveau des sprinkleurs actifs était observable. Ce phénomène est légèrement visible sur l'image de droite, au droit du foyer. On ne constate cependant pas de destratification massive des fumées. Enfin, sur la figure 3.33c, on constate que lorsque le désenfumage est utilisé, la quantité de fumées sortant du cantonnement sous les écrans est fortement réduite. On note également une plus faible quantité de fumées diffusées en partie basse du local (bien que plus difficilement observable sur les images).



(a) 1 min avant aspersion (exutoires fermés)



(b) Activation de l'aspersion (ouverture des exutoires à droite)



(c) 3 min après activation de l'aspersion (exutoires ouverts à droite)

FIGURE 3.33 – Comparaison visuelle de la quantité de fumée accumulée au niveau du plafond entre un essai sans désenfumage (à gauche) et avec désenfumage (à droite).

3.3.5 Synthèse des résultats expérimentaux obtenus

Les principaux résultats obtenus lors de cette seconde campagne expérimentale sont résumés ci-dessous. Des conclusions plus générale sur ces résultats seront présentées à la fin de ce chapitre.

Nombre de sprinkleurs activés

- Lorsque le foyer est situé entre les exutoires, le déclenchement du désenfumage préalablement à l'aspersion n'a pas de conséquence sur le nombre total de sprinkleurs activé ;
- Lorsque le foyer est situé directement sous l'exutoire 1 et que le désenfumage est déclenché après l'aspersion, seul le sprinkleur le plus proche de l'ouvrant s'active ;
- Aucun sprinkleur ne s'est déclenché dans trois des quatre essais avec ouverture du désenfumage préalablement à l'aspersion lorsque le foyer était sous l'exutoire.

Temps d'activation des sprinkleurs

- Lorsque le foyer bac est positionné entre les exutoires, l'ouverture du désenfumage préalablement à l'aspersion a retardé l'activation du premier sprinkleur ;
- Lorsque le foyer de palettes est positionné entre les exutoires, l'ouverture du désenfumage préalablement à l'aspersion n'a pas occasionné de retard significatif d'activation du premier sprinkleur.

Refroidissement

- Il n'a pas été constaté d'élévation de température à hauteur d'homme lors de ces essais. L'influence du désenfumage sur le refroidissement à cette hauteur n'a donc pas pu être étudié dans cette campagne.
- L'effet de refroidissement de l'aspersion est principalement localisé dans la zone couverte par le spray.
- L'effet de refroidissement du désenfumage est global au niveau du plafond.

Fumées

- Lors de ces essais, il n'a pas été constaté de perte de visibilité ni de destratification importante des fumées suite à l'aspersion.
- L'utilisation du désenfumage a contribué à limiter la quantité de fumées diffuses en partie basse.
- Le désenfumage a fortement réduit la quantité de fumée débordant sous les écrans de cantonnement.

3.4 Étude numérique

Comme pour la campagne précédente, certains de ces essais ont été reproduits numériquement grâce au logiciel FDS à des fins de validation et d'analyse complémentaire.

3.4.1 Préparation des simulations numériques

3.4.1.1 Local d'essais et conditions aux limites

Un modèle 3D du hall d'essais a été reproduit et une vue est présentée sur la figure 3.34. Les dimensions réelles du bâtiment ont été utilisées. Afin de reproduire le plus fidèlement possible les mouvements aérauliques, les ailes Nord et Sud ainsi que tous les exutoires du hall ont été modélisés. Les propriétés thermophysiques du bâtiment ont été utilisées pour configurer les surfaces du modèle. Ces propriétés sont reportées dans le tableau 3.9. En tenant compte des résultats obtenus lors de l'étude numérique réalisée lors de la première campagne, il n'a pas été jugé nécessaire de mener une analyse de sensibilité poussée aux conditions aux limites. Le rapport entre le volume total du bâtiment et la somme des surfaces exposées permet de justifier que des erreurs mineures sur les propriétés thermiques des matériaux n'auront pas d'effets significatifs sur les résultats attendus.

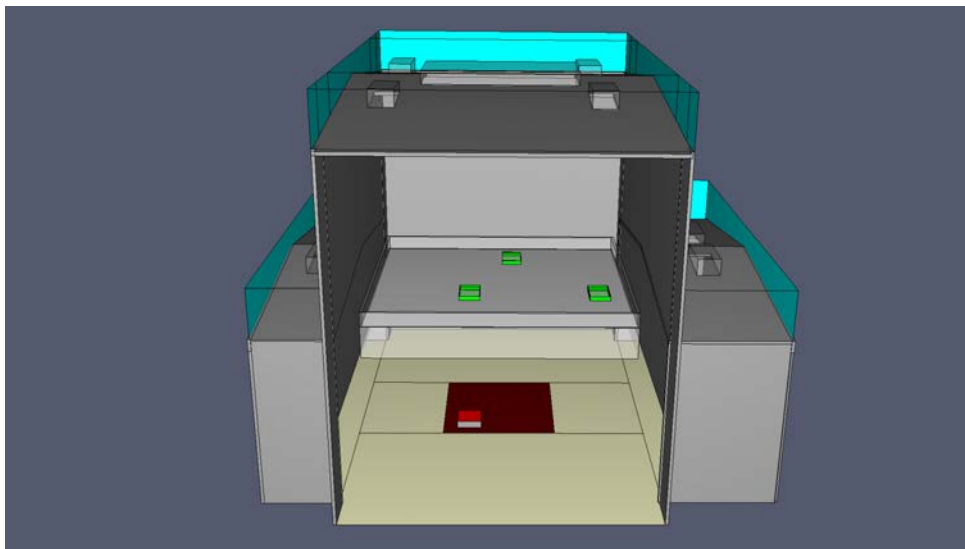


FIGURE 3.34 – Modèle 3D du hall d'essais utilisé lors de la seconde campagne expérimentale.

Les bordures extérieures du domaine sont configurées avec des conditions aux limites de type OPEN afin de représenter un milieu ambiant stable dans lequel les fumées évacuées du bâtiment vont se déverser. Les arrivées d'air créées lors de l'ouverture des exutoires sont également prises en compte avec ce type de conditions aux limites.

Matériaux	ρ - [kg·m ⁻³]	C_p - [kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	λ - [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
Acier	7800	0.45	50
Béton	2100	1	0.58
Brique réfractaire	2000	1.04	0.12
Verre	2500	0.75	1

TABLEAU 3.9 – Propriétés des matériaux utilisées en données d'entrée des simulations FDS [55], [4].

3.4.1.2 Foyers

La représentation numérique des foyers de palettes est une tâche complexe qui à elle seule aurait nécessité une partie conséquente du temps de l'étude. Il a donc été décidé de modéliser uniquement les essais utilisant le bac de fioul. Ce foyer est reproduit numériquement en imposant une valeur de puissance surfacique (HRRPUA) à une surface d'aire équivalente à celle du bac. Les valeurs de HRR déterminées expérimentalement par la méthode de perte de masse ont été utilisées comme données d'entrée des simulations. FDS traduit ensuite cette donnée en perte de masse de combustible et recalcule le HRR à partir de cette valeur à chaque itération, en prenant en compte les conditions environnantes (et principalement la concentration locale en dioxygène).

La comparaison entre la puissance déterminée lors de l'essai 6 et sa reproduction numérique est représentée sur la figure 3.35. Jusqu'à environ 90 s, le HRR expérimental est légèrement supérieur à la valeur calculée par FDS. Les deux valeurs fluctuent ensuite entre 3 MW et 4 MW jusqu'à l'activation du sprinkleur. Le délai entre l'instant d'activation de l'aspersion et la chute de la valeur expérimentale du HRR est dû à la méthode de lissage employée sur le signal de perte de masse. Comme expliqué précédemment, une fois l'aspersion déclenchée il n'est plus possible d'estimer la puissance du foyer expérimentalement. Afin de prolonger les simulations numériques au delà de cet instant, nous avons fait l'hypothèse que le déclenchement du spray n'influence pas le HRR. Ainsi, la perte de masse du combustible (et donc le HRR, sous réserve de bonnes conditions de ventilation) est maintenue constante après activation du premier sprinkleur et jusqu'à la fin de la simulation.

3.4.1.3 Aspersion et désenfumage

Les trois exutoires ont été positionnés sur le plafond mobile aux coordonnées correspondant à la configuration expérimentale. Contrairement aux essais où leur ouverture totale nécessitait environ 30 s, l'ouverture numérique des DENFC est instantanée et est contrôlée par un capteur paramétré en entrée des simulations. Une légère surestimation des débits extraits lors de l'ouverture est donc attendue.

Le réseau sprinkleur du hall a été reproduit. Trente-six têtes de sprinkleurs sont réparties sur la surface du canton à 10 cm du plafond mobile, aux positions relevées sur site. Les propriétés des éléments sensibles sont identiques à celles utilisées lors des simulations de la campagne précédente. Les débits d'eau mesurés lors des essais sont utilisés en données d'entrée des simu-

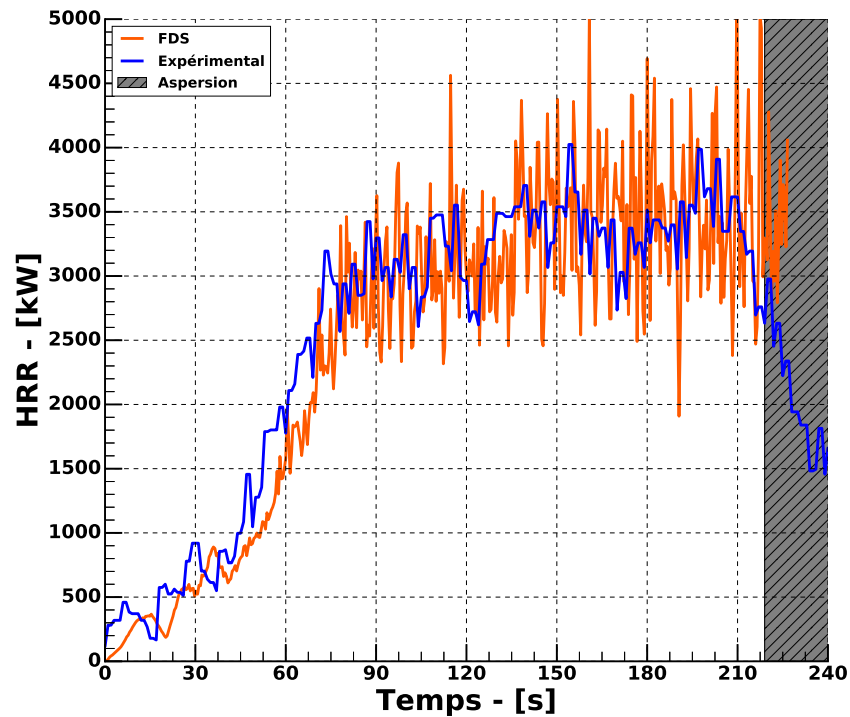


FIGURE 3.35 – Comparaison entre le HRR déterminé expérimentalement lors de l'essai 6 et le HRR calculé par FDS.

lations. Dans les résultats présentés dans ce manuscrit, les sprinkleurs ont été configurés pour s'activer aux temps relevés expérimentalement. On étudie les effets d'interaction, pas la capacité prédictive de FDS sur le déclenchement des sprinkleurs.

3.4.1.4 Maillage

Le domaine de calculs a été divisé en plusieurs tailles de mailles. Les régions de plus haute importance (la zone de flammes, le panache et le plafond mobile) ont été maillées avec un total de 132 768 mailles cubiques de 10 cm de côté. Les zones adjacentes, nécessitant un degré moindre de précision, utilisent 688 824 mailles de 20 cm de côté. Enfin, les régions les plus distantes (toit et ailes du hall) sont maillées avec 213 705 mailles de 40 cm de côté. Au total, le modèle est composé de près de 2 300 000 mailles, réparties dans 15 zones de maillage différentes.

Compte tenu du volume du local, l'utilisation de mailles plus fines aurait induit des temps de calculs trop importants pour l'étude. Le critère de dimensionnement des maillages utilisé en ingénierie de sécurité incendie et qui a été présenté dans le chapitre précédent a de nouveau été appliqué afin de s'assurer de la validité de ce choix. Pour rappel, ce critère basé sur les équations 2.4 et 2.5 permet de déterminer la taille des mailles afin d'obtenir un maillage jugé "fin" ou "grossier", en fonction de la puissance du foyer. Sur la figure 3.36 sont représentées les

tailles de mailles permettant de concevoir un maillage "fin", "médium" ou "grosier" (d'après le critère précédent). L'évolution du HRR avec le temps au cours d'un essai est également reportée sur cette figure. Contrairement à la campagne précédente, la montée en puissance du foyer bac n'est pas instantanée. En utilisant ce critère, on constate donc que dans les premiers instants des simulations, il serait nécessaire d'utiliser des mailles de moins de 10 cm afin de s'assurer d'une bonne résolution du panache thermique. Dans sa version actuelle, FDS ne possède pas la possibilité de modifier un maillage en cours de simulation. Utiliser des mailles aussi petite aurait donc pour conséquence une forte augmentation des temps de calculs. Dans cette étude, il a donc été décidé d'utiliser des mailles cubiques de 10 cm de côté dans la zone de feu ainsi qu'au niveau du plafond mobile. Ce choix permet d'assurer un bon niveau de résolution rapidement après le début de la simulation sans allonger la durée des simulations de manière significative. Concrètement, entre 0 s et 60 s de temps simulé, la qualité du maillage passera de "grosière" à "médium". Puis, avec l'augmentation de la puissance du foyer, ces tailles de mailles deviendront suffisantes pour que le maillage permettent une bonne représentation des effets d'entraînement du panache. À partir de 120 s, des mailles de 10 cm sont suffisantes pour avoir un maillage "fin".

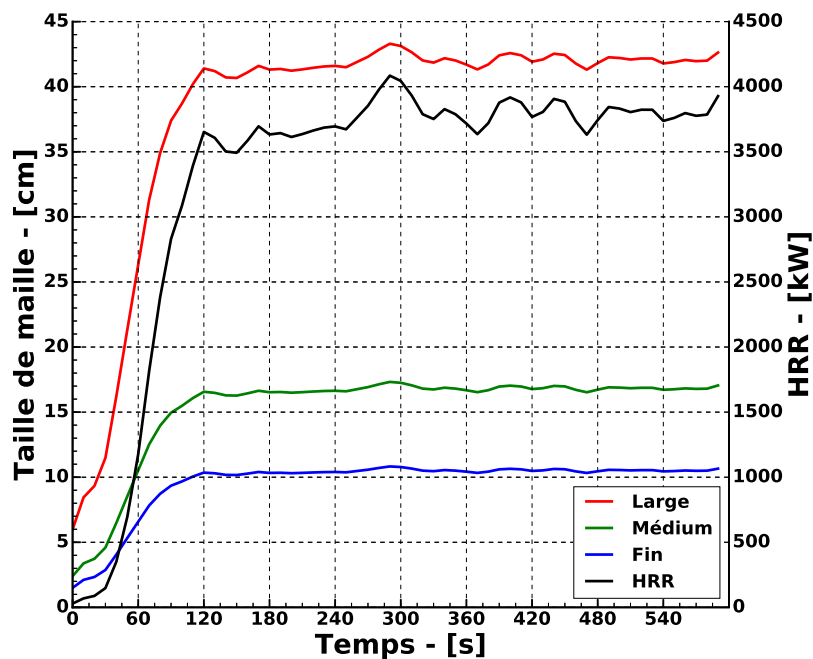


FIGURE 3.36 – Évolution du degré de finesse du maillage avec le temps et avec la variation de puissance du foyer.

3.4.2 Validation numérique

Dans cette partie, les résultats des simulations numériques de l'essai numéro 6 sont présentés et sont confrontés aux résultats expérimentaux. Pour rappel, lors de cet essai le foyer (de type bac) était positionné entre les trois exutoires. Trois sprinkleurs se sont activés à 219 s, 447 s et 468 s et les exutoires ont été ouverts à 80 s. L'extinction ayant lieu à 480 s, les simulations sont

arrêtées à cet instant.

Les conditions initiales de température, de pression atmosphérique et d'humidité relevées lors de l'essai sont utilisées en données d'entrée des simulations. L'évolution du HRR est celle de la figure 3.35, présentée précédemment.

Température au niveau des sprinkleurs activés

La température à proximité du sprinkleur SD14 est le premier point de comparaison considéré dans ce cas de validation. L'évolution de cette température est reportée sur la figure 3.37.

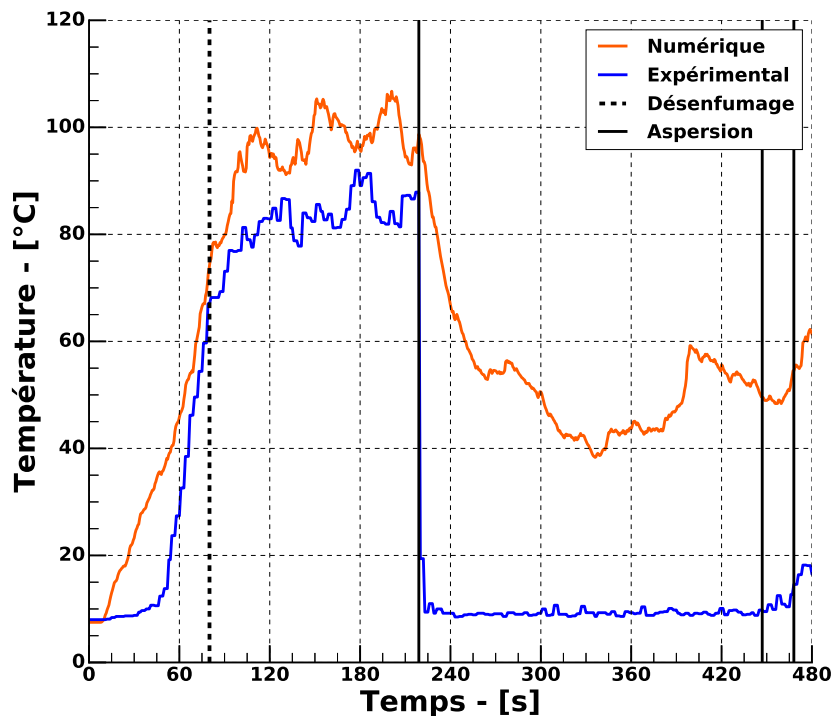


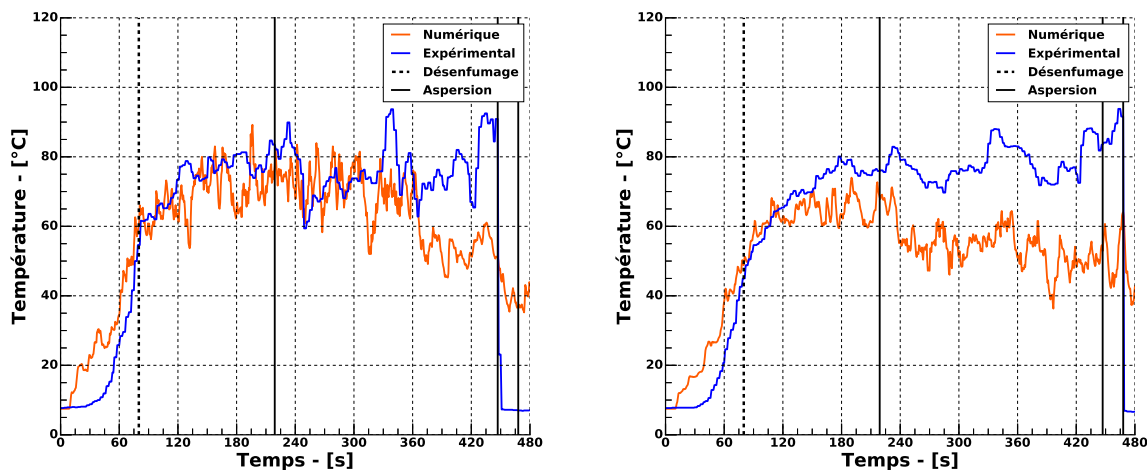
FIGURE 3.37 – Comparaison entre la température mesurée au niveau du sprinkleur SD14 et celle calculée par FDS lors de l'essai 6.

Lors de la première minute de simulation, on constate une croissance quasi linéaire de la température à cette position alors qu'expérimentalement, la température mesurée lors des trente premières secondes reste proche de la température initiale avant de présenter une croissance exponentielle. À l'ouverture des exutoires ($t = 80$ s), FDS prédit une température de 75 °C à cette position. Expérimentalement, la température était de 67 °C à cet instant. Comme expliqué précédemment, il est possible que la mauvaise résolution du maillage dans la zone de flammes et au niveau du panache thermique lors des premiers instants de la simulations explique ces dynamiques différentes. Après ouverture des exutoires, les températures continuent d'augmenter à un rythme réduit jusqu'à activation du premier sprinkleur. Malgré un écart moyen d'une

quinzaine de degrés entre les deux résultats, la dynamique d'évolution de ces températures est similaire. Lorsque le sprinkleur est activé, la température chute brutalement dans les deux cas. Comme au chapitre précédent, la différence notable de comportement de la température prédite par FDS provient a priori de l'incapacité du modèle à simuler le dépôt des gouttes sur le thermocouple, biais expérimental qui perturbe la mesure. Les résultats prédits au delà de l'activation du premier sprinkleur ne sont donc pas comparables.

Le comportement des températures au niveau du second sprinkleur activé (SD15) est relativement similaire (figure 3.38a). Lors de la première minute de simulation, du fait de la mauvaise résolution du maillage relativement à la puissance du foyer, la croissance de la température prédite par FDS présente une dynamique différente de celle mesurée lors de l'essai. À partir du déclenchement du désenfumage, les deux températures présentent un très bon accord. Malgré des fluctuations importantes, la température calculée par FDS suit l'évolution de la température mesurée lors de l'essai, même après déclenchement du premier sprinkleur. On constate cependant une divergence des deux résultats à partir de 360 s. Lors de l'activation du second sprinkleur, l'écart de température entre numérique et expérimental est d'environ 40 °C.

Le même constat est fait au niveau du troisième sprinkleur (SD19) (figure 3.38b). De nouveau, une différence de dynamique est observable lors de la première minute de simulation. Puis, à partir du déclenchement du désenfumage et jusqu'à activation du premier sprinkleur, les résultats coïncident. FDS arrive à prédire l'évolution de la température de manière satisfaisante (autant sur la dynamique que sur les niveaux de température). Ensuite, le refroidissement produit par l'aspersion est sur-évalué numériquement, produisant un écart moyen d'une vingtaine de degrés avec la mesure. Cet écart semble augmenter progressivement avec le temps, jusqu'à ce que le sprinkleur se déclenche.



(a) Sprinkleur SD15

(b) Sprinkleur SD19

FIGURE 3.38 – Comparaison entre la température mesurée au niveau des sprinkleurs SD15 et SD19, avec celles calculées par FDS lors de l'essai 6.

Ces résultats montrent qu'au niveau des sprinkleurs, la phase de montée en température (hors premières secondes de simulation) et les effets du désenfumage sont bien reproduits par

FDS. Le refroidissement provoqué par l'aspersion semble cependant être sur-évalué et les écarts entre numérique et expérience augmentent avec le temps et le nombre de sprinkleurs actifs.

