



**HAL**  
open science

# Méthode de détection de risques de phénomènes thermiques pendant la lutte contre les feux de compartiments

Amal Bouaoud

► **To cite this version:**

Amal Bouaoud. Méthode de détection de risques de phénomènes thermiques pendant la lutte contre les feux de compartiments. Mécanique [physics]. Normandie Université, 2018. Français. NNT : 2018NORMLH14 . tel-01900734

**HAL Id: tel-01900734**

**<https://theses.hal.science/tel-01900734>**

Submitted on 22 Oct 2018

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

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



Normandie Université

## THESE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

**Discipline :** Physique  
**Spécialité :** Mécanique

Préparée au sein du :  
**Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (CNRS, UMR 6294))**  
**Université Le-Havre Normandie**  
**Ecole Doctorale SPMII**

**Méthode de détection de risques de phénomènes thermiques  
pendant la lutte contre les feux de compartiments**

Présentée et soutenue par  
**Amal BOUAOUD**  
Le 19 Mars 2018

Thèse soutenue publiquement le (date de soutenance) devant le jury composé de		
Rapporteur	<b>Khaled CHETEHOUNA</b> Professeur des Universités	INSA Centre Val de Loire - Campus de Bourges Laboratoire PRISME UPRES EA 4229
Rapporteur	<b>Jean-Pierre GARO</b> Professeur des Universités	IUT de Poitiers, Institut P-Prime CNRS UPR 3346,
Examineur	<b>Hui-Ying WANG</b> CNRS, Directeur de Recherche	Institut P-Prime CNRS UPR 3346 Département Fluide-Thermique-Combustion
Examineur	<b>Alexandre BERRED</b> Professeur des Universités	Université Le-Havre Normandie Laboratoire de Mathématiques Appliquées du Havre EA 3821 - FR CNRS 3335
Examinatrice	<b>Béatrice PATTE-ROULAND</b> Professeure des Universités	Université Rouen Normandie, CORIA CNRS UMR 6614
Examineur	<b>Michel LEBEY</b> Maître de Conférences HDR	Université Le-havre Normandie Laboratoire d'Ondes et Milieux Complexes CNRS, UMR 6294
Invité	<b>Eloi LAMBERT</b> Maître de conférences	Université Le-havre Normandie Laboratoire d'Ondes et Milieux Complexes CNRS, UMR 6294
Invité	<b>Hervé COLIBERT</b> Commandant de Sapeurs-pompiers	Service Départemental d'Incendie et de Secours de Seine-Maritime

Thèse dirigée par Michel LEBEY



LABORATOIRE ONDES  
et MILIEUX COMPLEXES





## Remerciements

Dans un premier temps, je tiens à remercier mon directeur de thèse, Monsieur Michel LEBEY, pour son encadrement et accompagnement le long de cette expérience, ce qui m'a permis d'approfondir mes connaissances dans la recherche opérationnelle incendie.

Je souhaite remercier aussi ma co-directrice de thèse, Madame Béatrice PATTE ROULAND, pour sa gentillesse et sa bienveillance accordées tout au long de mon parcours de thèse.

Mes remerciements s'adressent aussi à l'équipe Recherche Opérationnelle Incendie du Havre, en premier lieu, Monsieur Eloi LAMBERT pour son encadrement, son aide précieuse et le temps qu'il m'a accordé jusqu'à la fin de ce parcours. Je remercie aussi Monsieur Hugues BESNARD pour son aide et tous les moments que l'on a partagés sur le terrain.

J'adresse aussi mes remerciements les plus distingués à Monsieur Khaled CHETEHOUNA et Monsieur Jean Pierre GARO pour avoir accepté d'examiner mon travail, leurs rapports m'ont été précieux dans l'élaboration de la version définitive de mon mémoire. Je remercie aussi les illustres membres du jury : Monsieur Hui Ying WANG président du jury, Monsieur Alexandre BERRED et Monsieur Hervé COLLIBERT, pour leur présence et leurs remarques pertinentes.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à tous les membres du *LOMC* et en particulier, Monsieur Innocent MUTABAZI, directeur du *LOMC*, Monsieur Abdelghani SAOUAB directeur adjoint du *LOMC* et de l'école Doctorale *PSIME* et Madame Carole LEGUEN secrétaire de direction au sein du *LOMC* pour leur disponibilité, leur bienveillance et surtout leur grand soutien quand j'en avais besoin.

Je garde aussi mes remerciements les plus chaleureux à mes collègues et amis au sein du *LOMC* avec qui j'ai partagé de nombreux bons moments : Bouchra, Céline, Nezha, Joanna, Raounak, Alaa, Benoit, Anthony, Rina, Hind, Kamal, Clément, Jean-Baptiste.

Mes derniers remerciements et gratitude vont aux membres de ma famille, qui sans leur présence dans ma vie, je ne saurais être ce que je suis : Mes très chers parents, ma sœur, mon frère et mon très cher mari. Merci de m'avoir soutenu pendant tous les moments difficiles, merci d'avoir cru et de toujours croire en moi, votre amour et vos encouragements m'ont donné la force d'aller jusqu'au bout de ce projet, enfin, merci tout simplement d'être ce que vous êtes pour moi.



# Sommaire

Introduction .....	13
1 Un peu d'histoire .....	14
1.1 Les plus grands incendies de l'histoire.....	14
1.2 La lutte contre le feu à travers les siècles : .....	14
2 Objectifs et plan de la thèse.....	16
Chapitre 1 .....	19
1 L'approche fondamentale.....	20
1.1 Les feux de compartiments.....	20
1.1.1 Généralités .....	20
1.1.2 Les étapes de développement du feu .....	20
1.1.3 La combustion.....	21
a- La combustion du bois : .....	22
b- La pyrolyse.....	23
1.2 Les transferts thermiques.....	23
1.3 Le développement d'un feu de compartiment (milieu confiné) .....	24
1.3.1 La phase initiale du feu .....	24
1.3.2 La phase de propagation du foyer .....	25
1.3.3 Période de transition vers le Flash-over.....	25
a- Milieu bien ventilé .....	25
b- Milieu sous-ventilé.....	25
1.3.4 La Phase de plein développement du feu.....	26
1.3.5 Les phénomènes particuliers liés aux feux sous-ventilés .....	26
1.4 Inflammation .....	27
1.4.1 Auto-inflammation.....	27
1.5 La dispersion de la fumée.....	28
1.5.1 Généralités .....	28
1.5.2 Composition chimique de la fumée .....	29
1.5.3 Les accidents thermiques .....	29
a- L'embrasement généralisé éclair : .....	30
b- L'explosion de fumée .....	31
2 L'approche opérationnelle.....	32
2.1 Organisation de l'intervention .....	32

2.1.1	La marche générale des opérations incendies .....	32
2.1.2	Les techniques de lutte en volume clos ou semi-ouvert.....	33
2.2	La ventilation opérationnelle .....	34
2.3	Les risques sur le terrain.....	36
Chapitre 2	.....	39
1	Généralités.....	40
2	Ensemble de l'instrumentation.....	41
2.1	La vitesse des fumées .....	41
2.2	Mesure des températures de fumées .....	41
2.2.1	Les thermocouples.....	41
2.2.2	Le choix de thermocouple .....	42
2.3	Les conditions atmosphériques.....	43
2.4	Le système d'acquisition de données .....	45
3	Choix du combustible et du foyer .....	45
4	Les configurations expérimentales étudiées.....	47
4.1	Incendie d'une chambre d'hôpital .....	47
4.2	Etude de l'évolution du feu dans un caisson d'entraînement .....	49
4.3	Étude de la propagation des fumées dans un couloir.....	50
5	Conclusion.....	52
Chapitre 3	.....	55
1	Les séries temporelles : .....	56
1.1	Classification des différentes méthodes de prédiction : .....	56
1.2	Exemple d'un concours : .....	57
2	Les moyennes mobiles : .....	57
2.1	Définition générale : .....	57
2.2	Calcul de la moyenne mobile des températures : .....	58
2.3	Calcul du retard entre la courbe de température et sa moyenne mobile :.....	58
2.4	Comparaison de deux moyennes mobiles dans le passé.....	60
2.4.1	Application de l'approche sur différents signaux de température.....	62
2.4.2	Bilan : .....	68
2.5	Méthode d'analyse et de "prédiction" des risques en temps réel : .....	68
3	Analyse par comparaison de deux moyennes mobiles dans le passé : feux de compartiment avec un foyer de buchettes étagées croisées.....	69
3.1	Dispositif expérimental : .....	69

L'expérimentation en quelques images :.....	72
3.2 Analyse de la situation et « prédiction » de danger .....	74
3.2.1 Évolution des températures dans l'ensemble du local .....	74
3.2.2 Analyse d'un point fixe de l'espace à deux distances dans le passé .....	75
3.3 Bilan : .....	82
4 Vérification de la validité de la méthode des deux moyennes mobiles dans le passé par une nouvelle analyse d'un essai d'incendie réel .....	83
4.1 Description de l'essai.....	83
L'expérimentation en quelques images :.....	84
4.2 Analyse de situation et détection des risques .....	86
4.2.1 Évolution des températures dans l'ensemble du local .....	86
4.2.2 Analyse d'un point fixe de l'espace à deux distances dans le passé .....	87
4.3 Bilan.....	89
4.4 La valeur idéale de la distance dans le passé des moyennes mobiles.....	89
5 Conclusion.....	92
Chapitre 4 .....	95
1 Définition générale de la méthode d'analyse par comparaison de moyennes mobiles dans l'espace.....	96
1.1 Exemple d'étude de cas .....	96
1.2 Bilan.....	98
2 Application sur un cas simple .....	98
2.1 Dispositif expérimental.....	98
2.2 Choix de la distance dans le passé des moyennes mobiles la plus adaptée.....	98
.....	100
2.3 Analyse par comparaison de moyennes mobiles de températures dans l'espace et bilan comparatif.....	103
3 Application sur un cas complexe .....	109
3.1 Dispositif expérimental.....	110
3.2 Analyse de l'évolution des températures.....	112
4 Conclusion.....	127
Chapitre 5 : Conclusion générale et perspectives.....	131

## Liste des figures

<b>Figure 1:</b> Seringue d'attaque du XVIème siècle .....	15
<b>Figure 2:</b> Première pompe avec tuyau de cuir .....	15
<b>Figure 1. 1:</b> Représentation schématique simplifiée de l'évolution de la température moyenne d'un feu de compartiment avec apparition d'un flash-over .....	21
<b>Figure 1. 2:</b> Schéma du triangle de feu qui représente les trois conditions nécessaires pour avoir une combustion.....	22
<b>Figure 1. 3:</b> Schéma illustrant les différents échanges thermiques lors d'un incendie de compartiment .....	23
<b>Figure 1. 4:</b> Les évolutions possibles d'un incendie en milieu confiné .....	24
<b>Figure 1. 5:</b> Schéma représentant le processus de production de fumée lors d'un incendie [14].....	29
<b>Figure 1. 6 :</b> Images représentant le passage soudain d'un feu localisé à l'embrasement de la totalité des combustibles présent dans la pièce [19].....	30
<b>Figure 1. 7 :</b> Explosion des fumées au contact de l'air frais suite à l'ouverture réalisé par le sapeur-pompier [19].....	31
<b>Figure 1. 8:</b> Ventilateur Hydraulique LEADER .....	35
<b>Figure 2. 1:</b> Composition d'un thermocouple .....	41
<b>Figure 2. 2:</b> Station météorologique .....	43
<b>Figure 2. 3:</b> a) Exemple de foyer de bûchettes de bois étagées croisées .....	46
<b>Figure 2. 4:</b> Photos d'époque de l'expérimentation .....	48
<b>Figure 2. 5:</b> Caisson d'entraînement des sapeurs-pompier.....	49
<b>Figure 2. 6:</b> Sapeurs-pompier en formation de maîtrise des différentes techniques de lance.....	49
<b>Figure 2. 7:</b> Image représentant le couloir expérimental .....	51
<b>Figure 2. 8:</b> Image représentant le couloir expérimental avec l'ouverture principale réduite .....	51
<b>Figure 3. 1:</b> La figure montre le retard d'un demi-intervalle entre la série de valeur de références en bleu et sa moyenne mobile d'ordre N=10 en rouge .....	60
<b>Figure 3. 2:</b> Échelle de temps représentant les différents paramètres de calculs de la moyenne mobile dans le passé .....	61
<b>Figure 3. 3:</b> Courbe des températures en phase croissante et ses deux moyennes mobiles à 10s et 15s dans le passé .....	62
<b>Figure 3. 4:</b> Signal de température en croissance et deux points représentant la moyenne mobile à court et à long terme à l'instant $t_i=15s$ .....	63
<b>Figure 3. 5:</b> Signal de température et ses deux moyennes mobiles à court (-10s) et à long (-15s) terme .....	64
<b>Figure 3. 6:</b> Courbe des températures en phase décroissante et ses deux moyennes mobiles à 10s et 15s dans le passé.....	64
<b>Figure 3. 7:</b> Courbe de température évoluant en deux phases, croissante puis décroissante, et ses deux moyennes mobiles à 10s et 15s dans le passé .....	65
<b>Figure 3. 8:</b> Courbe des températures évoluant en deux phases, décroissante puis croissante, et ses deux moyennes mobiles à 10s et 15s dans le passé .....	66
<b>Figure 3. 9:</b> Courbe des températures évoluant en trois phases (croissante, plateau puis décroissante) sans accident thermique et ses deux moyennes mobiles à 10s et 15 s dans le passé .....	67
<b>Figure 3. 10:</b> Courbe des températures évoluant en trois phases (croissante, plateau puis décroissante) avec accident thermique et ses deux moyennes mobiles à 10s et 15 s dans le passé ..	68
<b>Figure 3. 11:</b> Photo prise du côté gauche du container dans lequel a eu lieu l'expérimentation .....	70
<b>Figure 3. 12:</b> .....	71

<b>Figure 3. 13:</b> Photo du foyer prise à l'intérieur du caisson (120 buchettes en bois agglomérée étagées croisées) .....	72
<b>Figure 3. 14:</b> Photo de l'intérieur du caisson prise devant le foyer .....	72
<b>Figure 3. 15:</b> Vue de l'extérieur du foyer en flamme, photo prise en face de la porte d'entrée principale du caisson .....	73
<b>Figure 3. 16:</b> Ensemble des évolutions des températures de fumées mesurées dans le caisson tout au long de l'essai en fonction du temps.....	74
<b>Figure 3. 17:</b> Evolutions des températures de fumées mesurées à l'entrée et au milieu du caisson et dans le foyer à différentes hauteurs en fonction du temps.....	75
<b>Figure 3. 18:</b> Evolution des températures mesurées par le thermocouple placé à 50cm en dessous du plafond à l'entrée du caisson et ses deux moyennes mobiles à 15s et 30s dans le passé .....	76
<b>Figure 3. 19:</b> Zoom sur la partie étudiée .....	76
<b>Figure 3. 20:</b> Evolution des températures mesurées par le thermocouple placé à 50cm en dessous du plafond au milieu du caisson et ses deux moyennes mobiles à 15s et 30s dans le passé .....	78
<b>Figure 3. 21:</b> .....	79
<b>Figure 3. 22:</b> Evolution des températures mesurées par le thermocouple placé à 50cm en dessous du plafond dans le foyer et ses deux moyennes mobiles à 15s et 30s dans le passé .....	80
<b>Figure 3. 23:</b> Zoom sur la partie étudiée .....	81
<b>Figure 3. 24:</b> Schéma représentant une vue de haut du bâtiment où a eu lieu l'expérimentation .....	84
<b>Figure 3. 25:</b> Photo d'époque montrant la sortie des flammes lors de l'expérimentation .....	84
<b>Figure 3. 26:</b> Photo d'époque montrant la chambre où a eu lieu l'expérimentation et des équipements utilisés comme combustible .....	85
<b>Figure 3. 27:</b> Photo d'époque montrant le couloir montrant aussi les câblages de la chaîne de mesure .....	85
<b>Figure 3. 28:</b> Évolution des températures des fumées mesurées à l'époque à différents points tout au long de l'expérimentation .....	86
<b>Figure 3. 29:</b> La température en fonction du temps et ses deux moyennes mobiles calculées à 15s et 30s dans le passé.....	88
<b>Figure 3. 30:</b> Evolution des températures et ses moyennes mobiles calculées dans le passé (5s , 10s, 15s, 30s, 1min, 5min et 10 min) .....	91
<b>Figure 4. 1:</b> Schéma représentant un cas d'incendie d'une pièce (foyer+ 1 cible) .....	96
<b>Figure 4. 2:</b> Moyennes mobiles à (-30s) des températures enregistrées dans le foyer et au niveau de la cible.....	97
<b>Figure 4. 3:</b> Schéma explicatif représentant le dispositif expérimental utilisé.....	98
<b>Figure 4. 4:</b> Signal brut de l'évolution des températures enregistrées par les 8 thermocouples placés tout au long du couloir expérimental.....	99
<b>Figure 4. 5:</b> Zoom sur la partie étudiée comprise entre 100s et 1100s .....	100
<b>Figure 4. 6:</b> Moyennes mobiles à (-15s) des températures mesurées, le long du local expérimental, de 100s à 1100s du temps de combustion.....	101
<b>Figure 4. 7:</b> Moyennes mobiles à (-30s) des températures mesurées, le long du local expérimental, de 100s à 1100s du temps de combustion.....	101
<b>Figure 4. 8:</b> Moyennes mobiles à (-60s) des températures mesurées, le long du local expérimental, de 100s à 1100s du temps de combustion.....	102
<b>Figure 4. 9:</b> Moyennes mobiles à (-120s) des températures mesurées, le long du local expérimental, de 100s à 1100s du temps de combustion.....	102
<b>Figure 4. 10:</b> Schéma explicatif représentant le dispositif expérimental utilisé.....	103
<b>Figure 4. 11:</b> Etude par partie des moyennes mobiles à (-30s) des températures mesurées dans le caisson d'expérimentation entre 100s et 1100s du temps de combustion (a, b, c, d et e) .....	108
<b>Figure 4. 12:</b> Schéma explicatif du dispositif expérimental utilisé.....	110
<b>Figure 4. 13:</b> Moyennes mobiles à (-30s) de l'évolution des températures tout au long du couloir expérimental .....	111

<b>Figure 4. 14:</b> Comparaison de l'évolution de la moyenne mobile à (-30s) des thermocouples situés entre le foyer et le milieu du couloir, de 50s à 550s du temps de combustion.....	112
<b>Figure 4. 15:</b> Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés dans le foyer et entre le milieu et l'entrée du couloir, de 50s à 550s du temps de combustion .....	113
<b>Figure 4. 16:</b> Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés entre le foyer et le milieu du couloir, de 550s à 1050s du temps de combustion.....	115
<b>Figure 4. 17:</b> Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés dans le foyer et entre le milieu et l'entrée du couloir, de 550s à 1050s du temps de combustion ...	116
<b>Figure 4. 18:</b> Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés entre le foyer et le milieu du couloir, de 1050s à 1150s du temps de combustion.....	118
<b>Figure 4. 19:</b> Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés dans le foyer et entre le milieu et l'entrée du couloir, de 1050s à 1550s du temps de combustion .	119
<b>Figure 4. 20:</b> Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés entre le foyer et le milieu du couloir, de 1150s à 2750s du temps de combustion.....	122
<b>Figure 4. 21:</b> Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés entre le foyer et le milieu du couloir, de 1550s à 2750s du temps de combustion.....	123
<b>Figure 4. 22:</b> Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés le long du couloir, de 2750s à 3150s du temps de combustion.....	125
<b>Figure 4. 23:</b> Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés entre le foyer et le milieu du couloir, de 3150s à 3500s du temps de combustion.....	126
<b>Figure 4. 24:</b> Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés dans le foyer et entre le milieu et l'entrée du couloir, de 3150s à 3500s du temps de combustion .	127

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1</b> : Différentes substances et leurs températures d'auto-inflammation .....	28
<b>Tableau 2. 1</b> : Les différents types de thermocouple et leurs caractéristiques [28] .....	42
<b>Tableau 2. 2</b> : Comparaison de tailles de thermocouples utilisés dans des tests de feux de compartiment [29] .....	43
<b>Tableau 3. 1</b> : Tableau des croisements des deux moyennes mobiles avec l'instant de signalement de chaque évènement selon l'emplacement du thermocouple .....	82
<b>Tableau 4. 1</b> : Tableau comparatif représentant l'instant de croisement de deux courbes de température au point A à différentes distances de moyennes mobiles.....	103
<b>Tableau 4. 2</b> : Tableau comparatif représentant le temps de signalement des évènements par simple observation sur le terrain et par analyse des moyennes mobiles (cas simple) .....	109
<b>Tableau 4. 3</b> : Tableau comparatif représentant le temps de signalement des évènements par simple observation sur le terrain et par analyse des moyennes mobiles (cas complexe: de 50s à 550s) .....	114
<b>Tableau 4. 4</b> : Tableau comparatif représentant le temps de signalement des évènements par simple observation sur le terrain et par analyse des moyennes mobiles (cas complexe: de 550s à 1050s) .	117
<b>Tableau 4. 5</b> : Tableau comparatif représentant le temps de signalement des évènements par simple observation sur le terrain et par analyse des moyennes mobiles (cas complexe : de 1050s à 1550s) .....	121
<b>Tableau 4. 6</b> : Tableau comparatif représentant le temps de signalement des évènements par simple observation sur le terrain et par analyse des moyennes mobiles (cas complexe: de 1550s à 2750s)	124
<b>Tableau 4. 7</b> : Tableau comparatif représentant le temps de signalement des évènements par simple observation sur le terrain et par analyse des moyennes mobiles (cas complexe: de 2750 à 3150s) .	126



# Introduction

# **1 Un peu d'histoire**

## **1.1 Les plus grands incendies de l'histoire**

Depuis la nuit des temps l'homme a cherché à domestiquer son environnement. L'élément l'ayant certainement le plus fasciné est le feu. Le moment de sa première utilisation a constitué une étape majeure de l'évolution humaine. La plupart des préhistoriens s'accordent pour penser que l'aptitude à créer une flamme sans utiliser un feu préexistant remonte à environ 30 000 ans [1].

La maîtrise ou la domestication du feu par les premiers hommes est quant à elle un point important de l'aspect culturel de l'évolution humaine, c'est ce qui a permis à l'Homme de faire cuire de la nourriture et d'obtenir chaleur et protection. Faire du feu a également permis l'expansion de l'activité humaine durant la nuit et a fourni une protection contre les prédateurs.

L'organisation de la vie sociale a été indéniablement favorisée par la maîtrise du feu, ne serait-ce que grâce à la convivialité qu'il offre [2].

Mais l'homme s'est rapidement rendu compte que le feu peut facilement se propager et de manière incontrôlée représentant un danger pour ses biens, ses lieux de regroupement et surtout sa vie, ainsi, il a dû s'organiser pour lutter contre les incendies en même temps qu'il se socialisait.

Au cours du moyen âge, l'usage du feu se diversifie, allant du foyer d'habitation au feu destiné à l'artisanat, que ce soit pour la métallurgie, la poterie, la bijouterie, le travail du verre, la cuisine, ou même pour la guerre. L'utilisation du bois, combustible alors le plus employé, se perfectionne en même temps que les incendies continuent à ravager les cités.

Parmi les plus grands incendies qui ont marqué l'histoire, nous retrouvons en premier l'incendie de la bibliothèque d'Alexandrie (47 Av Jésus christ) qui représentait la plus célèbre bibliothèque de l'Antiquité et réunissait les ouvrages les plus importants de l'époque, l'incendie aurait ainsi mené à la perte de plus de 40 000 copies manuscrites [3].

Nous retrouvons aussi l'incendie de Rome qui éclata dans la nuit du 18 juillet 64 et sévit pendant six jours et sept nuits en se propageant pratiquement dans toute la ville. Les morts se comptèrent par milliers et on dénombra environ deux cent mille sans-abris. De nombreux édifices publics et monuments furent aussi détruits [4].

Enfin, le grand incendie de Londres en 1666 qui dura 5 jours et détruisit 10000 maisons. Les conséquences économiques et sociales de cet incendie ont été accablantes [5].

En France le plus ancien incendie remonte à 52 av. J.-C. à Lutèce (Paris). La ville a connu d'autres incendies en 585, 1037, 1059 et 1132, mais ne fut jamais détruite. Au contraire de Rouen 1200, Toulouse 1463 et Bourges 1487 qui ont été totalement détruite par des feux dévastateurs.

Face à ce fléau, très rapidement les souverains vont prendre des dispositions pour éradiquer ce fléau. La réglementation contre les risques d'incendie en France naît ainsi au début du XV<sup>ème</sup> siècle.

## **1.2 La lutte contre le feu à travers les siècles :**

Dans l'antiquité, la lutte contre les incendies était organisée de façon préventive dans les grandes cités.

En Grèce, par exemple, des gendarmes parcouraient les rues chaque nuit, afin de déceler d'éventuels incendies.

Tandis qu'à Rome on disposa très tôt d'un service d'incendie composé d'une légion de 2000 vigiles qui fut consacrée à la lutte contre le feu. Un tel service se justifiait par les nombreux risques que courait la cité romaine ; où les maisons étaient essentiellement construites en bois et en paille.

Au Moyen-Âge, la lutte contre le feu avait un caractère essentiellement préventif. Le rôle des guetteurs dans les tours qui dominaient les villes était de donner l'alarme afin que la population puisse se précipiter pour éteindre le feu ou du moins limiter les dégâts.

A cette époque, les sauveteurs disposaient de peu de moyens, quelques seaux d'eau qu'ils utilisaient non pas pour attaquer le foyer, mais surtout pour éviter la propagation du sinistre.

Le problème technique restait insoluble : comment attaquer le foyer de l'incendie, dont la chaleur empêchait le sauveteur de projeter l'eau sur la base des flammes ?

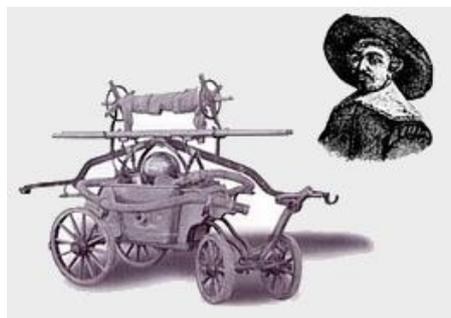
Un premier progrès fut réalisé au début du XVI<sup>ème</sup> siècle avec l'utilisation d'une espèce de seringue d'un mètre de long, actionnée par trois hommes, elle avait une portée d'une dizaine de mètres (Figure 1).



*Figure 1: Seringue d'attaque du XVI<sup>ème</sup> siècle*

Vers 1650, l'Allemand Hans Hausch mit au point une version géante de ces seringues. D'une capacité de loin supérieure, elle présentait néanmoins le grave inconvénient d'être lourde et encombrante. Lorsque la chaleur augmentait au pied des flammes, beaucoup de ces machines finirent donc leur existence dans les feux qu'elles étaient censées éteindre.

Ce fut finalement le Hollandais, Jan Van Der Heiden, peintre baroque et inventeur qui a grandement contribué à la lutte contre les incendies, qui résolut en 1672 le problème des pompes à portée insuffisante en inventant le tuyau de cuir (Figure 2).



*Figure 2: Première pompe avec tuyau de cuir*

Dès lors, munis de cette nouvelle invention, les combattants du feu découvrirent un atout essentiel : la mobilité, ils pouvaient désormais parvenir à une distance raisonnable du centre du

sinistre et si par hasard le rayonnement devenait trop intense, plus rien ne les empêchait de se retirer tout en continuant à arroser le feu.

Ce dispositif ne fut construit en France qu'en 1699 par François du Mouriez du Perrier qui obtint du Roi Louis XIV le privilège exclusif de sa fabrication.

Ce perfectionnement technique entraîna l'obligation de former des spécialistes capables de le mettre en œuvre efficacement.

François Dumouriez fut chargé, en 1716, d'organiser le premier corps de « gardes-pompes » de soixante personnes et devint pour la postérité : Le premier pompier de France.

En 1811, à la suite de l'incendie de l'Ambassade d'Autriche de 1810, Napoléon créa le premier corps professionnel de sapeurs-pompiers. Il organisa les pompiers de Paris sous la forme d'un corps militaire par le décret du 28 septembre 1811. C'est depuis ce décret que le terme sapeur-pompier est officiellement utilisé [6].

Actuellement, c'est le service département d'incendie et de secours<sup>1</sup>, établissement public chargé de la prévention, de la protection et de la lutte contre les incendies. Il comporte un corps départemental et métropolitain de sapeurs-pompiers, un service de santé et de secours médical, et est organisé en centres d'incendie et de secours au niveau de chaque département. Chaque SDIS est désigné par le numéro de son département (ex : SDIS 76).

## 2 Objectifs et plan de la thèse

L'étude des incendies représente un sujet très complexe pour l'approche fondamentale en raison de ses différentes spécificités. Il est donc obligatoire d'y procéder au cas par cas.

Dans ce travail de thèse, nous allons nous intéresser à l'étude des incendies en espace semi clos de configuration complexe, tels que les feux d'habitation et établissements publics, industriels et commerciaux.