Température au niveau des exutoires

Les variations de température au niveau des trois exutoires sont présentées sur les figures 3.39 et 3.40. Dans les trois cas, on constate un très bon accord entre les résultats expérimentaux et numériques. Aux DENFC 1 et 2, la phase de croissance de la température après ouverture de l'exutoire est très bien reproduite numériquement. Sur ce laps de temps, la température prédite par FDS au niveau de l'exutoire 3 est légèrement inférieure à celle mesurée expérimentalement mais l'écart reste très satisfaisant. Le déclenchement du premier sprinkleur produit un refroidissement perceptible au niveau des trois ouvrants. Ce refroidissement est légèrement sur-prédit au niveau de l'exutoire 2, mais une nouvelle fois, l'écart avec les valeurs expérimentales est correct.

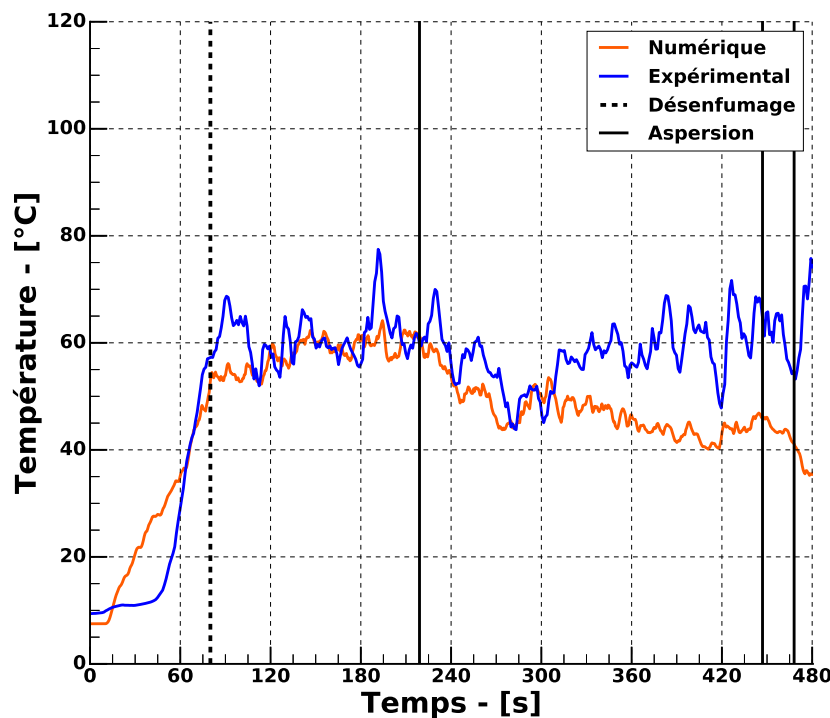


FIGURE 3.39 – Comparaison entre la température mesurée au niveau du DENFC 1 et celle calculée par FDS lors de l'essai 6.

À partir de 300s, alors que jusqu'à cet instant FDS prédisait correctement l'évolution de la température dans l'exutoire 1, on observe une divergence des résultats. Expérimentalement, la température dans l'exutoire augmente tandis qu'elle décroît lentement dans la simulation numérique. Lors de l'activation du second sprinkleur, la différence de température est de l'ordre d'une vingtaine de degrés entre les deux résultats. En dehors de la différence de température au moment de l'activation de ce sprinkleur, l'effet de refroidissement consécutif est de nouveau

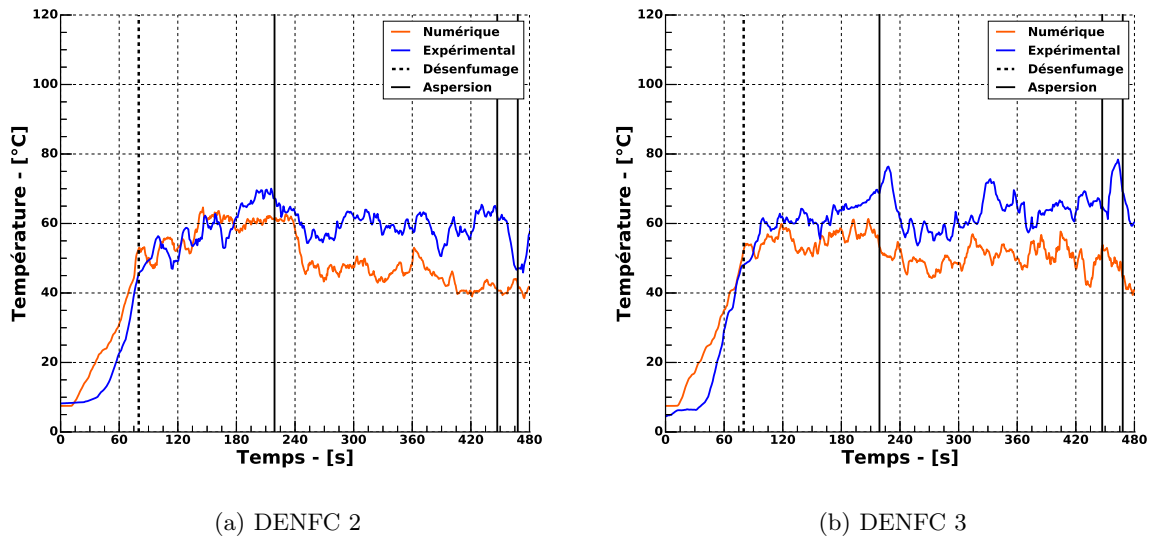


FIGURE 3.40 – Comparaison entre la température mesurée au niveau des DENFC 2 et 3 et celle calculée par FDS lors de l’essai 6.

observable numériquement à cette position.

Les effets du désenfumage sont reproduits avec une très bonne précision au niveau des trois exutoires. Les effets de refroidissement lié au déclenchement de l’aspersion sont également reproduits de manière satisfaisante par FDS. Toutefois, il semble que plus le nombre de sprinkleurs actifs augmente, plus l’écart entre les résultats expérimentaux et numériques est important.

Température moyenne sous le plafond mobile

Alors que les deux points de mesure précédents étaient des grandeurs locales à des positions clés, l’analyse de l’évolution de la température moyenne permet une comparaison plus globale des résultats numériques avec les données expérimentales. Cette comparaison est présentée sur la figure 3.41.

Encore une fois, dès les premières secondes de simulation, on observe une brusque montée en température qui n’est pas observable expérimentalement. Cette différence de température (de l’ordre d’une dizaine de degrés) est maintenue jusqu’à environ 180s. À cet instant et jusqu’à l’activation du premier sprinkleur quelques dizaines de secondes plus tard, les deux courbes sont superposées. Lorsque l’aspersion est déclenchée une première fois, le refroidissement est observable numériquement et expérimentalement. De nouveau, même si ce refroidissement est légèrement plus important numériquement, la capacité de FDS à reproduire ce phénomène est satisfaisante. À l’issue de la phase de décroissance de la température (à 300s), l’écart entre les deux résultats est d’environ 5°C.

Ensuite, l’écart se creuse légèrement entre les deux courbes jusqu’à activation du second

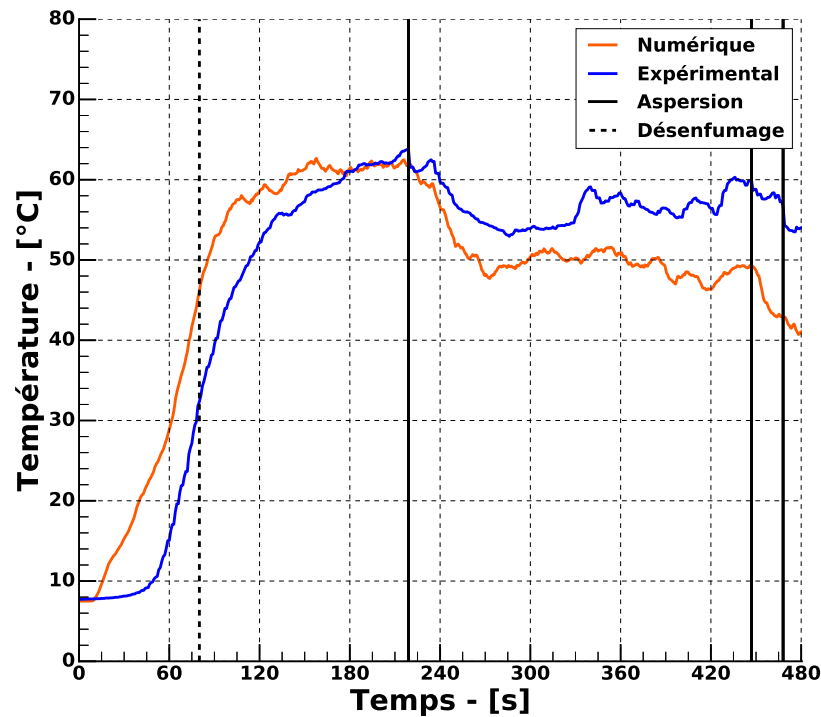


FIGURE 3.41 – Comparaison entre la température moyenne déterminée expérimentalement au niveau du plafond et celle prédite par FDS.

sprinkleur. À ce moment, il est alors d'une dizaine de degrés. Une nouvelle fois, le refroidissement global créé par l'aspersion est ressenti de manière légèrement plus importante dans la simulation numérique.

Lorsque l'extinction est réalisée après activation du troisième sprinkleur, l'écart de température entre les deux résultats est de 13 °C. L'accord est au moins qualitatif, et même plutôt satisfaisant quantitativement.

Quantité de chaleur extraite par les exutoires

Le rapport entre la quantité de chaleur extraite à chaque instant et la puissance instantanée du foyer est présenté sur la figure 3.42. Le rapport de la puissance sortant du foyer par les bordures du canton sur le HRR est également représenté sur cette figure.

On constate que dès 15s, la quantité de chaleur sortant du canton commence à augmenter. Cet instant correspond au temps à partir duquel les premières fumées sortent du cantonnement en débordant sous les écrans à la bordure du plafond mobile. Dans un premier temps, ces fumées se refroidissent fortement dans le milieu ambiant sur le trajet jusqu'au cantonnement. Ce milieu s'échauffant progressivement, les fumées sont de plus en plus chaudes lorsqu'elles sortent du

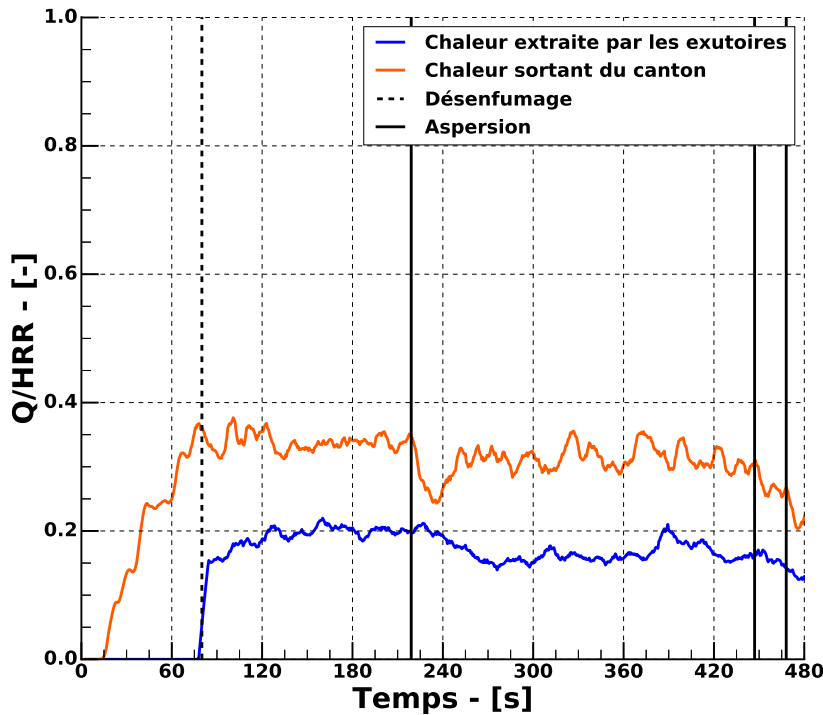


FIGURE 3.42 – Évolution du rapport des quantités de chaleur extraite par les exutoires et sortant par les bords du canton sur le HRR du foyer.

canton. Cela se traduit par une montée progressive de la puissance évacuée de cette manière. Lorsque le désenfumage est déclenché, cette quantité de chaleur représente 37 % de la chaleur produite par le foyer. Après ouverture des exutoires, on constate une stabilisation de cette grandeur autour de cette valeur alors que la quantité de chaleur extraite par les exutoires passe subitement à 15 % du total de la chaleur produite par le foyer. Cette grandeur va augmenter progressivement pour atteindre 21 % à 120 s puis se stabiliser à cette valeur jusqu'à activation du premier sprinkleur. Le déclenchement de l'aspersion provoque une chute temporaire de la quantité de chaleur évacuée au bord du cantonnement. Après quelques secondes, celle-ci remonte à une valeur légèrement inférieure à son niveau précédent (environ 30 % du HRR). Il est probable que ce comportement soit dû à la perturbation provoquée par l'apparition du spray entraînant une certaine quantité de fumées vers le bas, les refroidissant et retardant ainsi leur sortie du cantonnement. Le déclenchement du désenfumage réduit également la quantité de chaleur totale extraite par les trois exutoires. Cette réduction est liée au refroidissement observé précédemment au niveau des exutoires. Le tirage thermique est alors moins efficace. Lorsque le second sprinkleur se déclenche, environ 16 % du HRR est extrait par les exutoires et 25 % du HRR est évacué aux bordures du cantonnement. Le nouveau refroidissement que cela provoque réduit une nouvelle fois les deux quantités de chaleur sortant du canton. Au moment de l'extinction du foyer, 13 % de la quantité de chaleur produite par le foyer est évacuée par les exutoires et 22 % par les bords du canton.

En observant en détail les trois exutoires (voir figure 3.43), on constate que le total de la quantité de chaleur extraite est réparti de manière relativement homogène entre les trois ouvrants. On note toutefois une valeur légèrement inférieure au niveau du DENFC 3 (le plus éloigné du foyer) jusqu'au déclenchement de l'aspersion. Lorsque le premier sprinkleur se déclenche, la réduction de quantité de chaleur extraite est la plus importante au niveau de l'exutoire 2, passant de 280 kW à un minimum de 152 kW. Après activation du deuxième puis du troisième sprinkleur, la quantité de chaleur extraite par l'exutoire 3 chute considérablement, atteignant ainsi 100 kW au moment de l'extinction du foyer alors qu'elle est encore à environ 160 kW dans les deux autres DENFC.

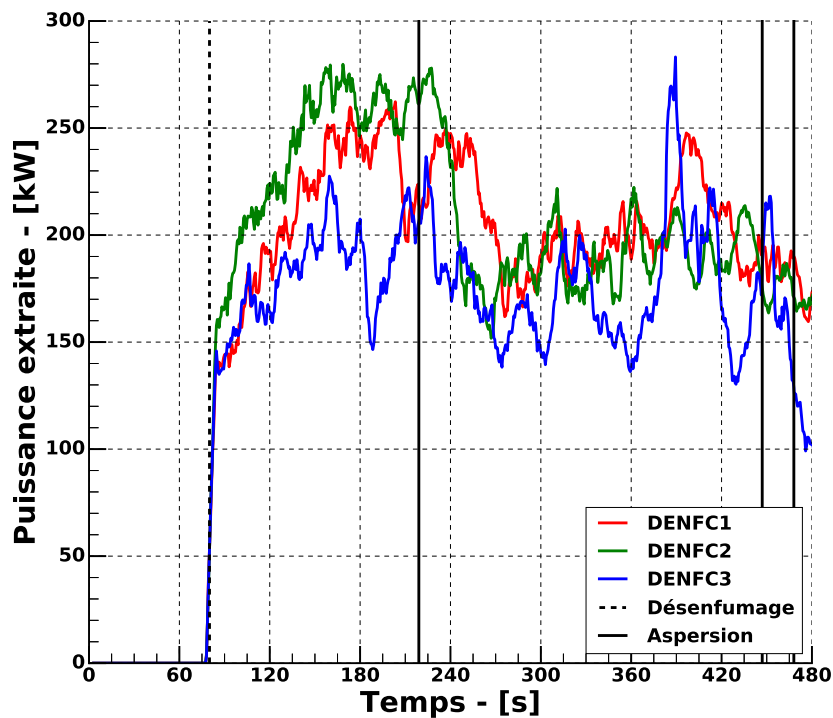


FIGURE 3.43 – Évolution de la quantité de chaleur extraite par chaque exutoire.

Ceci s'explique par la position des sprinkleurs activés. En se référant au plan de la figure 3.4, on constate que deux des trois sprinkleurs déclenchés (SD14 et SD19) se situent entre le foyer et l'exutoire 3. L'écoulement des fumées allant de la zone d'impact du panache sur le plafond jusqu'à cet exutoire est alors fortement perturbé et refroidi par les sprays issus de ces deux sprinkleurs.

Ce résultat renforce l'observation faite précédemment selon laquelle la disposition des exutoires joue un rôle important dans l'efficacité globale d'une installation de désenfumage. Un autre exemple est observable sur la figure 3.44. Il s'agit cette fois de l'évolution de la quantité de chaleur extraite par les trois exutoires lors de l'essai 17. Dans cet essai, le foyer était positionné directement sous l'exutoire 1. Tous les DENFC étaient maintenus ouverts pendant la durée de l'essai. Dans cette configuration, aucun sprinkleur ne s'était déclenché. En observant les courbes

sur cette figure, on constate que sur toute la durée de l'essai, la quasi-totalité de l'énergie extraite par le désenfumage s'effectue à travers l'exutoire 1. De plus, contrairement au cas de l'essai 6, l'énergie extraite de cette manière correspond à près de 50 % de l'énergie produite par le foyer.

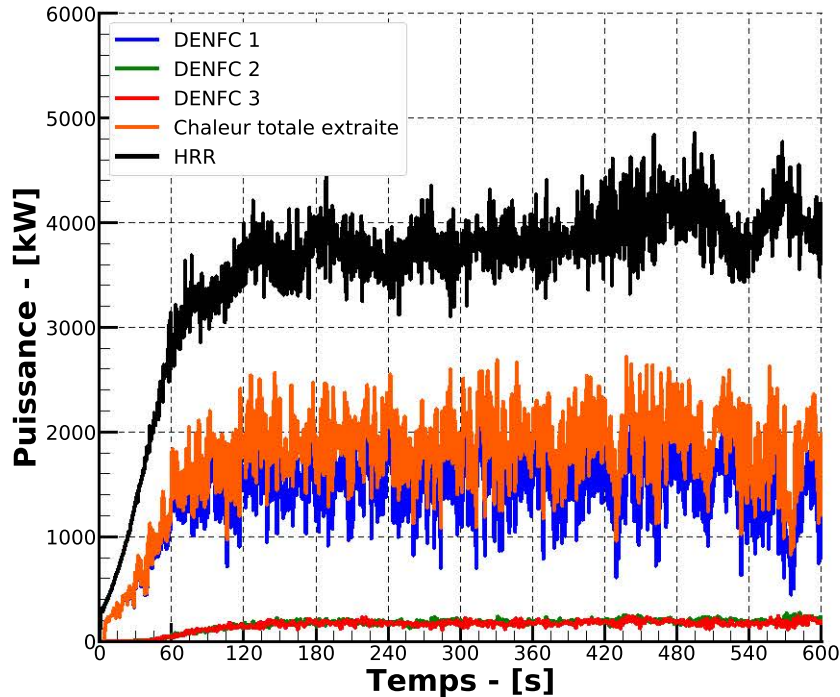


FIGURE 3.44 – Evolution de la quantité de chaleur extraite par les exutoires lors de l'essai 17.

Quantité de suie extraite par les exutoires

Finalement, le même constat que précédemment peut être fait en analysant les débits massiques de suies extraits par les exutoires au cours de l'essai 6. Ces résultats sont présentés sur la figure 3.45. À partir de l'ouverture des exutoires et jusqu'au déclenchement du premier sprinklers, les débits de suies extraits sont identiques au niveau des exutoires 1 et 2. Ce débit est légèrement plus faible au niveau de l'exutoire 3. Lors du déclenchement de l'aspersion, une baisse de tous les débits est observée. De la même manière que pour la quantité de chaleur, la chute de débit massique est la plus importante au niveau de l'exutoire 2. Le débit augmente cependant progressivement par la suite à cette position ainsi qu'au DENFC 1.

Lorsque le foyer est éteint à 480s, après le déclenchement des deux sprinklers supplémentaires, le débit au niveau de l'exutoire 3 est de l'ordre de 0.0003 kg/s contre 0.00054 kg/s à travers les deux autres ouvrants. Ce résultat est similaire à celui obtenu précédemment à propos de l'extraction de chaleur par les exutoires. L'activation de sprinklers sur le trajet des fumées sous le plafond est en mesure de perturber l'extraction par un exutoire. Cependant, si d'autres DENFC sont répartis de manière homogène, l'installation peut conserver une efficacité globale

convenable.

On peut également constater que, contrairement à l'extraction de chaleur, les débits extraits par les exutoires à la fin de l'essai sont supérieurs (ou égal dans le cas de l'exutoire 3) à ceux extraits lors de l'ouverture des exutoires. Ainsi, malgré le déclenchement de l'aspersion, le désenfumage conserve une bonne efficacité.

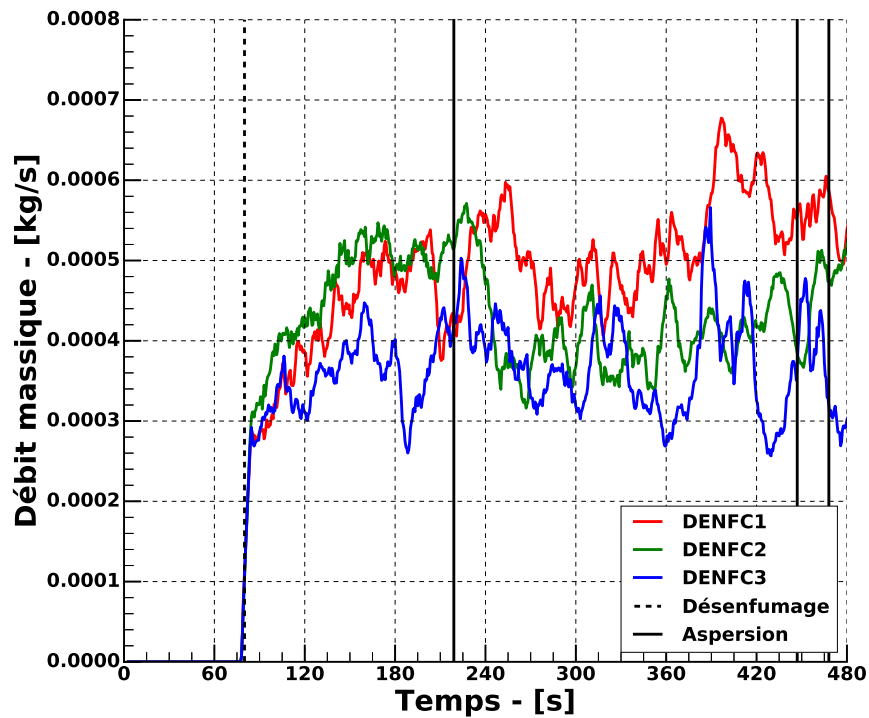


FIGURE 3.45 – Évolution des débits massiques de suies extraits par les exutoires au cours de l'essai 6.

3.5 Conclusions

Une seconde campagne d'essais a été réalisée à partir des résultats et des enseignements tirés de la première campagne de cette étude. Au total, 27 essais utilisant désenfumage et aspersion ont été réalisés dans un hall d'essais de 900 m². Les principaux résultats expérimentaux et numériques obtenus dans cette campagne sont résumés ci-dessous.

Résultats expérimentaux

Deux foyers différents ont été testés au cours de cette campagne. Lorsque le bac de fioul (HHR ≈ 4 MW) était positionné entre les 3 exutoires, des retards de déclenchement de sprinkleurs ont été observés lorsque le désenfumage était ouvert avant l'aspersion. Lorsque ce foyer était positionné directement sous un exutoire, les sprinkleurs ne se sont pas déclenchés dans la majorité des essais réalisés. Lors des essais utilisant le second foyer (palettes en bois, $4 \text{ MW} \leq HRR \leq 6 \text{ MW}$) positionné entre les exutoires, aucun retard d'activation des sprinkleurs n'a été observé.

Ces résultats semblent confirmer l'observation réalisée lors de la campagne précédente. En présence d'un foyer dont la puissance croît de manière relativement rapide, le déclenchement du désenfumage avant activation de l'aspersion n'a qu'un faible impact sur le temps de réponse du premier sprinkleur. Il est toutefois important de prendre en compte la nature académique des foyers utilisés dans cette étude (faible interaction entre l'aspersion et le foyer).

Au cours de cette campagne, il n'a pas été observé d'influence significative du désenfumage sur le nombre total de sprinkleurs déclenchés. De même, les effets de destratification thermique et optique n'ont pas été observés lors des essais.

Comme cela a été observé lors de la première campagne expérimentale, il apparaît que le refroidissement induit par le désenfumage est de nature plus globale que celui lié à l'aspersion et n'est pas négligeable devant ce dernier.

Il a également été montré que la distribution de la surface de désenfumage joue un rôle très important sur l'efficacité de l'installation de désenfumage. Lorsque plusieurs exutoires sont répartis de manière homogène sur un plafond, si l'efficacité de l'un d'entre eux est réduite à la suite de l'activation de l'aspersion, l'efficacité globale de l'installation n'est pas mise en défaut. Ce résultat a également été observé numériquement en étudiant les quantités de chaleur et de matière extraites par les DENFC.

Enfin, malgré l'absence de destratification massive des fumées lors du déclenchement de l'aspersion, le désenfumage a contribué à réduire la présence de fumées diffuses en partie basse du hall lors de certains essais. De même, il a été observé de manière qualitative une réduction du volume de fumées accumulées sous le plafond lorsque le désenfumage était utilisé, ainsi qu'une réduction du débordement des fumées sous les écrans de cantonnement.

Résultats numériques

La modélisation numérique de certains essais a permis de montrer la capacité de FDS à reproduire les effets du désenfumage et de l'aspersion avec un bon degré de fidélité. Toutefois, si les premiers instants des simulations et les phases de désenfumage présentent un très bon accord avec les résultats expérimentaux, la modélisation de l'aspersion présente des limites. Comme cela a été montré dans le chapitre d'introduction, la modélisation des sprays sous FDS est relativement rudimentaire devant la complexité des phénomènes physiques mis en jeu. De plus, cette modélisation dépend de nombreux paramètres souvent mal maîtrisés tels que la granulométrie ou la distribution spatiale des gouttes. Ainsi, si les effets de l'aspersion sont effectivement reproduits par FDS, il est très compliqué de faire correspondre les niveaux de refroidissement avec les données expérimentales. De plus, les écarts semblent s'accroître avec le nombre de sprinkleurs actifs.

Les résultats de ces simulations ainsi que de celles réalisées dans le cadre de la campagne précédente sont suffisamment satisfaisants pour que l'on puisse considérer que FDS est un outil adapté pour étudier les effets des interactions entre sprinkleurs et désenfumage dans des simulations ne pouvant pas faire l'objet d'essais. Bien que ne s'appuyant pas sur des résultats expérimentaux, ces simulations pourront faire l'objet d'analyse relative entre différents scénarios.

Chapitre 4

Modélisation de configurations réelles et ouverture à l'ingénierie

À travers les deux chapitres précédents, nous avons montré l'aptitude du logiciel FDS à modéliser avec certitude des scénarios faisant intervenir de l'aspersion par sprinkleur et des dispositifs de désenfumage naturel. Cela a été rendu possible grâce aux nombreuses et diverses données expérimentales obtenues lors d'essais réalisés dans des halls de moyenne (110 m^2 par 4 m de haut) et grande (280 m^2 par 10 m de haut) dimensions.

Ce chapitre traite maintenant des phénomènes d'interactions entre système sprinkleur et désenfumage naturel pouvant se produire dans des ouvrages existants, de dimensions beaucoup plus importantes que celles des halls utilisés lors des campagnes expérimentales et pour lesquels il n'est pas possible de réaliser des essais. Cette dernière partie de l'étude s'inscrit dans un cadre plus large que la thèse. L'objectif final est d'utiliser l'outil numérique (en l'occurrence FDS) à des fins (1) d'aide au dimensionnement et à l'implantation de systèmes sprinkleurs et de DENFC, (2) de pédagogie, à destination des différents acteurs de la sécurité incendie,

Dans ce dernier chapitre sont présentées les simulations numériques de différents scénarios étudiés pour deux bâtiments existants en France. La première géométrie étudiée est un entrepôt de stockage de 2000 m^2 . La seconde représente un centre commercial de 4000 m^2 . Ces deux géométries proviennent de la base de données du service de modélisation du CNPP. De légères modifications ont été apportées aux modèles numériques dans le cadre de cette étude mais les dimensions totales et les configurations intérieures ont été respectées.

4.1 Présentation des simulations

Dans un premier temps, les installations étudiées sont reproduites numériquement. Un certain nombre de modifications sont apportées, entre autres, des simplifications des géométries pour alléger les calculs et des dimensionnements des installations de désenfumage et d'aspersion afin de respecter les prescriptions et recommandations en vigueur pour chacun des systèmes.

Une fois cette étape réalisée, les scénarios incendies sont déterminés. Pour cette partie de l'étude, des foyers types sont modélisés tels qu'ils sont définis dans les études d'ISI et dans le guide de bonnes pratiques pour les études d'ingénierie du désenfumage en ERP [53]. Ce document (élaboré par le Laboratoire Central de la Préfecture de Police (LCPP)) définit, entre autres choses, des foyers imposés à utiliser lors de la réalisation de certaines études ISI. Celles-ci supposent une croissance du feu parabolique, telle que définie par l'équation (4.1). Dans cette relation, le coefficient α permet de caractériser la cinétique du foyer (lente ou rapide). Quatre foyers types sont ainsi définis, dont les courbes de puissance sont reportées sur la figure 4.1.

$$HRR = \alpha t^2 \quad (4.1)$$

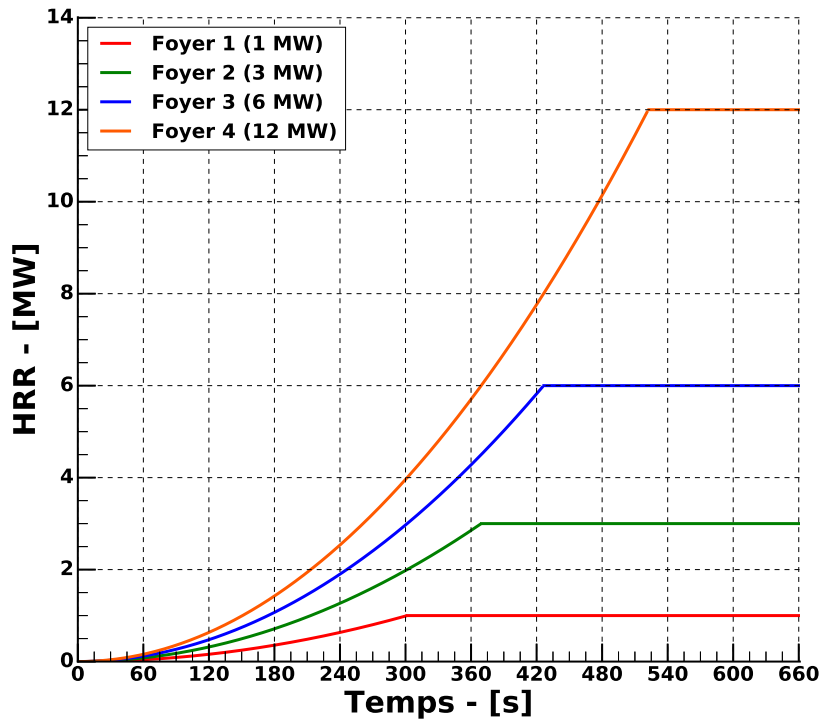


FIGURE 4.1 – Évolution du HRR pour les quatre foyers types proposés dans le guide du LCPP.

La puissance maximale atteinte par ces différents foyers est définie par le guide du LCPP et est reportée dans le tableau 4.1. Le temps nécessaire pour atteindre ce maximum ainsi que les coefficients α associés à chaque foyer sont également reportés dans ce tableau.

Le guide impose d'utiliser une chaleur de combustion $\Delta H_c = 25 \text{ MJ/kg}$ ainsi qu'un taux de production de suies de 0.05 kg/kg . Ces deux paramètres ont donc été utilisés en données d'entrée des simulations.

Les foyers utilisés dans cette étude sont représentés par des surfaces auxquelles sont attribuées des puissances surfaciques (HRRPUA) afin que la puissance totale (HRR) respecte la valeur

Foyer	HRR _{max} - [kW]	Temps nécessaire pour atteindre le HRR max.	α - [kW/s ²]
1	1000	5 min	0.011
2	3000	6 min	0.022
3	6000	7 min	0.033
4	12000	8.5 min	0.044

TABLEAU 4.1 – Caractéristiques des foyers types imposés par le LCPP.

imposée par le guide. Il s'agit donc de foyers de puissance prescrite.

Ce type de modélisation ne tient pas compte du déclenchement éventuel d'un système d'aspersion. Dans l'état actuel de développement de FDS, il n'est pas possible de réaliser des simulations réalistes prenant en compte les phénomènes d'extinction du foyer par les sprinkleurs. Une approche fréquemment employée dans les études d'ingénierie est de considérer que le déclenchement des sprinkleurs va conduire au contrôle du foyer. Cela veut dire qu'à partir du moment où l'aspersion se déclenche, la puissance du foyer va être maintenue constante jusqu'à la fin des simulations. Dans une étude réalisée pour la Fédération Française de l'Assurance (FFA) en 2012 [2], le CNPP a montré que dans plus de 75 % des incendies, le foyer est contrôlé par moins de cinq têtes de sprinkleurs. En prenant en compte cette donnée, il a été décidé de stopper la croissance des foyers lors de l'activation de la cinquième tête de sprinkleur lors des simulations. Cela revient donc à supposer que l'activation du cinquième sprinkleur conduit au contrôle du foyer. Un exemple d'évolution du HRR est présenté sur la figure 4.2. La courbe rouge correspond au HRR prescrit par le guide du LCPP et la courbe orange correspond au HRR d'une simulation FDS. Pendant les cinq premières minutes, les deux HRR sont identiques et les courbes sont superposées. Dans cet intervalle de temps, différents sprinkleurs sont activés (représentés par les traits verticaux). Lorsque le cinquième sprinkleur se déclenche peu après 300 s, la simulation impose un HRR stationnaire à un peu plus de 4 MW jusqu'à la fin de la simulation. Par la suite, d'autres sprinkleurs se déclenchent mais n'ont aucune influence sur la puissance du foyer.

Bien que l'extinction ne soit pas modélisée dans cette étude, les effets de refroidissement et d'entraînement des fumées par les sprinkleurs sont eux bel et bien simulés par FDS. Les propriétés des sprinkleurs sont définies en données d'entrée en fonction de la classe de risque auquel le bâtiment est exposé.

Pour chaque géométrie étudiée quatre scénarios différents sont analysés :

- Scénario 1 : Désenfumage après activation du premier sprinkleur ;
- Scénario 2 : Désenfumage simultanément à l'activation du premier sprinkleur ;
- Scénario 3 : Désenfumage avant activation du premier sprinkleur (ce temps est déterminé après analyse des résultats des simulations préliminaires) ;
- Scénario 4 : Pas de désenfumage.

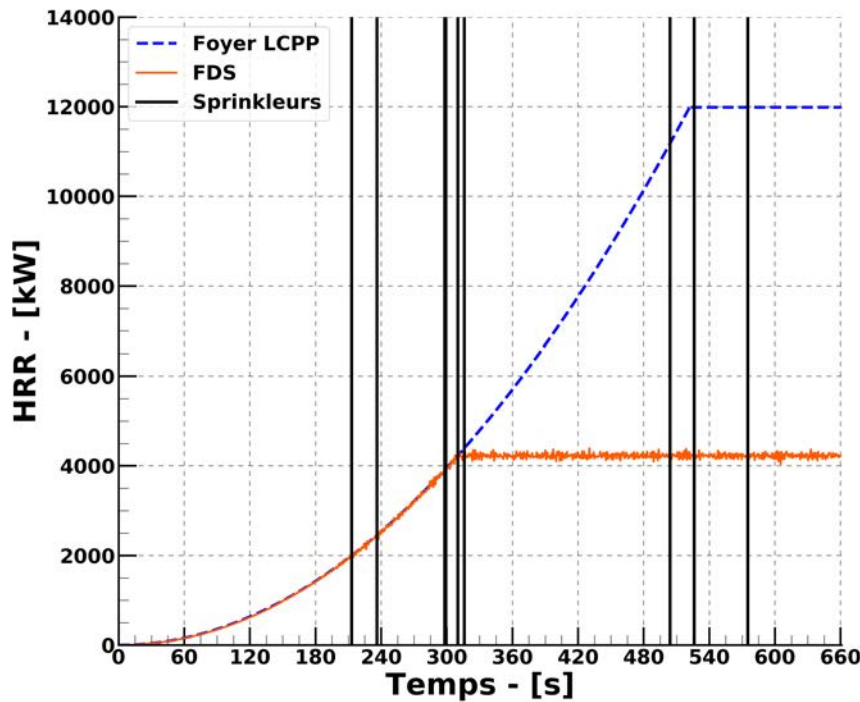


FIGURE 4.2 – Exemple de stabilisation du HRR après activation du cinquième sprinkleur.

4.2 Modélisation d'un entrepôt de stockage

Pour cette première partie, une cellule d'un entrepôt de stockage appartenant à la rubrique 1510 du classement ICPE a été modélisée. Cette cellule fait 85 m de long pour 30 m de large. La hauteur sous plafond est de 8.5 m et le volume est divisé en deux cantons de 1290 m² et 1260 m² par un écran de cantonnement de 2 m de haut.

Chacun de ces cantons est équipé de 6 DENFC, représentant une surface de désenfumage de 27 m² par canton. Cette installation respecte les règles de dimensionnement prescrites par l'I.T.-246 et les réglementations relatives à la rubrique 1510. Des arrivées d'air totalisant une surface supérieure à la surface de désenfumage sont réparties de manière homogène dans les deux cantons. Leurs positions sont représentées sur la figure 4.3. Leur ouverture est paramétrée en donnée d'entrée selon le scénario étudié. Lorsque le désenfumage est déclenché, tous les exutoires du canton concerné sont ouverts simultanément.

Chaque canton possède également un réseau sprinkleur dimensionné selon le référentiel AP-SAD R1. Au total, 296 têtes sont réparties sur la surface totale de la cellule avec un espacement de 3 m entre chaque sprinkleur. Dans les simulations, tous les sprinkleurs des deux cantons sont opérationnels et libres de se déclencher lorsque leur température d'activation est atteinte (68 °C).

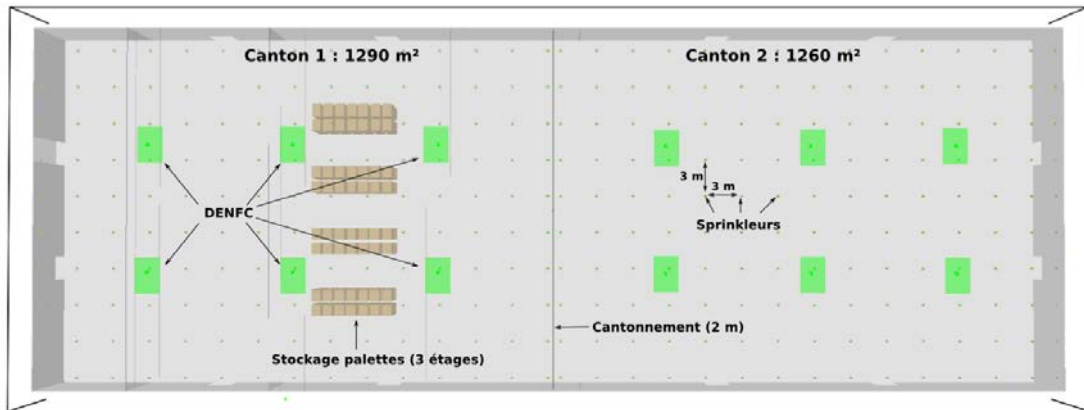


FIGURE 4.3 – Modèle numérique vu du dessus de la cellule de l'entrepôt de stockage.

Compte tenu des dimensions de la cellule de stockage ainsi que de la nature des risques existant dans des installations classées appartenant à la rubrique 1510, le foyer le plus puissant du guide du LCPP (foyer 4) a été utilisé pour nos simulations. Afin de modéliser un feu de stockage possédant la dynamique d'évolution prescrite, une propagation du feu a été réalisée. Le stockage est constitué de multiples rangées de racks de trois étages sur lesquels sont réparties des palettes. Le départ de feu se fait au niveau d'une palette localisée au niveau du sol au centre du canton 1 (en rouge sur la figure 4.4). Les faces de cette palettes sont définies comme une surface combustible dont la puissance surfacique est imposée en donnée d'entrée ($HRR_{PUA} = 416 \text{ kW/m}^2$). Après une phase de développement, le feu se propage à la palette supérieure ($HRR_{PUA} = 288 \text{ kW/m}^2$ après 140 s de temps simulé). Ce mode de propagation a été établi à partir de simulations dans lesquelles le foyer se développait librement (HRR calculé par FDS et non plus prescrit en entrée) et dont les temps d'inflammation des palettes environnantes ont été récupérés. Cette méthode permet d'utiliser un foyer avec une phase de croissance identique et contrôlée pour toutes les simulations. On peut visualiser le développement et la propagation du feu à deux instants différents sur les figures 4.4a et 4.4b.



FIGURE 4.4 – Visualisation du développement du foyer dans la cellule de stockage à deux instants différents.

À l'issue des simulations préliminaires réalisées pour les différents scénarios, il a été observé que l'activation automatique du premier sprinkleur avait lieu systématiquement après 200 s. Avec

cette information, il a été décidé d'ouvrir les exutoires à 180 s lors des simulations du scénario 3 (déclenchement du désenfumage avant aspersion).

Ainsi, pour tous les scénarios étudiés sur cette géométrie, la chronologie des principaux événements est la suivante :

- $t = 0$ s : Début de la simulation. Allumage du foyer.
- $t = 140$ s : Le feu se propage à la palette supérieure.
- $t = 180$ s : Déclenchement du désenfumage dans le scénario 3.
- $t = t_{spk,1}$: Activation automatique du premier sprinkleur. Déclenchement du désenfumage dans le scénario 2.
- $t = t_{spk,1} + 90$ s : Déclenchement du désenfumage dans le scénario 1.
- $t = t_{spk,5}$: Activation automatique du cinquième sprinkleur. Stabilisation du HRR dans tous les scénarios.
- $t = 660$ s : Arrêt des simulations.

L'arrêt des simulations à un peu plus de 10 min de temps simulé a été choisi arbitrairement. Comme montré dans le chapitre précédent, l'accumulation de sprinkleur ouverts diminue le degré de confiance dans les résultats. Ainsi, l'étude s'intéresse principalement aux premiers instants des scénarios d'incendie.

4.2.1 Analyse des résultats des simulations des 4 scénarios étudiés

4.2.1.1 Temps d'activation et nombre de sprinkleurs activés

Le nombre total de sprinkleurs activés ainsi que leurs temps respectifs d'activation constituent les premiers points de comparaison entre les différents scénarios. Ces deux résultats sont présentés sur la figure 4.5. Ce graphe représente l'évolution du nombre de sprinkleurs déclenchés au cours du temps lors des 600 s simulées pour chacun des scénarios. Dans ces simulations, seuls des sprinkleurs du canton 1 (où se situe le foyer) se sont déclenchés.

Lors des premières minutes de simulation, les résultats sont sensiblement identiques. Les temps d'activation des différents sprinkleurs sont très proches, quel que soit le scénario étudié. À 360 s de simulation, six sprinkleurs se sont activés dans tous les scénarios. Au delà de cet instant, les résultats divergent légèrement. Au terme des simulations, 7 sprinkleurs se sont activés dans le scénario 1 (désenfumage déclenché après aspersion), 8 dans les scénarios 2 et 3 (désenfumage simultané et avant aspersion). Dans la simulation sans désenfumage, les fumées et la chaleur ne pouvant pas être évacuées du bâtiment, 9 têtes de sprinkleurs se sont déclenchées.

En dehors des différences portant sur le nombre total de sprinkleurs déclenchés, on constate également que le temps de déclenchement de ces sprinkleurs varie considérablement d'un scénario à l'autre. Ainsi, on observe une différence de près de trois minutes dans le temps d'activation du septième sprinkleur entre les scénarios 2 et 3 et le scénario 1.