L'intervention des sapeurs-pompiers contre ces feux de bâtiment comporte un grand nombre de risques qui peuvent mettre leur vie en péril. La fumée est l'un de ces dangers majeurs. En effet, elles sont souvent à très hautes températures et sont surtout très mobiles, ainsi leur passage par des endroits étroits tels que les couloirs ou les gaines techniques peut provoquer des explosions ou propager le sinistre par la création de nouveaux foyers plus éloignés du foyer initial.

De plus les nouveaux matériaux de construction et les nombreuses couches d'isolation participent à la concentration de la chaleur ce qui rend l'intervention encore plus difficile notamment en phase d'attaque.

Un autre problème se pose lors l'intervention contre les feux de compartiments, lorsque les sapeurs-pompiers arrivent sur les lieux du sinistre, ils n'ont aucune information sur ce qui se passe à l'intérieur et doivent malgré cela intervenir le plus rapidement et plus efficacement possible. Ils ne peuvent se fier qu'à leurs expériences sur le terrain pour déterminer la bonne stratégie à entreprendre

L'objectif principal de la thèse est de répondre en temps réel au manque d'information des secours sur l'état de l'incendie et des éventuels dangers. Nous proposons donc une nouvelle méthode d'analyse de situation et de détection de risque, méthode utilisable sur site qui

---

<sup>1</sup> SDIS

permettra d'apporter aux opérateurs une aide à la décision opérationnelle avec d'avantage de sécurité.

L'incendie est étudié comme un phénomène physique, ce qu'il est, et analysé à partir des relevés de température des fumées tout au long de l'évolution du feu. La particularité de l'étude a été d'examiner ces relevés de températures comme des séries temporelles et d'étudier leurs caractéristiques à partir de deux moyennes mobiles dans le passé.

Cette méthode a permis de montrer que l'entrecroisement des moyennes mobiles donne des informations pertinentes, en temps réel, sur l'évolution à venir du feu et sur la possibilité de détecter l'apparition possible de phénomènes thermiques catastrophiques, tel que l'explosion des fumées et l'embrassement généralisé éclair.

Il est vrai que ces « prédictions » se font à quelques dizaines de secondes, mais nous pensons que cela peut permettre au commandant d'opération de secours de mieux savoir ce qui se passe au sein du local en feu, ce qui lui permettra de mieux définir les actions à mettre en œuvre afin de sécuriser l'intervention de ses équipiers.

Le plan de ce manuscrit est le suivant :

### **Chapitre 1 :**

Une étude bibliographique et théorique concernant les feux de compartiments. Les fumées et l'approche opérationnelle permet d'introduire les notions utilisées par la suite.

### **Chapitre 2**

Ce chapitre donne une description détaillée des éléments et dispositifs expérimentaux utilisés pour l'ensemble de l'étude.

### **Chapitre 3**

Dans cette partie du manuscrit, nous allons introduire la méthode d'analyse de risque par comparaison de deux moyennes mobiles dans le temps. Ensuite nous l'appliquerons à deux cas d'études, l'un simple et l'autre complexe, afin d'étudier son efficacité sur le terrain.

### **Chapitre 4**

Pour ce chapitre nous allons suivre la même démarche que celle du chapitre précédent (Ch.4) pour vérifier cette fois-ci la méthode d'analyse de risque par comparaison de deux moyennes mobiles dans l'espace. Nous l'appliquerons aussi sur deux cas d'études, simple et complexe.

### **Chapitre 5**

Il s'agit de la conclusion de ce mémoire qui comporte un bilan général sur les différents aspects de l'utilisation combinée des deux méthodes évoquées au Ch.3 et Ch.4.

\* \* \*



# **Chapitre 1**

## **Approche fondamentale et opérationnelle de la lutte contre les feux de compartiments**

## Présentation

Le présent chapitre porte sur un ensemble de généralités concernant les éléments théoriques fondamentaux, et l'approche opérationnelle de la problématique de la thèse.

L'approche fondamentale comporte une introduction générale sur les éléments théoriques concernant les feux de compartiments. Son objectif principal est de permettre de mieux comprendre les bases de chaque phénomène et ainsi définir les points clés de l'étude.

Quant à l'approche opérationnelle, elle porte sur les démarches suivies par les sapeurs-pompiers et les différentes techniques qu'ils mettent en place dans leur lutte contre les feux de compartiments. L'objectif principal de cette partie du chapitre est d'examiner le problème du manque d'information précise sur la nature du feu, sur son évolution et sur les risques qui peuvent apparaître lors de l'intervention des sapeurs-pompiers afin de pouvoir proposer des solutions d'aide aux décisions opérationnelles en temps réels afin d'améliorer l'efficacité des sapeurs-pompiers lors de leurs interventions sur feux de compartiments.

## 1 L'approche fondamentale

### 1.1 Les feux de compartiments

#### 1.1.1 Généralités

Contrairement au feu non confiné où une grande partie de la chaleur générée par le combustible se perd par rayonnement et convection, les feux de compartiment sont soumis à l'influence de plusieurs éléments constituant le local.

Les éléments tels que les parois ou les objets inflammables qui entourent le foyer absorbent une partie de la chaleur radiante produite par le feu. La partie qui n'est pas absorbée est donc réfléchiée et augmente la température du foyer ainsi que la vitesse de la combustion.

La fumée générée est aussi à de très hautes températures et participe au transfert de chaleur aux matériaux à température ambiante.

Quant aux ouvertures, elles peuvent être une source d'oxygène et de ventilation naturelle non contrôlables. Ainsi, la taille du local, la taille et le nombre des ouvertures influencent également le développement du feu.

#### 1.1.2 Les étapes de développement du feu

En théorie ou lors de l'analyse des données, il est simple de définir les différentes étapes de développement de l'incendie (Figure 1.1) car elles apparaissent clairement sur la courbe caractéristique du feu. En revanche, sur le terrain, il est souvent très difficile de les différencier ou de déterminer le temps de déroulement de chacune des phases [7].

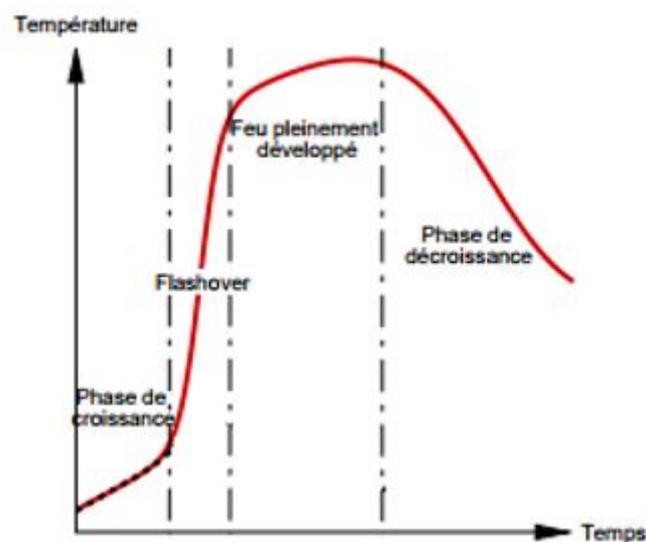
La croissance : Au début de la combustion, durant cette phase le feu se développe en générant de la fumée qui se propage horizontalement dans la partie haute du local en se dirigeant vers les ouvertures. Si la quantité d'oxygène est suffisante, le feu continue à se développer soit par propagation de flammes ou par l'allumage d'autres matériaux présents dans le compartiment.

C'est au cours de cette phase que l'incendie peut cesser de lui-même s'il manque d'air ou de ventilation ou, bien au contraire, se généraliser à cause de phénomènes thermiques tels que l'explosion des fumées ou l'embrassement généralisée éclair.

Quand l'un de ces accidents thermiques survient en cours de croissance, on pourrait le considérer comme une phase intermédiaire et c'est cette phase qui est généralement la plus importante à étudier car le développement de l'incendie est alors inéluctable, et la sécurité des victimes et des sapeurs-pompiers est souvent liée à cette période.

Le plein développement : A cette étape le dégagement d'énergie est à son maximum. Sur la courbe caractéristique on peut voir que les températures sont élevées mais restent stables en formant presque un plateau. En effet, les gaz imbrûlés se concentrent au niveau du plafond et peuvent dans certains cas brûler en continu en produisant des flammes souvent visibles par les ouvertures.

La décroissance : Cette phase démarre dès que le combustible s'épuise ou lorsque la situation a été maîtrisée par l'intervention des sapeurs-pompiers. L'incendie régresse et les températures commencent à décroître. Il faut savoir que même pendant cette phase le danger est toujours présent, car tant qu'on est dans une zone de températures très hautes, environ au-dessus des 400°C, il est possible qu'un accident thermique survienne ou que de nouveaux foyers se créent par transfert thermique de quelque manière que ce soit.



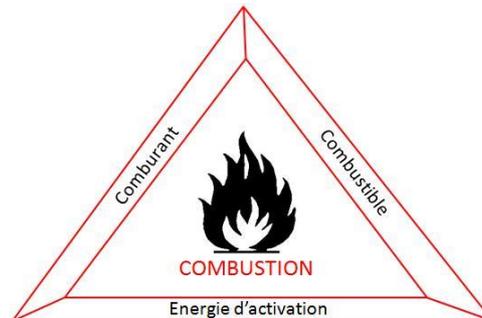
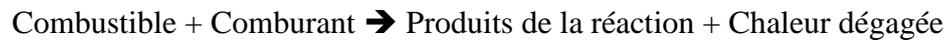
*Figure 1. 1: Représentation schématique simplifiée de l'évolution de la température moyenne d'un feu de compartiment avec apparition d'un flash-over*

### 1.1.3 La combustion

En théorie, la combustion est un ensemble de réactions chimiques d'oxydo-réduction qui dégagent de la chaleur. Ce dégagement de chaleur correspond à un gain d'énergie résultant de la rupture des liaisons entre les molécules du combustible et de la création de nouvelles molécules plus stables [8].

Ces réactions ne peuvent avoir lieu qu'en présence de deux réactifs, le combustible et le comburant. Ces deux réactifs nécessitent aussi de la chaleur, c'est-à-dire des températures importantes.

Nous pouvons ainsi représenter la réaction de combustion par son équation et par le schéma simplifié suivant :



**Figure 1. 2:** Schéma du triangle de feu qui représente les trois conditions nécessaires pour avoir une combustion

Le « triangle de feu » (Figure 1.2) est un modèle très simplifié, mais qui permet de comprendre les éléments nécessaires pour l'apparition des flammes. Ainsi, la suppression ou l'isolement de l'un de ces trois éléments provoque automatiquement l'arrêt de la combustion.

Les combustibles prenant part aux incendies sont très nombreux et de différents types de matériaux. Ils peuvent être sous forme gazeuse, liquide ou solide. Nous pouvons citer les thermoplastiques, les polymères thermo-durcis ou d'autres produits dérivés du bois [9].

Chaque combustible a ses propres propriétés, dont par exemple le pouvoir calorifique qui correspond à la chaleur de combustion propre à chaque matériau et qui représente précisément la quantité d'énergie produite par unité de masse de combustible lors d'une combustion complète de celui-ci.

Le pouvoir calorifique est caractérisé par deux valeurs, le PCI, qui est le Pouvoir Calorifique Inférieur et qui ne prend pas en compte l'énergie de condensation de l'eau produite par la combustion, et le PCS, le Pouvoir Calorifique Supérieur, où l'énergie de condensation de l'eau est prise en compte.

#### **a- La combustion du bois :**

Les bâtiments sont composés de nombreux matériaux qui sont devenus de plus complexes car produits à partir de la chimie du pétrole. Ces nouveaux matériaux produisent des fumées contenant des produits chimiques très combustibles, voire facilement explosifs.

Il aurait fallu utiliser ce genre de combustible pour ce travail de recherche. Cependant, par commodité dans cette première approche, nous avons choisi d'utiliser du bois compte tenu que beaucoup d'études ont été réalisées avec ce matériau. Malgré ce choix restrictif, comme on pourra le voir les résultats permettent une approche assez précise des phénomènes analysés.

Le bois est un composé naturel constitué d'un mélange complexe de différents polymères dont les principaux sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine [10]. La décomposition de ces polymères se fait par pyrolyse entre 200°C et 500°C. Le taux d'humidité du bois varie selon son environnement.

Lorsqu'un morceau de bois est soumis à un flux thermique, il apparaît, à partir d'une température de surface d'environ 200 °C, une zone de pyrolyse se propageant au sein du solide.

En même temps se produit un processus de carbonisation donnant naissance à une couche carbonisée en surface dont l'épaisseur augmente au cours du temps [11].

### b- La pyrolyse

Lors d'un incendie, les matériaux combustibles se trouvant dans les zones appauvries en oxygène tels que les fumées ou l'intérieur des flammes sont soumis à un important flux thermique. En réaction, ils se dégradent et produisent beaucoup de gaz. Cette décomposition thermique est ce que l'on appelle la pyrolyse, elle permet de générer des combustibles volatiles à partir du corps solide et alimente ainsi les flammes.

## 1.2 Les transferts thermiques

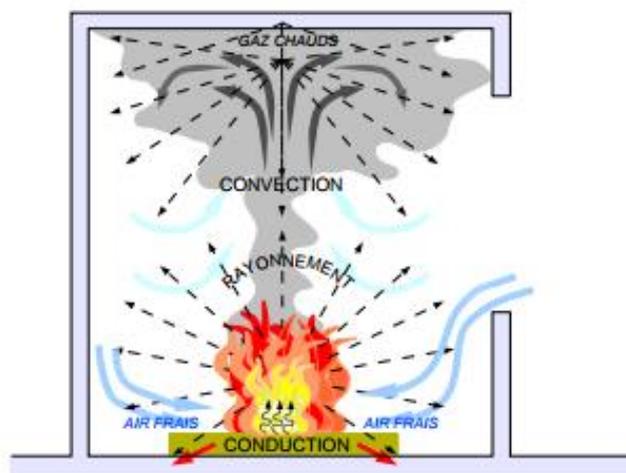
Afin que la pyrolyse puisse démarrer, il faut que la chaleur atteigne le combustible. Cette action a lieu grâce aux transferts thermiques (figure 1.3). Ainsi, il est important de comprendre les différents échanges thermiques dans le compartiment en feu avant d'aborder la propagation des fumées et les différentes techniques qui permettent de la contrôler.

La chaleur est transférée des matériaux ayant une température plus élevée, vers ceux qui sont à température plus basse, ceci par trois mécanismes principaux : Le rayonnement, la convection, et la conduction.

Le transfert thermique par conduction nécessite un contact direct entre un matériau chaud et un matériau de température inférieure. Ainsi c'est grâce à la conduction que les gaz chauds sont en contact avec les combustibles dont la température est plus basse.

Le transfert thermique par convection est dû au déplacement de particules de différentes températures, il se déroule dans un fluide (un liquide ou un gaz) [12]. Comme nous l'avons déjà expliqué plus haut, il en résulte la pyrolyse produisant des combustibles volatiles à très hautes températures qui se répandent dans l'espace et transfèrent leur énergie thermique à une partie du système. Cette opération a lieu grâce aux mouvements des masses gazeuses sous l'effet des différences de pression et à la convection.

L'énergie calorifique part d'un objet chaud dans toutes les directions sous forme de rayonnement électromagnétique. En effet, le rayonnement est un moyen qui n'a pas besoin de support matériel, tous les objets chauds présents dans le compartiment en feu émettent de la chaleur par rayonnement.



**Figure 1. 3:** Schéma illustrant les différents échanges thermiques lors d'un incendie de compartiment

### 1.3 Le développement d'un feu de compartiment (milieu confiné)

Les incendies en milieu confiné constituent un problème complexe. Il est en effet impossible de décrire et de prédire tous les développements spécifiques possibles d'incendie.

Toutefois, sur la base de l'accidentologie et du retour d'expérience, il est possible d'identifier différentes phases types de développement. En effet, en fonction des produits combustibles mis en jeu, de leur agencement, de l'infrastructure et de la ventilation, il est possible d'observer différentes évolutions possibles de l'incendie conduisant chacune à des phénomènes particuliers. La Figure 1.4, représentant la température moyenne du local en feu en fonction du temps, illustre bien la multitude des évolutions possibles des incendies en milieu confiné, en particulier dans le cas des infrastructures non ventilées [13].

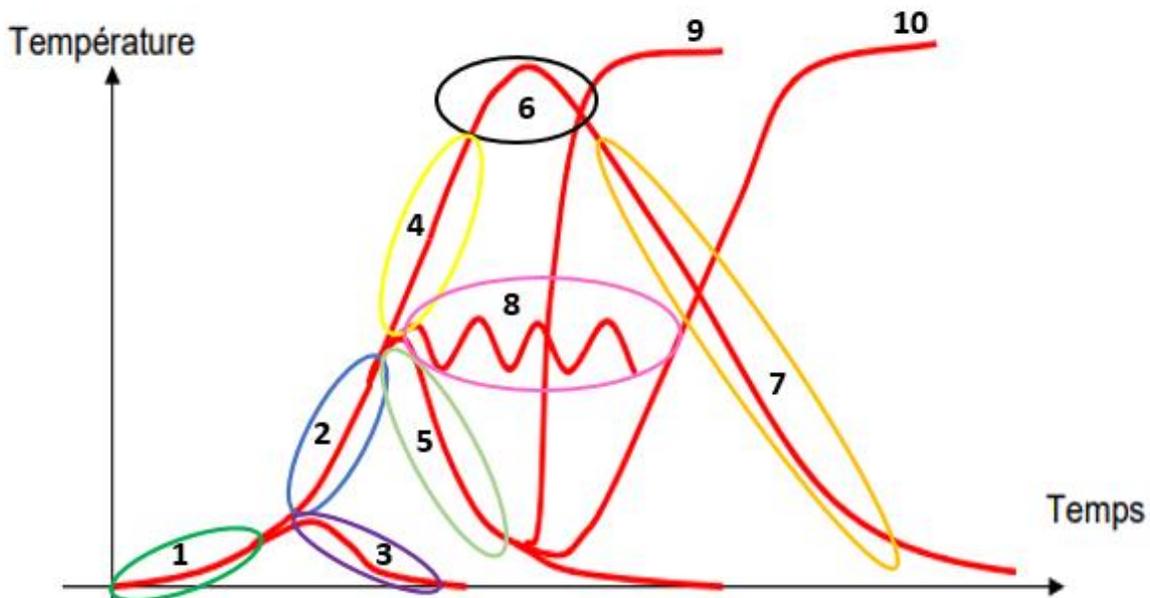


Figure 1. 4: Les évolutions possibles d'un incendie en milieu confiné

#### 1.3.1 La phase initiale du feu

Durant cette phase (courbe 1 – Figure 1.4) il nous est possible de comprendre les causes du départ de l'incendie. Ces causes peuvent être diverses et dépendre de la configuration de l'espace où a lieu l'incendie.

Dans les habitations par exemple, selon le retour d'expérience des sapeurs-pompiers, il a été montré que la cause d'incendie mortel était souvent liée à l'inflammation des literies due à la cigarette. Dans le cas des installations industrielles, les causes sont très variées : origine électrique, emballement chimique, acte de malveillance....

En général, le départ du feu est issu d'un dégagement suffisant d'énergie pour permettre d'échauffer un élément combustible jusqu'à une température critique permettant de déclencher la réaction de combustion.

### **1.3.2 La phase de propagation du foyer**

Cette phase (courbe 2 – *Figure 1.4*) correspond à la montée en puissance du feu liée à la combustion des éléments inflammables contenus dans le local incendié. Elle est exprimée par une accélération croissante de la montée en température dans le local en feu qui est plus importante que celle de la phase initiale.

Dans cette phase de propagation de l'incendie, la transition possible de la croissance du feu vers un embrasement généralisé est liée à l'emplacement des éléments combustibles dans le local.

En effet, si la quantité de combustible initiateur du feu est trop faible et que le foyer est suffisamment éloigné des autres matériaux combustibles, le flux thermique dégagé par le feu pourrait être insuffisant pour augmenter la température des autres combustibles et initier leur pyrolyse, ce qui pourrait être source d'une nouvelle inflammation.

Dans ce cas, le feu s'éteint par manque de combustible. Cette phase est exprimée par une baisse de température dans le local, représentée par la courbe 3 sur la *Figure 1.4*.

### **1.3.3 Période de transition vers le Flash-over**

#### **a- Milieu bien ventilé**

Lorsque l'apport d'air frais est suffisant, le feu continue son évolution par une augmentation importante de la température dans le local en feu dépassant les 500°C. Cette phase est illustrée sur la *Figure 1.4* par la courbe 4.

#### **b- Milieu sous-ventilé**

Dans le cas où l'apport d'air frais n'est pas suffisant, le feu risque de s'affaiblir très rapidement par manque d'oxygène. Ceci provoque une diminution des températures dans le local, le cas est illustré par la courbe 5 sur la *Figure 1.4*.

La combustion incomplète entraîne une production importante de gaz imbrûlés et de substances dangereuses, ce qui pourrait être la cause de déclenchement de différents phénomènes thermiques tels que le Backdraft et l'explosion des fumées.

Une étude plus profonde sur les phénomènes thermiques qui apparaissent lors des incendies de compartiment ainsi que les dangers qu'ils peuvent engendrer lors de l'intervention sera effectué dans la partie 1.5.3 de ce chapitre.

### 1.3.4 La Phase de plein développement du feu

Cette phase correspond au plein développement de la puissance du feu. Sa durée est déterminée par la quantité de combustible, la répartition du combustible dans le local et la ventilation. Elle est appelée aussi la phase de post flash-over quand elle vient à la suite d'un embrasement généralisé.

Si l'apport d'air frais est suffisant pour maintenir la combustion de l'ensemble des matériaux inflammables présent dans le local, le risque de propagation du feu d'un local à un autre est plus important. Cela pourrait être provoqué par la propagation des fumées ou par la conduction à travers les parois du local en feu qui peut provoquer l'inflammation d'objets combustibles présents dans les pièces voisines.

Dans le cas où, après la phase de plein développement, la quantité d'oxygène présente est suffisante pour assurer la combustion complète de tous les matériaux combustibles dans le local, le feu s'affaiblit et fini par s'éteindre par manque de combustible. Cette phase est traduite par une décroissance de température dans le local comme on peut voir sur la courbe 7 de la *Figure 1.4*.

### 1.3.5 Les phénomènes particuliers liés aux feux sous-ventilés

Lors de la phase de pré-flash-over. Si le local est non-ventilé ou la ventilation du local est très limitée, la quantité d'air frais présente dans le local n'est pas suffisante. Cela correspond aux feux en régime sous-ventilé où différents phénomènes spécifiques peuvent avoir lieu :

– Le phénomène de pulsation :

Le phénomène de pulsation s'exprime par une fluctuation importante de la température du local telle que présentée par la courbe 8 sur la *Figure 1.4*.

Ce processus s'enclenche après une diminution de la puissance de l'incendie suite au manque d'oxygène. La température dans le local en feu se met alors à chuter, ce qui entraîne une diminution volumique des gaz contenus dans le local.

Cette diminution volumique se traduit par une pression négative dans le local. L'air extérieur est alors entraîné à l'intérieur par les ouvertures disponibles. Cet air permet alors une reprise de la combustion générant une augmentation de la température du local et donc une dilatation des gaz créant une pression positive dans l'enceinte chassant les fumées vers l'extérieur ainsi que l'oxygène encore disponible.

La puissance chute alors de nouveau et le processus se répète alors successivement, ce qui conduit à la pulsation observée [13].

– Le Backdraft :

Ce phénomène est représenté sur la courbe d'évolution de l'incendie par une montée brutale de la température dans la pièce en feu (Courbe 9 - *Figure 1.4*).

Lorsqu'il survient, il est toujours précédé par une phase d'auto-extinction de l'incendie liée au manque d'oxygène (Courbe 5 – *Figure 1.4*). Ce phénomène est abordé plus loin dans la partie 1.5.3 de ce chapitre.

– La reprise du développement :

Ce phénomène se produit dans les mêmes conditions qu'un Backdraft suite à un apport soudain d'air frais dans le local à l'exception que la température initiale des imbrûlés est supérieure à leur température d'auto-inflammation. Ces gaz s'enflamment rapidement au contact de l'air. Le processus de mélange formant un nuage explosif n'a pas le temps de se produire. Ainsi, le phénomène explosif n'apparaît pas. (Courbe 10 - *Figure 1.4*).

## **1.4 Inflammation**

Le mélange gazeux produit lors d'un incendie se compose de gaz brûlés et de gaz imbrûlés. Les gaz brûlés sont constitués majoritairement de dioxyde de carbone, de vapeur d'eau et de gaz inertes qui ne participent pas à la réaction globale de la combustion.

Les gaz imbrûlés sont des produits de la combustion n'ayant pas complètement oxydé. Dans ce cas-là, il existe deux possibilités pour l'inflammation du mélange :

- Le mélange peut réagir et s'enflamme avec la présence d'une quantité suffisante d'oxygène et une source d'énergie (étincelles, flammes), formant une inflammation pilotée.
- Le mélange peut s'enflammer sans source locale d'énergie s'il atteint une température minimale appelée la Température d'Auto-Inflammation (TAI), formant une auto-inflammation.

### **1.4.1 Auto-inflammation**

Le phénomène d'auto-inflammation a lieu lorsqu'un mélange ou une matière prend feu en l'absence d'une source d'énergie apparente tel qu'une étincelle ou une flamme.

La température d'auto-inflammation d'une matière est la température minimale pour laquelle l'auto-inflammation se produit.

Pour qu'il y ait une auto inflammation, la température du volume est supposée uniforme dans le temps et l'espace.

Le tableau 1.1 suivant représente les températures d'auto-inflammation de certaines substances

Substance	Température (°c)
Monoxyde de carbone	605
Papier	233
Gazole	257
Butane	287
Acétylène	305
Huile végétale	350
Méthanol	455
Benzène	555
Hydrogène	571

*Tableau 1.1 : Différentes substances et leurs températures d'auto-inflammation*

## 1.5 La dispersion de la fumée

### 1.5.1 Généralités

Lors d'un incendie de bâtiment, la fumée représente un danger majeur que ce soit pour les victimes en termes de toxicité ou pour les secouristes du fait des accidents thermiques qu'elle peut engendrer. Elle constitue aussi un système complexe pour l'approche fondamentale de par sa mobilité et sa composition chimique.

Nous pouvons en identifier ses trois principaux : Sa toxicité, son opacité et sa mobilité.

**Toxicité :** L'une des premières causes de décès lors d'un incendie est l'inhalation des fumées. Elle contient de nombreux gaz chauds, toxiques, asphyxiants et irritants qui provoquent des brûlures à l'intérieur des organes et voies respiratoires et peuvent ainsi conduire à la mort les personnes atteintes si elles ne sont pas secourues à temps.

**Opacité :** L'opacité de la fumée est liée aux volumes de fumées produites par la combustion. Elle représente une gêne considérable lors de l'évacuation du bâtiment en feu, cause un abaissement de la visibilité des sapeurs-pompiers et complique ainsi leur intervention.

**Mobilité :** Etant très mobile et souvent à de très hautes températures, elle transporte avec elle des gaz imbrûlés et particules chaudes, issus de la pyrolyse des matériaux, qu'elle répand dans les espaces par lesquelles elle se propage. Son contact avec l'air peut provoquer des accidents thermiques tels que l'embrasement généralisé éclair ou encore l'explosion des fumées. Son passage par des endroits étroits, tels que les couloirs ou les gaines techniques, peut provoquer la création de nouveaux foyers éloignés du foyer initial et ainsi propager le sinistre.

Le schéma ci-dessous (Figure 1.5), représente très schématiquement le processus de production de fumée lors d'un incendie [14].