Les temps d'activation des différents sprinkleurs ainsi que leur numéro respectif sont reportés

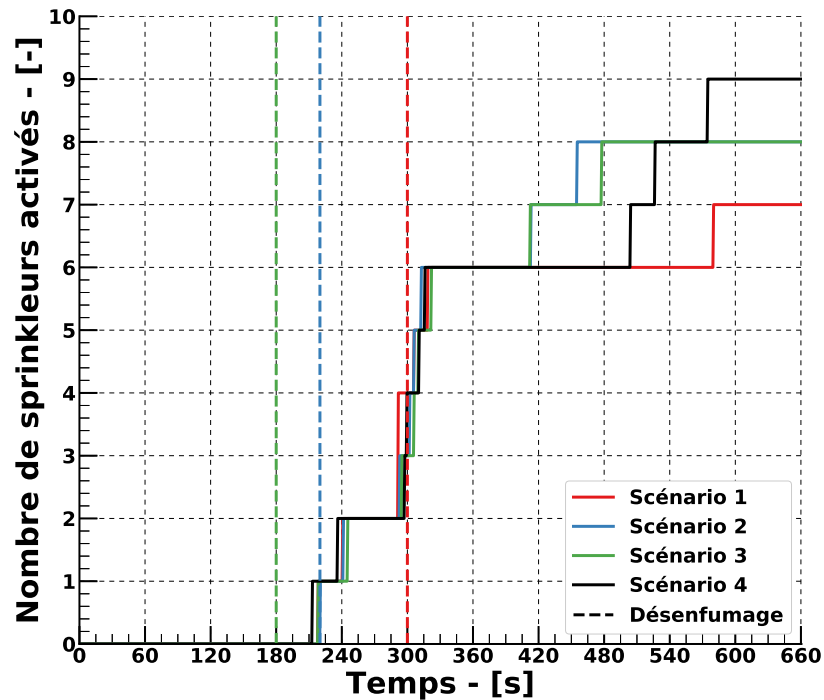


FIGURE 4.5 – Évolution avec le temps du nombre de sprinkleurs déclenchés dans les quatre scénarios étudiés.

dans le tableau 4.2. La position de ces sprinkleurs est représentée sur la figure 4.6. Dans tous les scénarios, l'ordre d'activation des sprinkleurs est le même. Les sprinkleurs situés au dessus du foyer (68 et 69) sont les premiers à s'activer, suivis par les sprinkleurs 83 et 84 situés dans l'allée du stockage où le départ de feu a lieu. Au cours de ces simulations, il n'a pas été constaté de saute de sprinkleurs, même lorsque le désenfumage a été déclenché avant activation de l'aspersion.

4.2.1.2 Température des éléments sensibles des cinq premiers sprinkleurs

Pour confirmer le résultat précédent, on trace sur les figures 4.7 à 4.8d les températures des éléments sensibles des cinq premiers sprinkleurs activés, pour les quatre scénarios étudiés.

À chacune des positions, l'évolution de la température est quasiment identique entre les différents scénarios. Au niveau du sprinkleur 68 (le plus proche du foyer et le premier à s'activer, figure 4.7), la température augmente rapidement jusqu'à atteindre le seuil d'activation ($68\text{ }^{\circ}\text{C}$). Le refroidissement induit par l'activation de ce sprinkleur est ressentie par le sprinkleur adjacent le plus proche du foyer (69, figure 4.8a). Dans les quatre scénarios, cela se traduit par une réduction temporaire de la pente de la température. Dans le scénario 3 où les exutoires sont déjà ouverts, la température est légèrement inférieure à celle des trois autres scénarios. En conséquence, le sprinkleur se déclenche dix secondes plus tard que lors du scénario 4. Il est

Scénario 1		Scénario 2		Scénario 3		Scénario 4	
Spk n°	t_{act} - [s]	Spk n°	t_{act} - [s]	Spk n°	t_{act} - [s]	Spk n°	t_{act} - [s]
68	218,2	68	220,3	68	218,4	68	212,8
69	240,8	69	241,4	69	245,1	69	235,8
83	291,1	83	292,6	83	294,4	83	297,5
84	291,3	84	302,2	84	305,9	84	299,2
54	306,2	54	306,0	54	309,9	54	310,2
53	318,7	53	312,7	53	321,5	53	315,6
82	579,6	82	412,6	82	412,5	82	503,9
-	-	85	455,0	85	477,3	85	526,1
-	-	-	-	-	-	55	574,7

TABLEAU 4.2 – Temps d'activation des différents sprinkleurs dans les quatre scénarios étudiés.

possible que l'évacuation de chaleur par les exutoires dans ce scénario soit responsable d'une réduction de l'élévation de température et donc de cet écart de temps. Cependant, ce décalage temporel est trop faible pour pouvoir l'affirmer avec certitude. Des effets numériques pourraient également entrer en compte. En effet, un écart de cinq secondes existe également entre les scénarios 1 et 4, bien qu'à ce temps de simulation, les deux scénarios soient rigoureusement identiques.

En analysant les températures des trois derniers sprinkleurs (figures 4.8b, 4.8c et 4.8d), on ne constate pas d'influence significative du scénario de désenfumage sur le temps de réponse des premiers sprinkleurs. L'écart maximum observé sur le temps d'activation d'un sprinkleur est de 15 s pour le sprinkleur numéro 84, entre les scénarios 1 et 3.



FIGURE 4.6 – Position des sprinkleurs situés au voisinage du foyer.

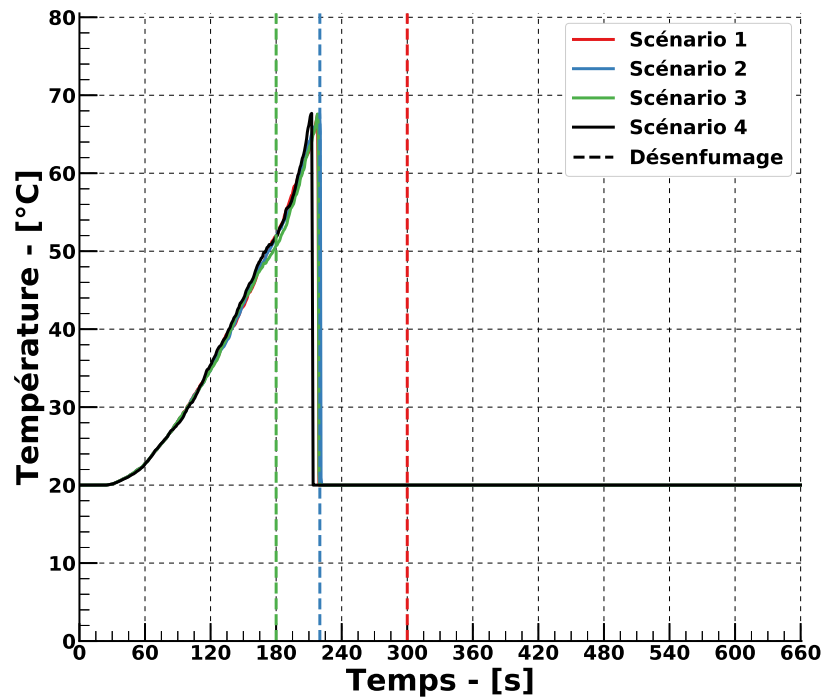
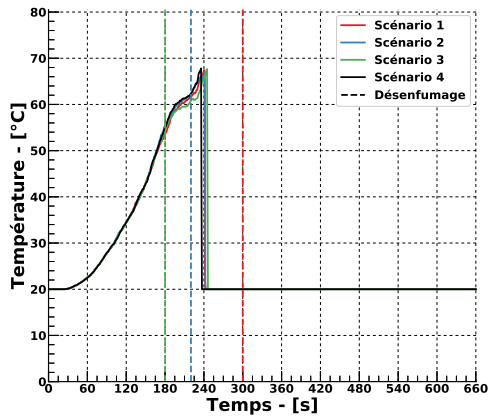
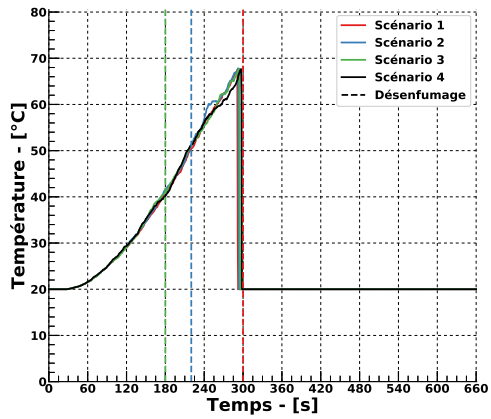


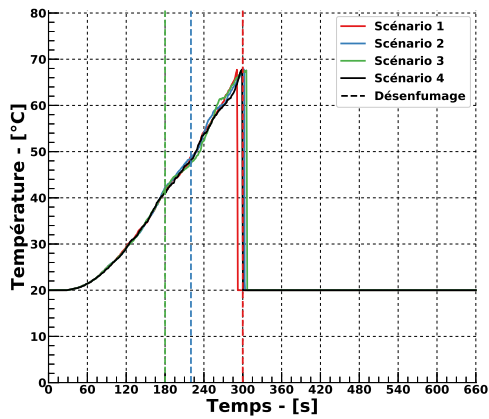
FIGURE 4.7 – Évolution de la température de l'élément sensible du sprinkleur 68.



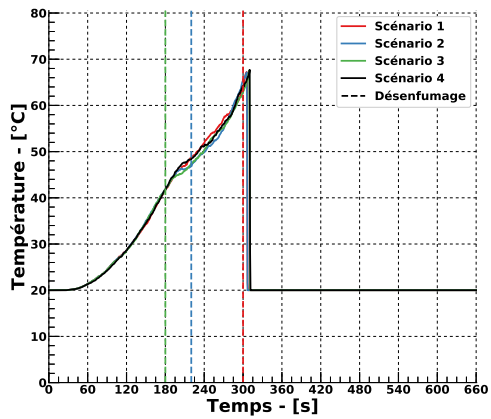
(a) Sprinkleur 69



(b) Sprinkleur 83



(c) Sprinkleur 84



(d) Sprinkleur 54

FIGURE 4.8 – Évolution de la température des éléments sensibles des sprinkleurs 69, 83, 84 et 54.

4.2.1.3 Température des sprinkleurs dans le canton adjacent

L'un des points mentionné par Beyler et Cooper dans leur article concerne l'effet du désenfumage sur le déclenchement de sprinkleurs dans des cantons adjacents à celui où se déclare le sinistre. D'une manière plus large, des questions se posent sur l'effet du désenfumage sur le transport de matière et de chaleur depuis la zone où se trouve le foyer vers les volumes périphériques.

Pour étudier ce point, on représente sur la figure 4.9 l'évolution de la température moyenne des éléments sensibles des sprinkleurs du second canton de l'entrepôt. Les sprinkleurs étant répartis de manière homogène sous le plafond du canton, cette variable est un bon indicateur de l'élévation de température dans cette zone.

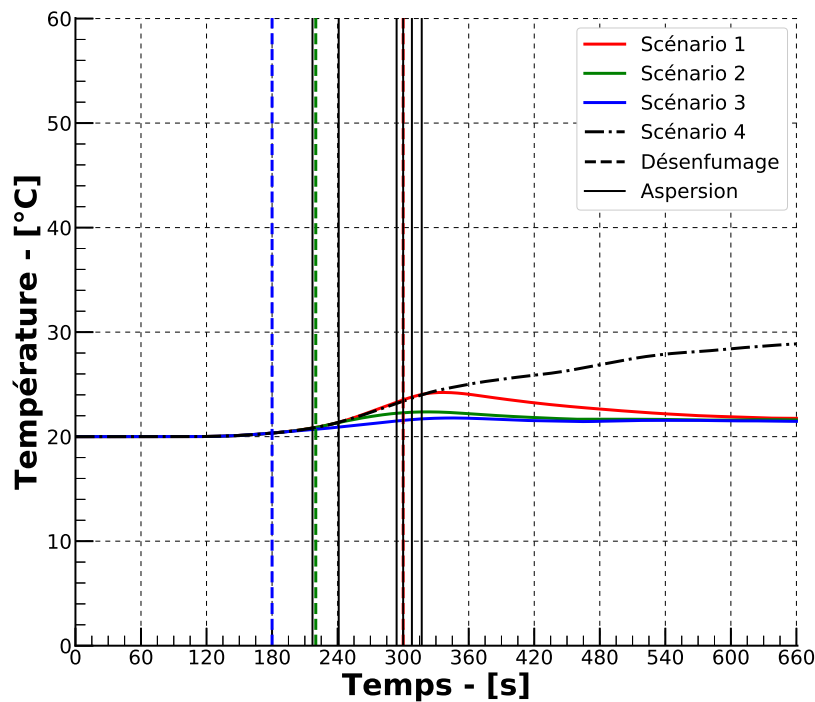


FIGURE 4.9 – Évolution de la température moyenne des éléments sensibles des sprinkleurs du second canton pour les quatre scénarios étudiés.

Comme montré précédemment, les écarts entre les temps d'activation des premiers sprinkleurs sont relativement faibles entre les différents scénarios. Les effets de décalage d'une dizaine de secondes de ces temps ne sont donc pas visibles sur les dynamiques de températures moyennes présentées sur cette figure. Pour alléger la figure et améliorer sa lisibilité, seules les moyennes des temps d'activation des six premiers sprinkleurs sont reportées.

Quel que soit le scénario étudié, les premières minutes de simulations sont identiques. Les fumées chaudes produites par le foyer remplissent progressivement le volume de cantonnement du

premier canton. Durant cette période, les températures moyennes n'évoluent pas et restent égales à la température initiale. Une fois ce volume rempli de fumées, le "trop plein" se déverse alors dans le canton adjacent. Cela a pour conséquence une augmentation progressive des températures dans ce second volume.

Si aucun exutoire n'est ouvert (scénario 4), les températures ne cesseront d'augmenter jusqu'à la fin des simulations, malgré l'activation de nombreux sprinkleurs. En revanche, si des exutoires sont ouverts dans le canton où se trouve le foyer (scénarios 1, 2 et 3), cette augmentation sera limitée. La valeur maximale atteinte sera d'autant plus faible que le désenfumage a été déclenché tôt.

Quelle que soit la stratégie de désenfumage adoptée, un état stationnaire est atteint après 540 s. Toutefois, l'élévation de température dans le second canton est d'autant plus faible que le désenfumage est déclenché tôt.

Ce résultat est explicable en analysant le flux net de chaleur entre les deux cantons (figure 4.10). Cette grandeur regroupe la somme des échanges thermiques (convectifs et radiatif) se produisant du canton 1 vers le canton 2. De fait, une valeur négative du flux indique que les échanges se font du canton 2 vers le canton 1.

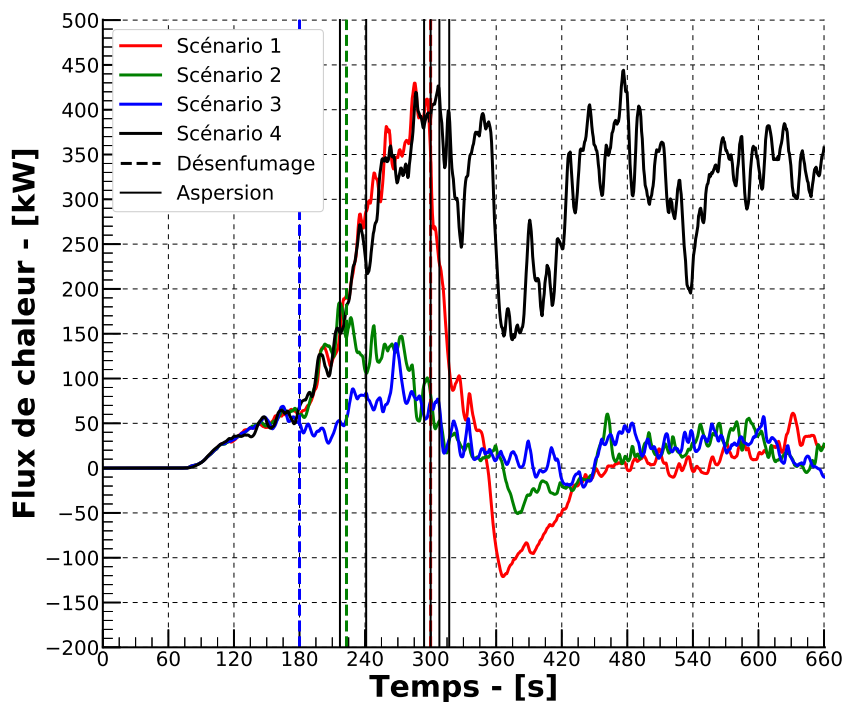


FIGURE 4.10 – Évolution de la quantité de chaleur transférée du canton 1 vers le canton 2 pour les quatre scénarios étudiés.

Au début des simulations, la chaleur produite par le foyer s'accumule dans le volume limité

par l'écran de cantonnement séparant les deux zones. Le flux net de chaleur échangé entre les deux cantons est donc nul. À partir de 80 s, les premières fumées chaudes commencent à passer sous l'écran de cantonnement et se propagent au canton 2. Le flux de chaleur augmente donc de manière identique dans les quatre scénarios. Lorsque le désenfumage est déclenché à 180 s dans le scénario 3, ce flux est alors d'environ 50 kW. L'ouverture des exutoires a pour conséquence immédiate une limitation du flux de chaleur transmis vers le canton 2. Trente secondes plus tard, ce flux est deux fois moins important que dans les trois autres scénarios.

Tant que les exutoires sont maintenus fermés, la valeur de ce flux de chaleur continue d'augmenter avec l'élévation de température des fumées dans le canton 1. Lorsque le désenfumage est déclenché à 223 s dans le scénario 2, il est de l'ordre de 175 kW. Dans le scénario 1, ce flux dépasse les 400 kW lors de l'ouverture des exutoires à 300 s (soit environ 10 % de la puissance délivrée par le foyer). Il est intéressant de constater que dans les scénarios 1 et 2, le déclenchement du désenfumage est suivi par une inversion des flux. Cela veut dire que durant un laps de temps plus ou moins long en fonction du scénario, des fumées chaudes présentes dans le canton 2 sont aspirées par le désenfumage se produisant dans le canton 1. Plus les exutoires sont ouverts tardivement (et donc plus les niveaux de flux sont élevés), plus cet effet est important. Cette évacuation des fumées présente dans le second canton permet d'aboutir à un même état d'équilibre en dessous de 50 kW après 480 s pour les trois scénarios avec désenfumage.

Dans le scénario 4 où les exutoires ne sont pas utilisés, la courbe de flux est similaire à celle du scénario 1 jusqu'à 300 s. Une réduction du flux se produit ensuite après l'activation successive de quatre sprinkleurs. Cette diminution est due au refroidissement brutal des fumées par les sprays d'eau. Cet effet est cependant temporaire puisque le flux ré-augmente rapidement après activation des têtes. La puissance du foyer étant maintenue constante après activation du cinquième sprinkleur, le flux se stabilise autour de 300 kW jusqu'à la fin de la simulation. L'activation d'un sprinkleur supplémentaire à 527 s est observable sur la courbe par une nouvelle chute temporaire du flux.

Bien que l'aspersion permette de réduire la température des fumées en absorbant une quantité de chaleur importante, le désenfumage contribue plus efficacement à limiter la propagation de chaleur aux cantons adjacents à celui où se trouve le foyer. De plus, malgré l'activation d'un certain nombre de sprinkleurs, l'efficacité du désenfumage pour réduire le transfert de chaleur au sein du bâtiment ne semble pas pénalisée. En effet, dans les scénarios avec désenfumage, quel que soit le temps auquel les exutoires ont été ouverts, un même état stationnaire a été atteint, conduisant à un transport de chaleur du canton 1 vers le canton 2 inférieur à 2 % de la puissance totale libérée par le foyer (contre 7.5 % sans désenfumage).

4.2.1.4 Quantité de chaleur extraite par les exutoires

La quantité de chaleur extraite par les exutoires au cours du temps est l'un des points les plus importants permettant d'évaluer l'efficacité du désenfumage lorsqu'il est utilisé en même temps que l'aspersion. Comme évoqué dans le premier chapitre, il est souvent avancé que le désenfumage perd son efficacité après que les sprinkleurs soient activés.

Pour évaluer l'impact de l'aspersion sur le désenfumage, on trace sur la figure 4.11 le rapport

entre la somme des puissances extraites par les exutoires et le HRR du foyer, pour chacun des scénarios étudiés.

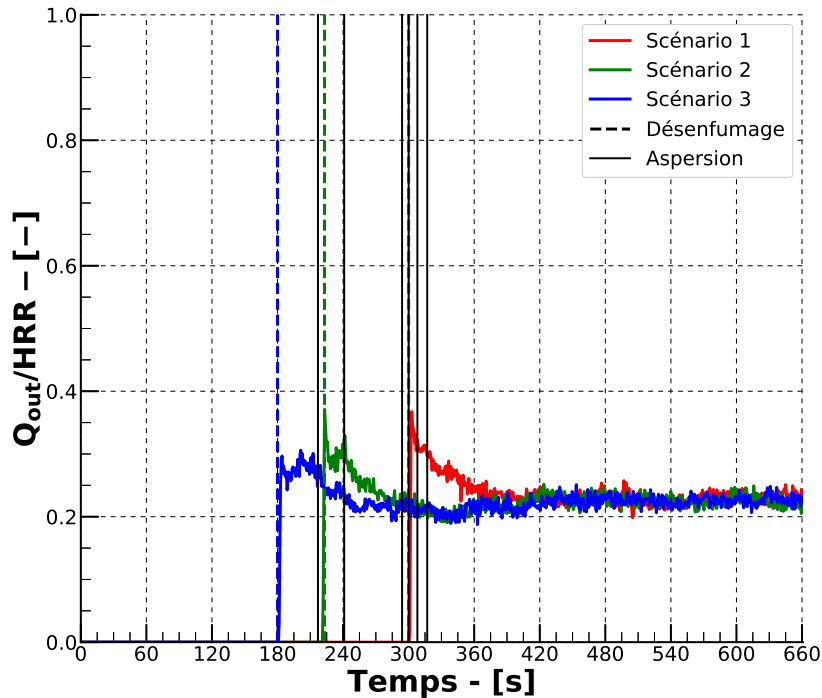


FIGURE 4.11 – Évolution du rapport entre la puissance extraite par les exutoires et le HRR du foyer.

Tant que les exutoires sont maintenus fermés, les fumées ne peuvent pas être extraites du bâtiment et ce rapport est donc nul. Lors de leur ouverture, les fumées chaudes accumulées sous le plafond peuvent être évacuées. Cela se traduit par un pic de puissance extraite. Plus le désenfumage est ouvert tardivement, plus les fumées sont chaudes et le gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment est important. Le tirage thermique à l'ouverture des exutoires est alors plus efficace et les puissances extraites sont plus élevées.

Lorsque le premier sprinkleur se déclenche, on constate que la puissance extraite par les exutoires diminue légèrement dans le scénario 3 (le seul où les exutoires sont déjà ouverts). La même observation peut être faite dans les scénarios 2 et 3 après activation du second sprinkleur. Cette diminution est d'autant plus importante que les quantités d'énergie extraite sont élevées. L'activation de sprinkleurs supplémentaires dans ces deux scénarios n'a en revanche que très peu d'effet sur l'extraction de chaleur. Dans le scénario 1, le désenfumage est suivi par l'ouverture de plusieurs sprinkleurs. La puissance extraite diminue alors rapidement pour atteindre un état stationnaire à 25 % du HRR après 420s. Ce même état stationnaire est atteint dans les deux autres scénarios.

L'intégration de ces résultats permet de comparer la quantité totale d'énergie extraite par les

exutoires en fonction du scénario de désenfumage choisi (figure 4.12). Il est toutefois intéressant de constater que bien qu'ils soient légèrement différents les premiers instants après ouverture des exutoires, les scénarios 2 et 3 présentent une pente identique légèrement plus forte que lorsque le désenfumage est déclenché après activation de l'aspersion. Cela veut donc dire que malgré des niveaux de température plus élevés, l'efficacité globale du désenfumage est légèrement moins performante lorsqu'il a été ouvert après activation des premiers sprinkleurs. Ainsi, à foyer équivalent, l'énergie thermique stockée dans le bâtiment est plus importante lorsque le désenfumage est ouvert tardivement, contribuant ainsi à augmenter les sollicitations thermiques sur les personnes et les structures.

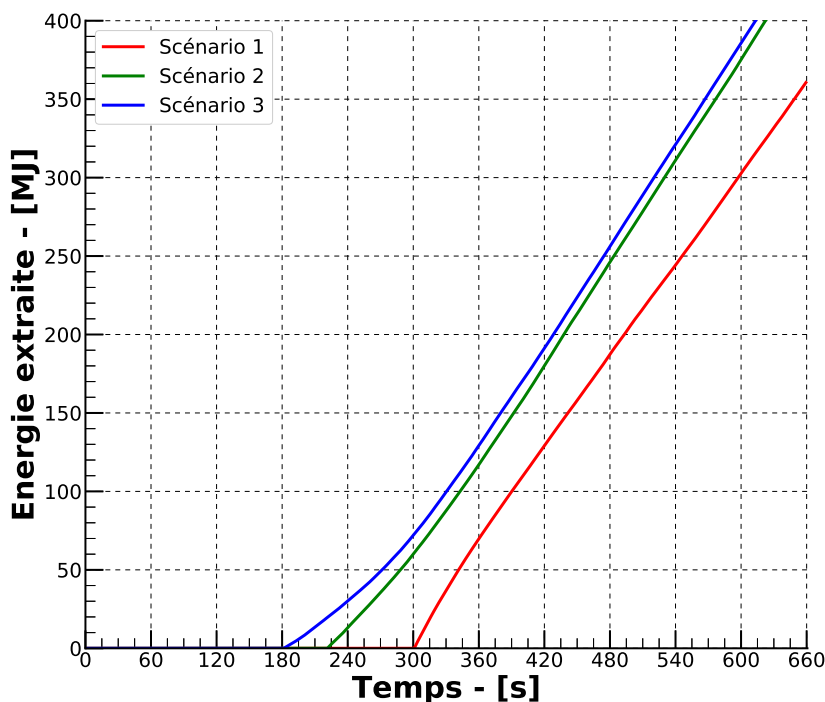


FIGURE 4.12 – Quantité d'énergie extraite par les exutoires au cours du temps.

4.2.1.5 Quantité de matière extraite par les exutoires

Nous allons maintenant étudier l'évolution de la quantité de suies extraites par les exutoires en fonction du scénario. Comme précédemment, nous analyserons également l'influence du désenfumage sur la quantité de suie transportée vers le canton adjacent

Les débits volumiques extraits par les exutoires pour les trois scénarios avec désenfumage sont reportés sur la figure 4.13. Comme précédemment avec les puissances extraites, tant que les exutoires sont fermés, rien ne peut sortir du bâtiment et les trois scénarios sont identiques avec un débit nul. Ensuite, deux comportements différents sont identifiables. Lorsque le désenfumage est déclenché avant ou en même temps que l'aspersion, le débit passe subitement à une valeur

non nulle puis augmente progressivement jusqu'à tendre vers une valeur d'équilibre commune de l'ordre de $35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La valeur initiale (à l'instant d'ouverture des exutoires) est d'autant plus élevée que le désenfumage est déclenché tardivement. Ceci est une nouvelle fois lié aux niveaux de température des fumées accumulées sous le plafond.

Dans le scénario 1 où le désenfumage est déclenché après l'aspersion, la valeur du débit volumique lors de l'ouverture des exutoires est beaucoup plus élevée que dans les deux autres scénarios (environ $45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). En revanche, ce débit va décroître rapidement jusqu'à tendre vers le même état d'équilibre que dans les deux autres cas. Contrairement aux résultats obtenus sur les puissances extraites, on ne constate pas d'influence significative de l'activation des sprinkleurs sur les débits volumiques extraits par les exutoires.

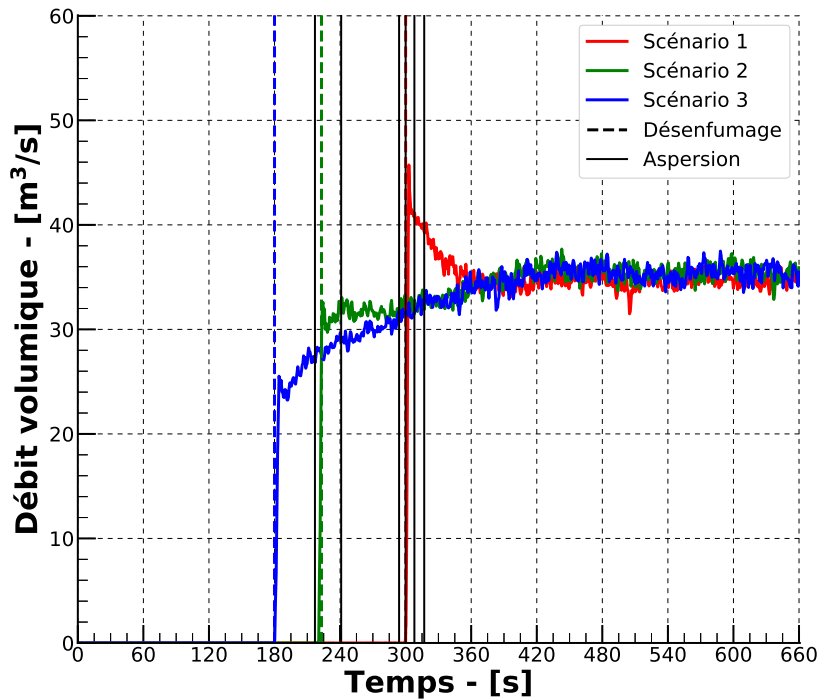


FIGURE 4.13 – Débits volumiques extraits par les exutoires.

Pour compléter cette analyse, il est utile de s'intéresser à l'évacuation des suies par les exutoires. Pour cela, on trace sur la figure 4.14 l'évolution de la quantité totale de suie accumulée dans le bâtiment au cours du temps pour les quatre scénarios de l'étude. Dans le cas sans désenfumage (courbe noire), cette valeur correspond à l'intégrale de la quantité de suie produite par le foyer à chaque instant. Cette grandeur est calculée par FDS en multipliant le taux de combustible brûlé par le taux de production de suie utilisé en donnée d'entrée. Elle suit donc la dynamique de croissance du foyer jusqu'à activation du cinquième sprinkleur. La puissance du foyer étant maintenue constante, la masse de suie accumulée dans le bâtiment augmente linéairement avec le temps jusqu'à la fin de la simulation.

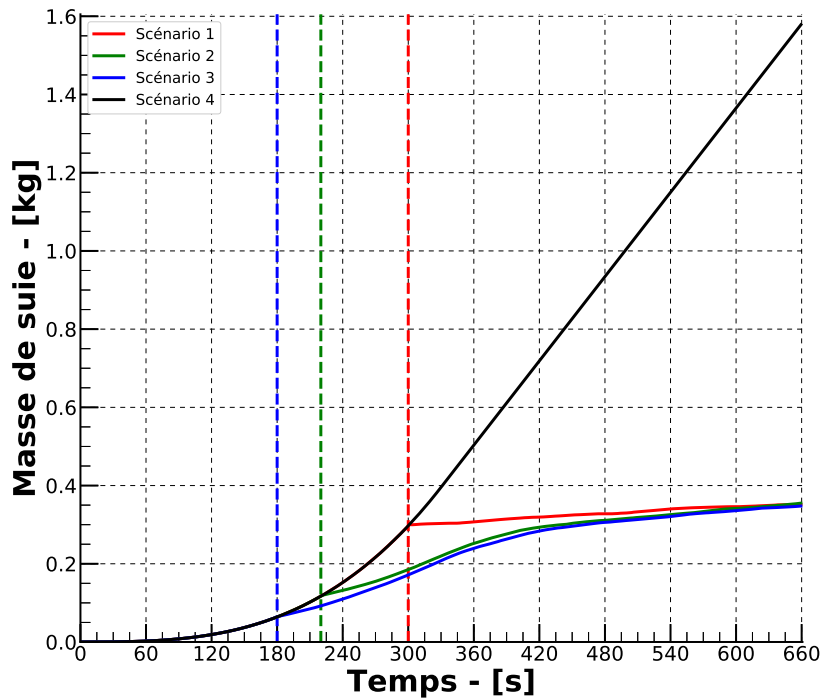


FIGURE 4.14 – Évolution de la masse de suie accumulée dans le bâtiment.

Jusqu'à ouverture des exutoires, les trois scénarios avec désenfumage sont identiques au scénario 4. Les suies produites s'accumulent progressivement dans le bâtiment au fur et à mesure de leur libération par le foyer. Il est donc logique que plus les exutoires sont ouverts tardivement, plus la quantité totale de suies accumulées soit élevée.

Après ouverture des exutoires dans les scénarios 2 et 3, les suies continuent de s'accumuler progressivement dans le bâtiment à un rythme nettement plus faible. À partir de 420 s, les deux courbes se superposent. Il n'y a donc plus de différence entre les deux scénarios en terme de quantité de suie présente dans le bâtiment.

Lorsque l'exutoire est ouvert plus tardivement (scénario 1), l'accumulation de suie dans l'entrepôt est ralentie de manière significative. Moins de 100 g de suies supplémentaires vont s'ajouter jusqu'à la fin de la simulation. Ceci ne veut cependant pas dire qu'il n'y a plus de suies présentes, mais plutôt qu'il y a un relatif équilibre entre la quantité de suies produite et celle extraite. La masse de suies accumulées depuis le départ de feu est toujours présente au sein du bâtiment.

Comme précédemment, au terme de la simulation, les trois scénarios avec désenfumage sont équivalents.

4.2.2 Scénarios alternatifs

À partir des résultats obtenus précédemment, des simulations supplémentaires modélisant des scénarios alternatifs ont été réalisées. Dans ces nouvelles simulations, des modifications sont apportées à l'installation de désenfumage.

Le premier scénario alternatif a pour objectif de vérifier l'influence de la surface totale de désenfumage sur la capacité de l'installation à extraire de la fumée et de la chaleur du bâtiment. Pour cela, des simulations ont été réalisées en utilisant un coefficient $\alpha = 0.005$ (taux servant à déterminer la surface utile de l'installation). Cela se traduit par une surface de désenfumage de 6.45 m^2 par canton, distribuée sur quatre exutoires. Pour rappel, précédemment la surface totale de désenfumage par canton était de 25.8 m^2 divisée en six exutoires.

Dans le second scénario alternatif, la S.U.I. initiale est conservée mais sa distribution est modifiée. Dans chaque canton, cette surface est désormais distribuée sur trois exutoires de dimensions plus importantes. Cette configuration permet d'étudier l'influence de la répartition de la S.U.I. sur l'efficacité du désenfumage.

Ces simulations alternatives sont réalisées sur le scénario 1. Le désenfumage est donc déclenché 90 s après activation du premier sprinkleur et les résultats sont à comparer à ceux obtenus précédemment lors des simulations du scénario 1.

Tout d'abord, on s'intéresse au nombre total de sprinkleurs déclenchés ainsi qu'à leur temps d'activation (figure 4.15). Jusqu'à 300 s, les résultats sont censés être identiques dans les trois cas. On note toutefois que des sprinkleurs se déclenchent légèrement plus tôt dans la simulation originale que dans les deux alternatives étudiées. Les paramètres d'entrée relatifs à la dynamique du foyer étant rigoureusement identiques dans les trois cas, les courbes de HRR se superposent parfaitement (figure 4.16). La position et la puissance du foyer sont donc identiques entre les trois simulations et ne peuvent pas être la cause de ces écarts. La position et les caractéristiques des sprinkleurs ont également été conservées dans les trois cas.

Dans ces conditions, il semble donc probable que les différences observées soient dues à des effets numériques. Deux causes peuvent être identifiées :

- Pour des raisons logistiques, les simulations ont été réalisées sur des machines différentes (mais utilisant la même version de FDS). Les calculs se faisant en parallèle, des architectures différentes peuvent produire des résultats légèrement différents.
- Lors de l'initialisation de l'écoulement, FDS ajoute un bruit afin d'éviter le développement d'écoulements parfaitement symétriques. Ce bruit est généré aléatoirement au début de la simulation. Si une même simulation est effectuée deux fois sur une même machine, ce nombre aléatoire sera inchangé et les résultats seront identiques [59].

La conjugaison de ces deux effets est une cause probable permettant d'expliquer ces écarts. En dehors de ces problèmes numériques, il ne semble pas y avoir d'influence significative des caractéristiques de l'installation de désenfumage sur les temps d'activation des cinquième et sixième sprinkleurs. Dans le scénario 1 original, un sprinkleur supplémentaire se déclenche un peu avant 600 s simulées. Compte tenu des effets cités précédemment ainsi que des modèles de sprays rudimentaires utilisés par FDS, il n'est pas possible de conclure avec certitude sur les raisons de l'activation de ce dernier sprinkleur. D'une manière plus générale, la confiance portée

aux résultats décroît avec le nombre de sprinkleurs activés dans les simulations.

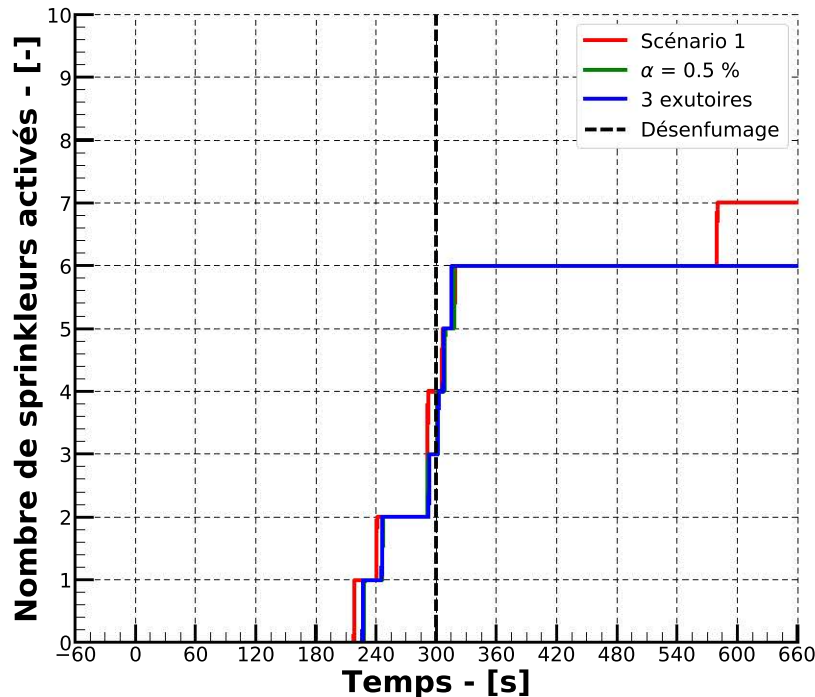


FIGURE 4.15 – Évolution du nombre de sprinkleurs activés dans les simulations alternatives.

Pour étudier l'influence des modifications apportées à la géométrie sur l'efficacité du désenfumage, on trace sur la figure 4.17 l'évolution du ratio entre la puissance extraite et le HRR du foyer. Jusqu'à 300 s, les exutoires sont maintenus fermés dans les trois simulations. Lors de leur ouverture, on observe deux comportements différents. Dans le scénario 1 et sa version alternative avec 3 exutoires totalisant la même surface de désenfumage, le rapport des deux grandeurs atteint un maximum avant de décroître progressivement et de se stabiliser légèrement au dessus de 20 %. Jusqu'à ce que l'état stationnaire soit atteint, le rapport de la puissance extraite sur le HRR du foyer reste légèrement supérieur dans le cas du scénario 1. La valeur du maximum est légèrement supérieure dans le scénario 1 (37 % contre 32 %). Bien que la surface de désenfumage soit la même dans les deux cas, l'installation possédant uniquement 3 exutoires est moins efficace que celle avec 6 DENFC.

Dans le scénario avec une surface de désenfumage réduite, l'ouverture du désenfumage est suivie également d'une augmentation brusque de la puissance extraite. Cependant, à la différence des deux simulations précédentes, le ratio ne va pas diminuer après l'ouverture. Au contraire, on peut noter une faible augmentation progressive jusqu'à la fin de la simulation, passant de 10 % à un peu plus de 12 %. Lorsque les exutoires sont ouverts, la faible surface de désenfumage n'est pas en mesure d'extraire suffisamment d'énergie pour permettre un refroidissement efficace dans le bâtiment. Les fumées chaudes accumulées sous le plafond conservent donc un niveau de température similaire à celui présent lors du déclenchement du désenfumage. En conséquence,

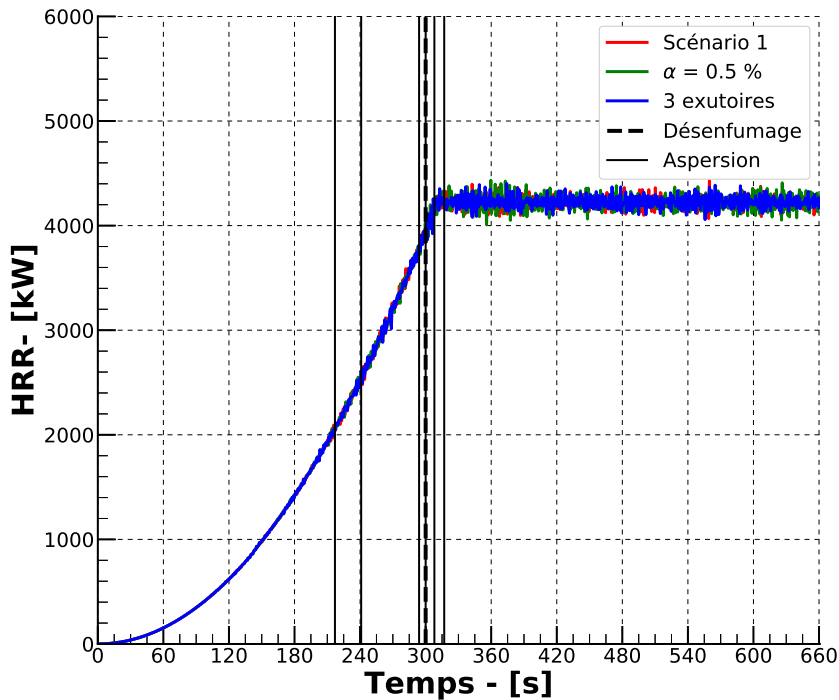


FIGURE 4.16 – Évolution de la puissance des foyers des simulations alternatives.

le tirage thermique reste sensiblement le même durant le reste de la simulation.

Ces résultats se retrouvent également en analysant la quantité d'énergie extraite au cours du temps dans les trois simulations. Ces résultats sont reportés sur la figure 4.18. On retrouve bien efficacité moindre du désenfumage à extraire les fumées lorsque la S.U.I. est répartie sur trois exutoires plutôt que six. Lors des premières secondes après ouverture des exutoires, les résultats sont quasi identiques dans les deux cas. Puis, progressivement, un écart se creuse. Au terme des simulations, on constate une réduction de près de 10 % de la quantité totale d'énergie extraite lorsque trois exutoires sont utilisés.

Enfin, en utilisant une surface de désenfumage quatre fois plus faible, la quantité totale d'énergie extraite est deux fois moins importante. Cette différence d'énergie contribue à réchauffer les fumées et les parois à l'intérieur du bâtiment, augmentant ainsi les risques auxquels pourraient être exposés des personnes ainsi que les structures.

Un constat similaire peut être fait en suivant l'évolution de la quantité totale de suies présente dans le bâtiment en fonction du scénario (figure 4.19). Alors que les deux simulations utilisant la même surface de désenfumage présentent des profils similaires avec une très forte réduction de l'accumulation de suies dans le bâtiment après ouverture des exutoires, cette quantité continue d'augmenter fortement dans la simulation avec une surface réduite. Après 600 s simulées, ce scénario a accumulé plus du double de masse de suie des deux autres scénarios. De même que

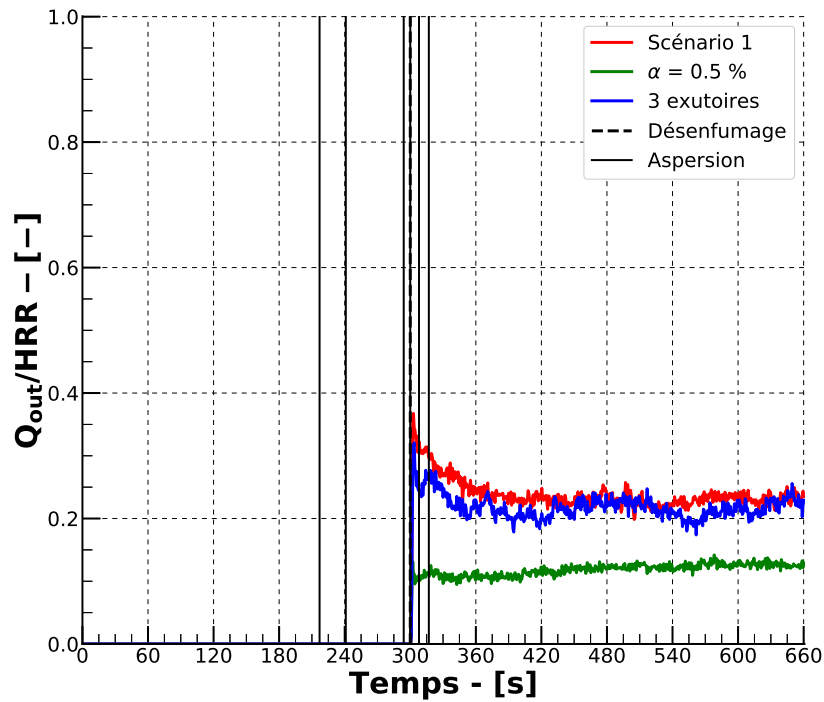


FIGURE 4.17 – Évolution du rapport entre puissance extraite et HRR dans les simulations alternatives.

précédemment, on note que l'installation utilisant uniquement trois exutoires a été moins efficace à extraire les suies que celle en utilisant six (augmentation d'un peu plus de 17%). Cela vient conforter les observations réalisées lors de la seconde campagne d'essais sur l'influence de la distribution de la surface utile de désenfumage.

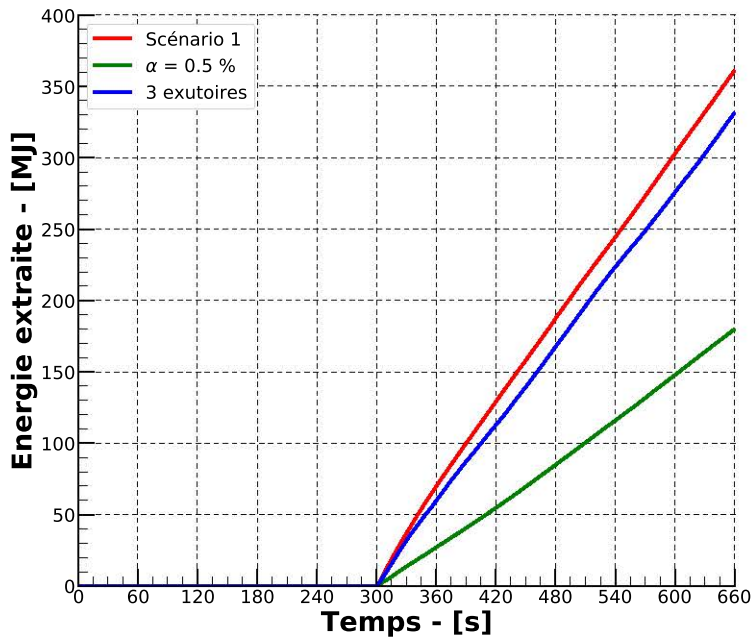


FIGURE 4.18 – Évolution de l'énergie extraite par les exutoires dans les simulations alternatives.