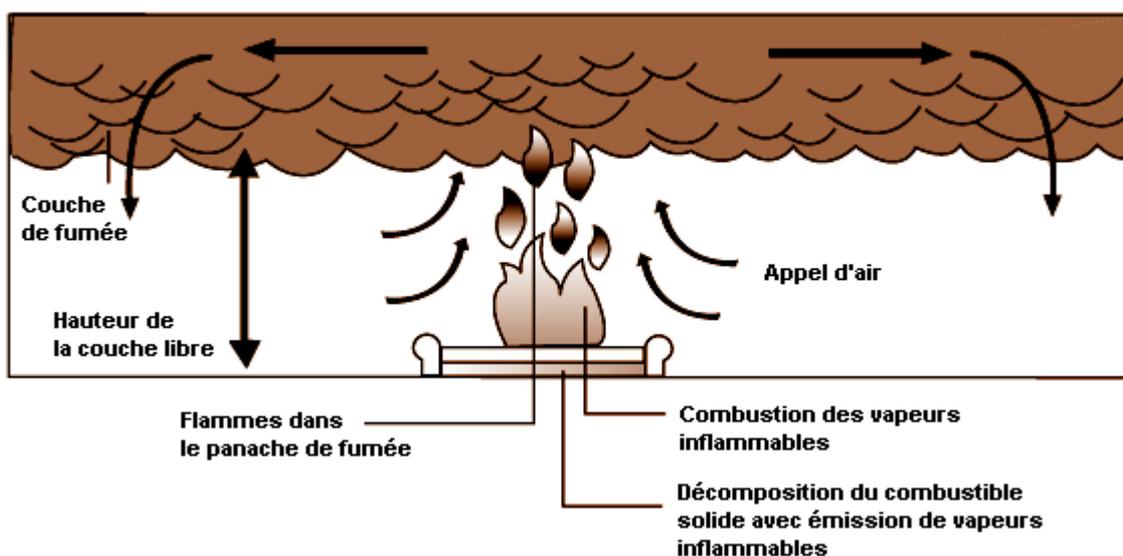


Figure 1. 5: Schéma représentant le processus de production de fumée lors d'un incendie [14]

### 1.5.2 Composition chimique de la fumée

Parmi les gaz, asphyxiants et irritants, produits par la combustion des matériaux lors d'un incendie de bâtiment, nous allons en citer les principaux suivants [15] :

- Le monoxyde de carbone (**CO**) et le dioxyde de carbone (**CO<sub>2</sub>**), représentent les produits les plus fréquents et abondants de la combustion. La quantité de CO produite est toujours la même peu importe le type du matériau brûlé (bois, plastique, mousse...).
- Les concentrations toxiques de ces gaz ont un effet immédiat et peuvent provoquer l'inconscience en quelques secondes. Ils conduisent aussi à une accélération du rythme respiratoire qui favorise l'inhalation des autres gaz toxiques.
- L'acide cyanhydrique (**HCN**), appelé aussi le cyanure d'hydrogène, est extrêmement irritant et toxique et peut être mortel, car il cause une anoxie<sup>2</sup>. L'intoxication aigüe peut survenir par ingestion, par inhalation, ou par contact avec la peau.
- L'acide chlorhydrique (**HCl**), est un produit libéré dans le cas des PVC et des synthétiques ignifugés avec du chlore (100kg de PVC peuvent libérer 57kg de HCl). C'est un gaz irritant et corrosif et peut provoquer la mort par œdème aigu du poumon.
- Les oxydes d'azote **NO<sub>x</sub>** (NO, NO<sub>2</sub>) forment un groupe de gaz très réactif. Ils sont libérés avec les poly-acrylonitriles, les polyamides et les celluloids. Les impacts des NO<sub>x</sub> sont les difficultés respiratoires. Le NO<sub>2</sub>, par exemple, est 40 fois plus toxique que le monoxyde de carbone (CO).

### 1.5.3 Les accidents thermiques

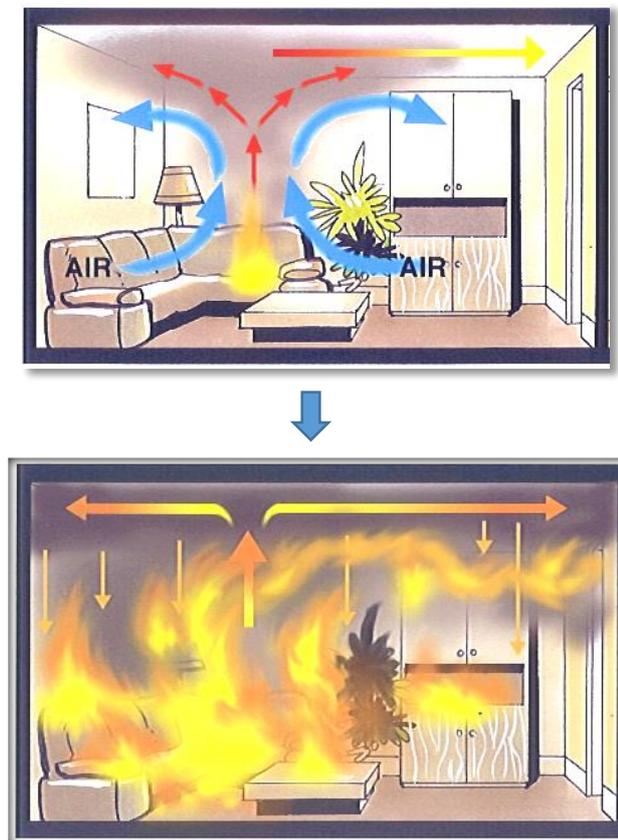
En plus de sa toxicité, lors d'un incendie de bâtiment, la fumée est la cause principale de la propagation du feu en espace clos ou semi-ouvert. Les deux phénomènes thermiques qui représentent un danger majeur pour les sapeurs-pompier lors de l'intervention contre les feux

<sup>2</sup> Anoxie : Diminution de la quantité de dioxygène disponible pour les tissus de l'organisme.

de bâtiments, sont l'embrasement généralisé éclair (Flashover) et l'explosion des fumées (Backdraft).

a- L'embrasement généralisé éclair :

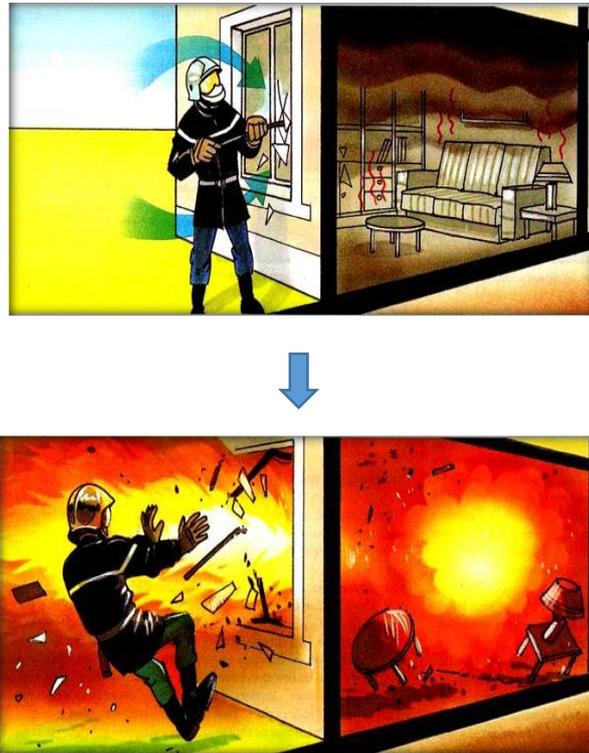
- L'embrasement généralisé éclair (Figure 1.6), représente un événement thermique de très courte durée et de grande dangerosité.
- Lors du développement du feu, il se caractérise par une inflammation soudaine et simultanée de tous les gaz émanant de la pyrolyse de tous les matériaux.
- Sur le terrain, il correspond au passage soudain d'un feu localisé à l'embrasement de la totalité des combustibles présent dans le compartiment incendié. Ainsi, il représente une grande menace, surtout au cours de la phase d'attaque des sapeurs-pompiers de par son caractère soudain, imprévisible et incontrôlable.
- Plusieurs études différentes ont été menées sur les flashovers, partant de l'étude théorique simplifiée [16], jusqu'aux applications numérique et expérimentale plus complexes [17, 18].



**Figure 1. 6 :** Images représentant le passage soudain d'un feu localisé à l'embrasement de la totalité des combustibles présent dans la pièce [19]

## b- L'explosion de fumée

- L'explosion de fumée (Figure 1.7) connue aussi sous le nom de backdraft est un phénomène explosif qui peut être provoqué de deux manières, soit par un apport d'air aux gaz imbrulés à température suffisamment élevée (auto-inflammation de tous combustibles, gazeux, liquides ou solides) produit par la pyrolyse des matériaux combustibles ; soit par l'apport d'énergie d'activation (chaleur) aux fumées mélangées à de l'air. Une étude plus détaillée a été menée par Gottuk, D and Al [20].
- La configuration moderne des constructions actuelles comporte plusieurs facteurs qui favorisent l'apparition du backdraft et rend ainsi le phénomène encore plus redouté par les sapeurs-pompiers. D'une part l'isolation thermique qui rend les espaces confinés et carencés en oxygène en cas d'incendie, et d'autre part les multiples espaces étroits tels que les couloirs ou gaines techniques qui favorisent l'auto-inflammation du monoxyde de carbone.



**Figure 1. 7 : Explosion des fumées au contact de l'air frais suite à l'ouverture réalisé par le sapeur-pompier [19]**

## 2 L'approche opérationnelle

Avant de parler des aspects techniques de la lutte contre les incendies, nous allons commencer par une brève présentation concernant l'organisation de l'intervention afin de comprendre les bases de la démarche suivie par l'ensemble du corps opérationnel dans la lutte contre les feux de bâtiments. Une étude plus détaillée a été menée par Grimwood. P & Al [21].

### 2.1 Organisation de l'intervention

L'équipe d'intervention est composée comme suit :

- 1- Un COS<sup>3</sup>: chargé d'évaluer le sinistre, de définir la stratégie d'intervention, coordonner les binômes et remonter les informations du terrain au centre de traitement de l'alerte.
- 2- Binômes d'attaque : ils sont affectés à l'exploration des lieux et à l'attaque du feu.
- 3- Binômes d'alimentation : Ils s'occupent de la mise en place de la "division alimentée" qui effectue le relai entre l'alimentation sur une source d'eau et la pièce de jonction (division) ou le binôme d'attaque se raccorde. Ils sont aussi prêts à intervenir en renfort des binômes d'attaque.
- 4- Le conducteur : Il doit s'assurer de la bonne pression en sortie des lances et que la citerne du camion soit en permanence alimentée.

#### 2.1.1 La marche générale des opérations incendies

Afin que l'intervention des pompiers soit ordonnée et efficace, les pompiers vont suivre un cadre nommé MGO-Incendies<sup>4</sup> qui correspond à l'ensemble des étapes à suivre lors d'une intervention pour incendie.

La MGO comporte 7 phases principales : reconnaissance, sauvetage et mise en sécurité, établissement, attaque, protection, déblai et surveillance.

Elle ne doit pas se résumer à une succession stricte et linéaire d'opérations à entreprendre, car certaines phases sont complémentaires, d'autres menées en parallèle et d'autres permanentes, tels que la mission de reconnaissance qui est renouvelée jusqu'à la fin de l'intervention.

##### ▪ Phase 1 : Reconnaissance et lecture du feu

- La première étape est l'exploration des lieux, ou « reconnaissance », faite par le chef d'agrès<sup>5</sup> et un (ou deux) binôme(s) avec l'utilisation de leur appareil respiratoire isolant.
- Le but est d'évaluer la situation et de rassembler le maximum de renseignements afin de définir les objectifs et idées de manœuvre à entreprendre immédiatement.

---

<sup>3</sup> COS : Commandant d'opération de secours

<sup>4</sup> MGO-Incendies : Marche Générale des Opérations Incendies

<sup>5</sup> Le chef d'agrès : Est le sapeur-pompier responsable de la planification et de la gestion des activités du personnel armant son véhicule

- Les reconnaissances se poursuivront tout au long de l'intervention car elles permettent aussi d'analyser l'efficacité des actions entreprises et l'évolution du sinistre dans le temps.
- La difficulté durant cette étape est que les intervenants ne se fient qu'à leur expérience sur le terrain pour prendre les bonnes décisions qui feront que leur intervention sera efficace et en même temps sécurisée.
  - **Phase 2 : Sauvetage et mise en sécurité**
- Le sauvetage consiste à éloigner les victimes d'un péril direct ou imminent. La protection des personnes et leur mise en sécurité est une priorité pour les sapeurs.
  - **Phase 3 : Les établissements**
- C'est la mise en place des lances et du dispositif hydraulique associé qui permettra une attaque efficace, sûre et adaptée aux besoins et ressources.
  - **Phase 4 : L'attaque du feu**
- L'attaque du feu consiste à abattre les flammes pour stopper la propagation du feu, puis à l'éteindre. Elle se fait depuis les points d'attaque déterminés au plus près par un COS en fonction des risques de propagation déterminé lors de la phase de reconnaissance.
  - **Phase 5 : La protection**
- Il s'agit de limiter l'impact du sinistre et de l'action des sapeurs-pompiers (fumées, rayonnement thermique ou eaux d'extinction...) sur l'environnement direct et indirect, en engageant différentes actions tels que la ventilation des locaux, le déplacement des objets de valeurs ou le bâchage..., selon les besoins.
  - **Phase 6 : Les déblais**
- Une fois que le feu est éteint, les décombres laissent apparaître des fumerons, il faut donc effectuer un déblai au risque de voir le feu reprendre.
- Cette phase de l'opération est tout aussi décisive que les précédentes, notamment en termes de sécurité des intervenants.
  - **Phase 7 : La surveillance**
- La surveillance consiste à maintenir sur les lieux du sinistre, du personnel et du matériel sur une période définie afin de pouvoir intervenir rapidement en cas de reprise de feu.

### 2.1.2 Les techniques de lutte en volume clos ou semi-ouvert

Le TOOTEM est une série de règles qui représente aussi, pour le moment, le seul moyen utilisé par les sapeurs-pompiers pour se protéger des deux phénomènes thermiques les plus redoutés : l'embrassement généralisé éclair et l'explosion de fumées.

Les différentes étapes de cette mnémotechnique sont :

- T** : Tester les portes en les arrosant afin de déterminer l'état thermique du local.
- O** : Observation des fumées. S'ils elles pulsent sous la porte, par exemple, c'est le signe d'une intense activité thermique et d'un manque de comburant.
- O** : L'ouverture de porte qui peut représenter un grand risque lors de l'intervention. Les gaz chauds sortent par en haut, tandis que l'air frais rentre par en bas. La ré-aspiration des fumées dans le local est un signe annonciateur d'une explosion à très brève échéance. Si à l'ouverture de la porte, les fumées sont rapidement aspirées, il convient de se protéger très vite.
- T** : Tester en arrosant le plafond pour estimer la chaleur des fumées.
- EM** : engagement minimum pour limiter le nombre de victimes en cas d'accident.

## 2.2 La ventilation opérationnelle

Dans le jargon des sapeurs-pompiers le mot COMIX est le moyen mnémotechnique utilisé pour définir les propriétés dangereuses des fumées d'incendie : **C**haude, **O**paque, **M**obile, **I**nflammable et **tO**Xique.

L'un des principaux moyens de l'intervention contre les feux de compartiment est la maîtrise de la propagation des fumées. Avec leur forte mobilité et leur température très élevée elles peuvent être la cause des deux accidents thermiques les plus redoutés, l'embrasement généralisé éclairé et l'explosion des fumées.

Ainsi lors de leurs interventions dans des volumes clos ou semi-ouverts, les sapeurs-pompiers mettent parfois en place différentes techniques d'évacuation forcée de la fumée permettant de contrôler et de maîtriser sa propagation, l'ensemble de ces moyens regroupe ce qu'on appelle la ventilation opérationnelle. Cette dernière se fait généralement à l'aide de différents types de ventilateurs.



**Figure 1. 8:** Ventilateur Hydraulique LEADER

Dans un milieu clos, la première action à faire dans le but de maîtriser les fumées, est de créer une ouverture en hauteur ou un exutoire qui assurera la sortie des fumées. De nos jours, la majorité des bâtiments accueillant du public sont munis d'un exutoire qui s'ouvre manuellement ou automatiquement dès que l'alarme incendie est déclenchée.

L'exutoire permet de créer un courant d'air pour l'extraction naturelle des fumées vers l'extérieur, étant souvent insuffisante, elle est renforcée par l'utilisation de ventilateur (Figure 1.6).

Il existe différentes manières de ventilation opérationnelle, la plus utilisée et pour laquelle les pompiers ont opté lors de cet essai est la ventilation en surpression. Elle consiste à installer un gros ventilateur, face à une porte ouverte afin de créer une surpression en faisant entrer de l'air frais dans la pièce en feu et ainsi faciliter la sortie des fumées par l'exutoire.

Pour que l'opération soit efficace, le flux d'air doit être plusieurs fois plus important que le volume en feu, ainsi il est possible d'utiliser plusieurs ventilateurs tout au long de l'intervention jusqu'à atteindre les résultats attendus qui sont en principe :

- Dégager la visibilité ;
- Baisser les températures ;
- Diminuer le risque des accidents thermiques ;
- Sécuriser et faciliter l'intervention

Des recherches sur la ventilation opérationnelle ont commencé en 1977, à la Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris avec les travaux du Colonel Legendre et de l'Ingénieur Lebey. Ils se sont poursuivis depuis en collaboration avec l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, par les travaux de Lebey au Laboratoire de Mécanique des fluides [22, 23]. C'est lors de ces travaux que Lebey a montré la relation qu'il existe entre l'évolution de la puissance dans un incendie et l'évolution des températures issues de la combustion, d'où l'idée d'utiliser ce principe pour avoir des informations plus précises concernant l'évolution de l'incendie et des risques qui peuvent apparaître.

En 1996, il a pu reprendre ces travaux qu'il poursuit depuis au sein de l'Université Le-Havre Normandie au Laboratoire d'Ondes et Milieux Complexes (CNRS, UMR 6294), travaux portant à la fois sur les stratégies opérationnelles et sur les matériels à mettre en œuvre [24]

D'autres travaux ont été menés aussi sur les aspects fondamentaux de la ventilation dans les espaces naturellement ventilés et contenant des sources de chaleur [25].

### **2.3 Les risques sur le terrain**

Le feu provoque chaque année en France le décès d'environ 600 personnes et des dégâts matériels représentant plus de 1,2 milliard d'euros versés aux seules PME par les sociétés d'assurance [1].

Les incendies sont la cause de près de 400 000 sorties par an des services de secours sur tout le territoire français. Au niveau européen, le feu fait 5000 victimes par an et 10 fois plus de blessés, avec un coût global représentant près de 0.5% du PIB [26].

Les statistiques relatives aux incendies faites par le Ministère de l'écologie et du développement durable, du logement et des transports en 2012, dénombrent quant à elles une fréquence d'un incendie domestique toutes les deux minutes. Malgré la grande avancée technologique que nous connaissons dans notre époque, les incendies représentent toujours un grand danger pour notre société.

La lutte contre les incendies reste l'une des principales missions des sapeurs-pompiers. Elle consiste à priver le feu d'un des trois éléments essentiels à son maintien et faisant partie du triangle du feu (combustible, comburant ou l'énergie d'activation).

Une partie des principaux dangers auxquels s'exposent nos soldats du feu en étant proche d'un incendie sont liés à la chaleur élevée. Même en dehors des flammes, ils s'exposent au risque de brûlures dues principalement aux fumées chaudes, mais aussi au rayonnement infrarouge, au contact avec des objets chauffés ou encore à l'air chauffé.

Mais la lutte contre les feux de compartiment comporte d'autres risques encore plus dangereux et qui peuvent être fatales pour la vie des sapeurs-pompiers dont les deux les plus redoutés, cités plus haut, sont l'explosion de fumée et l'embrasement généralisé éclair, accidents imprévisibles et surtout incontrôlables [27].

## **Conclusion : Problématique de l'étude**

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté un ensemble de généralités sur les deux axes de base, l'approche fondamentale et l'approche opérationnelle, dans le but de mieux définir la problématique de la thèse.

Pour l'approche fondamentale, en rapport avec l'analyse théorique du phénomène, nous avons pu définir les différentes caractéristiques des feux de compartiments, celles des fumées et les risques qu'elles peuvent engendrer.

Nous pouvons donc en conclure que les fumées représentent un danger majeur lors de l'intervention des sapeurs-pompiers. Elles sont souvent à très hautes températures et sont surtout très mobiles. De ce fait, elles provoquent la propagation du feu et peuvent engendrer des phénomènes thermiques, imprévisibles et incontrôlables, tels que les explosions de fumées ou l'embrasement généralisé éclair.

De plus, l'apparition des nouveaux matériaux de construction et les isolations thermiques ont fait que les constructions modernes sont devenues très dépourvues d'oxygène et conduisent à la concentration de chaleur lors d'un incendie, le feu de compartiments est devenu encore plus dangereux pour les sapeurs-pompiers, surtout lors de leurs phases d'attaque.

Quant à l'approche opérationnelle, nous avons pu présenter les différentes démarches suivies par les sapeurs-pompiers et les dispositifs mis à leur disposition lors de leurs interventions contre les feux de bâtiment.

Le problème qui se présente pour les sapeurs-pompiers lorsqu'ils arrivent sur les lieux c'est qu'ils n'ont aucune information sur ce qui se passe à l'intérieur du local en feu, ils doivent donc faire le point de situation pour déterminer la meilleure stratégie à mettre en œuvre, puis de savoir l'effet qu'elle a eu, positif ou négatif ; tout ceci en temps réel et très limité. À cette difficulté s'ajoute l'impossibilité de détecter les dangers potentiels tels que l'explosion de fumées ou l'embrasement généralisé éclair.

L'étude présentée dans ce qui suit se propose de contribuer à construire des méthodes et des moyens pour pallier ces manques afin de contribuer à améliorer la sécurité et l'efficacité des sapeurs-pompiers dans leurs interventions sur feux de compartiments. Il s'agit donc de proposer une méthode de diagnostic en temps réel afin, en particulier de détecter l'occurrence de dangers potentiels spécifiques à ces situations.

\* \* \*



## **Chapitre 2**

### **Moyens expérimentaux utilisés**

## Présentation

L'étude expérimentale ou la reproduction de cas réel d'incendie nous permet d'étudier le développement du feu et la propagation des fumées tout en prenant en compte leurs caractéristiques complexes et les phénomènes dangereux qu'ils peuvent engendrer.

Pour analyser en détail chaque phénomène, l'étude peut être faite soit en taille réelle soit en modèles plus simplifiées se rapprochant plus ou moins de la réalité. Ainsi, dans ce qui suit, nous étudierons les feux localisés en espace semi-confiné pour les deux situations évoquées.

Nous commencerons d'abord par des généralités concernant les moyens d'études utilisés, ensuite nous présenterons les dispositifs expérimentaux sur lesquels l'ensemble des essais de la présente étude ont été menés, et enfin, nous décrirons, pour chacun des essais, les différentes situations d'incendie reproduites.

### 1 Généralités

L'étude des feux localisés en espace semi-confiné concerne les locaux dont les parois ne sont pas combustibles, présentant une ventilation naturelle et contenant un foyer unique.

Il existe deux cas d'études : l'étude en taille réel et l'étude sur configuration simplifiée à l'échelle un ou de taille réduite.

L'étude en taille réelle permet une reproduction identique des phénomènes thermiques rencontrés lors de l'intervention contre les feux de bâtiment ainsi elle facilite leur étude en évitant les problèmes liés au changement d'échelle.

Cependant, la taille réelle comporte des inconvénients, comme la violence des phénomènes thermique reproduits qui nécessite la présence obligatoire des sapeurs-pompiers afin de les contrôler en cas de sinistre, ou encore la grande quantité de combustible nécessaire et le coût de l'instrumentation qui peuvent limiter le nombre d'essais.

Par contre, l'analyse du feu en configuration simplifiée, ou sur maquette à petite échelle ; est moins onéreuse et la faible quantité de combustible qu'on peut y utiliser implique un temps de combustion moins long, ce qui permet de réaliser plusieurs fois les essais dans la même journée selon la taille du local.

En taille réelle, les observations sont directement transposables à la réalité et ne nécessitent pas une main d'œuvre experte pour sa conception. Les inconvénients sont liés à la grande taille de la maquette sont les mêmes que ceux évoqués dans le paragraphe précédent.

Si les études sur modèles de taille réduite sont plus faciles à réaliser, elles présentent des inconvénients concernant les phénomènes observés qui peuvent être très différents de ceux observés lors d'un essai en taille réel ou à l'échelle réelle ; en effet, il y a incompatibilité entre les similitudes thermique et cinétique ; si bien les différences entre réalité et maquette sont d'autant plus grandes que la différence de taille est importante.

En conséquence, nous avons choisi de vérifier notre méthode d'analyse de risque sur un cas de taille réelle en plus des deux cas d'études de configuration simplifiée à l'échelle un.

## 2 Ensemble de l'instrumentation

### 2.1 La vitesse des fumées

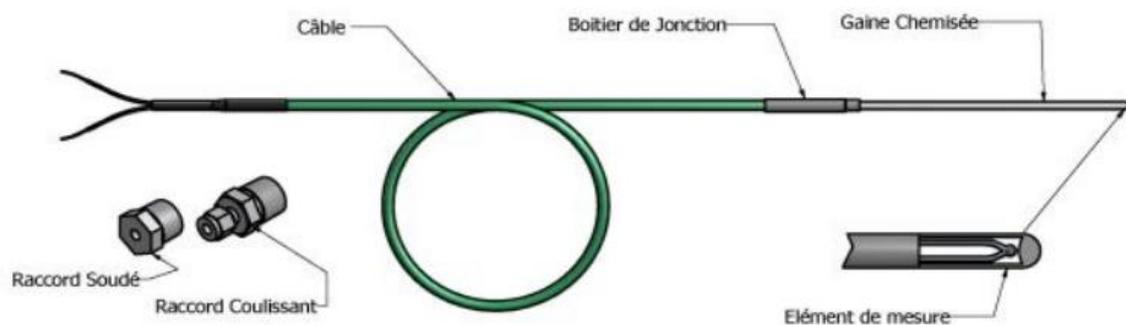
La vitesse des fumées est mesurée à la sortie du local par un anémomètre à hélice. En effet les températures très élevées des fumées ne permettent pas de placer l'anémomètre à l'intérieur de la structure.

La mesure de la vitesse des fumées nous permet de déterminer la vitesse maximale des fumées au cours de la combustion et permet aussi d'estimer la puissance transportée par les fumées à l'extérieur du local en feu.

### 2.2 Mesure des températures de fumées

#### 2.2.1 Les thermocouples

Le principe de fonctionnement d'un thermocouple (Figure 2.2) se base sur le conducteur électrique qui subit un gradient de température et l'énergie reçue émet un mouvement d'électrons qui génère ainsi une force électromotrice dont le sens et la valeur dépendent de l'amplitude et de la direction du gradient de température et aussi du matériau conducteur.



*Figure 2. 1: Composition d'un thermocouple*

## 2.2.2 Le choix de thermocouple

Il existe différents types de thermocouples dont le domaine d'utilisation dépend du couple de métaux conducteurs utilisés auquel on associe une lettre normalisée.

Le tableau suivant (Tableau 2.1) représente les désignations correspondant aux différents types de thermocouples :

Types de thermocouples	Conducteurs - Positif	Conducteurs – Négatif	Gamme de température (°C)
B	Platine rhodié à 30%	Platine rhodié à 6%	(0 ; 1820)
E	Alliage nickel / chrome	Alliage cuivre / nickel	(-270 ; 1000)
J	Fer	Alliage cuivre / nickel	(-210 ; 1190)
K	Alliage nickel / chrome	Alliage nickel / aluminium	(-270 ; 1372)
N	Alliage nickel / chrome / silicone	Alliage nickel / silicone / magnésium	(-270 ; 1300)
R	Platine rhodié à 13%	Platine	(-50 ; 1768)
S	Platine rhodié à 10%	Platine	(-50 ; 1768)
T	Cuivre	Alliage cuivre / nickel	(-270 ; 400)

**Tableau 2. 1:** Les différents types de thermocouple et leurs caractéristiques [28]

Dans notre étude, nous utiliserons les thermocouples de type K qui correspondent au couple Nickel/Chrome, Nickel/Aluminium aussi appelé couple Chromel, Alumel.

La gamme de mesure en tension s'étale de -6,46 mV à 55 mV et correspond à une plage de température variant de -270 °C à 1372 °C ce qui est particulièrement bien adapté pour l'étude des feux. La correspondance entre les deux grandeurs s'obtient au moyen d'un polynôme d'interpolation. La précision de la mesure est égale à 0,75% de la température mesurée en degré Celsius. Cela veut dire, par exemple, que pour une température mesurée à 800°C, la précision est de  $0.0075 \times 800 = 6^\circ\text{C}$ .

Les thermocouples de type K sont protégés par une gaine en fibre de verre tressée qui permet d'éviter tout contact électrique entre les deux conducteurs qui risquerait de fausser la mesure.

Le diamètre de la sonde du thermocouple joue un rôle important dans la précision de la mesure et le temps de réponse. Ainsi, plus le diamètre est grand et plus la réponse du thermocouple sera lente. Par conséquent, lorsque le diamètre de la sonde est plus fin, il est certes plus précis mais il résiste moins aux grandes températures. Il faut donc bien choisir la taille du diamètre pour que le thermocouple puisse répondre au mieux aux besoins de chaque cas étudié.

Le tableau ci-dessous (Tableau 2.2) représente quelques tailles de thermocouples utilisées lors de l'étude des feux de compartiments :

Combustibles	Taille des thermocouples (mm)	Références
Bois	0,5	P+2
PMMA	0,025	P+3
Brûleur à gaz	1	P+4
Ethanol	0,1	P+5
Méthanol	0,3	P+6
Propane	2	P+7
Heptane	1,6	P+8

**Tableau 2. 2:** Comparaison de tailles de thermocouples utilisés dans des tests de feux de compartiment [29]

Nous avons étudié trois sondes de thermocouple de diamètres différents : 0,1 mm ; 0,5 mm et 1 mm

Les mesures ont été effectuées au même moment et au même emplacement avec les trois thermocouples. Notre choix s'est porté sur le thermocouple de 0,5 mm de diamètre qui s'est avéré le plus adapté à nos besoins en termes de robustesse et rapidité temps de réponse.

En revanche le thermocouple à 1 mm est certes plus résistant mais il est moins précis que le thermocouple choisi. Enfin, la sonde à 0.1 mm est certes plus précise, mais elle reste très fragile et difficile à manœuvrer.

### 2.3 Les conditions atmosphériques

Les conditions météorologiques ont une influence sur le déroulement de la combustion. C'est pourquoi avant le démarrage de chaque manipulation, il nous a été nécessaire, à l'aide d'une station météo (Figure 2.3), de relever en temps réel certaines grandeurs caractéristiques de la météo tel que l'hygrométrie, la pression ou la température atmosphérique.



**Figure 2. 2:** Station météorologique

Les paramètres caractéristiques des capteurs sont les suivantes : Le relevé de température peut varier de -40 °C à 60 °C avec une résolution de 0,1 °C, celle de l'hygrométrie peut varier

entre 1% et 99% avec une résolution de 1% et enfin le relevé de la pression varie de 300 hPa à 1099 hPa avec une résolution de 0,1 hPa.

## 2.4 Le système d'acquisition de données

Nous utilisons une chaîne d'acquisition équipée du matériel fabriqué par la société National Instrument. Cette chaîne se compose d'une carte d'acquisition aux caractéristiques suivantes: la fréquence d'échantillonnage est de 500 kHz, le codage du signal en tension est réalisé sur 12 bits, la carte dispose de 2 sorties analogiques dont l'échantillonnage maximal est de 1 MHz et elle dispose aussi de 8 entrées et 8 sorties numériques.

Nous utilisons l'entrée analogique qui fonctionne en multiplexage. A cette carte est relié un châssis sur lequel peuvent être enfichés quatre modules d'acquisition.

Nous utilisons trois modules de températures auxquels sont reliés trois blocs de connectiques comportant chacun 32 voies. Il est ainsi possible d'utiliser simultanément jusqu'à 96 thermocouples avec une fréquence d'acquisition maximale de 8,3 kHz.

A ce châssis est également relié un bloc dédié à la connectique des signaux de tension, il comporte 8 voies différentielles soit 16 voies référencées à la masse. Il servira d'une part, à l'acquisition de la vitesse des fumées et d'autre part, à l'acquisition de la masse du foyer.

Les boîtiers sont blindés pour éviter les perturbations électromagnétiques et l'ensemble peut fonctionner dans un environnement dont la température est comprise entre 0 °C et 50 °C.

National Instrument permet le traitement des acquisitions à l'aide du logiciel Labview. Cette interface graphique permet de nombreux traitements du signal.

## 3 Choix du combustible et du foyer

Notre choix s'est porté sur le bois comme combustible car ses caractéristiques se rapprochent beaucoup des caractéristiques de l'ensemble de matériaux qui prennent feu lors des incendies de bâtiment.

Afin d'assurer la validité des essais, les combustions doivent être reproductibles. C'est pourquoi la puissance du feu doit être identique lors des essais effectués dans les mêmes conditions, sinon cela compliquerait l'étude.

La complexité de l'utilisation de combustibles solides tels que le bois réside dans la difficulté de fixer au préalable son hygrométrie. De plus la géométrie du foyer doit être parfaitement calibré afin d'assurer la reproductibilité.

Les combustibles gazeux tels que le propane ou le butane permettent d'étudier des feux en régime stationnaire, le débit du gaz étant fixé par un détendeur et mesuré à l'aide d'un débitmètre. Ce type d'étude concerne les flammes de pré-mélanges ou partiellement pré-mélangées ce qui s'écarte des incendies étudiés mais présente l'avantage de connaître précisément la puissance libérée par la réaction de combustion.

Dans nos essais un seul foyer à la fois est utilisé. Il est choisi de forme simplifiée, nous avons donc opté pour un foyer de buchettes de bois étagées croisées nommé (crib-fire), qui est largement utilisé dans des études de feux de compartiments. La loi d'évolution de ce type foyer a été étudiée par LEBEY lors de sa thèse DDI (1983), c'est l'une des raisons pour laquelle il a été choisi pour cette thèse.

A l'exception de l'essai en taille réelle, et compte tenu de la forme de type couloir des configurations étudiées, le foyer (Figure 2.5) est placé suivant l'axe longitudinal du local de manière à être le plus proche possible de l'écoulement bidimensionnel.

La quantité des buchettes et des étages est différentes pour chaque cas d'étude, ceci permet de faire varier la puissance maximale du feu étudié. La masse initiale du foyer sera maintenue constante pour la reproduction de chaque cas.



**Figure 2. 3:** a) Exemple de foyer de buchettes de bois étagées croisées

« Ici un foyer de masse importante, environ 250 kg de bois ; la même structure de foyer a été utilisée pour des foyers de plus faible masse, environ 35kg pour les essais réalisés dans la structure couloir (présentée dans les chapitres suivants) »



**Figure 2.5 :** b) Foyer de buchettes en feu



**Figure 2.5 :** c) Foyer de buchette effondré

## 4 Les configurations expérimentales étudiées

En vue du grand nombre d'essais sur lesquels nous avons travaillé, et ceux que nous avons répétés dans le but d'analyser la reproductibilité des phénomènes étudiés, il nous est impossible de tous les présenter en détail. Ainsi, dans cette partie, nous présenterons en générale les trois dispositifs sur lesquelles nous avons appliqué nos méthodes d'analyse et les différentes configurations réalisées, ensuite dans les deux chapitres suivants (3 et 4) nous décrirons en détail (dimensions, emplacement des thermocouples, position des cibles...) les principaux cas retenus et les résultats obtenus

### 4.1 Incendie d'une chambre d'hôpital

Avant d'entreprendre l'analyse complète de notre méthode, une première validation a été réalisée en utilisant un essai en taille réelle.

Cet essai (Figure 2.6) a été réalisé par LEBEY et al. en 2004 [23] à la demande de l'Etat-major de la Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris (BSPP) dans le but de montrer l'intérêt et l'efficacité de la ventilation dans les incendies. C'est à la suite de cette démonstration que la BSPP a commencé à utiliser en situation d'opération cette méthode de contrôle des mouvements de fumées pendant l'attaque de certains feux de compartiments.

L'intérêt d'utiliser cet essai est que quinze mesures de températures ont été faites en continu, en des points précis stratégiques. Comme nous le verrons plus loin ; c'est l'analyse de ces mesures qu'en ont fait LEBEY et al., qui a non seulement permis de montrer l'intérêt et l'efficacité de la ventilation dans les incendies, mais qui a aussi permis de faire apparaître certains détails particuliers comme l'apparition potentiel de phénomènes thermiques comme l'embrassement généralisé éclair.

C'est grâce à la précision de cet essai, et bien que réalisé dans des conditions réelles, que LEBEY a pu réaliser une première vérification de la nouvelle méthode que nous proposons, méthode qui sera détaillée dans toute la suite de ce travail.

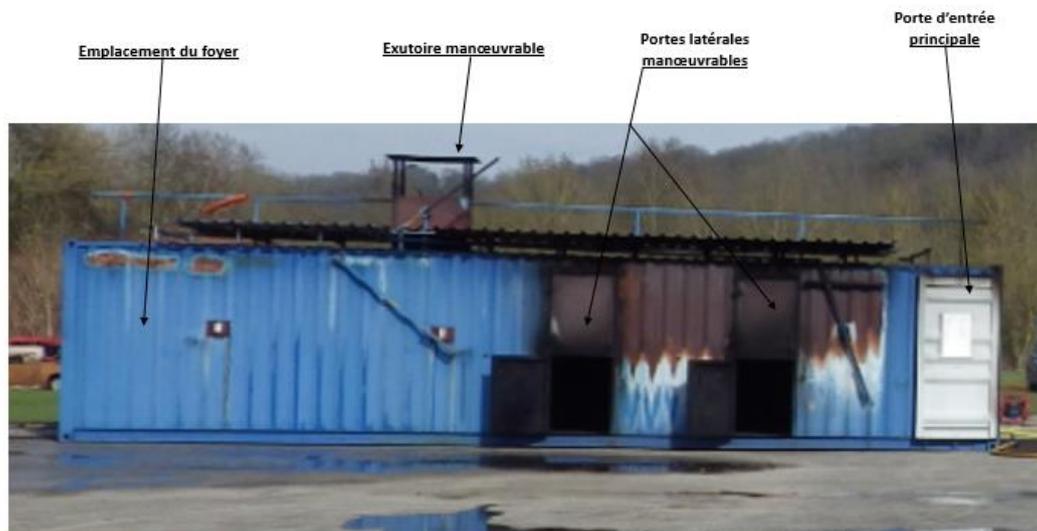




**Figure 2. 4:** Photos d'époque de l'expérimentation

« Photos d'époque. En haut, une partie de la charge combustible de la pièce avant la mise à feu. En bas, l'effet de la ventilation opérationnelle repoussant vers l'extérieur l'effet de l'embrassement généralisé éclair. »

## 4.2 Etude de l'évolution du feu dans un caisson d'entraînement



*Figure 2. 5: Caisson d'entraînement des sapeurs-pompiers*

Le caisson d'entraînement (Figure 2.7) est un container dans lequel des reproductions de feu de compartiment sont réalisées afin de permettre aux sapeurs-pompiers en formation (Figure 2.8) de s'entraîner à gérer les différentes situations auxquelles ils vont devoir être confrontés lors leurs interventions de lutte contre les feux de compartiments et ainsi maîtriser les différentes techniques d'attaque.



*Figure 2. 6: Sapeurs-pompiers en formation de maîtrise des différentes techniques de lance*

L'objectif de base de ces entraînements est de reproduire certains phénomènes dangereux afin de permettre aux pompiers de multiplier les manœuvres et d'avoir une bonne lecture du

feu qui leur permettra par la suite de connaître les signes annonciateurs de chaque phénomène thermique.

En ce qui nous concerne, nous avons eu une collaboration avec les sapeurs-pompiers de Seine Maritime. Nous avons donc pu effectuer nos essais au centre de formation le SDIS 76 qui se situe à Tourville-la-Rivière.

Nous avons réalisé certaines configurations dans un caisson d'entraînement que nous avons équipé de plusieurs thermocouples afin d'enregistrer les températures tout au long de l'intervention des pompiers. Différentes manœuvres ont été effectuées tel que l'ouverture des portes ou de l'exutoire par exemple qui entraîne de puissantes flammes lorsque les fumées sont sous pression et se mélangent à l'air frais. En effet, le caisson permet de reproduire remarquablement les feux de bâtiment. La simulation y est idéale.

### **4.3 Étude de la propagation des fumées dans un couloir**

La configuration du dispositif expérimental dans lequel nous avons effectué la plus grande partie des essais qui ont permis l'analyse détaillée, se présente sous forme d'un couloir de longueur 6m, de largeur 1m et de hauteur 1,70m.

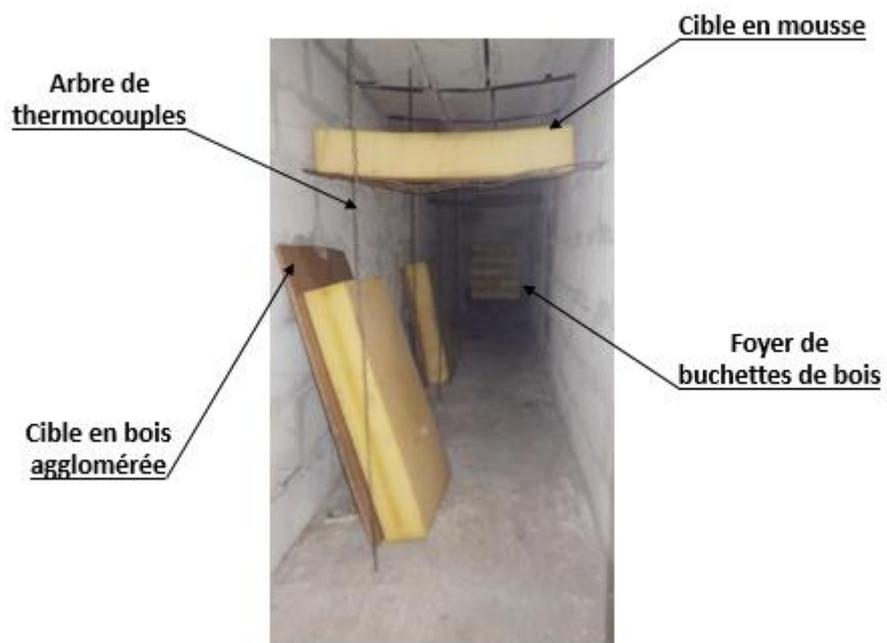
Cette installation expérimentale avait été construite par LEBEY et LAMBERT [24] en 2009 pour entreprendre ce type d'étude spécifique sur l'analyse des phénomènes précurseurs aux phénomènes thermiques dangereux que peuvent produire les fumées, phénomènes précurseurs qui peuvent être détectés dans l'analyse des signaux de températures.

Pour l'étude que nous présentons, ici ils ont choisi de doubler la longueur de ce couloir qui, à l'origine ne faisait que 3m ; ceci de manière à voir si dans des signaux de températures plus atténués, il est encore possible d'obtenir des informations significatives.

Dans ce couloir un seul foyer à la fois est utilisé. Il est choisi de la même forme que le foyer utilisé dans la configuration précédente, c'est-à-dire, des buchettes de bois étagées croisées. Ce foyer est placé suivant l'axe longitudinal du dispositif de manière à ce que les parois latérales se comportent de la même manière vis-à-vis du feu et au fond du couloir de sorte que les fumées se propagent vers la sortie du couloir.

Plusieurs essais ont été réalisés dans ce dispositif, du plus simple où l'on a suivi seulement la combustion du foyer, au plus complexe où l'on a rajouté au foyer plusieurs foyers cibles de taille et composition différentes comme indiqué ci-dessous (Figure 2.9).

Chaque essai a été répété au minimum 3 fois avec les mêmes conditions afin d'analyser sa reproductibilité.



*Figure 2. 7: Image représentant le couloir expérimental*



*Figure 2. 8: Image représentant le couloir expérimental avec l'ouverture principale réduite*

Pour l'ensemble des cas étudiés dans ce dispositif, il a été utilisé 96 thermocouples de type K de 0.5 mm de diamètre placés dans des le long du couloir, enregistrés et analysé avec le logiciel LabView de National Instrument.

Plus de détail sur l'emplacement des cibles et des thermocouples dans le chapitre 4.

L'objectif principal de cette manip est de nous permettre d'étudier la propagation des fumées dans les espaces étroits semi-confinés. L'utilisation des cibles a pour but d'étudier la propagation du feu en présence d'objets combustibles proches du foyer ou la simulation de la création de nouveau foyer par la propagation des fumées.

## **5 Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de justifier les choix que nous avons faits concernant l'instrumentation et les dispositifs expérimentaux utilisés.

Après avoir présenté les moyens mis en œuvre pour ce travail, les chapitres suivants vont expliquer en détail comment il est possible d'analyser les risques des phénomènes thermiques en utilisant l'analyse des fumées qui se déplacent dans le tunnel.

Dans un premier temps, (Ch.3) nous allons vérifier l'efficacité de la méthode « A » qui concerne l'étude des températures de fumées par comparaison de deux moyennes mobiles dans le passé en l'appliquant sur le cas d'incendie de chambre d'hôpital, et sur le cas simplifié de l'évolution du feu dans le caisson d'entraînement des sapeurs-pompiers.

Dans un second temps, (Ch.4) nous allons vérifier l'efficacité de la méthode « B » de comparaison des moyennes mobiles dans l'espace dans la détection et localisation du danger, en l'appliquant sur les cas d'études de la propagation des fumées dans le couloir expérimental dont la reproductibilité a été prouvée.

\* \* \*





## **Chapitre 3**

**Détection en temps réel des dangers  
générés par les fumées lors de  
l'attaque des feux de compartiments**

**- Méthode A -**

**Comparaison de deux moyennes  
mobiles calculées au même endroit à  
deux instants différents dans le passé**

## Présentation

Ce chapitre est consacré à l'analyse de la détection de risque par comparaison de deux moyennes mobiles. Cette première méthode consiste à comparer deux moyennes mobiles calculées à deux distances différentes dans le passé des températures de fumées d'un seul point de l'espace (emplacement du thermocouple).

Il présente, brièvement, dans un premier temps des généralités sur les différentes méthodes de prédiction par analyse de séries temporelles. Par la suite nous nous intéresserons plus en détail à la méthode d'analyse par comparaison de deux moyennes mobiles dans le passé. Deux grandes parties de ce chapitre sont dédiées à l'application de cette méthode sur un cas simple et un autre plus complexe afin d'étudier son efficacité sur le terrain.

### 1 Les séries temporelles :

La prédiction par analyse des séries chronologiques est un défi dans de nombreux domaines. En finance, on prévoit les cours boursiers ou encore les indices boursiers ; les spécialistes du traitement des données prévoient la circulation de l'information sur leurs réseaux; les producteurs d'électricité prévoit la consommation électrique futur en utilisant les données de la consommation passée ou actuelle.

#### 1.1 Classification des différentes méthodes de prédiction :

De nombreuses méthodes existent, y compris des méthodes linéaires telles qu'ARMA<sup>6</sup>, et des méthodes non linéaires telles que celles utilisées dans le domaine de l'apprentissage automatique [30].

Les modèles ARMA (Modèles Autorégressifs et Moyenne Mobile), sont les principaux modèles des séries temporelles.

Étant donné une série temporelle  $x_t$ , le modèle ARMA est un outil pour comprendre et prédire, éventuellement, les valeurs futures de cette série. Le modèle est composé de deux parties : une part autorégressive (AR) et une part moyenne-mobile (MA).

L'ensemble de ces méthodes tentent de construire un modèle du processus à prévoir. Le modèle est utilisé sur les dernières valeurs de la série pour prédire les futures.

La difficulté commune à toutes les méthodes est la détermination d'informations suffisantes et nécessaires pour une bonne prédiction.

Si l'information est insuffisante, les prévisions seront mauvaises. Et si l'information est inutile, la modélisation sera difficile à interpréter ou même faussée. Parallèlement à cette détermination, un modèle de prédiction approprié doit être sélectionné.

Afin de comparer différentes méthodes de prédictions plusieurs compétitions sont organisées, nous pouvons en citer les suivantes : Le concours Santa Fe [31], le concours CATS Benchmark [32] et le concours ESTSP'07 [33].

---

<sup>6</sup> ARMA : AutoRegressif - Moving Average Models

Le but de ces compétitions est la prédiction de valeurs futures d'un temps donné (3 à 100 valeurs à prédire). A la suite de la publication des résultats, les vraies valeurs obtenues sont comparées avec les valeurs prédites par les différents modèles de prédiction, ce qui permet de choisir le modèle le plus efficace selon le cas étudié.

## **1.2 Exemple d'un concours :**

Nous présentons comme exemple le concours ESTSP'08 (European Symposium on Time Series Prediction) qui s'est déroulé à Porvoo, en Finlande, en septembre 2008.

L'objectif du concours ESTSP'08 était de prédire l'avenir de trois séries chronologiques de domaines différents : L'environnement, la charge électrique et le trafic Internet. La longueur et la période d'échantillonnage des séries temporelles étaient différents aussi. Pour que l'ensemble des participants ait la même chance, les origines des trois séries chronologiques ont été gardées secrètes jusqu'à la fin de la compétition.

Vingt ensembles de prédictions ont été soumis à la compétition. Les différentes données ainsi que les résultats obtenus sont expliqués en détail dans l'article de la référence [34].

Plusieurs conférences ont été organisées lors du concours ESTSP'08 et AKRR'08 (Adaptive Knowledge Representation and Reasoning) [35].

Ces dernières avaient comme thème d'intérêt commun l'anticipation, c'est-à-dire, comment un agent prend des décisions basées sur des prédictions et des attentes sur l'avenir. L'anticipation est un concept important lorsque l'on considère des systèmes cognitifs naturels complexes [36].

## **2 Les moyennes mobiles :**

### **2.1 Définition générale :**

La moyenne mobile est utilisée dans l'analyse de données, plus précisément des séries temporelles, où elle permet de lisser les courbes en supprimant les fluctuations tout en soulignant leurs tendances à long terme.

Le calcul de la moyenne mobile se fait en continu à chaque fois qu'une nouvelle donnée intègre la série elle remplace celle qui la précédait, l'ensemble des données est ainsi recalculé ce qui explique la mobilité de la moyenne.

En mathématique, la moyenne mobile est représentative de la notion de filtre linéaire qui s'applique aussi bien à des données temporelles (en traitement du signal par exemple) qu'à des données spatiales (en traitement d'image).

En physique, elle représente un filtre passe-bas utilisé dans le traitement du signal en acoustique.

La moyenne mobile est également connue pour être très utilisée dans le domaine financier en particulier dans l'analyse technique et la prévision des cours boursiers. Sa facilité d'utilisation et d'interprétation en font un outil très prisé des traders.

Nous la retrouvons aussi dans d'autres domaines, comme par exemple la distribution d'électricité ou elle permet de détecter les anomalies et prévenir les accidents [37], ou encore en probabilité et ingénierie mécanique dans l'étude de la fatigue sous charge [38].

## 2.2 Calcul de la moyenne mobile des températures :

Dans notre étude, les relevées en continu des températures en différents endroits constituent des séries temporelles. Il existe différentes formules pour exprimer la moyenne mobile.

L'équation de base s'écrit sous la forme suivante :

$$\bar{T}(i, i - d) = \frac{1}{(i) - (i - d) + 1} \sum_{k=i-d}^{k=i} T(t_i)$$

Dans ce qui suit, nous allons opter pour la forme simplifiée de calcul de la moyenne mobile qui s'écrit comme ainsi :

$$\bar{T}(i, N) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} T(t_{i-k})$$

Où :

$\bar{T}$  : La moyenne mobile de la température

$t$  : L'instant auquel la température a été mesurée

$i$  : L'indice de l'instant ( $t$ )

$d$  : La distance dans le passé

$N$  : Le nombre de valeurs de l'intervalle de calcul

$T$  : La température prélevée à l'instant ( $t_{i-k}$ )

La moyenne mobile des températures à 15 secondes dans le passé sera la valeur moyenne des températures calculées sur 15 secondes à partir des données prélevées.

Ainsi pour une fréquence de mesure de 10 Hz le N sera égal à 151 points.

## 2.3 Calcul du retard entre la courbe de température et sa moyenne mobile :

Nous considérons que la température est une fonction affine du temps qui s'écrit sous forme de :

$$T_i = at_i + b$$

La moyenne mobile en  $t_i$  sur N points est définie comme suit :

$$\bar{T}_{i,N} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} T_{i-k}$$

Nous avons :  $T_i = at_i + b = ai\Delta t + b$

Et  $T_{i-k} = at_{i-k} + b = a(i-k)\Delta t + b = ai\Delta t + b - ak\Delta t$

$$T_{i-k} = T_i - ak\Delta t$$

$$\Delta t = 1/f$$

$\Delta t$  : Intervalle de temps entre deux points de mesure pour une fréquence constante.

$f$  : fréquence de l'acquisition.

Donc la moyenne mobile s'écrit aussi sous forme de :

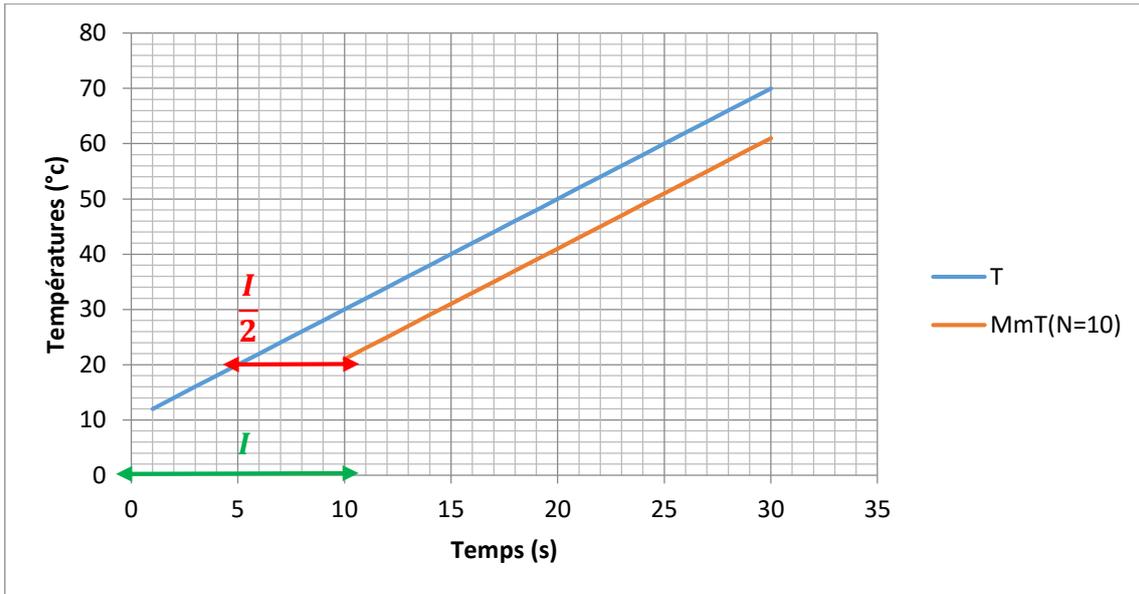
$$\begin{aligned}\bar{T}_{i,N} &= \frac{1}{N} \left[ \sum_{k=0}^{N-1} T_i - a\Delta t \sum_{k=0}^{N-1} k \right] \\ \bar{T}_{i,N} &= \frac{NT_i}{N} - \left( \frac{a\Delta t}{N} \times \frac{N}{2} (N-1) \right) \\ \bar{T}_{i,N} &= T_i - a\Delta t \left( \frac{N-1}{2} \right)\end{aligned}$$

Sachant que l'intervalle de calcul est :  $I = \Delta t(N-1)$

$\bar{T}_{i,N}$  s'écrit ainsi :

$$\bar{T}_{i,N} = T_i - a \left( \frac{I}{2} \right)$$

Nous en concluons donc que la température moyenne d'ordre N à un instant  $t_i$  est définie par le signal retardé d'un demi-intervalle de calcul (Figure 3.1).



**Figure 3. 1:** La figure montre le retard d'un demi-intervalle entre la série de valeur de références en bleu et sa moyenne mobile d'ordre N=10 en rouge

#### 2.4 Comparaison de deux moyennes mobiles dans le passé

Les relevés de températures en différents endroits peuvent être analysés comme des séries temporelles sur lesquelles il est possible d'appliquer un certain nombre de lois qui permettent de prévoir l'occurrence de certains événements.

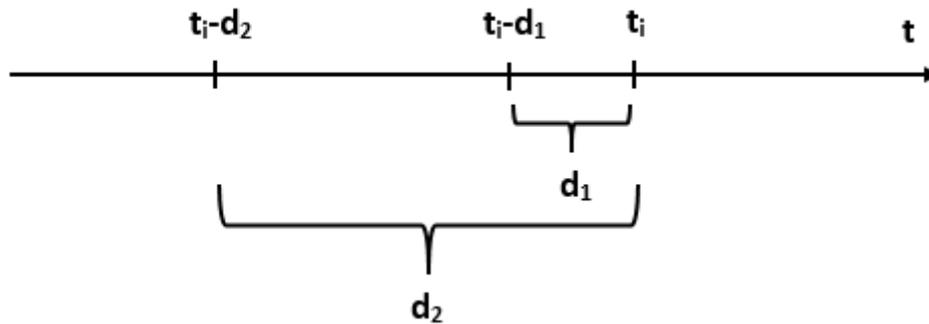
Deux calculs sont définis :

a) Une moyenne mobile à *court terme* :

$$\bar{T}(i, i - d_1) = \frac{1}{(i) - (i - d_1) + 1} \sum_{j=i-d_1}^{j=i} T(t_j)$$

b) Une moyenne mobile à *long terme* :

$$\bar{T}(i, i - d_2) = \frac{1}{(i) - (i - d_2) + 1} \sum_{j=i-d_2}^{j=i} T(t_j)$$



**Figure 3. 2:** Échelle de temps représentant les différents paramètres de calculs de la moyenne mobile dans le passé

Avec :

$d_1$  et  $d_2$  : distances en temps dans le passé

$t_i$  : la date à laquelle est calculée la moyenne mobile dans le passé ( $t_i - d_2 < t_i - d_1 < t_i$ )

Il en est de même pour le nombre de valeurs que comprend l'intervalle de calcul.  $N_1$  et  $N_2$  correspondent respectivement au nombre de valeurs que contient l'intervalle de calcul à court et à long terme ( $N_1 < N_2$ ).