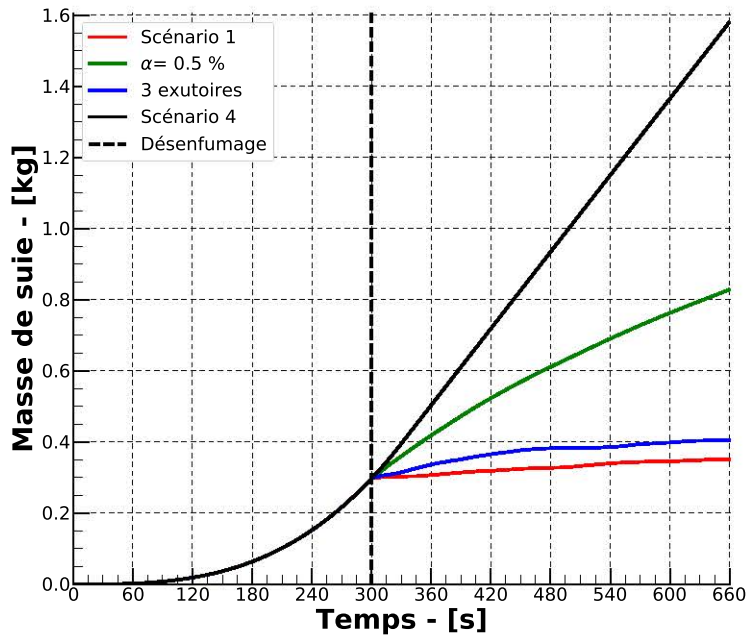


FIGURE 4.19 – Évolution de la quantité de suie présente dans le bâtiment dans les simulations alternatives.

4.3 Modélisation d'un centre commercial

La seconde géométrie étudiée dans cette partie de l'étude est un centre commercial faisant un peu moins de 4300 m² de surface au sol. Le volume est divisé en quatre cantons de tailles similaires par des écrans de cantonnement de 1.5 m de haut. Une représentation de la géométrie est présentée sur la figure 4.20. Sur cette figure, les grandes formes colorés représentent divers rayonnages répartis dans les quatre cantons. Le grand rectangle jaune sur la partie gauche de l'image correspond à la zone délimitant la sortie des caisses (l'alignement de formes grises courbées) et la galerie marchande (aussi appelée mail). La hauteur sous plafond dans tout le bâtiment est de 7.5 m.

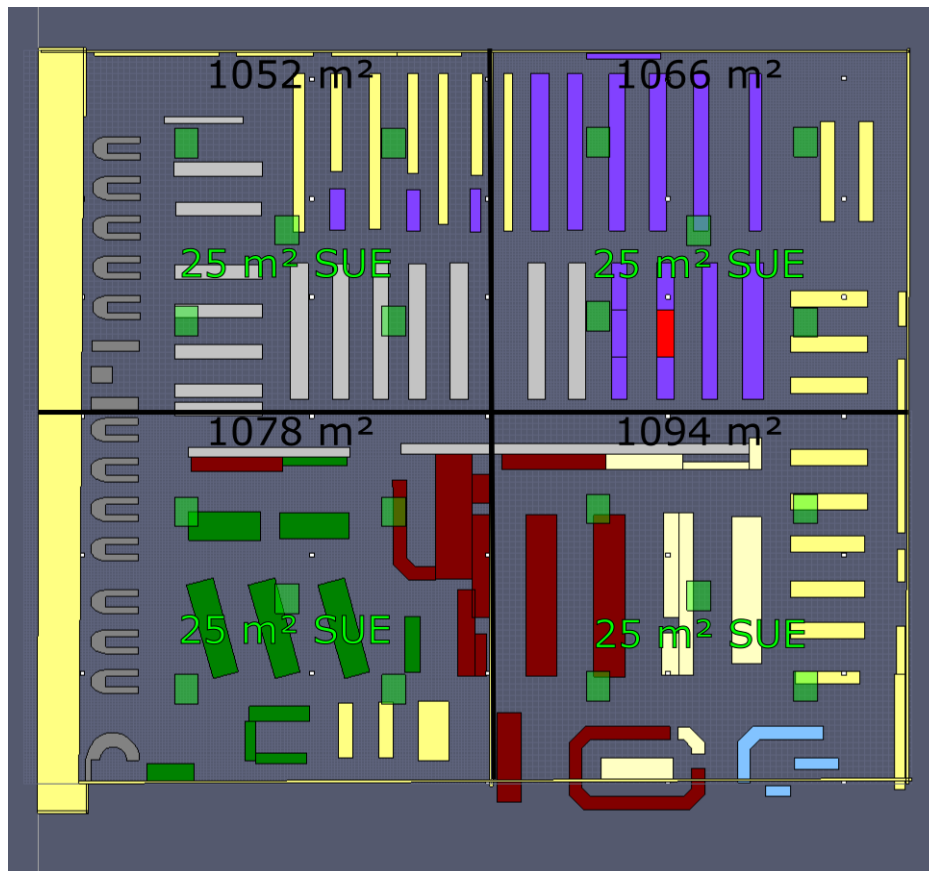


FIGURE 4.20 – Plan du centre commercial et position des principaux éléments.

Chacun de ces cantons est équipé de cinq DENFC, représentant une surface de désenfumage de 25 m² par canton. Cette installation respecte les règles de dimensionnement prescrites par l'I.T.246 et les réglementations relatives au E.R.P. de type M (magasins de vente et centres commerciaux). L'amenée d'air frais est réalisée par la galerie marchande considéré comme un volume largement désenfumé (§3.3 de l'I.T.246). La position de chaque exutoire est représentée en vert translucide sur la figure 4.20.

Chaque canton possède également un réseau sprinkleur dimensionné selon le référentiel APSAD-R1. Au total, 528 sprinkleurs sont répartis sur la surface du bâtiment avec un es-

pacement de 3 m entre chaque tête.

De même que pour la géométrie précédente, le foyer le plus puissant du guide du LCPP a été utilisé dans les simulations. Pour rappel, ce foyer présente une cinétique de montée en puissance en t^2 et atteint un HRR maximum de 12 MW en 8.5 min. Dans notre cas, l'évolution de la puissance est stoppée lors de l'activation du cinquième sprinkleur. Comme précédemment, cette contrainte n'empêche pas l'activation de sprinkleurs supplémentaires. La géométrie du foyer est celle d'un élément de rayonnage de 4 m de long et 1.5 m de large pour 2 m de hauteur et se situe dans une allée au milieu du canton Nord-Est (en rouge sur la figure 4.20). Cette position correspond à une zone où se trouvent des éléments combustibles dans la grande surface originale. Une vue du foyer pleinement développée est représentée sur la figure 4.21

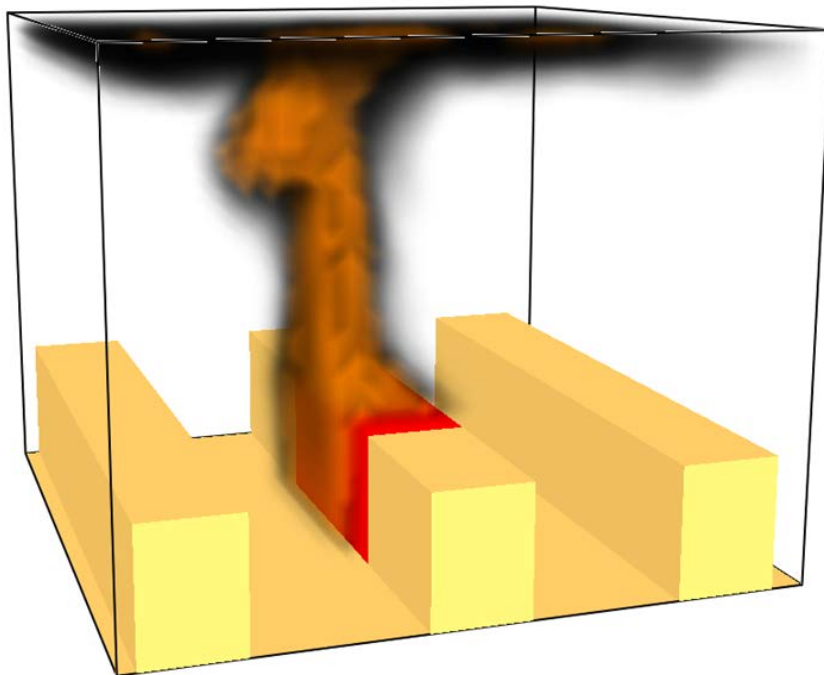


FIGURE 4.21 – Visualisation du foyer pleinement développé.

À l'issue des simulations préliminaires, il a été choisi d'utiliser les mêmes scénarios que pour l'entrepôt de stockage. À savoir :

- Scénario 1 : Désenfumage 90 s après activation du premier sprinkleur ;
- Scénario 2 : Désenfumage déclenché simultanément à l'activation du premier sprinkleur ;
- Scénario 3 : Désenfumage 180 s après le début de l'incendie ;
- Scénario 4 : Simulation sans désenfumage.

4.3.1 Analyse des résultats des simulations des 4 scénarios étudiés

4.3.1.1 Temps d'activation et nombre de sprinkleurs activés

Comme précédemment, le nombre total de sprinkleurs activés ainsi que leurs temps respectifs d'activation constituent les premiers points de comparaison entre les quatre scénarios. Ces deux résultats sont présentés sur la figure 4.22. Les temps d'activation ainsi que les numéros des différents sprinkleurs sont eux reportés dans le tableau 4.3. Enfin, la position de ces sprinkleurs est présentée sur la figure 4.23.

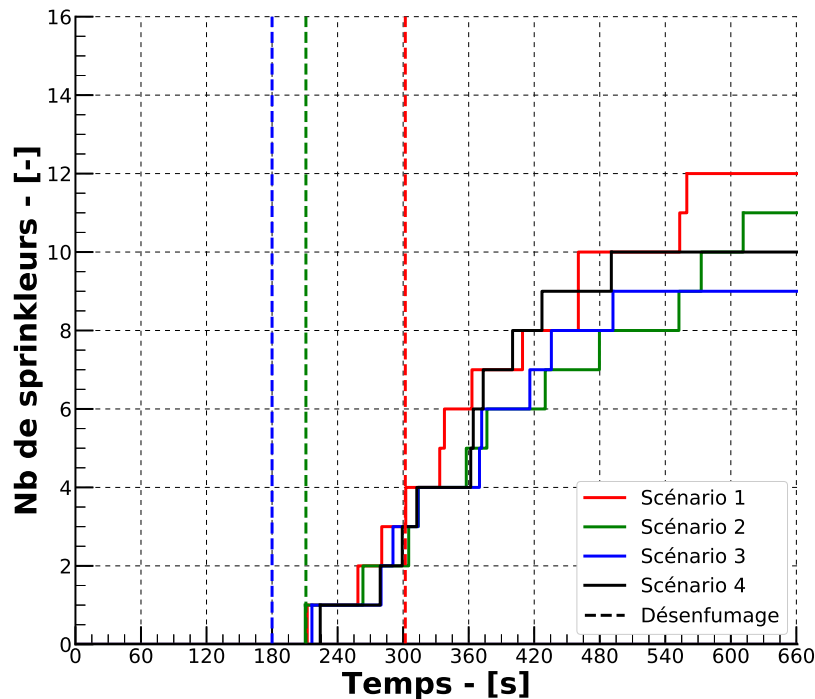


FIGURE 4.22 – Evolution avec le temps du nombre de sprinkleurs déclenchés dans les quatre scénarios étudiés.

De même que dans les simulations réalisées sur la géométrie précédente, les temps d'activation des sprinkleurs dans les différents scénarios sont sensiblement similaires lors des premières minutes de l'incendie. Les temps moyens d'activation des quatre premiers sprinkleurs présentent un écart type inférieur à 10 s. Ensuite, plus le nombre de sprinkleurs actifs augmente, plus cet écart devient important. L'écart type à la moyenne des temps d'activation des sprinkleurs 5 et 6 est de l'ordre de 15 s. Les sprinkleurs 7 et 8 présentent quant à eux des écarts types d'environ 30 s. Pour le neuvième sprinkleur, cet écart est de l'ordre de 50 s.

Il est possible que les légers écarts observés dans les temps d'activation des premiers sprinkleurs soient liés aux problèmes numériques présentés précédemment. Pour preuve, les temps

Scénario 1		Scénario 2		Scénario 3		Scénario 4	
Spk n°	t_{act} - [s]	Spk n°	t_{act} - [s]	Spk n°	t_{act} - [s]	Spk n°	t_{act} - [s]
29	212,2	29	210,4	29	216,5	29	224,1
30	258,6	30	263,2	30	279,8	30	279,0
28	280,4	31	305,1	28	290,7	28	299,2
31	302,4	28	313,9	31	313,6	31	312,5
42	333,5	32	357,8	42	369,9	32	361,9
32	337,8	42	376,7	32	371,9	18	364,2
17	363,0	17	430,1	41	416,0	17	373,3
41	409,3	41	479,7	17	435,7	42	400,2
05	460,4	18	552,5	18	492,1	54	427,1
06	460,4	05	572,9	-	-	65	490,6
53	553,2	53	661,3	-	-	-	-
65	559,7	-	-	-	-	-	-

TABLEAU 4.3 – Temps d'activation et numéros des différents sprinkleurs activés dans les quatre scénarios.

d'activation du premier sprinkleur dans les scénarios 1, 2 et 4 devraient en toute logique être rigoureusement identiques.

Dans les quatre scénarios étudiés, les sprinkleurs 29 et 30 (proches du foyer) se sont systématiquement activés en premier et en second. Ensuite, bien que de légères différences existent entre les différents scénarios, aucune saute de sprinkleur n'a été observée. Bien qu'il semble y avoir des directions privilégiées d'activation des sprinkleurs (axes Est-Ouest et Nord-Sud), cela ne semble pas être dû à l'action du désenfumage. En effet, les mêmes directions sont observées dans les simulations sans désenfumage.

Concernant le nombre total de sprinkleurs déclenchés dans les scénarios, les résultats sont plus complexes à interpréter. À l'issue des simulations, 9 sprinkleurs se sont activés dans le scénario avec déclenchement du désenfumage avant aspersion. Vient ensuite le scénario sans désenfumage (10 sprinkleurs), suivi par le scénario avec déclenchement du désenfumage simultanément à l'activation du premier sprinkleur (11 sprinkleurs). Enfin, 12 sprinkleurs se sont activés dans la simulation du scénario 1 où le désenfumage était ouvert le plus tardivement. En observant les courbes de HRR sur la figure 4.24, on constate de fortes fluctuations de la puissance des foyers (jusqu'à près de 4 MW d'amplitude) après 360 s de temps simulé. Ces fluctuations sont le signe d'une mauvaise ventilation du foyer, domaine où FDS rencontre des limites. Pour s'assurer que les arrivées d'air utilisées dans l'étude soient suffisantes, des simulations tests ont été réalisées avec remplacement des bordures du domaine (murs) par des conditions aux limites de type *OPEN*. Les résultats n'ont pas montré d'amélioration significative de la ventilation du foyer. Il s'avère que la cause de ce début de sous-ventilation est la destratification des fumées causée par l'activation successive d'un grand nombre de têtes de sprinkleurs. Le HRR du foyer étant prescrit en entrée des simulations, le débit de combustible introduit à chaque instant dans les simulations est indépendant de la combustion en elle-même. Ainsi, le combustible introduit dans le domaine et qui n'est pas brûlé au niveau du foyer se trouve transporté dans le milieu jusqu'à rencontrer des conditions lui permettant de s'enflammer. Ce phénomène est observable sur les

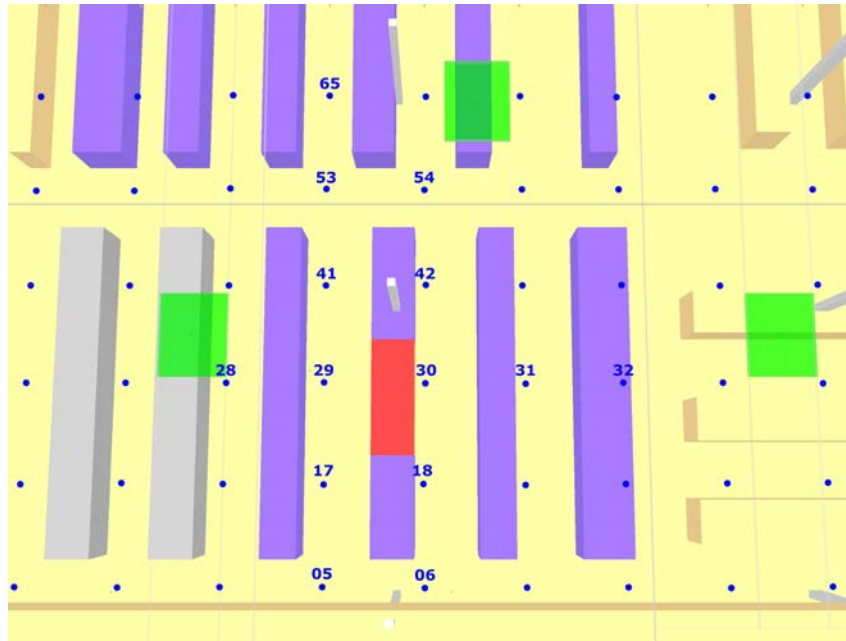


FIGURE 4.23 – Position et numéro de tous les sprinklers déclenchés au cours des quatre différents scénarios.

figures 4.25a et 4.25b. Sur la figure de gauche, à 300 s et alors que des sprinklers sont déjà en activité, la zone de combustion se situe au niveau du foyer. En revanche, à 480 s (figure de droite), alors que de nouveaux sprinklers se sont déclenchés, on constate que la combustion des gaz n'est plus réalisée au niveau du foyer mais se produit au niveau du plafond à divers endroits. Ces fluctuations du foyer ont été observées dans toutes les simulations réalisées sur cette géométrie. Lors de l'embrasement soudain de ces gaz de combustion, la température locale augmente et peut être responsable de l'activation de sprinklers supplémentaires.

Il est donc complexe de déterminer si l'activation de ces sprinklers est lié à ces fluctuations ou non. Dans la suite de cette section, les résultats présentés seront tronqué à 420 s afin d'éviter toute mauvaise interprétation, les résultats aux temps ultérieurs étant trop sujets à critique.

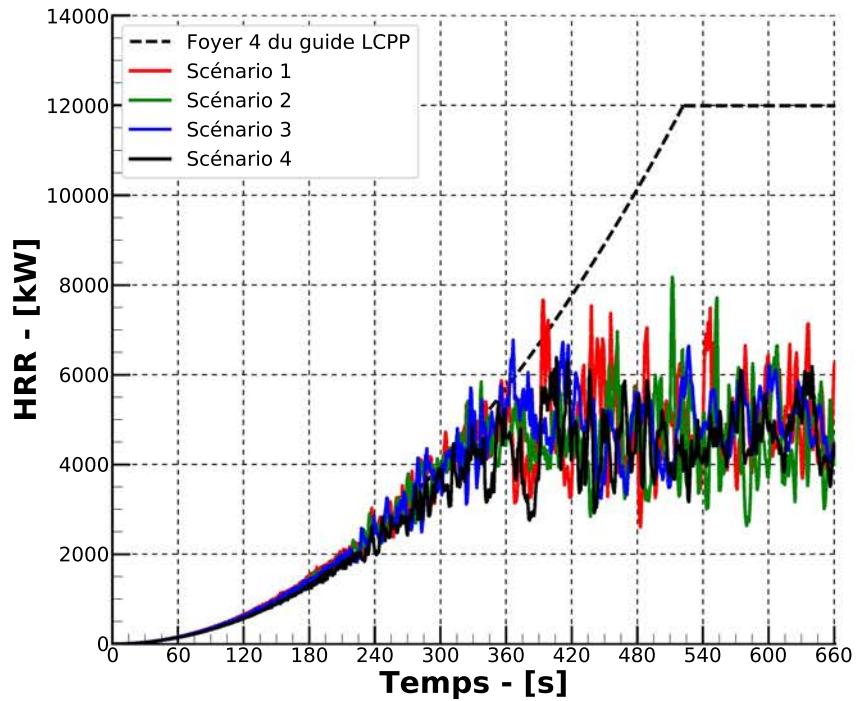


FIGURE 4.24 – Evolution du HRR dans les quatre scénarios différents.

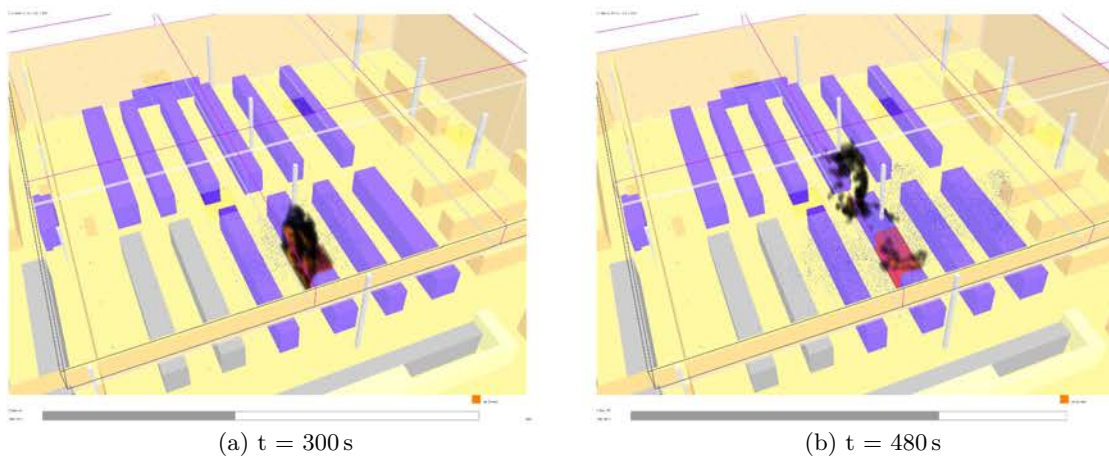
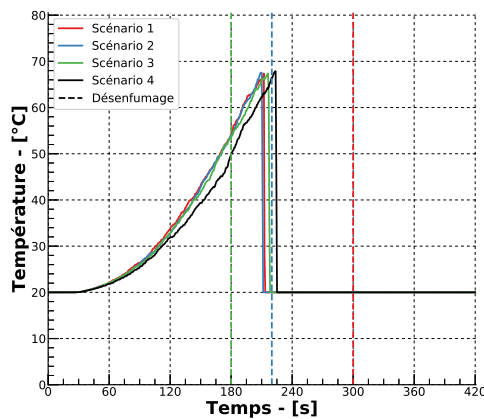


FIGURE 4.25 – Observation du foyer à 300 s et 480 s dans le scénario 2. Les fumées sont désactivées pour permettre de distinguer les zones de flammes.