Ainsi, les deux moyennes mobiles s'écrivent respectivement comme suit :

$$\bar{T}_{i,N_1} = T_i - a\Delta t \left( \frac{N_1 - 1}{2} \right)$$

$$\bar{T}_{i,N_2} = T_i - a\Delta t \left( \frac{N_2 - 1}{2} \right)$$

$$\bar{T}_{i,N_2} - \bar{T}_{i,N_1} = -a\Delta t \left( \frac{N_2 - 1}{2} - \frac{N_1 - 1}{2} \right) = -a\Delta t \frac{N_2 - N_1}{2}$$

Pour  $N_1 < N_2$  et  $\Delta t > 0$  :  $\bar{T}_{i,N_2} - \bar{T}_{i,N_1}$  prends le signe de  $-a$

Donc :

$$\text{Si } \bar{T}_{i,N_2} - \bar{T}_{i,N_1} > 0 \rightarrow a < 0 \quad (1)$$

$$\text{Et si } \bar{T}_{i,N_2} - \bar{T}_{i,N_1} < 0 \rightarrow a > 0 \quad (2)$$

(1) :  $\bar{T}_{i,N_2} > \bar{T}_{i,N_1} \rightarrow$  La valeur de référence est en décroissance

(2) :  $\bar{T}_{i,N_2} < \bar{T}_{i,N_1} \rightarrow$  La valeur de référence est en croissance

Nous en déduisons l'approche suivante :

1) Lorsque l'évolution de la moyenne mobile à *court terme* est au-dessus de la moyenne mobile à *long terme*, cela signifie que la grandeur concernée, la température, est croissante.

- 2) A l'inverse, lorsque l'évolution de la moyenne mobile à *court terme* est en-dessous de la moyenne mobile à *long terme*, cela signifie que la grandeur concernée, la température, est décroissante.

### 2.4.1 Application de l'approche sur différents signaux de température

Afin de vérifier l'approche de la position des moyennes mobiles par rapport à l'évolution des températures, nous allons l'appliquer sur des signaux de températures représentant les trois phases qui caractérisent le développement d'un incendie : croissance, plein développement et décroissance.

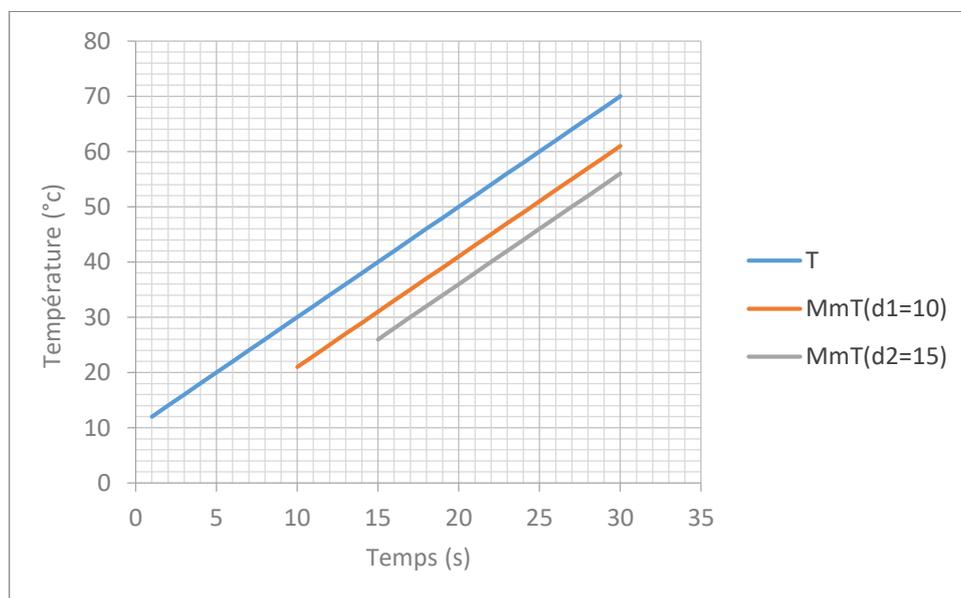
Nous avons donc choisi les signaux de configuration suivante :

- c) Signal monotone en croissance
- d) Signal monotone en décroissance
- e) Signal non monotone qui passe par les trois phases, croissante, plateau et décroissante.

#### 2.4.1.1 Signal monotone croissant :

Tout d'abord, nous avons défini un signal de température en croissance continue, ensuite, nous avons calculé sa moyenne mobile à 10s dans le passé qui correspond à la moyenne mobile à court terme, et une autre moyenne mobile à long terme calculée à 15s dans le passé.

La représentation graphique des résultats est dans la figure 3.3 ci-dessous.



**Figure 3. 3:** Courbe des températures en phase croissante et ses deux moyennes mobiles à 10s et 15s dans le passé

**T** : La température

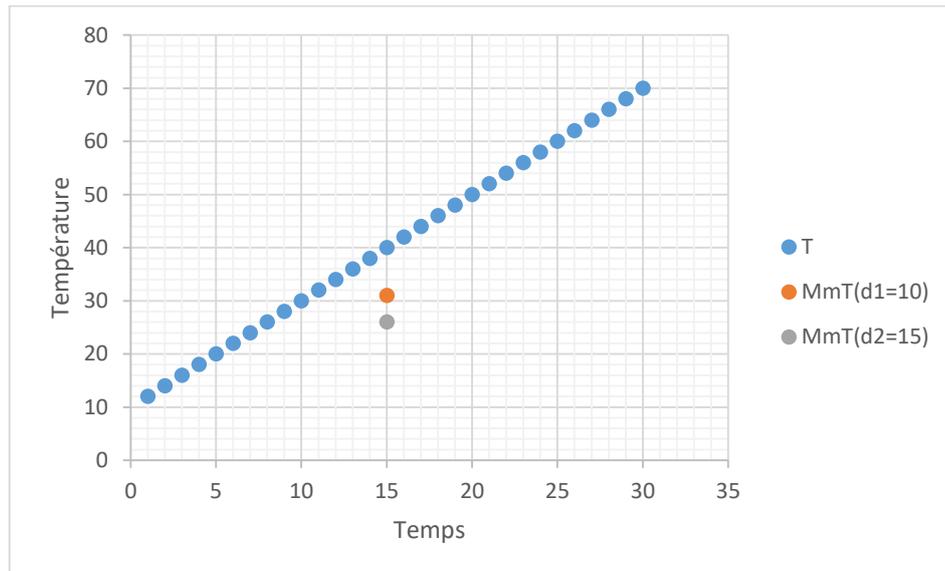
**MmT (N=10)** : la moyenne mobile à court terme calculée sur une période de 10s dans le passé

**MmT (N=15)** : la moyenne mobile à long terme calculée sur une période 15s dans le passé

La figure montre l'application de l'approche sur une valeur de référence en croissance et ses deux moyennes mobiles dans le passé.

Nous remarquons qu'effectivement, lorsque la valeur de référence est en croissance la moyenne mobile à court terme est au-dessus de la moyenne mobile à long terme.

Afin de comprendre le processus, nous allons faire apparaître les deux moyennes mobiles point par point comme indiqué dans les graphes suivants :

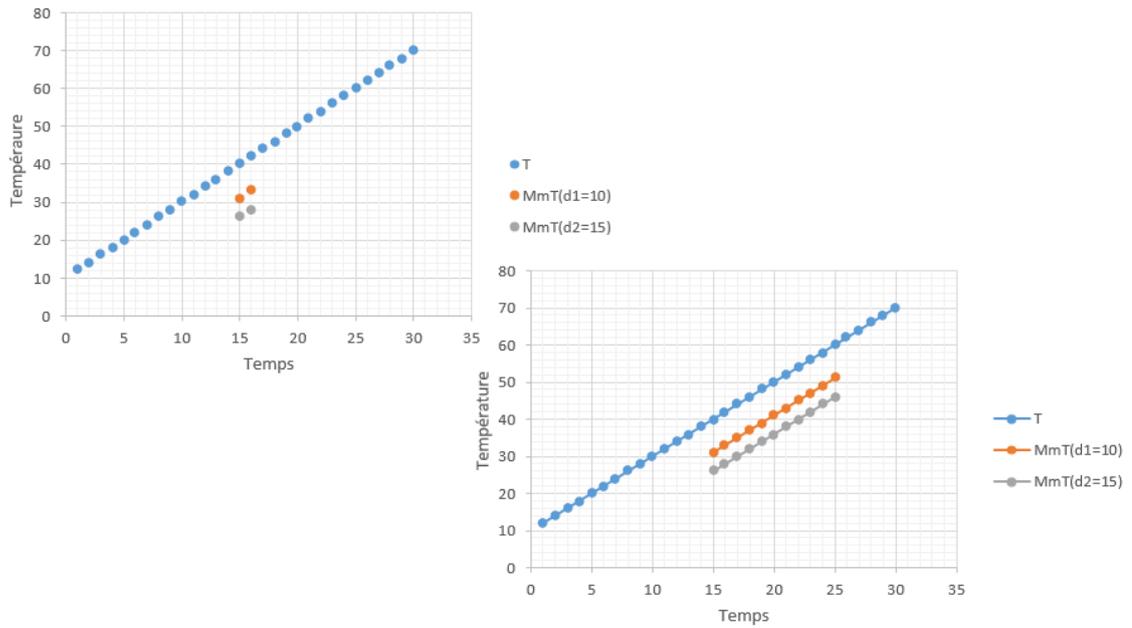


**Figure 3. 4:** Signal de température en croissance et deux points représentant la moyenne mobile à court et long terme à l'instant  $t_i=15s$

*Le point orange* : représente la moyenne mobile de distance de 10s dans le passé et calculée à l'instant  $t_i=15s$ . L'intervalle de calcul comprend 11 valeurs (N=11) car les données ont été prélevées à une fréquence de 1Hz.

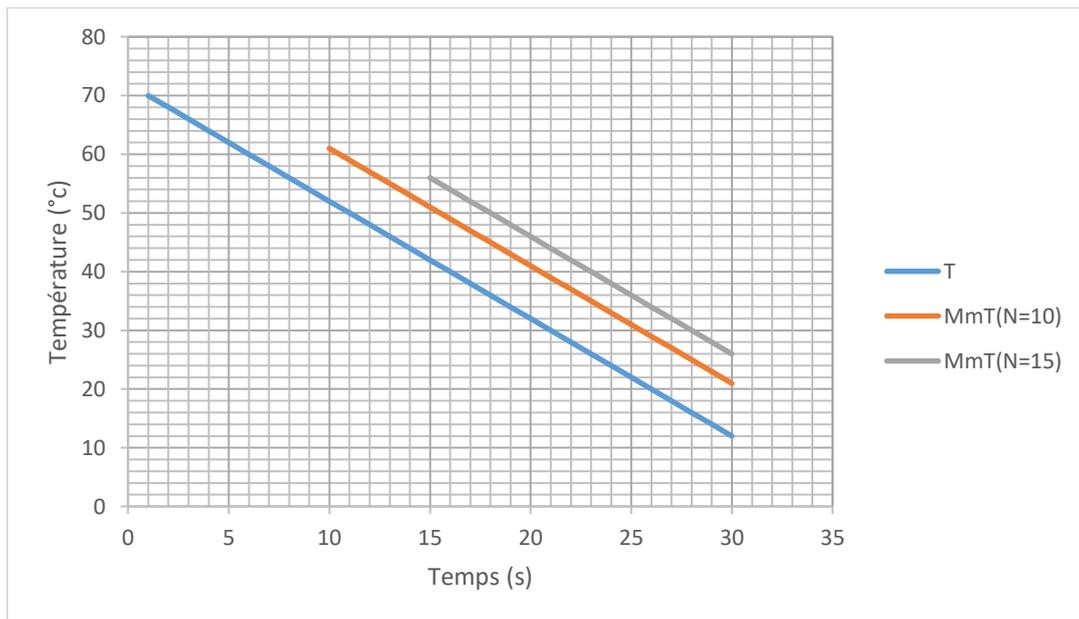
*Le point gris* : correspond à la moyenne mobile de distance de 15s dans le passé calculée à l'instant  $t_i=15s$ . L'intervalle de calcul est de 16 valeurs (N=16).

La suite de l'évolution des points est représentée dans les deux figures suivantes :



**Figure 3. 5:** Signal de température et ses deux moyennes mobiles à court (-10s) et à long (-15s) terme

### 2.4.1.2 Signal monotone décroissant :



**Figure 3. 6:** Courbe des températures en phase décroissante et ses deux moyennes mobiles à 10s et 15s dans le passé

La figure 3.6 montre l'application de l'approche sur une valeur de référence en décroissance qui, dans notre cas, est représentée par la température et ses deux moyennes mobiles décentrées dans le passé. Nous remarquons qu'effectivement, lorsque la valeur de référence est en décroissance la moyenne mobile à court terme est en-dessous de la moyenne mobile à long terme.

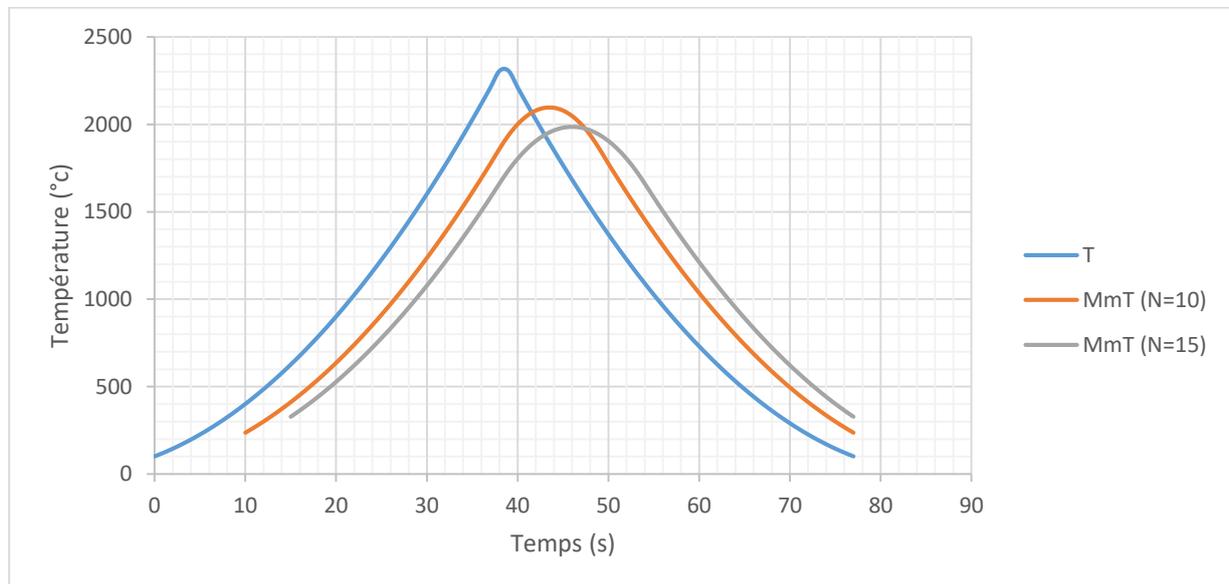
### 2.4.1.3 Signal non monotone

Notre but dans cette partie de l'étude est de vérifier la validité de l'approche sur une évolution non monotone.

Nous avons donc choisi d'appliquer l'approche en premier sur un cas simple d'une courbe de températures qui évolue en deux phases croissante et décroissante, pour ensuite l'appliquer aussi sur la phase plateau en deux cas suivi et non suivi par un accident thermique.

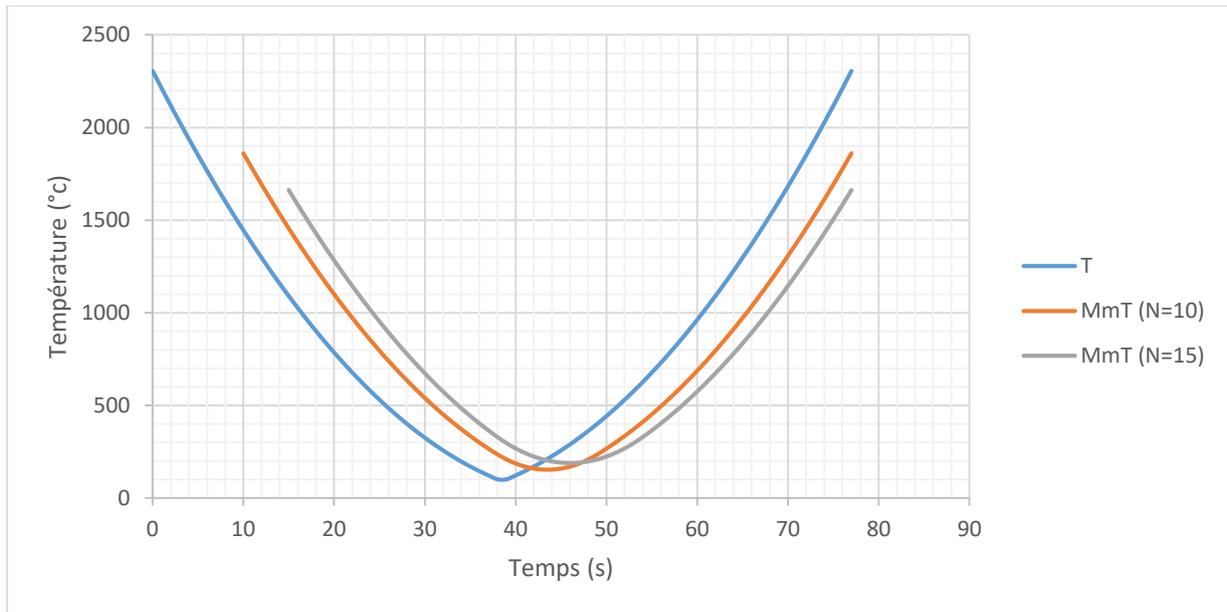
#### ▪ Courbes évoluant sur deux phases (croissante et décroissante)

Dans le premier graphe l'évolution commence par une hausse des températures jusqu'à atteindre un pic suivi par une décroissance. A l'inverse, dans le second graphe, c'est la chute des températures qui précèdent l'augmentation.



**Figure 3. 7:** Courbe de température évoluant en deux phases, croissante puis décroissante, et ses deux moyennes mobiles à 10s et 15s dans le passé

Le graphe ci-dessus, représente une évolution qui démarre par une hausse de température puis passe par un maximum ensuite chute en décroissance exponentielle. Dans le cas d'un incendie, la phase croissante pourrait représenter le déclenchement de l'incendie et la phase décroissance représente la chute des températures après l'intervention des sapeurs-pompiers ainsi nous représentons une phase de danger suivi par une phase sans risque où la situation est maîtrisée.



**Figure 3. 8:** Courbe des températures évoluant en deux phases, décroissante puis croissante, et ses deux moyennes mobiles à 10s et 15s dans le passé

La figure 3.8 représente un cas qui peut survenir lors de l'intervention des sapeurs-pompiers, quand, même après une "phase sécurisée" où les températures ont chuté, l'incendie redémarre. Cet évènement peut être causé par plusieurs phénomènes thermiques tels que l'explosion des fumées suite à l'ouverture d'une porte ou la ré-inflammation des fumées au contact de l'air dans une gaine de climatisation ou dans un couloir par exemple.

L'application de l'approche sur ces deux cas d'étude (Figures 3.7 et 3.8) nous montre encore une fois la validité de l'approche. En effet, même dans un cas de signal non monotone, nous remarquons toujours que quand les températures sont en croissance puis en décroissance les deux moyennes mobiles sont d'abord en dessous du signal étudié puis la moyenne mobile à long terme (N=15) croise la moyenne mobile à court terme et passe au-dessus. A l'inverse, lorsque les températures sont en baisse puis en croissance, les deux moyennes mobiles sont au-dessus du signal étudié, puis c'est la moyenne mobile à court terme qui passe au-dessus de la moyenne mobile à long terme.

Les croisements des moyennes mobiles à court terme et à long terme indiquent qu'un extremum a été atteint. Si la moyenne mobile à court terme devient supérieure à celle à long terme alors la température commence à croître.

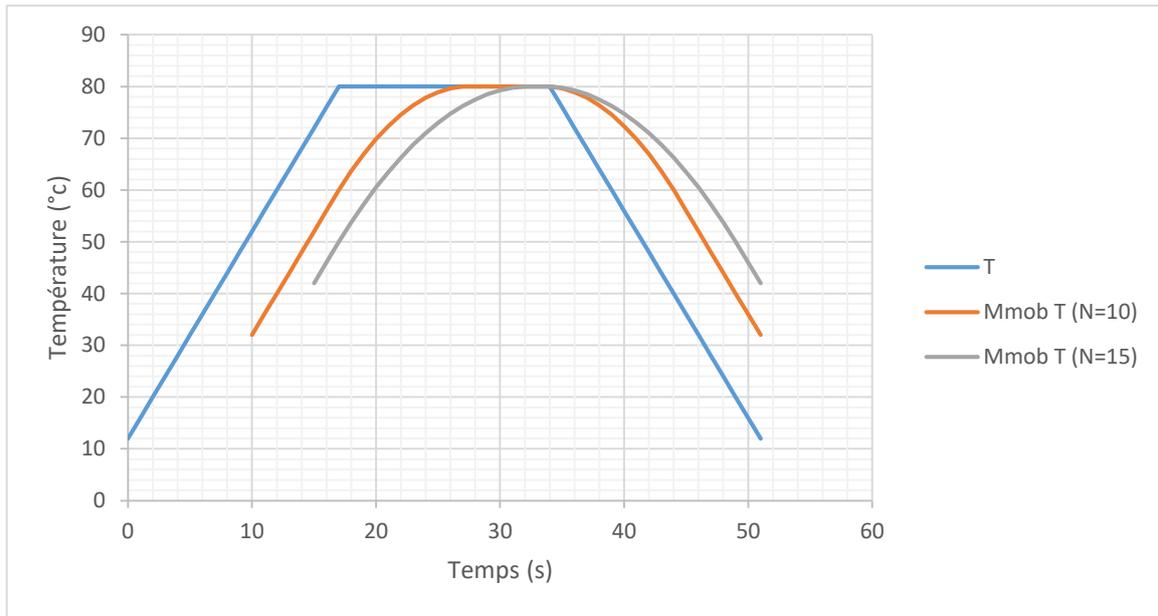
- **Etude de la phase plateau (cas de courbes évoluant sur trois phases)**

Dans l'évolution des températures lors d'un incendie, la phase plateau est une phase que l'on peut difficilement interpréter, car le signal brut stagne pendant un certain moment et on ignore s'il sera suivi d'une chute de températures ou si elles augmenteront brusquement chose qui arrive souvent lorsqu'on fait face à un accident thermique tel que le Flashover.

Vu le danger de ce phénomène nous avons décidé de nous intéresser de plus près à cette phase d'évolution en appliquant la méthode d'analyse par comparaison de moyennes mobiles sur deux exemples d'évolution des températures avec et sans accidents thermiques.

a) Évolution de températures sans accident thermique :

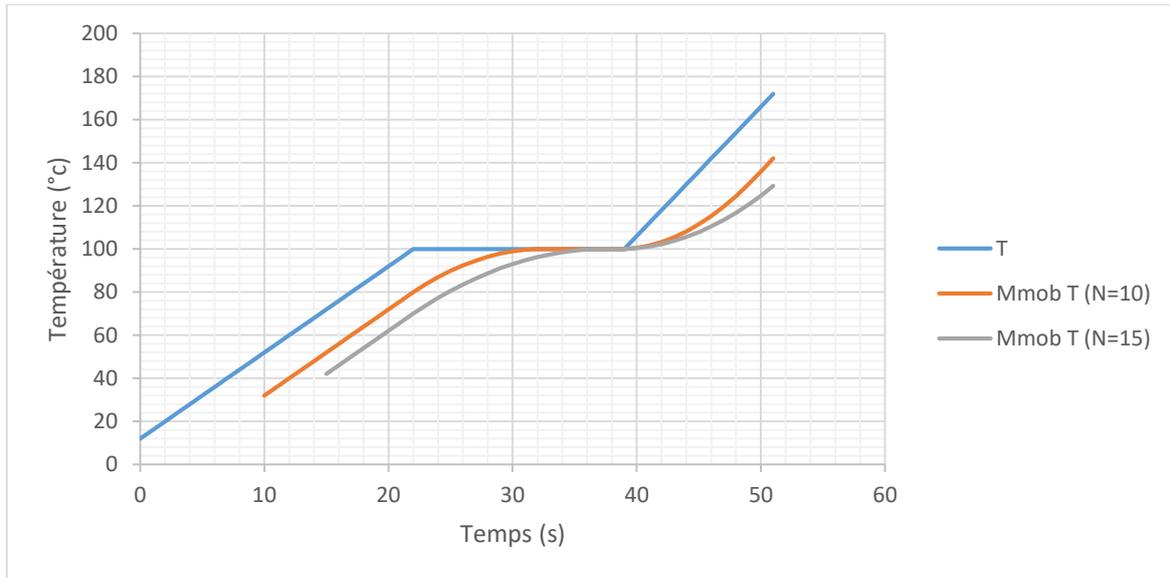
Ce cas dévolution pourrait correspondre à un cas d'incendie sans accident thermique, ainsi la phase croissante correspond au déclenchement de l'incendie suivi par les deux phases, plateau et décroissante, qui correspondent à l'intervention et à la maîtrise de la situation par les sapeurs-pompiers.



**Figure 3. 9:** Courbe des températures évoluant en trois phases (croissante, plateau puis décroissante) sans accident thermique et ses deux moyennes mobiles à 10s et 15 s dans le passé

L'analyse des deux phases, croissante et décroissante, de la courbe ci-dessus (Figure 3.9) nous donne le même résultat que celui que nous avons obtenu lors de l'analyse du cas de la courbe (Figure 3.7), nous remarquons que pour la phase croissante c'est la moyenne mobile à long terme qui est en dessous de la moyenne mobile à court terme et inversement pour la phase décroissante la moyenne mobile à long terme est au-dessus de celle à court terme.

b) Evolution de températures avec accident thermique :



**Figure 3. 10:** Courbe des températures évoluant en trois phases (croissante, plateau puis décroissante) avec accident thermique et ses deux moyennes mobiles à 10s et 15 s dans le passé

Comme nous l'avons déjà précisé plus haut, en temps réel la phase plateau est très difficile à déterminer, ainsi grâce à l'analyse par comparaison de deux moyennes mobiles quand ces deux dernières seront égales ou ne dépasseront pas quelques degrés de différence, nous saurons que nous sommes en phase plateau, et le plus important si l'on est à plus de 450°C cela pourrait être signe qu'un accident thermique pourrait se produire, ce qui laisserait le temps aux sapeurs-pompiers de prendre les précautions nécessaires à temps afin de s'en protéger.

#### 2.4.2 Bilan :

Tout d'abord, il est à rappeler que les cas traités ci-dessus dont le signal brut est aussi aplati que sa moyenne mobile ne sont que des exemples simplifiés afin d'expliquer le phénomène. En cas réel, le signal est beaucoup plus bruité de par sa dynamique ce qui explique la nécessité d'utiliser ses moyennes mobiles afin de faciliter son interprétation.

Cependant, cet amortissement de fluctuations peut être défavorable aussi car il en résulte une perte de signal causant ainsi une perte de l'information. Ainsi plus les moyennes mobiles sont calculées sur des temps longs et plus le retard sera conséquent et donc le signal sera très aplati et moins fiable. C'est pourquoi nous choisissons de travailler avec les moyennes mobiles dont la distance dans le temps est la plus petite et bien sûr la plus significative<sup>7</sup>.

#### 2.5 Méthode d'analyse et de "prédiction" des risques en temps réel :

L'étude qui a été menée par Lebey [39] a permis de montrer que l'évolution des températures des fumées est significative de l'évolution de la puissance d'un feu de compartiment.

Ainsi :

<sup>7</sup> Le choix de la distance la plus adaptée est traité en détail dans la partie « Application sur un cas réel »

- 1) Lorsque la température croît dans un incendie et qu'elle se trouve aux environs 450°C à 600°C (zone de l'auto-inflammation du monoxyde de carbone), il peut survenir un événement dangereux comme l'embrasement généralisé éclair ou l'explosion des fumées.
- 2) En revanche, lorsque la température décroît durablement et se situe en dehors de la zone de l'auto-inflammation du monoxyde de carbone (en dessous des 450°C), cela peut signifier que le contrôle du feu est obtenu et que la situation peut être maîtrisée.

Cette mise en relation entre les moyennes mobiles montre que ces dernières permettent non seulement de donner une bonne estimation de la situation du sinistre à l'instant  $t_i$ , mais aussi de prévoir des événements qui peuvent survenir dans un proche avenir. Ces événements sont de deux natures : soit la décroissance du feu, donc la mise en sécurité de la situation, soit la croissance des températures qui, si elle est importante et/ou brutale montre la possibilité de la présence d'un danger comme l'embrasement généralisé éclair.

Dans notre cas particulier de situations complexes que sont les feux de compartiments, l'identification de l'occurrence possible d'événements dangereux, voire catastrophiques, devient un élément important de sécurité pour les équipes d'intervention dans la mesure où cela peut leur permettre de se mettre en sécurité et donc de ne pas additionner d'autres victimes à celles déjà produites par le sinistre lui-même.

Il existe aussi d'autres méthodes de détection ou de prédiction de la propagation du feu et des fumées ou il a été utilisé des codes numériques [40, 41]. Ou encore l'analyse d'images ou vidéos thermiques [42, 43].

### **3 Analyse par comparaison de deux moyennes mobiles dans le passé : feux de compartiment avec un foyer de buchettes étagées croisées**

#### **3.1 Dispositif expérimental :**

Dans cette partie nous allons appliquer la méthode d'analyse par comparaison de deux moyennes mobiles des températures de fumées sur un cas simplifié de simulation d'incendie de compartiment.

L'expérience a eu lieu au centre de formation du SDIS 76 à Tourville La Rivière. Ce test a été réalisé dans un container maritime de 12m de long, 2,5m de large et 2,5m de hauteur, avec un exutoire manœuvrable, une porte d'entrée principale et deux ouvertures à mi-hauteur sur le côté gauche du caisson manœuvrables aussi. Le foyer était composé de 120 buchettes (60mm\*60mm\*600mm) en bois aggloméré étagées croisées d'une masse totale de 250kg.

La mesure des températures a été faite par 19 thermocouples de type K, placés comme suit (voir figure 3.12) : 5 thermocouples sur une verticale à l'entrée du caisson ; 5 autres au milieu du caisson ; 5 au niveau du foyer ; 1 thermocouple au plafond entre l'entrée et le milieu du caisson ; 1 thermocouple au plafond entre le milieu et le foyer ; et deux thermocouples à l'intérieur et à l'extérieur de l'exutoire. Les données ont été enregistrées et analysés avec le logiciel LabView de National Instrument.

La sécurité incendie a été assurée par les sapeurs-pompiers de Seine Maritime. Différentes actions ont été réalisées tout au long de l'essai :

- Ouverture et fermeture de l'exutoire
- Ouverture et fermeture des portes latérales
- Ouverture et fermeture de la porte arrière

Ces actions étaient destinées à reproduire certains phénomènes thermiques et accidents qui peuvent survenir lors des conditions réelles d'intervention contre un incendie de compartiment.

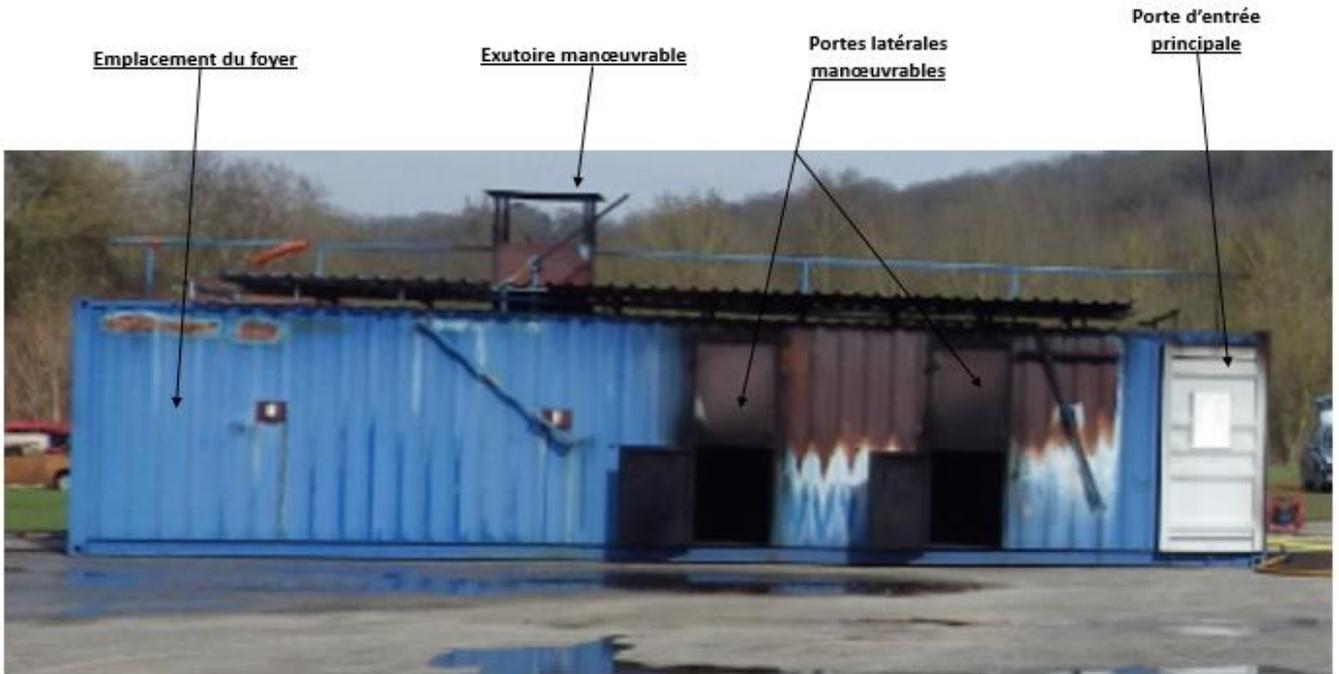
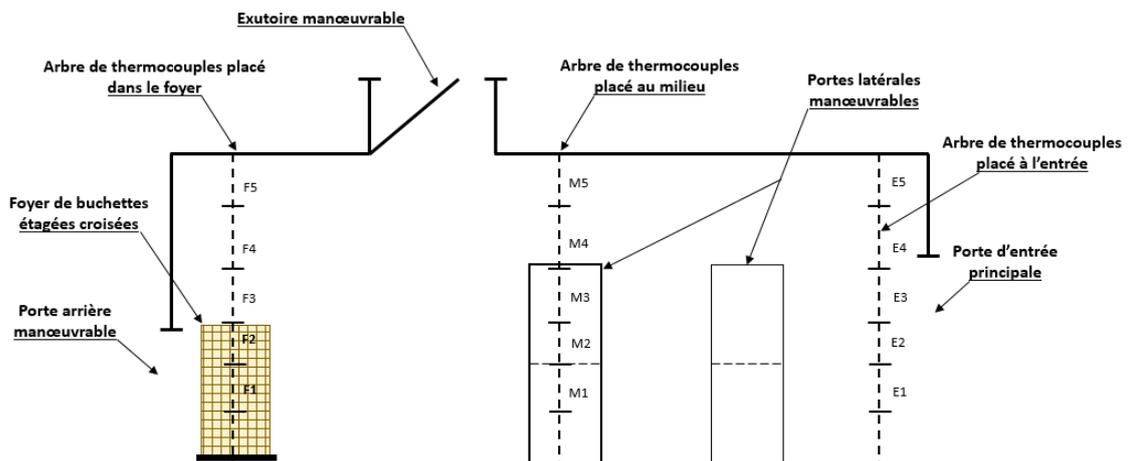
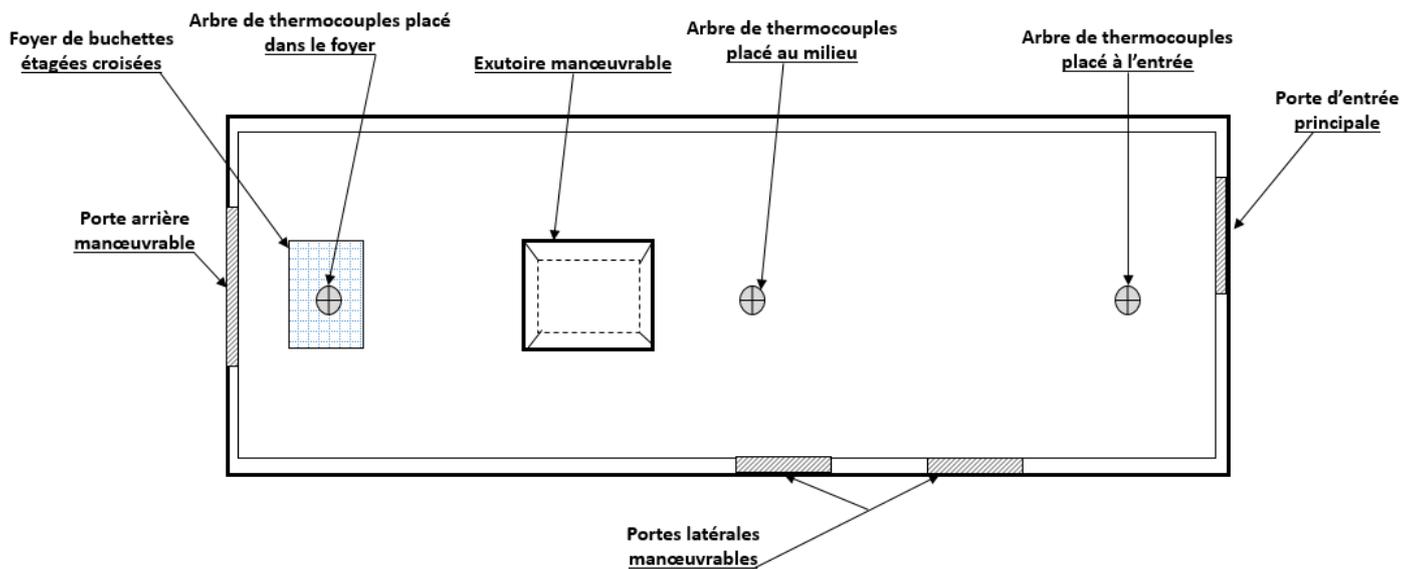


Figure 3. 11: Photo prise du côté gauche du container dans lequel a eu lieu l'expérience





**Figure 3. 12:**

- a) Schéma représentant une vue de côté du dispositif expérimental et l'emplacement de chaque thermocouple
- b) Schéma représentant une vue de dessus du dispositif expérimental avec l'emplacement des arbres de thermocouples

Les thermocouples étudiés sont placés comme suit :

**E** : Thermocouples placés à l'entrée du caisson.

**M** : Thermocouples placés au milieu du caisson.

**F** : Thermocouples placés dans le foyer.

**1** : Référence des thermocouples placés à 40 cm au-dessus du sol.

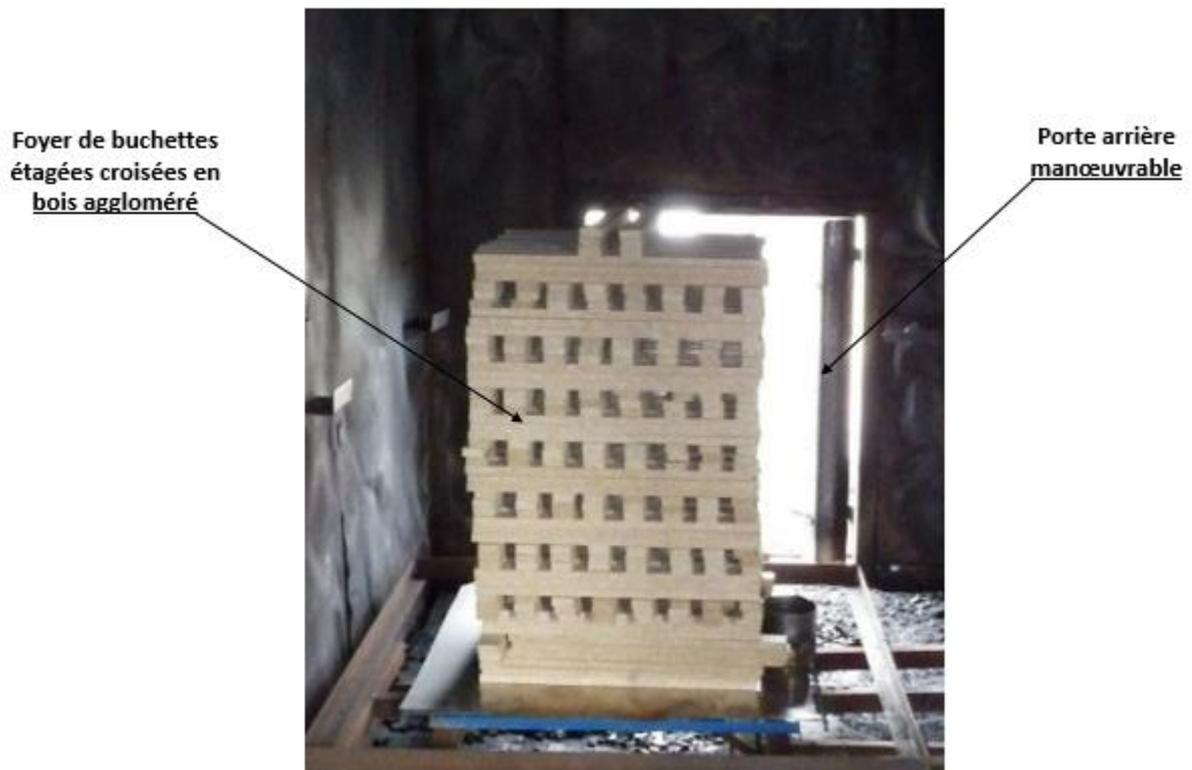
**2** : Référence des thermocouples placés à 70 cm au-dessus du sol.

**3** : Référence des thermocouples placés à 110 cm du sol.

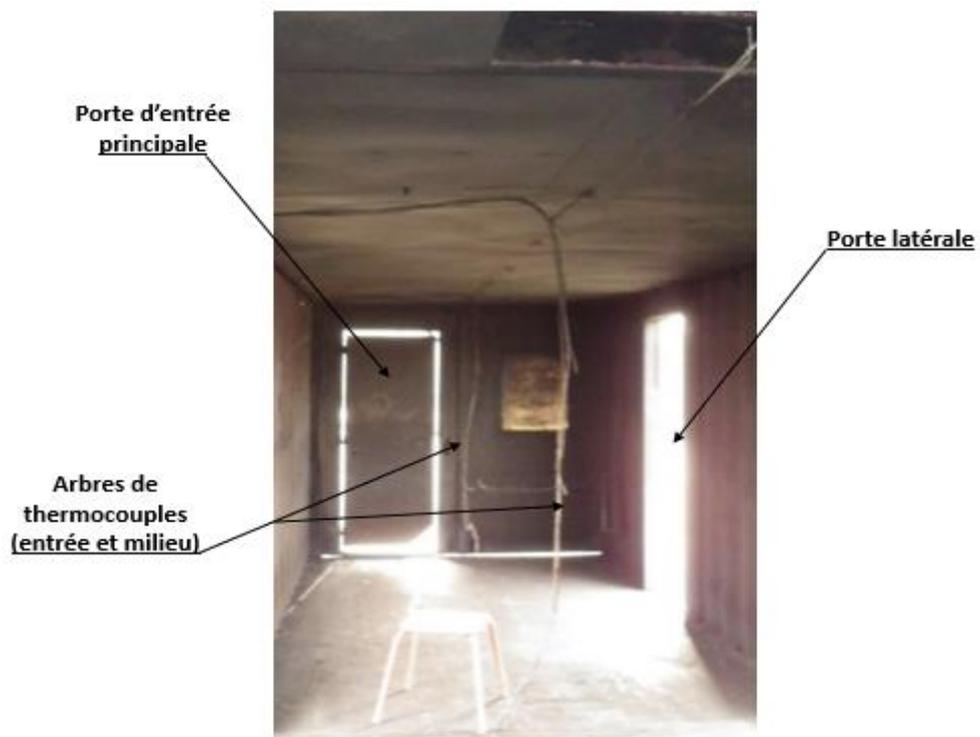
**4** : Référence des thermocouples placés à 170 cm au-dessus du sol soit 80 cm sous le plafond.

**5** : Référence des thermocouples placés à 230 cm au-dessus du sol soit 20 cm sous le plafond.

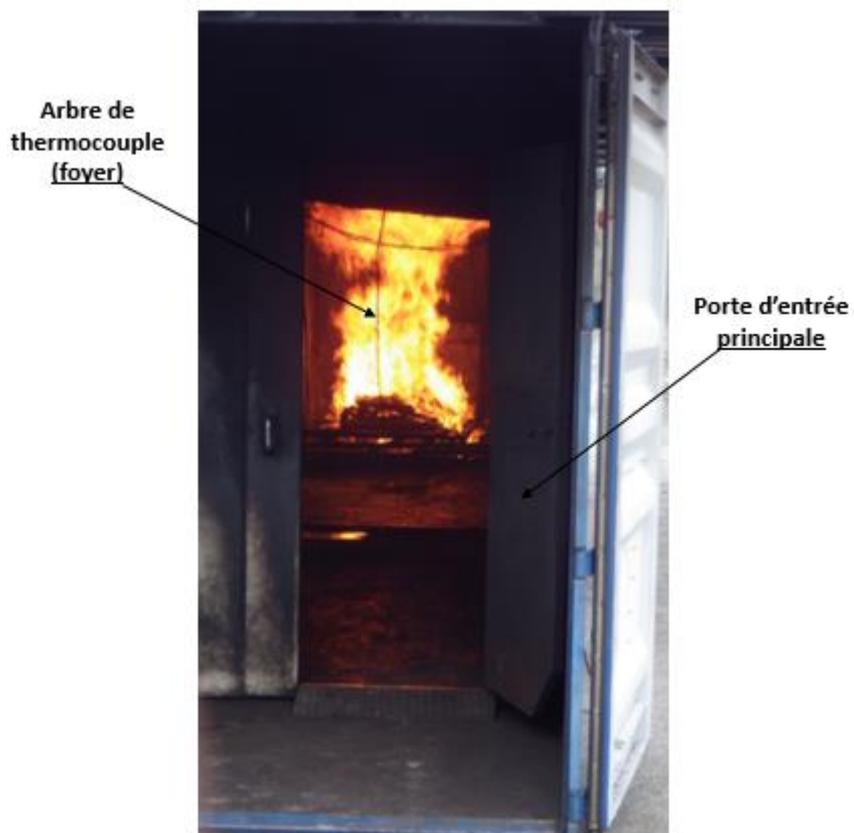
L'expérimentation en quelques images :



*Figure 3. 13: Photo du foyer prise à l'intérieur du caisson (120 buchettes en bois agglomérée étagées croisées)*



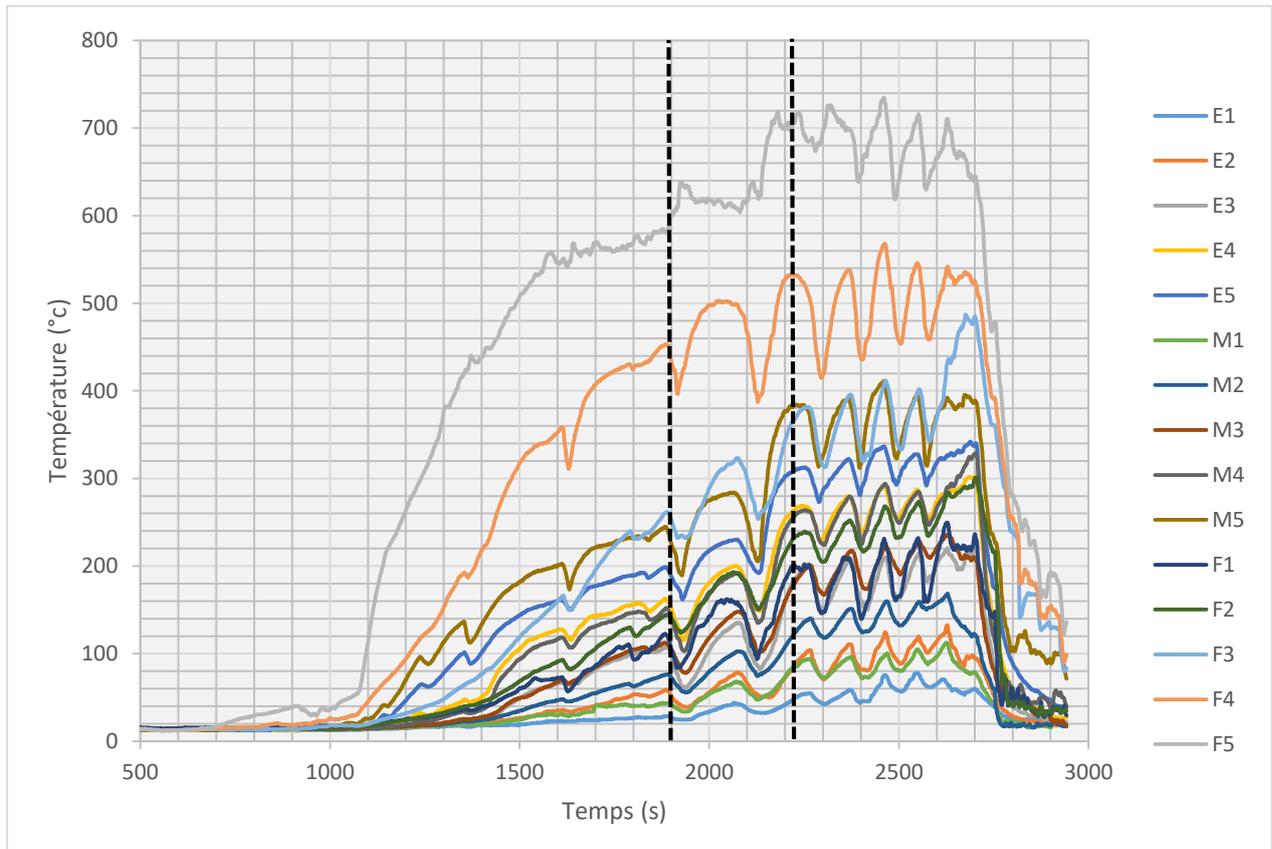
*Figure 3. 14: Photo de l'intérieur du caisson prise devant le foyer*



*Figure 3. 15: Vue de l'extérieur du foyer en flamme, photo prise en face de la porte d'entrée principale du caisson*

## 3.2 Analyse de la situation et « prédiction » de danger

### 3.2.1 Évolution des températures dans l'ensemble du local



**Figure 3. 16:** Ensemble des évolutions des températures de fumées mesurées dans le caisson tout au long de l'essai en fonction du temps

Les courbes de température indiquées sur la figure ci-dessus (Figure 3.16) représentent le comportement du foyer. Nous remarquons que tout au long de la combustion, les courbes de température à l'entrée et au milieu de l'espace ont des évolutions similaires à celles des courbes de température au niveau du foyer.

L'ouverture accidentelle ou manœuvrée d'une porte lors d'un incendie peut entraîner une forte activation de la combustion qui peut aller jusqu'à une explosion de fumées, dans le cas d'un foyer sous ventilé, comme elle peut permettre aussi l'évacuation des fumées chaudes est ainsi entrainer une baisse des températures.

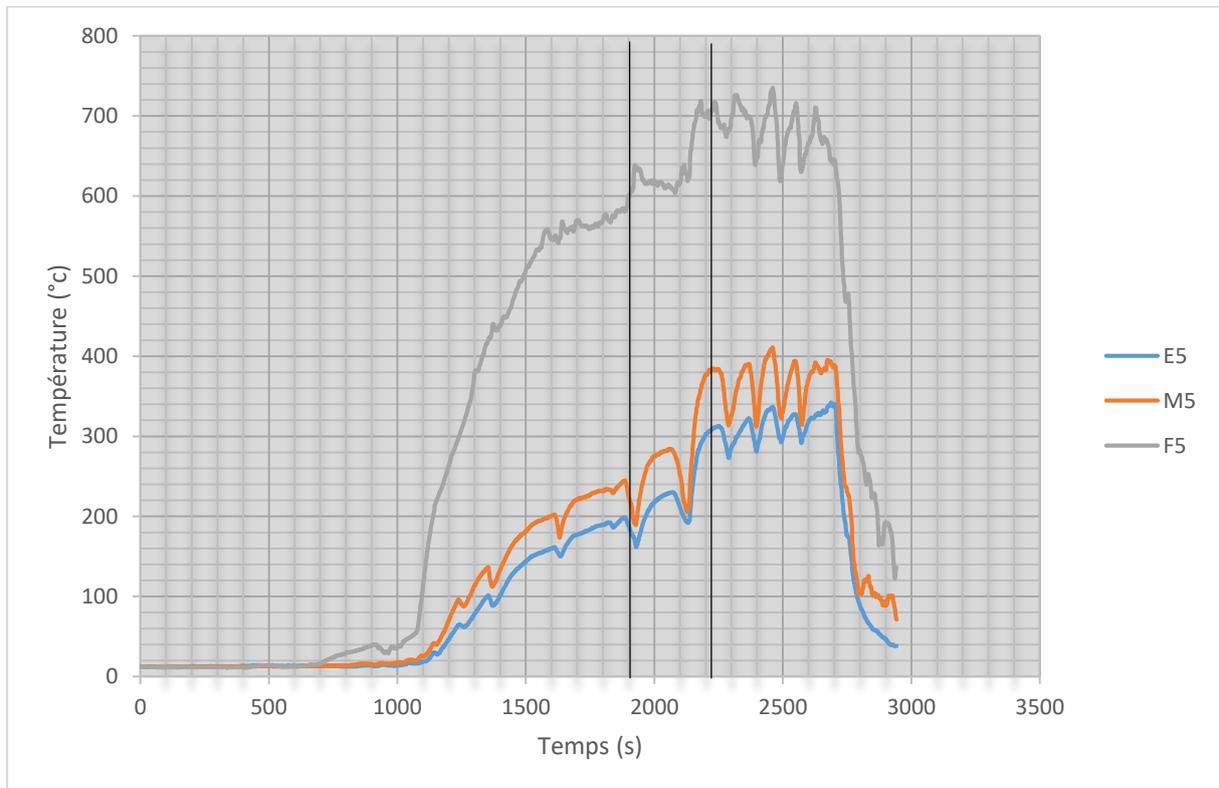
En effet, c'est ce qui explique les fluctuations qui apparaissent sur toutes les courbes entre 1900s et 2700s, cette période représente la phase où les actions (ouverture ou fermeture des portes et de l'exutoire) ont été réalisées.

Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser plus précisément à ce qui se passe entre 1900s et 2220s sur la courbe grise correspondant au point au-dessus du foyer, sous le plafond (zone délimitée par deux verticales en pointillés noirs sur la figure 3.16 ci-dessus). Cette phase est importante car elle représente un plateau suivi d'une hausse brusque de la température dépassant les 650°C, car c'est ce qui se produit lors d'un flash-over.

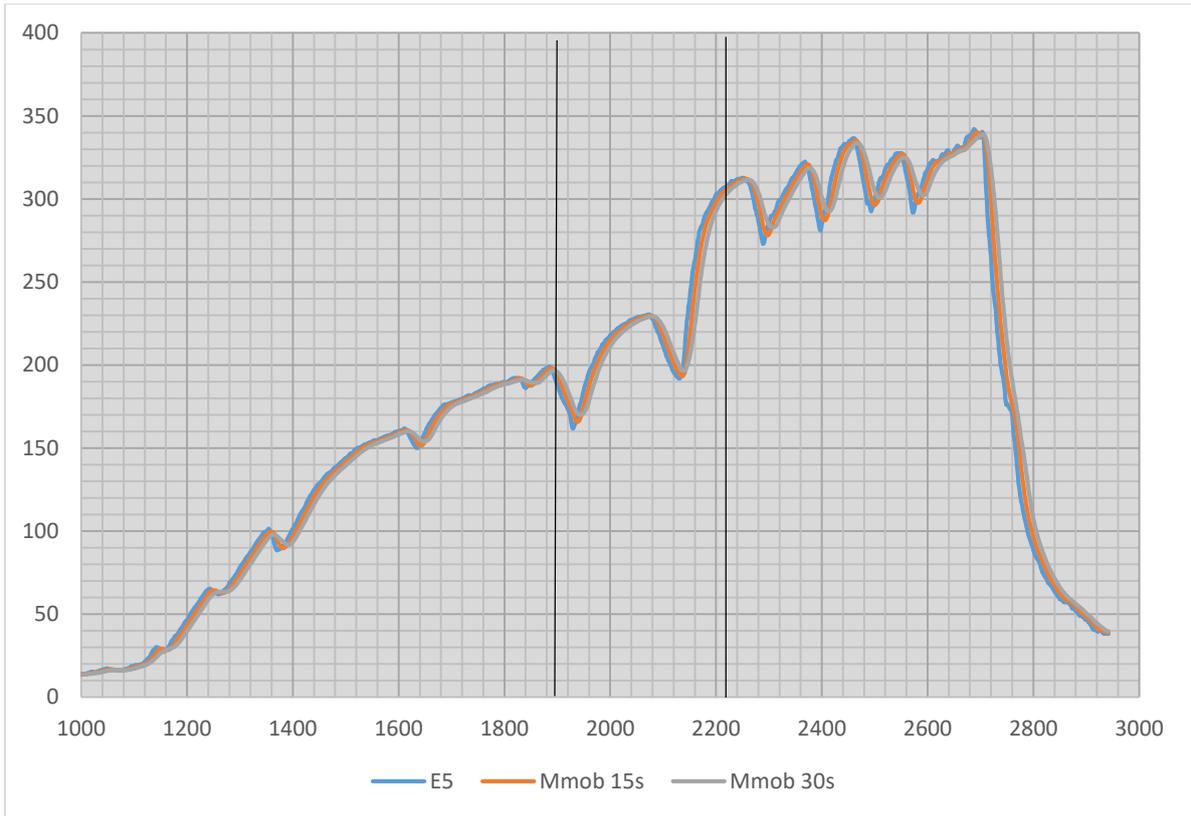
Cette étude sera menée sur les trois thermocouples sous plafond, à l'entrée au milieu et dans le foyer : E5, M5, F5.