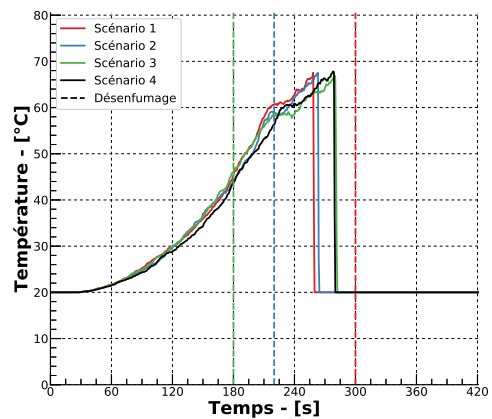
4.3.1.2 Température des éléments sensibles des cinq premiers sprinkleurs

L'évolution de la température des éléments sensibles des premiers sprinkleurs activés est reportée sur les figures 4.26a à 4.26d. Sur toutes ces courbes, on note que l'ouverture des exutoires lors des scénarios 2 et 3 ne perturbe pas l'élévation de température des éléments sensibles des sprinkleurs. Les problèmes numériques évoqués précédemment permettent d'expliquer les légères différences observées entre les différents scénarios lors des premières minutes de simulations.

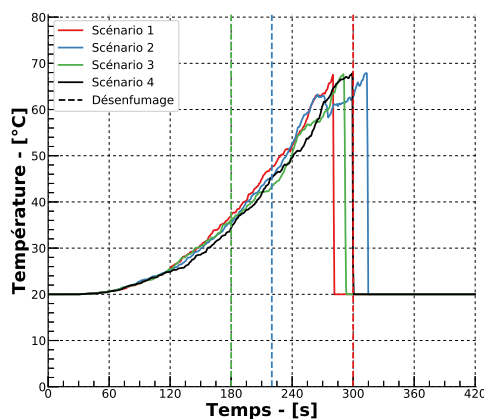
L'ensemble de ces résultats permet de considérer que l'utilisation du désenfumage n'a pas d'influence significative sur le temps de déclenchement des premiers sprinkleurs lors d'un incendie dans un bâtiment de ces dimensions.



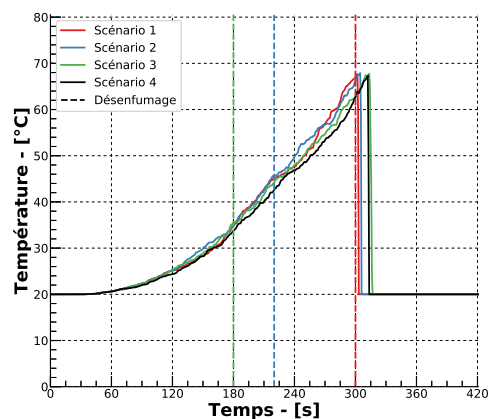
(a) Sprinkleur 29



(b) Sprinkleur 30



(c) Sprinkleur 28



(d) Sprinkleur 31

FIGURE 4.26 – Évolution de la température des éléments sensibles des sprinkleurs 29, 30, 28 et 31

4.3.1.3 Quantité de chaleur transmise aux cantons adjacents

Pour étudier l'influence du désenfumage sur les échanges (de toute nature) entre un canton sinistré et des cantons adjacents, deux grandeurs sont analysées. Tout d'abord, sur les figures 4.27 et 4.28 sont reportés les flux nets de chaleur échangés entre le canton où se situe le foyer et les cantons Nord-Ouest et Sud-Est, respectivement. Compte tenu de l'orientation de la géométrie, les flux sortant du canton sont de signe négatif.

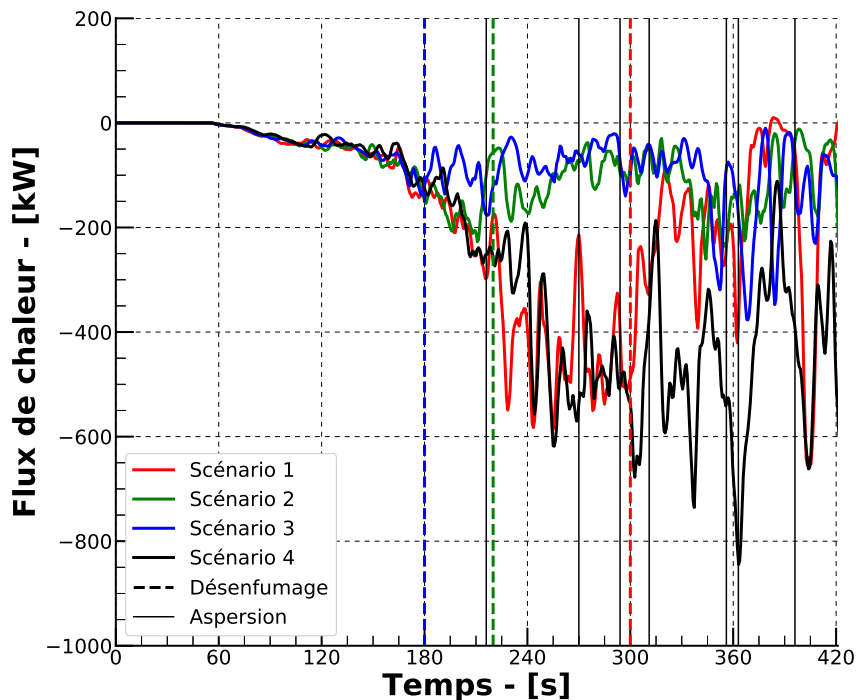


FIGURE 4.27 – Quantité de chaleur transmise du canton Nord-Est au canton Nord-Ouest dans les quatre scénarios.

On retrouve sur ces graphes des comportements identiques à ceux observés précédemment dans ce chapitre, lors de l'analyse de l'entrepôt de stockage. Lors des premiers instants simulés, le cantonnement se remplit progressivement de fumée et de gaz de combustion chauffés. Après environ une minute, les premières fumées commencent à se déverser dans les cantons adjacents. Les flux nets commencent alors à décroître légèrement. Ce transfert d'énergie s'accroît avec le temps, jusqu'à ouverture des exutoires. À partir de cet instant, on observe une réduction significative de la quantité de chaleur transmise du canton sinistré aux cantons adjacents. Cet effet est très prononcé dans le cas du scénario 1. L'ouverture des exutoires se faisant plus tardivement, les niveaux de température des fumées qui se déversent dans les cantons adjacents sont plus élevés. Par conséquent, les flux de chaleur sont également à des niveaux plus importants. Lors du déclenchement du désenfumage, plus de 10 % de la chaleur libérée par le foyer est transmise à chaque canton voisin.

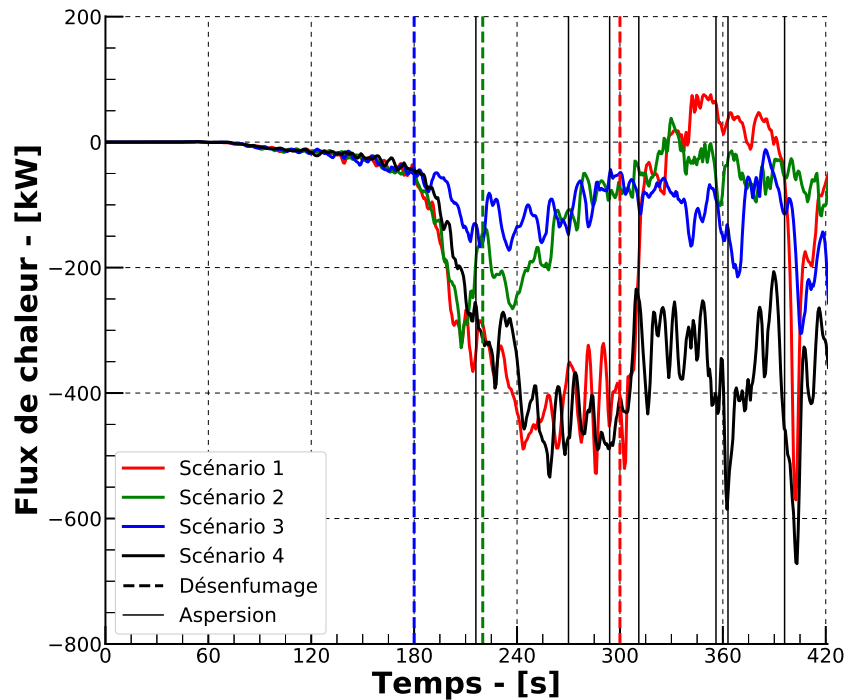


FIGURE 4.28 – Quantité de chaleur transmise du canton Nord-Est au canton Sud-Est dans les quatre scénarios.

L'effet de la destratification des fumées est également visible sur les courbes de la figure 4.28. Lors de l'activation de certains sprinkleurs (les plus proches des écrans de cantonnement), on constate une soudaine augmentation de la valeur du flux transmis aux cantons voisins. Les fumées chaudes sont entraînées vers le sol par les sprays et une certaine quantité est alors en mesure de passer sous le cantonnement.

De nouveau, il semble correct de considérer que l'utilisation du désenfumage permet de limiter fortement le transport d'énergie du canton où se situe le foyer aux cantons voisins. Bien que la destratification induite par l'asperision contribue à augmenter ces échanges, les résultats fournis par les simulations sans désenfumage montrent clairement l'impact positif du désenfumage sur ce point particulier.

4.3.1.4 Quantités de chaleur et de matière extraites par les exutoires

Pour étudier l'impact de l'asperision sur l'efficacité du désenfumage, on trace sur la figure 4.29 le rapport entre la quantité de chaleur extraite par les exutoires et le HRR du foyer, pour les quatre scénarios.

De la même manière que pour la géométrie précédente, le déclenchement du désenfumage est

suivi par un pic de la valeur de ce rapport. Ensuite, avec le refroidissement créé conjointement par le désenfumage et l'aspersion, ce rapport diminue jusqu'à se stabiliser (toujours avec des fluctuations liées au foyer) entre 30 % et 40 %. En revanche, contrairement au cas précédent, le scénario 1 (ouverture des exutoires tardive) n'est pas marqué par une efficacité supérieure à celle des autres scénarios. Dans ce cas, les sprinkleurs ont contribué à suffisamment limiter l'élévation de température dans le canton pour réduire l'efficacité du désenfumage lors de son déclenchement. L'efficacité du désenfumage reste cependant au moins aussi bonne que dans les deux autres scénarios.

En considérant que plus de 30 % de la chaleur produite par le foyer est évacuée à travers les exutoires, quelle que soit la solution de désenfumage choisie et malgré l'activation d'un grand nombre de sprinkleurs, il semble juste d'affirmer que l'aspersion ne rend pas inefficace le désenfumage naturel

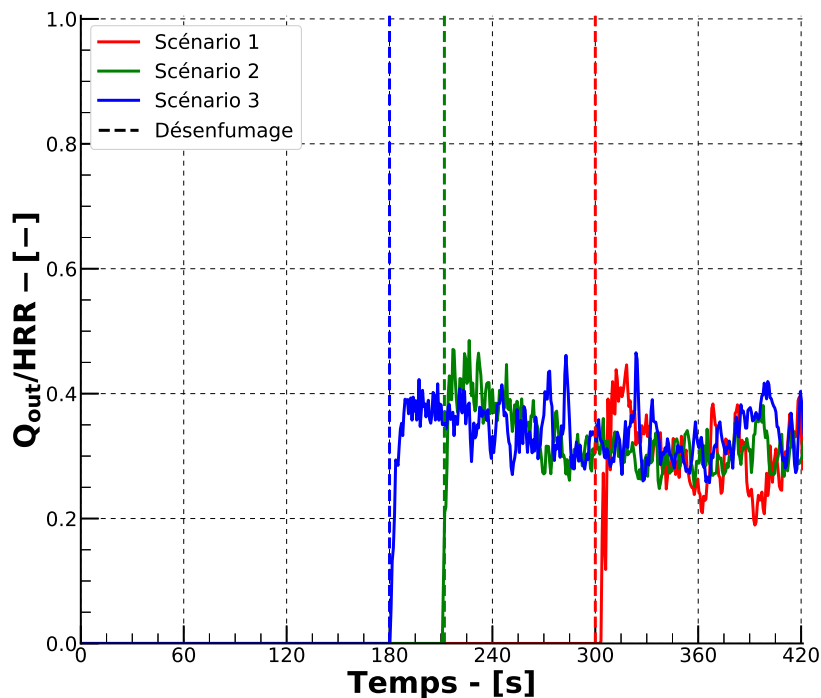


FIGURE 4.29 – Évolution du rapport entre la puissance extraite par les exutoires et le HRR du foyer.

L'intégration de ces résultats (figure 4.30) permet une nouvelle fois de comparer la quantité totale d'énergie évacuée par les exutoires, en fonction du scénario de désenfumage choisi. Comme précédemment, on constate que les scénarios 2 et 3 présentent des profils similaires ainsi qu'une faible différence de quantité totale d'énergie extraite à l'issue des simulations. En revanche, lorsque les exutoires ont été ouverts plus tardivement, près de deux fois moins d'énergie a été extraite du bâtiment à 420s. L'efficacité du désenfumage étant similaire aux temps long, cet

écart ne pourra pas être rattrapé. La conséquence est donc d'être confronté à des niveaux de température plus élevés augmentant ainsi les contraintes thermiques subies par les personnes présentes ainsi que par les structures du bâtiment.

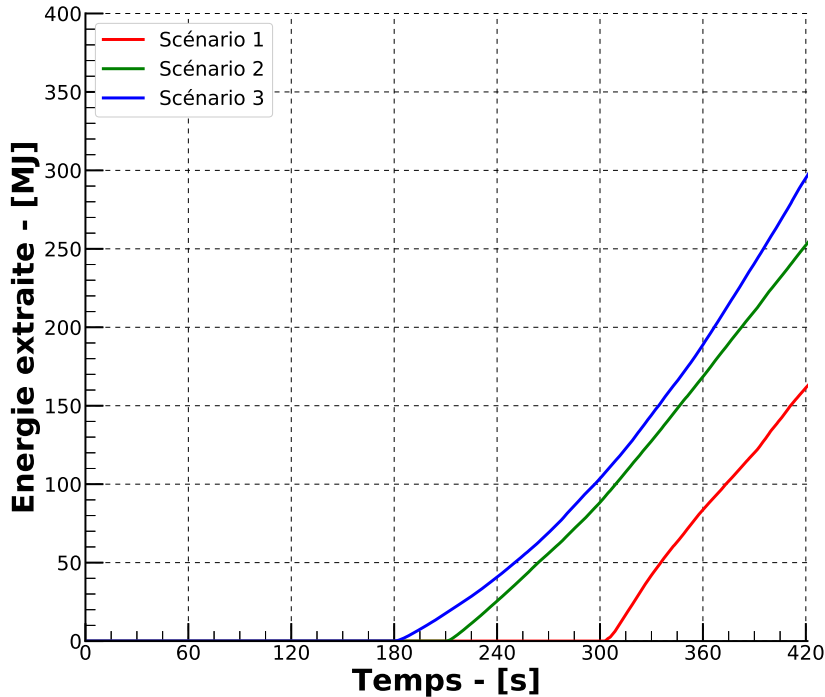


FIGURE 4.30 – Quantité d'énergie extraite par les exutoires au cours du temps.

Le même constat est fait quant à l'évacuation des suies par les exutoires. L'évolution de la quantité totale de suie présente dans le bâtiment au cours du temps et pour les trois scénarios avec désenfumage est reportée sur la figure 4.31. Jusqu'à ouverture des exutoires, le bâtiment étant fermé, cette grandeur correspond à la quantité de suie libérée par le foyer. Lorsque le désenfumage est déclenché, les fumées sont évacuées du bâtiment et le taux d'accroissement de l'accumulation de suie est réduit. Plus les exutoires sont ouverts tardivement, plus la quantité de suie accumulée est importante. De même que pour la quantité d'énergie extraite par les exutoires, on constate que les scénarios 2 et 3 sont similaires, bien que présentant un comportement légèrement différent après 360 s de temps simulé.

On note également que, contrairement à la géométrie précédente, les suies continuent à s'accumuler avec un taux assez élevé aux temps longs. Cette différence de comportement peut être liée à la configuration géométrique des lieux ainsi qu'à la disposition du foyer et des exutoires. Des simulations supplémentaires seraient nécessaire afin de vérifier cela.

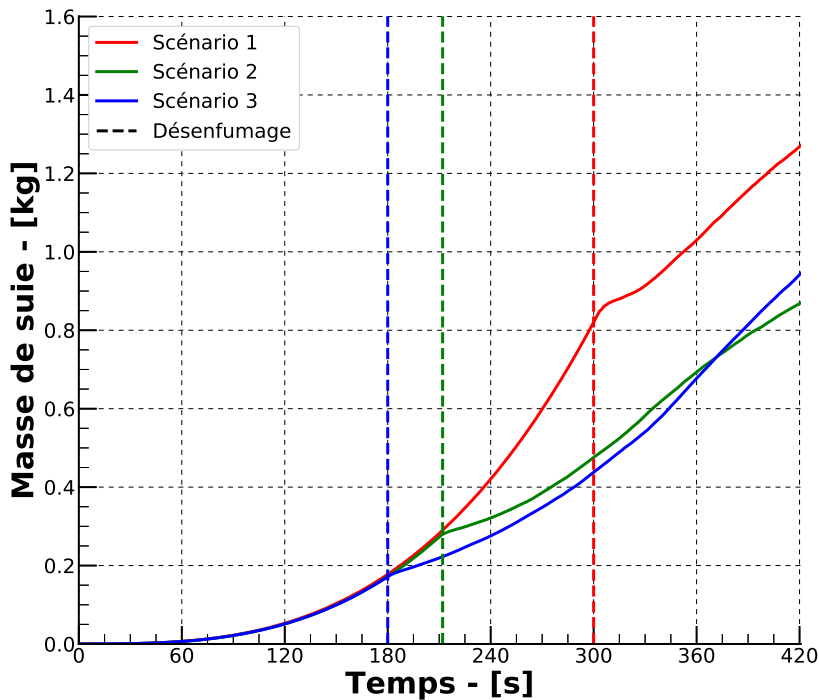


FIGURE 4.31 – Évolution de la quantité de suie présente dans le bâtiment.

4.4 Conclusions

En s'appuyant sur les résultats obtenus lors des deux campagnes expérimentales menées dans cette étude, des simulations numériques de divers scénarios couplant désenfumage et extinction ont été réalisées en se basant sur des géométries de bâtiments existants.

Les résultats obtenus permettent de conclure que :

- Il ne semble pas y avoir d'influence du désenfumage sur le temps de réponse des premiers sprinkleurs.
- Le désenfumage contribue à limiter de manière significative le transport d'énergie et de matière du canton où se trouve le foyer aux cantons adjacents.
- La présence d'aspersion ne pénalise pas la capacité du désenfumage à extraire efficacement de la chaleur et des fumées.
- La distribution de la surface de désenfumage joue un rôle important dans l'efficacité de l'installation de désenfumage.

Bien que ce paramètre ait été également étudié dans ce chapitre, l'absence de phénomène d'extinction ne permet pas de conclure avec certitude sur l'influence du désenfumage sur le nombre total de sprinkleurs déclenchés. Toutefois, les résultats obtenus laissent à penser que le désenfumage ne contribue pas à augmenter ce nombre, ce qui serait pénalisant pour l'installation sprinkleur.

En dépit du travail de validation réalisé aux chapitres précédents pour qualifier l'utilisation de FDS, il convient de rester prudent quant à la valeur quantitative des résultats, compte tenu des réserves exposées précédemment sur l'absence d'extinction et la limite de sous-ventilation.

Conclusions et perspectives

Conclusions

À travers le travail bibliographique mené en amont de ce travail de thèse, nous avons pu constater que la question de l'interaction entre les systèmes d'extinction automatique à eau et les dispositifs de désenfumage naturel se pose depuis la moitié du XX^e siècle. Si de nombreuses études ont été réalisées sur le sujet, beaucoup présentent des lacunes importantes ou ne sont tout simplement plus en phase avec les pratiques actuelles. Autre point important, la dernière étude de grande ampleur sur le sujet datant de 1998, les moyens numériques employés alors sont désormais obsolètes. La croissance continue des puissances de calculs couplée à l'amélioration significative des codes de calculs à champs permet aujourd'hui d'utiliser l'outil numérique afin de réaliser des études sur des configurations de trop grandes dimensions pour pouvoir donner lieu à des essais expérimentaux. Ce type de démarche doit toutefois s'accompagner obligatoirement d'une étape de validation reposant sur une confrontation des résultats numériques avec des données expérimentales obtenues en réalisant des essais pour lesquels un maximum de paramètres doivent être connu et maîtrisé.

Dans cette optique, deux séries d'essais à grande échelle ont été réalisées sur le site de Vernon du Groupe CNPP. Au total, 98 essais incendie faisant intervenir du désenfumage naturel et de l'aspersion ont été réalisés dans deux bâtiments de 110 m² et 900 m². Grâce à l'utilisation de foyers académiques allant de 400 kW à près de 6 MW, un bon niveau de répétabilité a été atteint (le manque de répétabilité étant un défaut récurrent des études existantes de la littérature, en raison du coût des essais à grande échelle). Ces essais étant fortement instrumentés, un grand nombre de données clés a été recueilli dont notamment des champs de température, des hauteurs de strate de fumées, des temps et des températures d'activation de sprinklers ou encore des températures de gaz extraits par des exutoires.

Avant de confronter ces données à des résultats de simulations numériques, leur analyse a permis de mettre en évidence des phénomènes intéressants pour notre étude. Tout d'abord, en l'absence de désenfumage, le temps de réaction d'un sprinkleur présente une forte variabilité malgré une bonne répétabilité des conditions expérimentales. Il est donc important d'en tenir compte dans l'analyse de tout résultat faisant intervenir cette grandeur.

Ensuite, à l'issue de ces deux campagnes expérimentales, il apparaît qu'il y a toujours un avantage à utiliser le désenfumage afin d'améliorer la visibilité ou de réduire les températures au sein des halls d'essais. Même dans les cas où l'aspersion déclenchée avant le désenfumage a causé

une forte destratification thermique et optique, l'ouverture d'un exutoire a contribué à regagner significativement en visibilité tout en réduisant les niveaux de température dans le bâtiment.

Quel que soit le type de foyer employé, l'utilisation du désenfumage n'a pas eu d'influence significative sur le nombre total de sprinkleurs déclenchés au cours des différents essais, en dehors du cas particulier d'un foyer positionné directement sous un exutoire. Dans cette configuration expérimentale, seul le sprinkleur le plus proche de la zone d'impact du panache sur le plafond s'est déclenché. Il est à noter cependant que cette configuration n'a pu être étudiée qu'avec un foyer dont le maximum de puissance était atteint bien avant l'activation du sprinkleur (bac de fioul).

Toujours dans cette configuration expérimentale particulière, l'ouverture du désenfumage avant activation du sprinkleur a provoqué une non activation quasi-systématique de ce sprinkleur. Dans un cas seulement, l'activation s'est produite plusieurs minutes après le temps moyen d'activation en l'absence de désenfumage. De nouveau, seul le foyer bac a été testé dans cette configuration. Lorsque le foyer était positionné entre les trois exutoires, l'activation des sprinkleurs a toujours eu lieu. Lors des essais utilisant le foyer de type bac, l'ouverture du désenfumage préalablement au déclenchement de l'aspersion a provoqué un retard d'activation du premier sprinkleur. En revanche, lorsque le second foyer (constitué de palettes en bois) était utilisé à cette même position, aucun retard d'activation des sprinkleurs n'a pu être observé. Ce foyer avait la caractéristique de toujours être en phase de croissance lors de l'activation du premier sprinkleur. Un résultat similaire avait été trouvé lors de la première campagne expérimentale. Alors que le déclenchement du désenfumage avant l'aspersion provoquait des retards d'activation du sprinkleur avec un foyer constant de 400 kW, aucun retard n'a été observé lorsqu'un foyer de 800 kW était utilisé dans les mêmes conditions. Il a même été constaté que l'ouverture du désenfumage à un temps proche du temps moyen d'activation du sprinkleur en l'absence de désenfumage pouvait conduire à une activation anticipée de l'aspersion.

Les données recueillies au cours de la seconde campagne expérimentale ont également fourni des informations précieuses quant à l'influence de la disposition des exutoires sur l'efficacité du désenfumage lors d'un incendie. Dans le cas où un sprinkleur se déclenche à proximité d'un exutoire, ou lorsque des sprinkleurs s'activent le long de l'axe reliant la zone d'impact du panache du foyer sur le plafond à un exutoire, la température dans l'ouvrant est susceptible de chuter plus ou moins significativement. Le tirage thermique, moteur du désenfumage naturel, reposant sur le gradient de température à travers l'ouvrant, le refroidissement créé dans ces conditions pénalise l'efficacité d'extraction du DENFC. Dans une installation où la surface utile de désenfumage est répartie de manière homogène (c'est à dire qu'il existe plusieurs exutoires de tailles moyennes plutôt qu'un seul de très grandes dimensions), la baisse d'efficacité d'un ouvrant ne pénalise pas l'efficacité de l'intégralité de l'installation de désenfumage.

Ce dernier résultat, basé sur l'analyse des températures dans les exutoires au cours des différents essais réalisés, a été confirmé par la suite grâce aux résultats des simulations numériques. Celles-ci ont été réalisées sur le logiciel FDS v.6. Dans un premier temps, certains essais réalisés au cours des deux campagnes expérimentales ont été simulés. Les résultats de grandeurs clés telles que les températures au niveau des sprinkleur ou dans les exutoires ont été comparés aux données expérimentales. Après s'être assuré de la capacité de FDS à reproduire les phénomènes observés expérimentalement, l'outil a pu être utilisé pour déterminer des grandeurs n'ayant pas pu faire l'objet de mesure. Ainsi, nous avons été en mesure de déterminer, entre autres choses,

les quantités de chaleur et de matière extraites par les exutoires au cours de différents scénarios dans chacune des campagnes d'essais. L'analyse de ces résultats a ainsi permis de confirmer par des bilans de masse et d'énergie les observations présentées précédemment.

Enfin, dans la dernière phase de l'étude, des simulations numériques de différents scénarios de désenfumage ont été réalisées sur des géométries de bâtiments existants (un entrepôt et un centre commercial). Ces bâtiments ne pouvant pas faire l'objet d'essais, l'objectif était de réaliser une étude comparative des résultats en fonction des temps de déclenchement du désenfumage. Ces simulations ont été paramétrées à partir des connaissances acquises au cours des deux campagnes réalisées et en suivant les recommandations officielles de bonnes pratiques pour les études d'ingénierie de désenfumage en ERP.

Les résultats obtenus semblent confirmer une nouvelle fois l'importance de la répartition de la surface de désenfumage sur l'efficacité de l'installation. De plus, les bilans d'énergie et de masse indiquent que contrairement à un argument fréquemment rencontré, le désenfumage conserve une réelle efficacité malgré l'activation d'un système d'aspersion. Toutes les simulations dans lesquelles le désenfumage était absent ont montré de moins bons résultats.

Perspectives

L'ensemble des résultats obtenus au cours de cette étude, qu'ils soient numériques ou expérimentaux, tendent à montrer que le désenfumage est un atout important pour la sécurité des biens et des personnes et que son utilisation conjointement à de l'aspersion apporte plus d'avantages que de désagréments. Cependant, ces résultats sont à nuancer.

Tout d'abord, lors des campagnes d'essais, les foyers utilisés étaient relativement "académiques" (foyers simples pour les besoins de reproductibilité et de modélisation). Il s'agissait de combustibles homogènes, ne présentant pas de phase de croissance ou des croissances rapides et mesurables. Lors d'un véritable incendie, il est peu fréquent que les foyers se comportent de la même manière. Il est en effet plus courant d'avoir une phase de croissance plutôt lente avant une inflexion vers un développement rapide. De plus, bien que travaillant avec des puissances relativement élevées et bien supérieures à celles des foyers utilisés en laboratoire, celles-ci sont encore loin des puissances qui peuvent être rencontrées lors de véritables sinistres. Enfin, dernier point et non des moindres, les foyers utilisés dans les campagnes expérimentales (hormis le foyer de palettes) étaient très peu sensibles à l'aspersion. Il est ainsi probable que des vrais foyers d'incendie se comportent de manière différentes lorsqu'ils sont soumis à l'aspersion. Toutefois, contrairement à l'idée que s'en fait une personne non initiée, le rôle premier d'un système sprinkleur n'est pas d'éteindre le foyer, mais de limiter sa propagation en le contrôlant et en mouillant les combustibles éventuellement présents à proximité (l'extinction peut cependant être atteinte dans certains cas). Ainsi, l'utilisation de foyers de puissance constante ou atteignant rapidement un maximum reste pertinente sous la condition de l'hypothèse d'un contrôle du foyer par le système sprinkleur.

À l'avenir, il serait pertinent de réaliser des séries d'essais utilisant des combustibles réels tels que les foyers normalisés proposés par FM-Global afin de vérifier certains points avancés

dans cette étude. La réalisation de ces essais aurait cependant un coût élevé limitant le nombre de répétitions possibles. Le second point de blocage concerne la modélisation de ces foyers. Pour cette étude, le modèle de chimie simple proposé par FDS a été utilisé. L'utilisation de foyers plus complexes nécessiterait également l'emploi de modèles physiques plus élaborés afin de les représenter numériquement. Ces modèles devraient prendre en compte les effets de dégradation et de pyrolyse ainsi que les processus d'extinction. À l'heure actuelle, bien que des avancées significatives aient été réalisées concernant les deux premiers points, les modèles d'extinction ne sont pas suffisamment aboutis pour être utilisés dans des simulations, sans validation par des essais expérimentaux.

Dans cette étude, seuls des sprinkleurs à réponse standard ont été étudiés. Il est possible que des sprinkleurs à réponse rapide tels que les ESFR présentent des comportements différents en présence de désenfumage. Pour compléter cette étude, il pourrait être intéressant de réaliser des simulations ou des essais utilisant ce type de têtes. De même, seuls les systèmes d'aspersion de type sprinkleurs ont été étudiés. Dans certains cas, il est pourtant possible que cohabitent des systèmes d'aspersion de type brouillard d'eau avec des dispositifs de désenfumage.

Enfin, il faut tenir compte du fait que chaque géométrie est unique. Les deux bâtiments étudiés dans le dernier chapitre de ce mémoire ont l'avantage de posséder des géométries simples, presque génériques. Le retour d'expérience montre cependant que des modifications géométriques et des perturbations aérauliques peuvent significativement impacter les résultats. Il n'est donc pas jugé pertinent de tenter de généraliser à ce stade les résultats de cette étude à toute volumétrie équivalente sans un support expérimental ou numérique. À l'avenir, la multiplication des cas de validation sur des géométries variées permettra de confirmer les tendances générales observées lors des travaux réalisés dans le cadre de cette thèse.

Bibliographie

- [1] C. L. BEYLER et L. Y. COOPER, “Interaction of sprinklers with smoke and heat vents”, *Fire technology*, tome 37, numéro 1, pages 9-35, 2001.
- [2] CNPP, *Etude n° EP-09.04*. 2012.
- [3] D. générale de la sécurité civile et de la gestion des CRISES, “Les statistiques des services d’incendie et de secours”, Ministère de l’intérieur, rapport technique, 2016.
- [4] A. JENFT, “Étude des interactions entre phénomènes d’incendie et systèmes d’extinction à eau. Développement d’un module d’extinction dans le logiciel FDS”, thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2013.
- [5] D. T. SHEPPARD, *Spray characteristics of fire sprinklers*. US Department of Commerce, National Institute of Standards et Technology, 2002.
- [6] N. J. THOMPSON, *Fire Behavior and Sprinklers*. National Fire Protection Association, 1964.
- [7] CNPP, *Traité pratique de sécurité incendie, 13e édition*. CNPP Editions, 2013.
- [8] A. MARSHALL et M. DI MARZO, “Modelling aspects of sprinkler spray dynamics in fires”, *Process Safety and Environmental Protection*, tome 82, numéro 2, pages 97-104, 2004.
- [9] D. YATES, C. CAMPBELL, S. STOLIAROV et P. SUNDERLAND, “Liquid Expansion in Glass Sprinkler Bulbs”, *Fire Safety Science*, tome 10, pages 335-344, 2011.
- [10] N. F. P. ASSOCIATION, *NFPA 13 Standard for the Installation of Sprinkler Systems*. National Fire Protection Association, 1999.
- [11] G. HESKESTAD et R. G. BILL, “Quantification of thermal responsiveness of automatic sprinklers including conduction effects”, *Fire Safety Journal*, tome 14, numéro 1-2, pages 113-125, 1988.
- [12] F. GAVELLI, P. RUFFINO, G. ANDERSON et M. DI MARZO, *The effect of minute water droplets on a simulated sprinkler link thermal response*. National Institute of Standards, Technology, Building et Fire Research Laboratory, 1999.
- [13] H. AUSSEL, P. FERRY et P. LESNÉ, *Incendie et lieu de travail : prévention et lutte contre le feu*. INRS, 2007.
- [14] A. BUSBY et G. PIGMAN, “Roof Ventilation Requirements for Industrial Plants”, *Final Report Project Number L-565*, *Armour Research Foundation*, 1955.
- [15] F. M. E. CORPORATION, “Heat Vents and Fire Curtains, Effect in Operation of Sprinklers and Visibility”, *Factory Mutual Research Corporation*, Norwood, MA, rapport technique, 1956.

- [16] P. THOMAS, P. HINKLEY, T. C.R. et A. SIMMS, "Investigations into the Flow of Hot Gases in Roof Venting, Fire Research Technical Paper No. 7", Building Research Establishment (BRE), Borehamwood, Herts, London, rapport technique, 1963.
- [17] P. THOMAS et P. HINKLEY, "Design of Roof-Venting Systems for Single-Story Buildings, Fire Research Technical Paper No. 10", Building Research Establishment (BRE), Fire Research Station (FRS), Borehamwood, rapport technique, 1964.
- [18] M. SUCHOMEL, "A Preliminary Study of Factors Influencing the Use of Vents with Ordinary-Degree Sprinklers", *Underwriters' Laboratories Inc. for the National Board of Fire Underwriters, New York, NY, File NC449, Assignment 63K4340*, 1964.
- [19] L. COLT INTERNATIONAL, "Portsmouth Fire Test, Internal Report", rapport technique, 1966.
- [20] F. M. E. CORPORATION, "Fire Test of Palletized and Racked Tire Storage", Factory Mutual Research Corporation, Norwood, MA, rapport technique, 1970.
- [21] F. M. E. CORPORATION, "The Report of the Rack Storage of Materials Test Committee — 20 Series", Factory Mutual Research Center, West Gloucester, RI, rapport technique, 1971.
- [22] G. HESKESTAD, "Model Study of Automatic Smoke and Heat Vent Performance in Sprinklered Fires, Technical Report, FMRC Serial No. 21933", Factory Mutual Research Corporation, Norwood, MA, rapport technique, 1974.
- [23] R. DEAN, "Stored Plastics Test Program, Technical Report, FMRC J.I. 202069", Factory Mutual Research Corporation, Norwood, MA, rapport technique, 1975.
- [24] T. WATERMAN, "Fire Venting of Sprinklered Buildings, IITRI Project No. 8385", IIT Research Institute, Chicago, rapport technique, 1982.
- [25] T. WATERMAN, "Fire Venting of Sprinklered Buildings", *Fire Journal*, tome 78, numéro 2, pages 30-39, 1984.
- [26] T. WATERMAN, "Fire Vent/Sprinkler Interactions : Phase 1—Study and Analysis, IITRI Project No. 8246", IIT Research Institute, Arlington Heights, IL, rapport technique, 1977.
- [27] P. HINKLEY et al., "Experiments at the Multifunctioneel Trainingcentrum, Ghent, on the Interaction between Sprinklers and Smoke Venting", Building Research Establishment (BRE), Fire Research Station (FRS), Borehamwood, Herts, rapport technique, 1992.
- [28] P. HINKLEY, G. HANSELL, N. MARSHALL et R. HARRISON, "Sprinklers and Vents Interaction - Experiments at Ghent", *Fire Surveyor*, pages 18-23, 1992.
- [29] P. HINKLEY, G. HANSELL, N. MARSHALL et R. HARRISON, "Large-Scale Experiments with Roof Vents and Sprinklers. Part 1 : Temperature and Velocity Measurements in Immersed Ceiling Jets Compared with a Simple Model", *Fire Science and Technology*, tome 13, numéro 1, pages 19-41, 1993.
- [30] P. HINKLEY, G. HANSELL, N. MARSHALL et R. HARRISON, "Large-scale experiments with Roof Vents and Sprinklers. Part 2, The operation of sprinklers and the effects of venting with growing fires", *Fire Science and Technology*, tome 13, numéro 1, pages 43-59, 1993.
- [31] J. TROUP, "Large-Scale Fire Tests of Rack Storage of Plastics Protected by Central Model ELO-231 Sprinklers, Technical Report J.I. Ox0R4.RR", Factory Mutual Research Corporation, Lansdale, PA, rapport technique, 1993.

-
- [32] J. TROUP, “Large-Scale Fire Tests of Racked Stored Group A Plastics in Retail Operation Scenarios Protected by Extra Large Orifice (ELO) Sprinklers, Technical Report J.I. OX1R0”, Factory Mutual Research Corporation, Norwood, MA, rapport technique, 1994.
- [33] J. TROUP, “Protection of Warehouse Retail Occupancies with Extra Large Orifice (ELO) Sprinklers”, *Journal of Fire Protection Engineering*, tome 8, numéro 1, pages 1-11, 1996.
- [34] D. SHEPPARD et D. STEPPAN, “Sprinkler, Heat and Smoke Vent, Draft Curtain Project - Phase 1 : Scoping Tests, Technical Report”, Underwriters Laboratories, Northbrook, IL, rapport technique, 1997.
- [35] K. MCGRATTAN, A. HAMINS et D. STROUP, “International fire sprinkler ; smoke and heat vent ; Draft curtain fire test project — Large scale experiments and model development”, National Fire Protection Research Foundation, rapport technique, 1998.
- [36] M. BULLEN, “The effect of a sprinkler on the stability of a smoke layer beneath a ceiling”, *Fire Safety Science*, tome 1016, pages 1-1, 1974.
- [37] W. CHOW et B. YAO, “Numerical modeling for interaction of a water spray with smoke layer”, *Numerical Heat Transfer : Part A : Applications*, tome 39, numéro 3, pages 267-283, 2001.
- [38] Y. LI et W. CHOW, “Study of water droplet behavior in hot air layer in fire extinguishment”, *Fire technology*, tome 44, numéro 4, pages 351-381, 2008.
- [39] Z. TANG, Z. FANG, J. YUAN et B. MERCI, “Experimental study of the downward displacement of fire-induced smoke by water sprays”, *Fire safety journal*, tome 55, pages 35-49, 2013.
- [40] Z. TANG, J. VIERENDEELS, Z. FANG et B. MERCI, “Description and application of an analytical model to quantify downward smoke displacement caused by a water spray”, *Fire safety journal*, tome 55, pages 50-60, 2013.
- [41] Z. TANG, Z. FANG et B. MERCI, “Development of an analytical model to quantify downward smoke displacement caused by a water spray for zone model simulations”, *Fire Safety Journal*, tome 63, pages 89-100, 2014.
- [42] C. ZHANG, W. CHOW, R. HUO, W. ZHONG et Y. LI, “Experimental studies on stability of smoke layer with a sprinkler water spray”, *Experimental Heat Transfer*, tome 23, numéro 3, pages 196-216, 2010.
- [43] C. ZHANG et W. CHOW, “Numerical studies on the interaction of sprinkler and smoke layer”, *Procedia Engineering*, tome 62, pages 453-462, 2013.
- [44] K. LI, L. HU, R. HUO, Y. LI, Z. CHEN, S. LI et X. SUN, “A mathematical model on interaction of smoke layer with sprinkler spray”, *Fire Safety Journal*, tome 44, numéro 1, pages 96-105, 2009.
- [45] G. MULHOLLAND, M. JANSSENS, S. YUSA, W. TWILLEY et V. BABRAUSKAS, “The effect of oxygen concentration on CO and smoke produced by flames”, *Fire Safety Science*, tome 3, pages 585-594, 1991.
- [46] M. J. PEATROSS et C. L. BEYLER, “Ventilation effects on compartment fire characterization”, *Fire Safety Science*, tome 5, pages 403-414, 1997.
- [47] A. TEWARSON, J. LEE et R. PION, “The influence of oxygen concentration on fuel parameters for fire modeling”, in *Symposium (international) on combustion*, Elsevier, tome 18, 1981, pages 563-570.

- [48] G. SANTO et F. TAMANINI, "Influence of oxygen depletion on the radiative properties of PMMA flames", in *Symposium (International) on Combustion*, Elsevier, tome 18, 1981, pages 619-631.
- [49] G. HESKESTAD, "Letter to the Editor", *Fire Technology*, tome 38, numéro 3, pages 207-210, 2002.
- [50] N. GUSTAFSSON, "Smoke Ventilation and Sprinklers-A Sprinkler Specialist's view", in *Seminar at the Fire Research Station, Borehamwood, Herts*, 1992.
- [51] K. LI, M. J. SPEARPOINT, J. JI, R. HUO, Y. LI et L. HU, "A mathematical model of the drag component of a sprinkler spray adjacent to horizontal smoke vents", *Journal of fire protection engineering*, tome 20, numéro 1, pages 27-54, 2010.
- [52] B. MCCAFFREY et G. HESKESTAD, "A robust bidirectional low-velocity probe for flame and fire application", *Combustion and Flame*, tome 26, pages 125-127, 1976.
- [53] LCPP, *Guide de bonnes pratiques pour les études d'ingénierie du désenfumage*. 2017.
- [54] B. PERSON et H. INGASON, *Modelling of Interaction between Sprinklers and Fire Vents*. 1996, tome 32.
- [55] *SFPE Handbook of fire protection engineering*. Springer, 2015, chapitre Appendix 2 : Thermophysical Property Data, pages 3425-3436.
- [56] K. MCGRATTAN, "Verification and validation of selected fire models for nuclear power plant applications, volume 7 : Fire Dynamics Simulator (FDS)", *Final Report, NUREG-1824, EPRI*, tome 1011999, 2007.
- [57] H. INGASON, "Investigation of thermal response of glass bulb sprinklers using plunge and ramp tests", *Fire safety journal*, tome 30, numéro 1, pages 71-93, 1998.
- [58] A. TSUI et M. SPEARPOINT, "Variability of sprinkler response time index and conduction factor using the plunge test", *Building Services Engineering Research and Technology*, tome 31, numéro 2, pages 163-176, 2010.
- [59] K. MCGRATTAN, S. HOSTIKKA, R. MCDERMOTT, J. FLOYD, C. WEINSCHENK et K. OVERHOLT, "Fire dynamics simulator user's guide", *NIST special publication*, tome 1019, 6thEdition, 2013.
- [60] M. ARVIDSON, "Idle Pallet Storage-Free-burn Fire Tests", *SP Technical Research Institute of Sweden, Borås, Sweden*, 2006.
- [61] V. BABRAUSKAS, *SFPE Handbook of fire protection engineering*. Springer, 2015, chapitre Heat Release Rate, pages 857-859.

Résumé Ce travail est consacré à l'étude des interactions entre dispositifs de désenfumage naturel et systèmes d'extinction (sprinkleur). Deux campagnes expérimentales à grande échelle utilisant conjointement sprinkleur et désenfumage naturel ont été menées dans des halls d'essais du CNPP. Au total, 98 essais instrumentés ont été réalisés en faisant varier le type et la position du foyer et les temps d'activation respectifs des deux dispositifs de sécurité. Les données recueillies incluent principalement des hauteurs libres de fumées, des champs de température et des temps de déclenchement automatique des sprinkleurs. L'ensemble de ces résultats permet la constitution d'une base de données pour la création de cas de validation en utilisant le logiciel FDS (Fire Dynamics Simulator). Des simulations utilisant les données d'entrée relatives aux différents essais sont réalisées et les résultats numériques sont confrontés aux mesures. Le bon accord entre ces résultats permet d'utiliser FDS pour effectuer des bilans de masse et d'énergie pour les différents scénarios étudiés. En utilisant les connaissances accumulées au cours de ces campagnes, des simulations de scénarios incendie dans deux bâtiments existant ont été réalisées. Pour chaque géométrie, différents temps de déclenchement du désenfumage sont testés et les résultats (niveaux de température, temps et nombre de déclenchements de sprinkleurs, transfert de chaleur et de masse) sont comparés.

Mots-clés: Désenfumage, Sprinkleur, Expérimental, Numérique, FDS

Abstract This work is devoted to the study of interactions between smoke and heat exhaust ventilation systems (SHEAVS) and automatic fire sprinklers. Two real scales experimentation campaigns involving sprinklers and SHEAVS have been carried out in fire test facilities at CNPP (France). A total of 98 instrumented tests have been conducted with various fuel type, experimental configuration and activation time of both systems. Collected datas include smoke free layer height, temperature field and automatic sprinkler activation time. These results are used to build a database in order to create a validation case for the software Fire Dynamics Simulator (FDS). Numerical simulations of several tests are conducted using experimental data as input parameters. Results are then confronted to measurements. A good agreement between these results allows us to use FDS in order to realize mass and energy balances for various scenarios. Using knowledge acquired during both campaigns, numerical simulations of fire scenarios in two actual facilities have been conducted. For both configuration, various SHEAVS activation time have been tested and results (temperature levels, time and number of activated sprinklers, heat and mass transfer) have been confronted.

Keywords: Smoke venting, Sprinkler, Experimental, Numerical modeling, FDS