### 3.2.2 Analyse d'un point fixe de l'espace à deux distances dans le passé

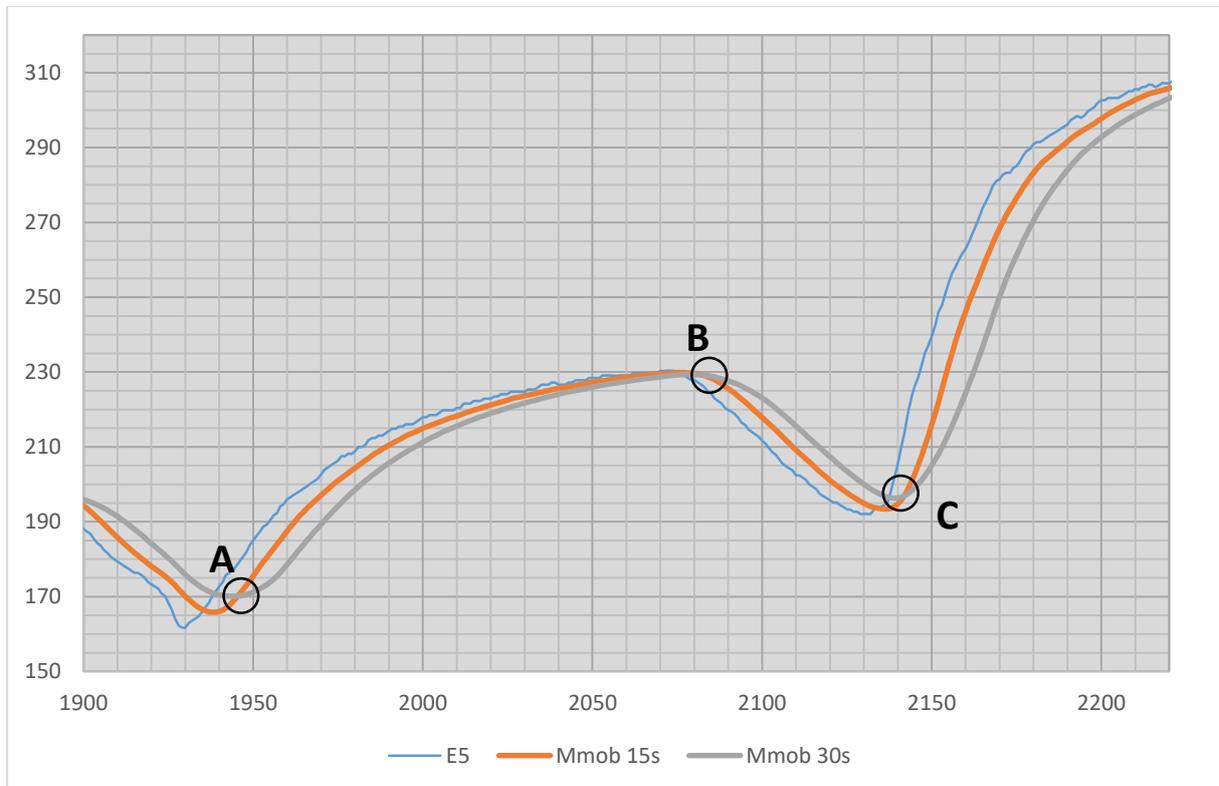
#### 3.2.2.1 Thermocouple placé l'entrée du caisson



**Figure 3. 17:** Evolutions des températures de fumées mesurées à l'entrée et au milieu du caisson et dans le foyer à différentes hauteurs en fonction du temps



**Figure 3. 18:** Evolution des températures mesurées par le thermocouple placé à 50cm en dessous du plafond à l'entrée du caisson et ses deux moyennes mobiles à 15s et 30s dans le passé



**Figure 3. 19:** Zoom sur la partie étudiée

**Du début jusqu'au point A :** La moyenne mobile à long terme (-30s) est au-dessus de la moyenne mobile à court terme (-15s), cela signifie que les températures sont en décroissance.

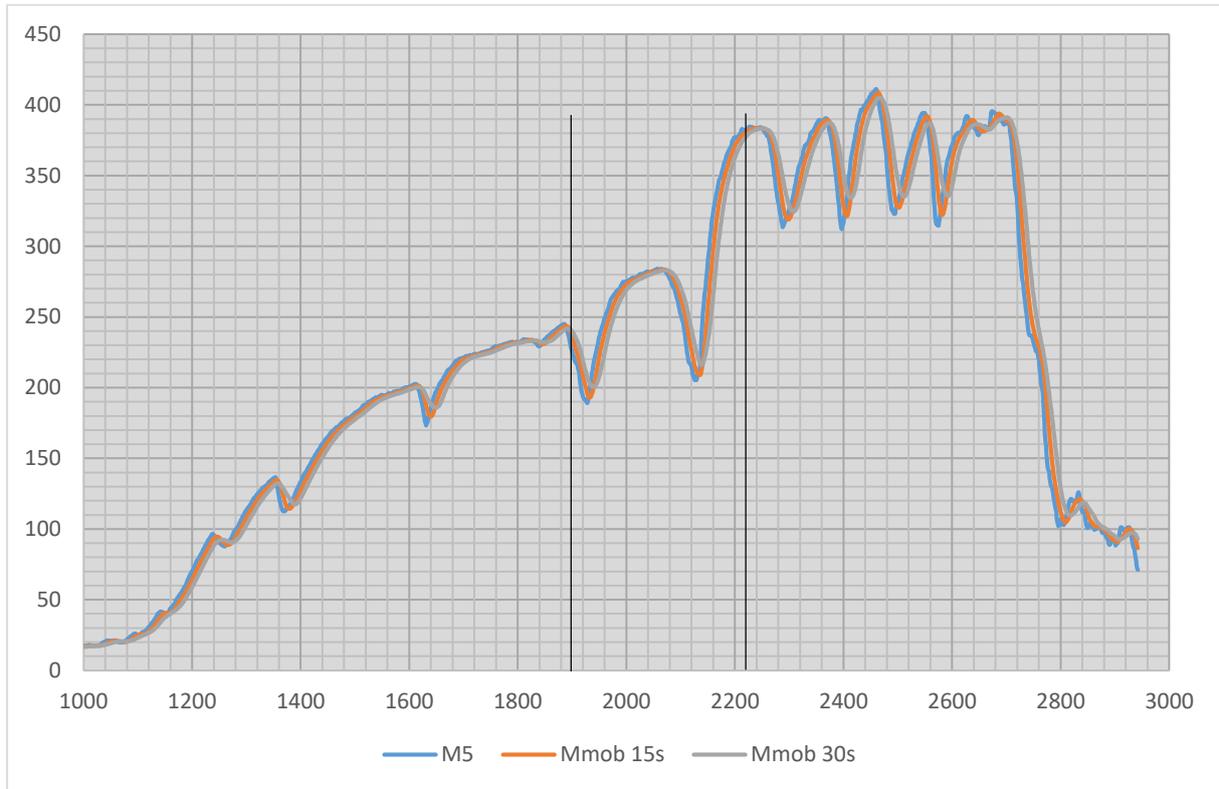
**Au point A :** La moyenne mobile à court terme commence à croître et croise puis dépasse la moyenne mobile à long terme (-30s) avec différence de température de 2°C à 5°C. Cela signifie que les températures ont commencé à croître mais pas subitement car la différence de température entre les deux moyennes mobiles ne dépasse pas les 5°C.

**Entre le point A et le point B :** Les deux moyennes mobiles continuent à croître, et à partir du point A la moyenne mobile à long terme se rapproche de la moyenne mobile à court terme jusqu'à ce les deux deviennent égales ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) et confirment ainsi le passage par une phase plateau, cela signifie que la situation n'est pas très stable et que la tendance de la courbe des températures va changer.

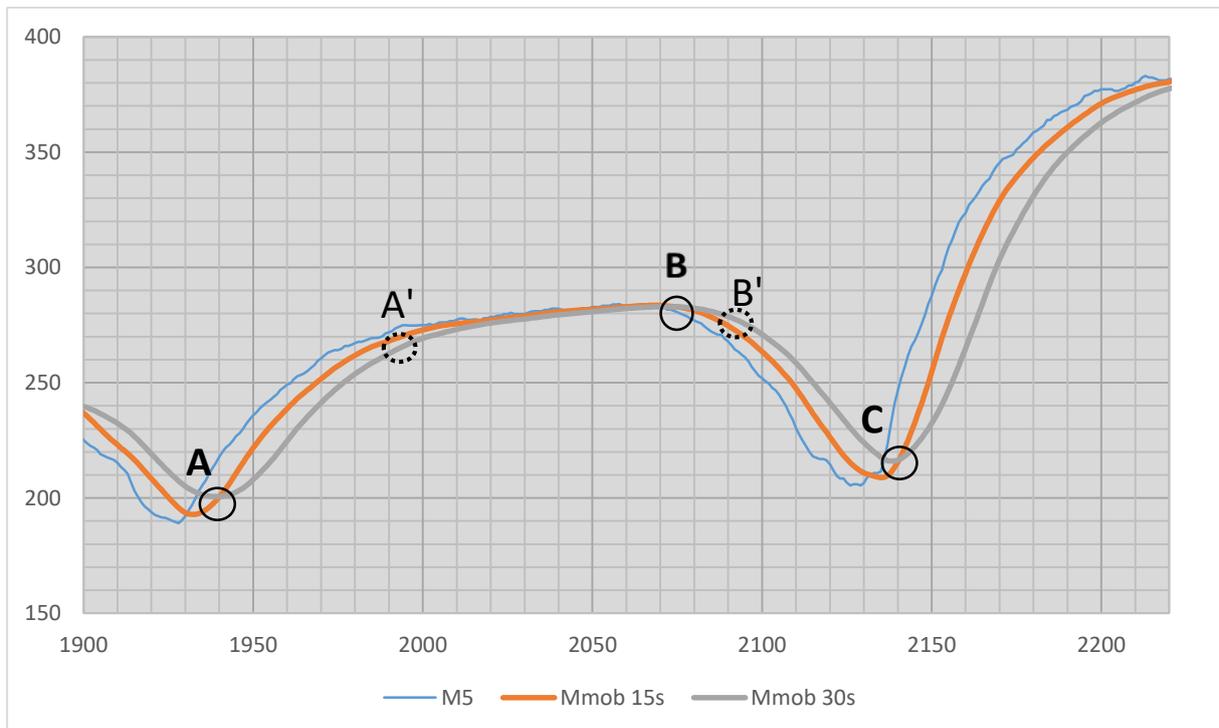
**Du point B au point C :** La moyenne mobile à long terme est passée au-dessus de la moyenne mobile à court terme, cela signifie que les températures ont commencé à décroître et confirme ainsi le changement de la tendance de la courbe des températures qui suit la phase plateau.

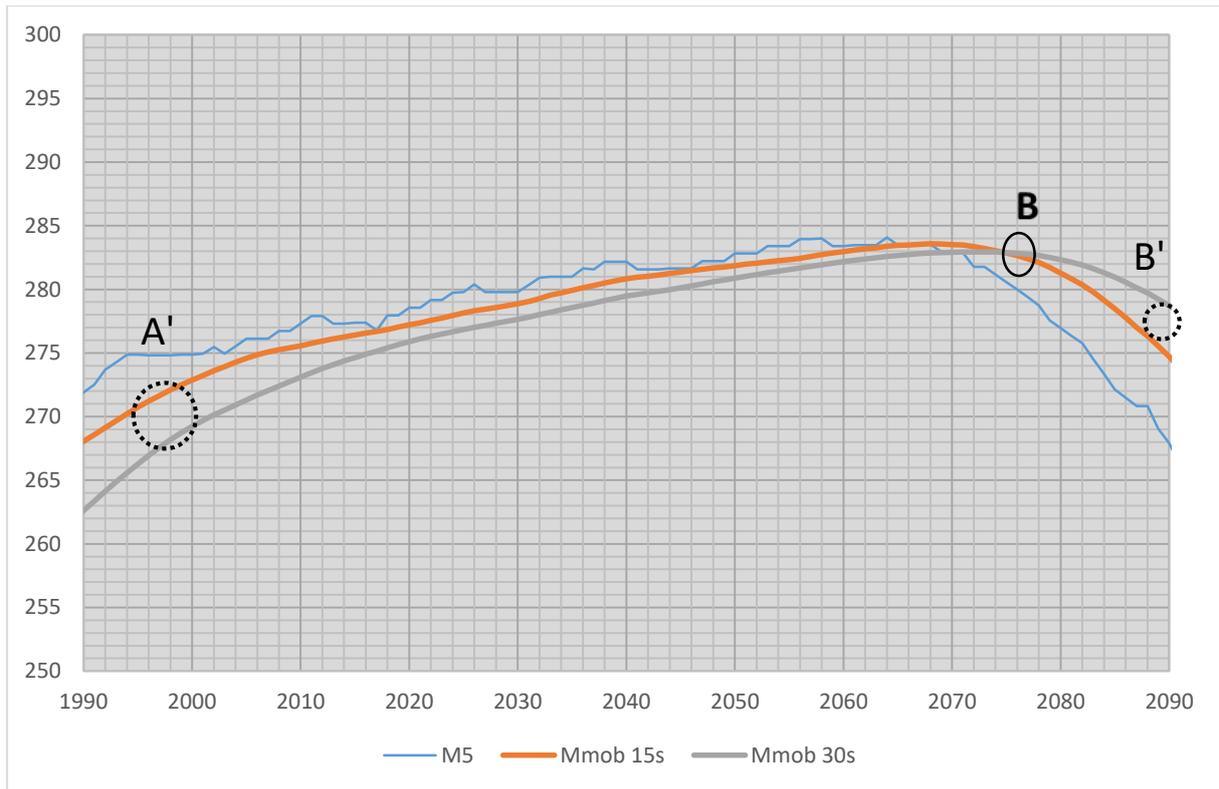
**Au point C :** La moyenne mobile à (-15s) est passé au-dessus de la moyenne mobile à long terme (-30s) avec une augmentation brusque de la température exprimé par une différence de température entre les deux moyennes mobile supérieur à 10°C, c'est un embrasement généralisé des fumées.

### 3.2.2.2 Thermocouple placé au milieu du caisson



**Figure 3. 20:** Evolution des températures mesurées par le thermocouple placé à 50cm en dessous du plafond au milieu du caisson et ses deux moyennes mobiles à 15s et 30s dans le passé





**Figure 3. 21:**

*a) Zoom sur la partie étudiée*

*b) Zoom sur la phase plateau*

**Du début au point A :** La moyenne mobile à court terme est au-dessus de la moyenne mobile à court terme indiquant ainsi une évolution décroissante de la température.

**Au point A :** La moyenne mobile à long terme (-30s) croise la moyenne mobile à court terme (-15s) et passe en dessous, cela signifie que la température au niveau du foyer a commencé à croître.

**Du point A au point A' :** Tout au long de cette partie la moyenne mobile à long terme reste en dessous de la moyenne mobile à long terme, e gardant une différence de température supérieure à 3°C, ce qui veut dire que la hausse de la température est en continu.

**Au point A' :** A partir de ce point les deux courbes se rapprochent et la différence des températures entre les deux moyennes mobiles est strictement minimale, inférieure ou égale à 3°C, cela pourrait prévenir de l'apparition imminente d'un plateau de température

**Du point A' au point B :** La différence des températures des deux moyennes mobiles tout au long de ce fragment est inférieure ou égale à 2°C, ce rapprochement a duré 80s, ceci valide enfin l'hypothèse faite au point A' ou nous avons anticipé l'apparition d'un plateau.

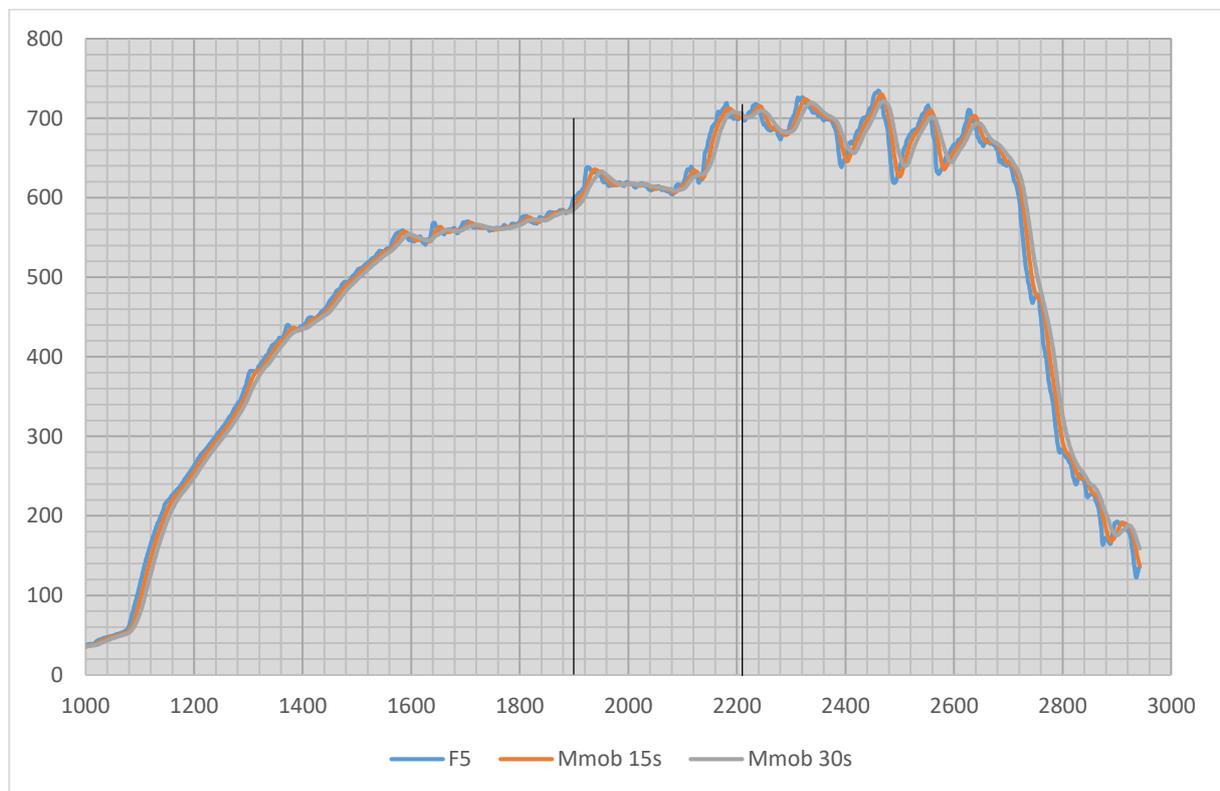
**Du point B à B' :** Au point B la moyenne mobile à long terme croise la moyenne mobile à court terme et la dépasse, la différence entre les températures des deux moyennes

mobiles reste inférieure à 3°C mais cela ne dure que 10s du point B au point B', ce qui indique la fin du plateau.

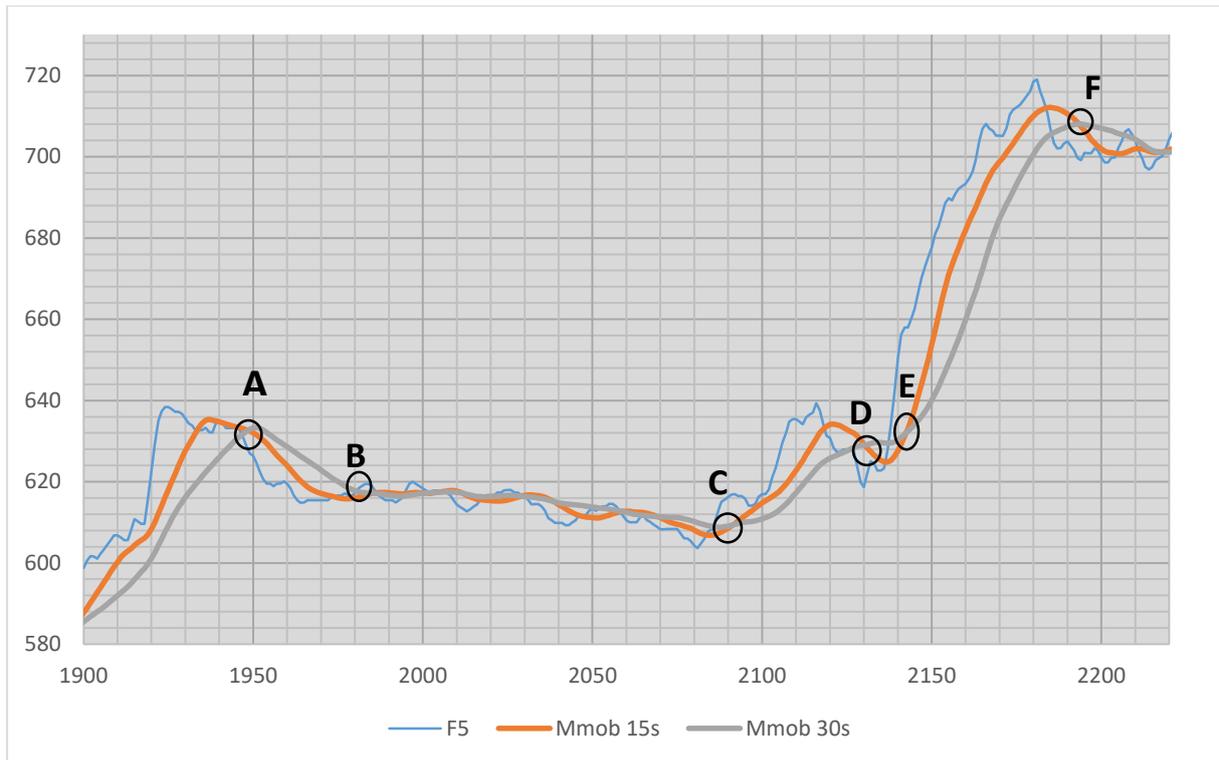
**Entre le point B' et le point C :** La moyenne mobile à long terme est au-dessus de la moyenne mobile à court terme indiquant ainsi que la température a commencé à décroître. Nous remarquons aussi que la différence des températures reste toujours inférieure à 10°C.

**A partir du point C :** La moyenne mobile à court terme (-15s) croit subitement, croise et passe au-dessus de la moyenne mobile à long terme (-30s). La différence des températures a dépassé les 10°C en très peu de temps (10s) jusqu'à atteindre 25°C de différence de température entre les deux moyennes mobiles à  $t=2160s$ . Ce phénomène est un embrasement généralisé des fumées.

### 3.2.2.3 Thermocouple placé dans le foyer



**Figure 3. 22:** Evolution des températures mesurées par le thermocouple placé à 50cm en dessous du plafond dans le foyer et ses deux moyennes mobiles à 15s et 30s dans le passé



**Figure 3. 23:** Zoom sur la partie étudiée

**Du début au point A :** Moyenne mobile à (-15s) est au-dessus de la moyenne mobile à (-30s), la température est en croissance au niveau du foyer.

**Du point A au point B :** La moyenne mobile à long terme croise la moyenne mobile à court terme et passe au-dessus, la température commence à croître. Au point A' nous remarquons que l'écart entre les deux moyennes mobiles diminue, ce qui pourrait signifier que l'on se rapproche d'une phase plateau.

**Entre le point B et le point C :** La différence de température entre les deux moyennes mobiles ne dépasse pas et inférieure à  $2^{\circ}\text{C}$  et dure plus d'une minute (100s), nous sommes en phase plateau de température. Les nombreux entrecroisements entre les deux moyennes mobiles sont dus aux fluctuations du signal brut, cela signifie qu'il est possible que le plateau soit suivi d'un embrasement généralisé.

**Du point C au point D :** La moyenne mobile à court terme est au-dessus de la moyenne mobile à long terme, nous remarquons qu'au point B' que l'écart entre les deux moyennes mobiles est de  $2^{\circ}\text{C}$ , cela ne signifie pas que nous allons rentrer dans une seconde phase plateau car cet écart a dépassé les  $2^{\circ}\text{C}$  en moins de dix secondes, ce qui veut dire que nous sortons de la phase plateau et que les températures ont commencé à augmenter.

**Du point D à E :** Au point D la moyenne mobile à long terme croit et passe au-dessus de la moyenne mobile à court terme, les températures ont baissé mais pas continument et l'écart entre les deux moyennes reste inférieur à  $5^{\circ}\text{C}$ , ainsi au bout de 12s, au point E, la moyenne mobile à long terme (-30s) décroît puis passe en-dessous de la moyenne mobile à court terme. Etant donné que nous nous situons dans une zone de hautes températures ( $+600^{\circ}\text{C}$ ) nous ne pouvons considérer la chute des

températures que si elle dure dans le temps. Cet évènement peut être expliqué par l'étouffement momentané du foyer.

**Du point E au point F :** La moyenne mobile à court terme (-15s) croise et passe au-dessus de la moyenne mobile à long terme (-30s), les températures ont brusquement augmenté et l'écart entre les deux moyennes a dépassé les 10°C en moins de dix secondes atteignant tout au long de la distance entre ces deux points les 20°C d'écart. Toutes les caractéristiques de cette évolution sont celles d'un embrasement généralisé des fumées.

**Au point F :** L'évolution des deux moyennes mobiles pourrait signifier la fin de l'embrasement généralisé mais non pas la fin du danger car nous sommes toujours dans une zone à très hautes températures (700°C) et nous remarquons qu'elles s'entrecroisent une seconde fois, ce qui veut dire que la situation n'est pas encore maîtrisée.

### 3.3 Bilan :

L'évènement	L'emplacement du thermocouple	Instant t(s) ou l'évènement a été signalé
Plateau de température	Entrée (E5)	2008 s
	Milieu (M5)	2010 s
	Foyer (F5)	1980 s
L'embrasement généralisé des fumées	Entrée (E5)	2141 s
	Milieu (M5)	2141 s
	Foyer (F5)	2141 s

**Tableau 3. 1:** Tableau des croisements des deux moyennes mobiles avec l'instant de signalement de chaque évènement selon l'emplacement du thermocouple

La figure ci-dessus (Tableau 3.1) représente un tableau comparatif de l'instant de signalement des deux évènements principaux de l'évolution des températures de notre cas d'étude.

L'apparition du plateau des températures a été détecté en premier lieu par le thermocouple se trouvant dans le foyer (à t=1980s), ensuite par le thermocouple situé à l'entrée du caisson expérimental avec un retard de 28s (à t=2008s) et deux secondes plus tard le thermocouple placé au milieu de la pièce le détecte aussi (à t= 2010s).

Quant à l'embrasement généralisé des fumées, il a été détecté précisément et strictement au même moment par les trois thermocouples étudiés (à t=2141s).

La zone de danger, dans ce cas, se trouve au niveau du foyer où les températures ont atteint environ 700°C. Les deux autres zones (entrée et milieu) sont considérées comme « moins dangereuses » car les températures n'ont pas dépassé les 400°C.

Le fait d'avoir pu détecter le danger au même moment au niveau de ces trois zones malgré le grand écart entre leur signal de température et la distance qui les sépare dans l'espace, constitue un élément très solide à prendre en compte dans l'efficacité de l'analyse des risques par comparaison de moyennes mobiles dans le temps.

En intervention, cela peut permettre aux sapeurs-pompiers d'avoir le temps de prendre les précautions nécessaires tout en restant éloigné de la zone à haut risque.

Enfin, grâce à l'étude de cette partie, nous avons constaté les éléments suivants :

- f) Pour les trois emplacements de thermocouples l'embrassement généralisé des fumées a été précédé par une phase de plateau suivie d'une très courte chute de température.
- g) Plus nous nous rapprochons de la zone de danger et plus le signal des températures est perturbé, ce qui s'exprime par plusieurs entrecroisements des deux moyennes mobiles, notamment lors de la phase plateau.
- h) L'analyse des informations transportées par les fumées était très efficace dans ce cas d'étude, car nous avons pu suivre l'évolution du feu et détecter les événements dangereux qui ont lieu au niveau du foyer même en ne traitons que les données enregistrées à l'entrée ou au milieu de notre dispositif expérimental.

## **4 Vérification de la validité de la méthode des deux moyennes mobiles dans le passé par une nouvelle analyse d'un essai d'incendie réel**

### **4.1 Description de l'essai**

Pour cette partie, en utilisant la méthode des deux moyennes mobiles dans le passé, méthode que nous avons proposée en début de chapitre, Lebey a procédé à une nouvelle analyse de l'essai qu'il avait monté et réalisé en 2004 avec le Colonel Garrigues des sapeurs-pompiers de Paris. L'objectif de base de cet essai était de montrer aux officiers d'État-Major l'intérêt et l'efficacité de la ventilation opérationnelle dans la lutte contre les feux de compartiments.

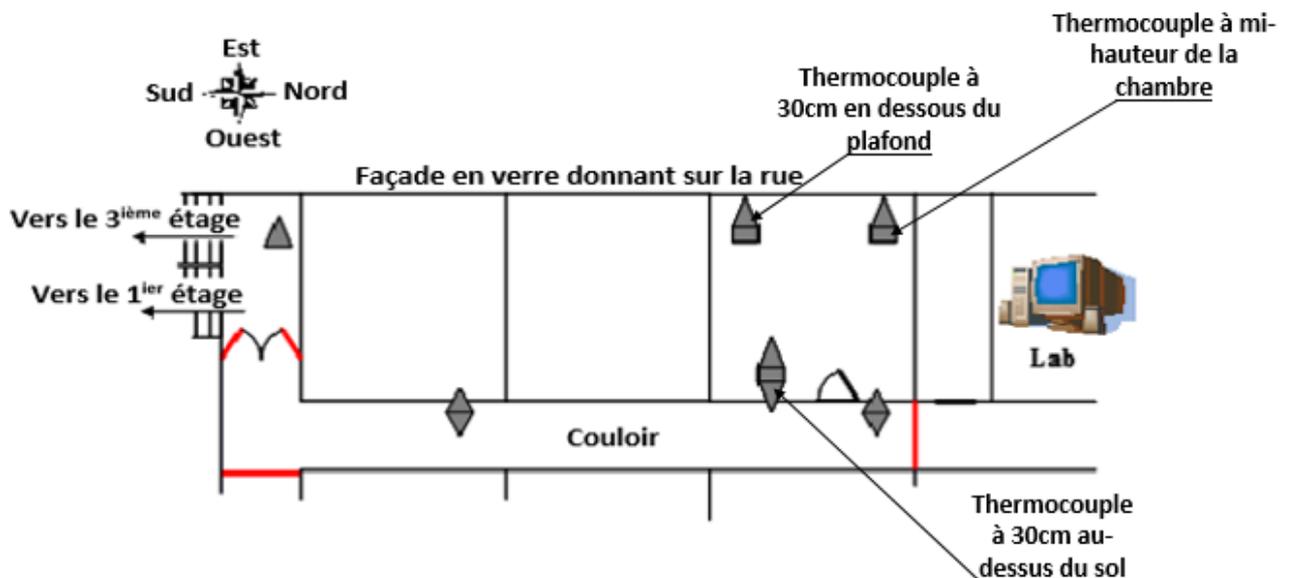
Nous allons ainsi pouvoir montrer l'efficacité de cette méthode dans le cas d'une situation réelle d'incendie.

L'expérience avait été réalisée dans une salle d'hôpital de 6m de long, 5m de large et 3m de hauteur, dans laquelle il y avait environ 300kg de combustibles : une table et une chaise en bois, un fauteuil en similicuir, un placard plein de vêtements, une autre table avec un ordinateur et une télévision, et deux lits avec toute la literie.

Les températures étaient mesurées à différents endroits comme indiqué sur le schéma ci-dessous (Figure 3.24), en utilisant douze thermocouples de type K et enregistrées et analysées avec le logiciel LabView de National Instrument.

Quant à l'intervention incendie, elle était assurée par la Brigade des Sapeurs-Pompiers de Paris (BSPP). Le laps de temps (5 minutes) représente en moyenne le temps habituel entre l'alerte et l'arrivée des pompiers sur place.

Il est à noter que dans cette démonstration d'attaque de feu avec ventilation opérationnelle, aucun moyen hydraulique n'avait été utilisé avant 9min et 20s, ceci de manière à n'observer que les seuls effets de la ventilation opérationnelle. Il est évident que dans une situation réelle d'intervention l'engagement de moyen hydraulique se ferait comme habituellement ; la ventilation opérationnelle, si elle peut être employée, ne venant que faciliter les opérations.



**Figure 3. 24:** Schéma représentant une vue de haut du bâtiment où a eu lieu l'expérimentation

L'expérimentation en quelques images :



**Figure 3. 25:** Photo d'époque montrant la sortie des flammes lors de l'expérimentation

« La photo montre la sortie des flammes de la fenêtre de la chambre donnant sur la rue, sortie provoquée par le contrôle des mouvements de fumées réalisé par les ventilateurs ; l'explosion de fumée se produit à l'extérieur, diminuant ainsi les risques à l'intérieur, là où se trouvent les équipes d'attaque »

Arbre des thermocouples placés à l'entrée de la pièce



Arbre des thermocouples placés face à la fenêtre

*Figure 3. 26: Photo d'époque montrant la chambre où a eu lieu l'expérimentation et des équipements utilisés comme combustible*

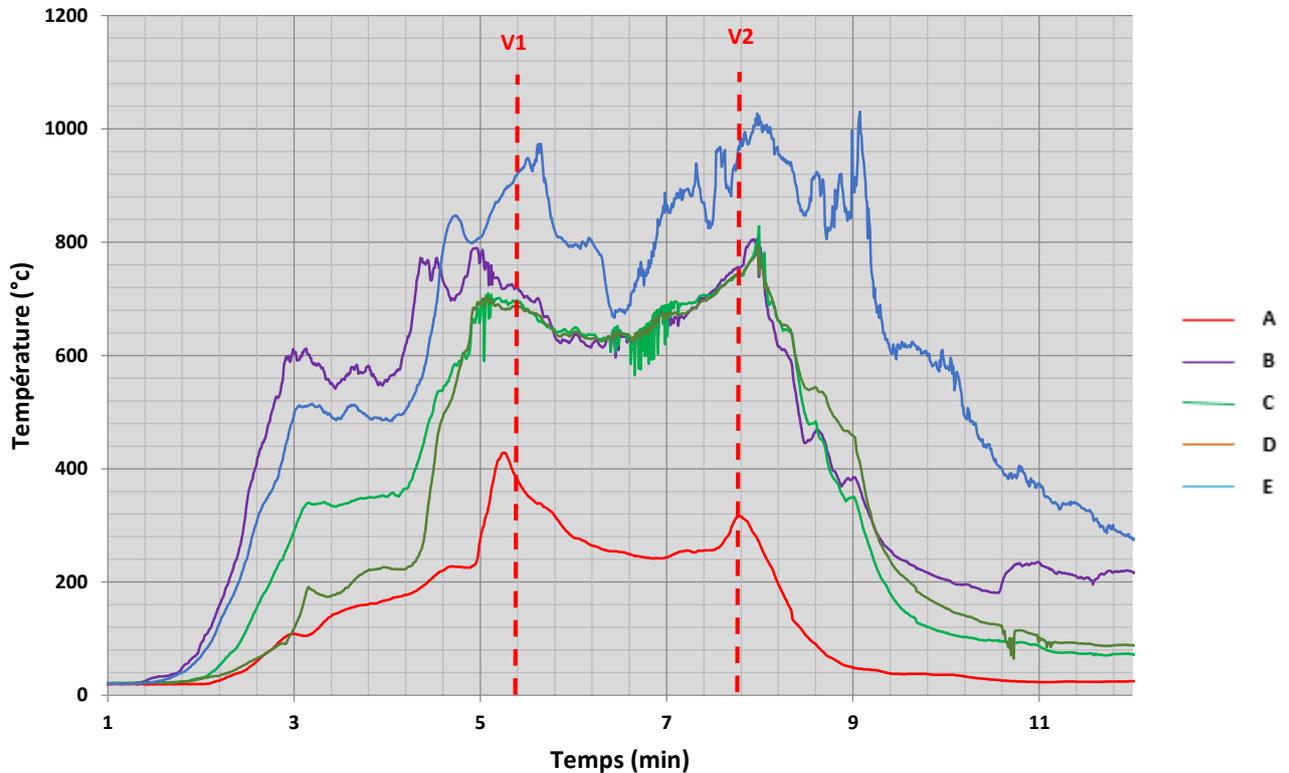
Câblages de la chaîne de mesure



*Figure 3. 27: Photo d'époque montrant le couloir montrant aussi les câblages de la chaîne de mesure*

## 4.2 Analyse de situation et détection des risques

### 4.2.1 Évolution des températures dans l'ensemble du local



**Figure 3. 28:** Évolution des températures des fumées mesurées à l'époque à différents points tout au long de l'expérimentation

Les courbes de température sont les suivantes :

- A : 30 cm au-dessus du sol dans le couloir
- B : 30 cm sous le plafond à l'intérieur de la chambre en feu
- C : Hauteur de la position d'intervention du sapeur-pompier (à genoux) à l'intérieur de la chambre en feu
- D : 30cm au-dessus du sol à l'intérieur de la chambre en feu
- E : 30 cm sous le plafond devant la fenêtre

Les ventilateurs utilisés :

- V1: premier ventilateur utilisé
- V2: second ventilateur utilisé

Les courbes de température indiquées sur la figure ci-dessus (Figure 3-28) représentent les résultats obtenus. Dans la première étape, sans action, un plateau de température apparaît à environ 550 ° C. C'est la température de l'auto-inflammation du monoxyde de carbone, un gaz contenu dans une grande quantité dans la fumée des feux de compartiments.

Juste après ce plateau, une élévation de la température se produit à un niveau supérieur à 800 ° C. Ce phénomène est le flashover, comme expliqué dans le premier chapitre il est très dangereux et voire mortel.

Sur la figure 3.28, la verticale V1 indique la mise en service du premier ventilateur, ce qui a produit une diminution globale des températures, due à la sortie des fumées chaudes poussées par le flux d'air vers la fenêtre qui avait explosée sous effet de la chaleur avant l'utilisation du ventilateur. Cette diminution de la température s'est arrêtée après quelques minutes et a été suivie d'une autre augmentation soudaine de la température, car la combustion a été réactivée par l'oxygène poussé vers l'intérieur par le flux d'air. Cela montre que le ventilateur utilisé n'est pas assez puissant : la réactivation du foyer n'est pas compensée par une évacuation de chaleur suffisante pour pousser toute la fumée produite par le feu vers l'extérieur.

La vertical V2 montre le début de l'utilisation du second ventilateur, à partir de ce moment, la puissance des deux ventilateurs est devenue suffisante pour forcer l'évacuation des fumées vers l'extérieur causant ainsi la baisse de la chaleur.

Deux remarques principales peuvent être faites à partir de ce test :

- 1- La courbe de température sous le plafond à l'intérieur de la chambre (B) montre en premier l'évolution du feu et l'effet de l'utilisation du premier ventilateur ainsi que son manque de puissance par la suite. Enfin, elle montre aussi l'efficacité de la ventilation une fois le second ventilateur ajouté.
- 2- Les courbes B et E montrent clairement le plateau de température (entre 3 et 5 min) qui se produit juste avant un flashover, et qui est suivi d'une élévation de température importante.

#### **4.2.2 Analyse d'un point fixe de l'espace à deux distances dans le passé**

Pour cette partie, l'étude est réalisée sur l'enregistrement de la température mesurée par le thermocouple situé 30 cm sous le plafond près de la porte à l'intérieur de la pièce en feu (courbe B).

Deux moyennes mobiles sont comparées, nous mettrons donc, pour ce qui suit, en évidence l'approche que nous avons développée en début de ce chapitre et dont, pour rappel, les deux caractéristiques principales sont les suivantes :

- 1) Lorsque la courbe de la moyenne mobile à long terme croise la moyenne mobile à court terme et la dépasse, cela signifie que la température a commencé à diminuer, ce qui signifie que la puissance du feu va diminuer aussi et que la situation sera plus sécurisée
- 2) Lorsque la courbe de la moyenne mobile à long terme croise la moyenne mobile à court terme et passe en dessous, cela signifie que la température a commencé à augmenter, ce qui signifie que la puissance de l'incendie augmentera aussi et que des événements dangereux peuvent survenir.

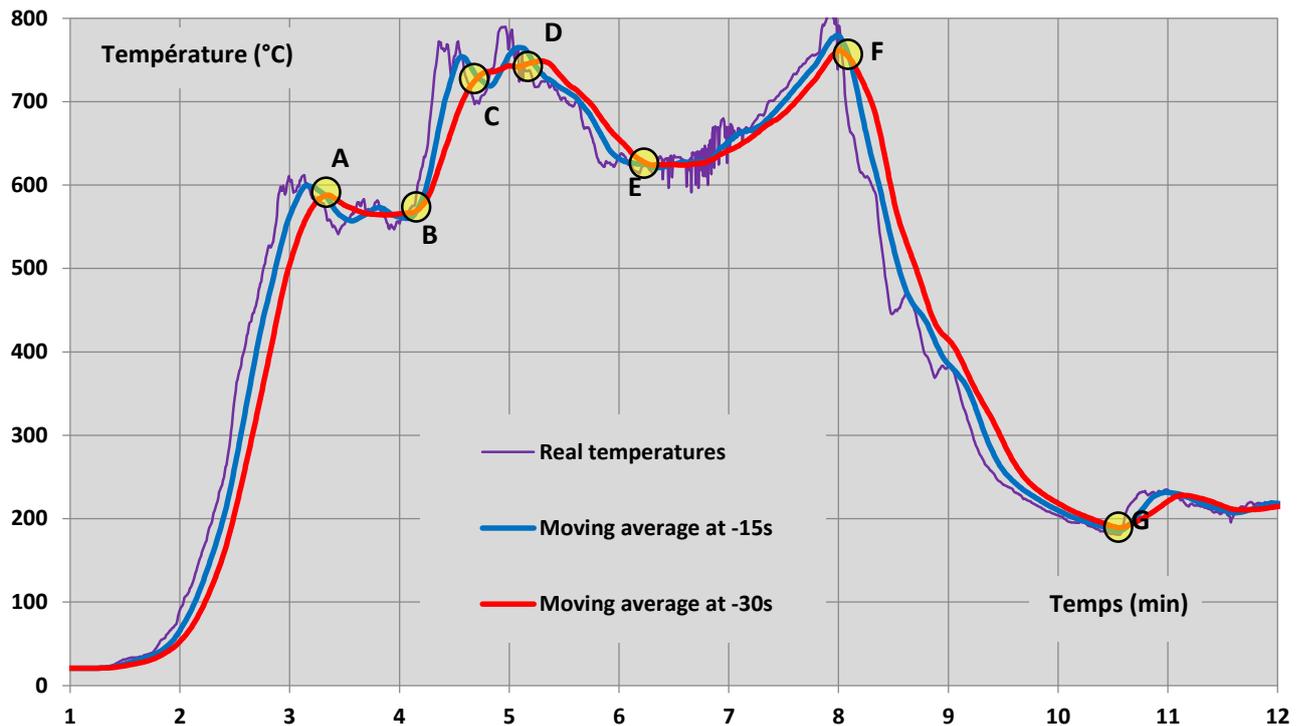


Figure 3. 29: La température en fonction du temps et ses deux moyennes mobiles calculées à 15s et 30s dans le passé

La figure (3.29) représente l'évolution de la température mesurée par le thermocouple situé à 30 cm sous plafond près de la porte d'entrée et ses deux moyennes mobiles, l'une à court terme calculée à 15s dans le passé (-15s) et l'autre à long terme calculée à 30s dans le passé (-30s).

Les croisements des courbes de ces deux moyennes mobiles mettent en évidence différentes phases du feu et surtout des évènements spécifiques comme suit :

**Du début jusqu'au point A :** la moyenne mobile à (-15s) est supérieure à celle à (-30s), cela signifie que les températures augmentent, donc la puissance du feu augmente aussi.

**Au point A :** la moyenne à (-15s) devient inférieure à la moyenne à (-30s), cela signifie que la puissance de feu ne s'accroît plus, ce qui est confirmé par le plateau de température apparaissant par la suite.

**Entre le point A et le point B :** nous avons un plateau de température, les fluctuations et les entrecroisements répétés des courbes des deux moyennes mobiles signifient qu'il y a de fortes possibilités qu'un flashover ait lieu car les températures sont supérieures à 550 ° C, la température d'auto-inflammation du gaz CO.

**Entre B et C :** encore une fois, la moyenne mobile à (-15s) devient supérieure à la moyenne mobile à (-30s) avec une augmentation brusque de la température, c'est le flashover, l'évènement dangereux bien connu.

**Entre les points C et D :** il y a encore une fois des oscillations dans les moyennes mobiles et les températures restent assez stables mais à un niveau élevé, donc la situation reste dangereuse.

**Au point D :** la moyenne mobile à (-15s) passe encore une fois en-dessous de la moyenne mobile à (-30s), cela signifie que la température est en diminution, donc la situation peut devenir plus sûre, ce qui montre que la ventilation appliquée (1<sup>er</sup> ventilateur) semble efficace.

**Au point E :** il y a une fois de plus une courte période d'oscillations, puis la moyenne à (-15s) devient supérieure à la moyenne à (-30s), cet événement montre clairement que si la première ventilation était efficace au début, elle est devenue insuffisante car elle apporte de l'air frais qui augmente la dynamique de combustion sans être suffisamment puissante pour évacuer assez de chaleur vers l'extérieur.

**Du point F au point G :** la moyenne à (-15s) devient de nouveau inférieure à la moyenne à (-30s), ce qui montre clairement l'effet positif de l'utilisation du second ventilateur qui a augmenté la puissance de la ventilation et a pu forcer l'évacuation des fumées vers l'extérieur. Toutes les températures à l'intérieur de la pièce sont passées en-dessous de 220 ° C (voir fig n°III-26), donc la situation est sous contrôle et complètement sécurisée, même s'il y a une petite augmentation de la température au niveau du point G.

### 4.3 Bilan

La comparaison des deux moyennes mobiles centrées dans le passé montre clairement qu'il est possible de détecter des événements qui peuvent être dangereux comme un flashover ou de savoir que la première ventilation n'est pas suffisamment puissante.

Cette information peut devenir très importante pour le commandant de l'opération de secours afin d'améliorer ses capacités de décision en temps réel. Ceci est possible car tous les calculs ont pu être réalisés en temps réel avec un retard de 30s (intervalle de calcul de la moyenne mobile à long terme).

### 4.4 La valeur idéale de la distance dans le passé des moyennes mobiles

Dans l'analyse effectuée ci-dessus, les « distances temporelles » dans le passé ( $d_1 = -15$  s) et ( $d_2 = -30$ s) ont été choisies afin d'obtenir des résultats significatifs. Cependant, la question est de savoir comment choisir la valeur de ces distances temporelles dans le passé, et combien de temps faut-il pour obtenir ces valeurs ?

Comme il a été montré, le délai d'obtention d'une valeur est très court. Afin d'analyser ce problème, d'autres calculs ont également été réalisés dans le même temps avec en plus cinq autres distances temporelles dans le passé :

$d_1 = -5$ s,  $d_2 = -10$ s,  $d_3 = -15$ min,  $d_4 = -30$ s,  $d_5 = -1$ min,  $d_6 = -5$ min et  $d_7 = -10$ min

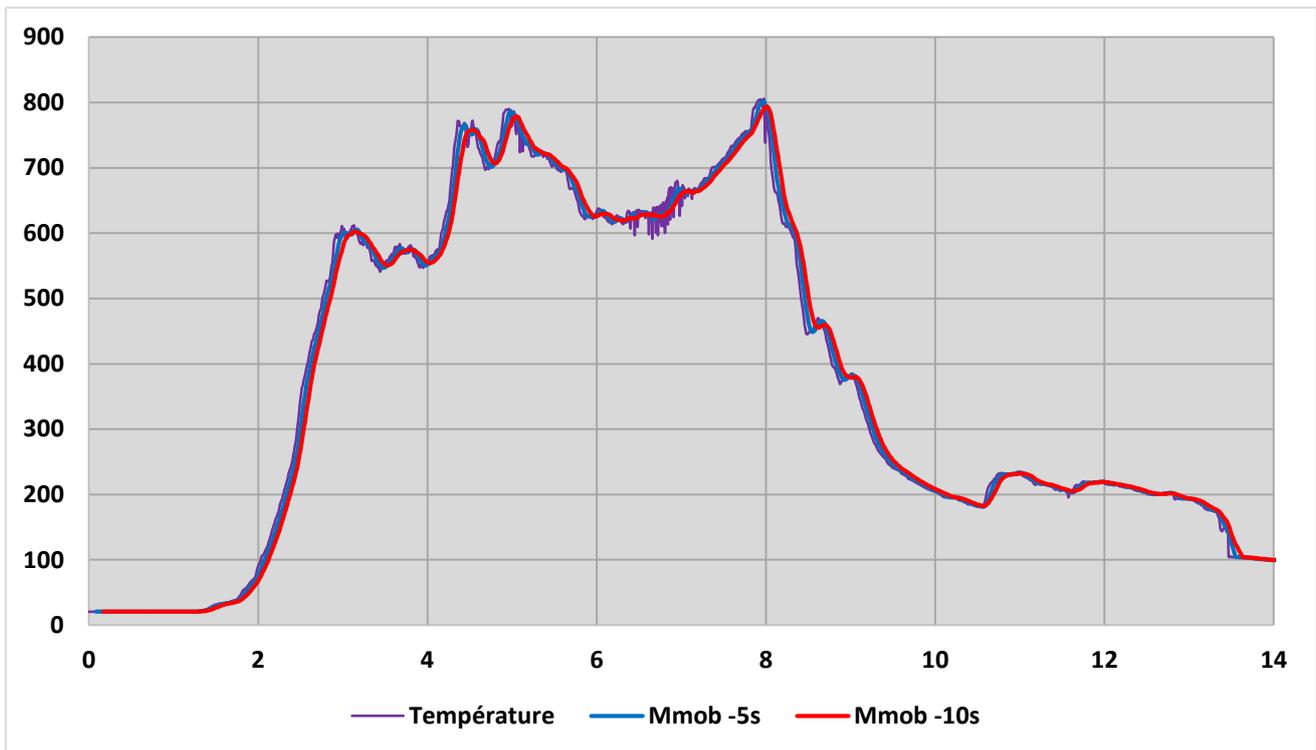


Figure 3.30 : a) Evolution des températures et ses moyennes mobiles calculées à 5s et 10s dans le passé

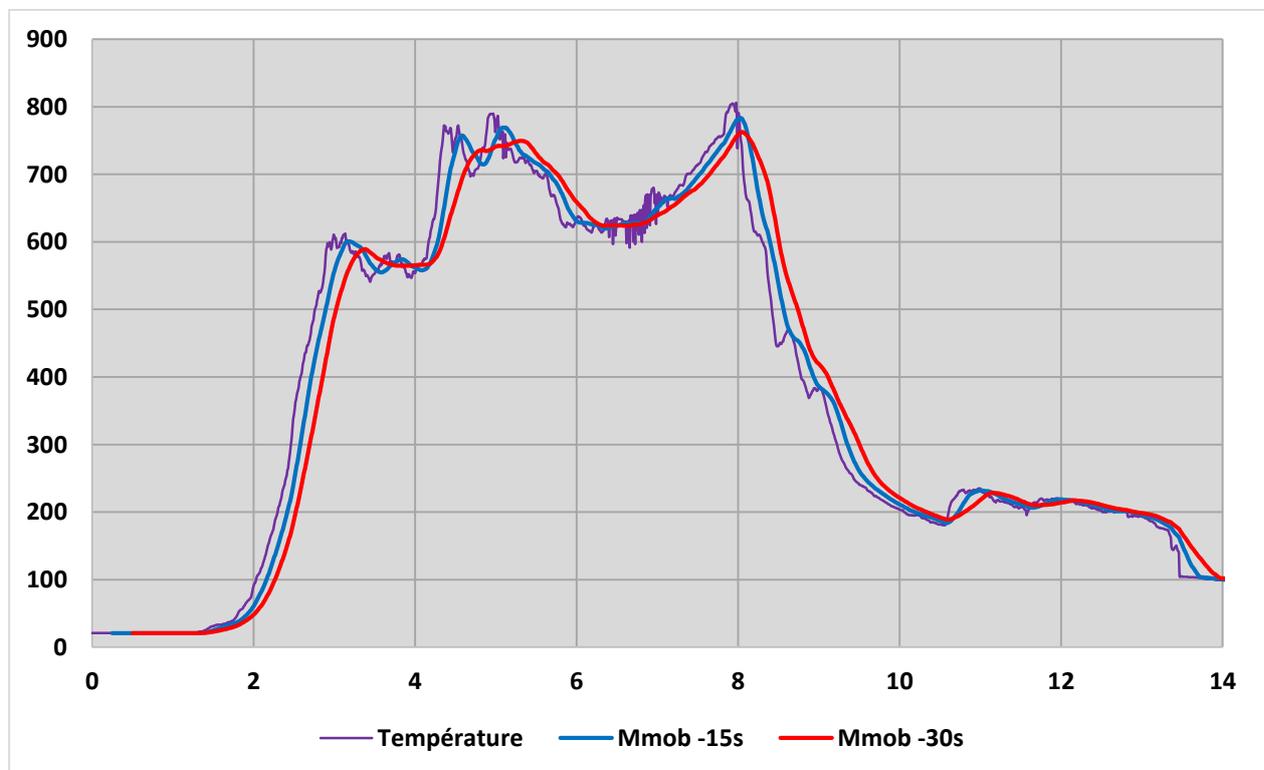
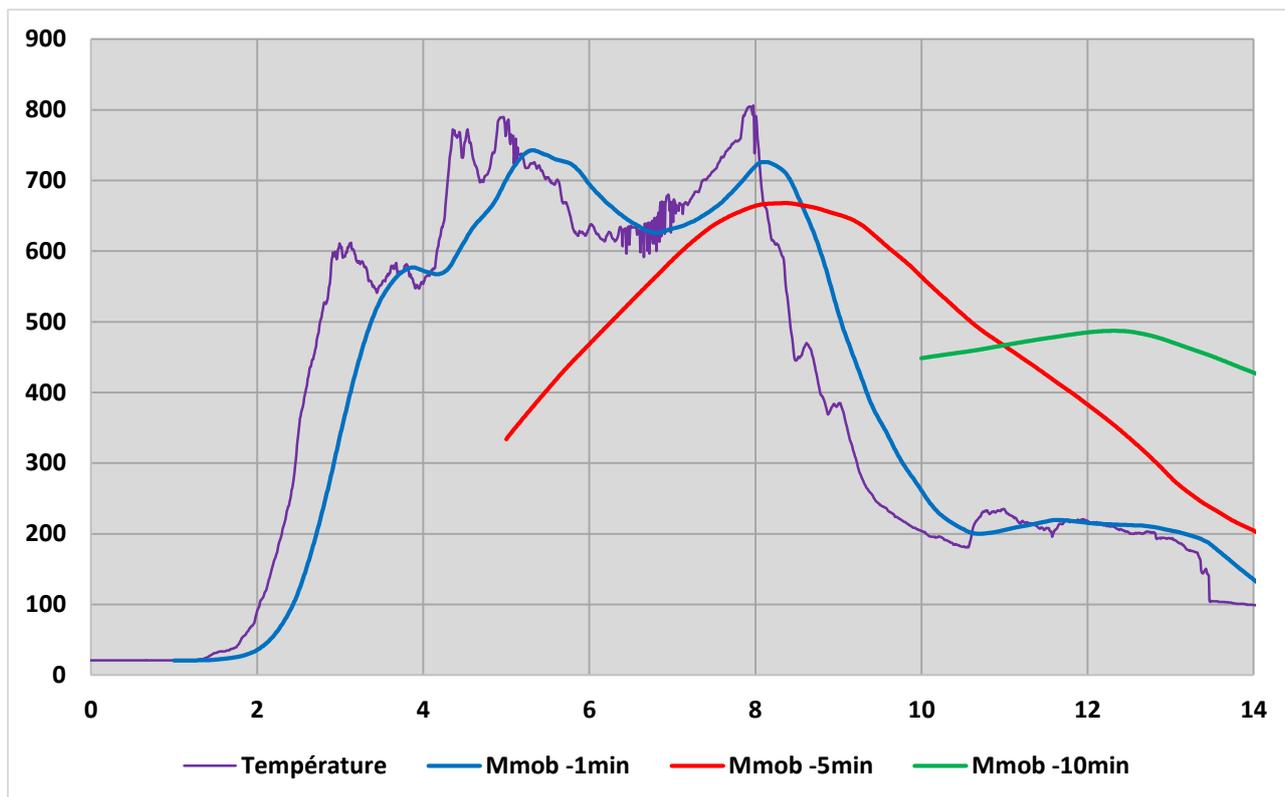


Figure 3.30 : b) Evolution des températures et ses moyennes mobiles calculées à 15s et 30s dans le passé



**Figure 3.30 : c)** Évolution des températures et ses moyennes mobiles calculées à 1min, 5min et 10min dans le passé

*Figure 3. 30: Evolution des températures et ses moyennes mobiles calculées dans le passé (5s , 10s, 15s, 30s, 1min, 5min et 10 min)*

Les trois graphes a, b et c de la figure (Figure 3.30) ci-dessus nous permettent de comparer les deux distances (-15s et -30s) utilisées dans l'analyse précédente avec d'autres distances plus courtes (-5s et -10s) et plus longues (-1min, -5min et -10min).

Il est clair que les deux moyennes mobiles qui donnent les meilleurs résultats sont celles de la figure « b » calculées à 15s et 30s dans le passé. Elles sont donc utiles et totalement compatibles avec le temps caractéristique d'un feu de compartiment, environ 10 minutes à 1 heure.

Les deux moyennes mobiles de la figure « a » sont calculées avec les deux temps les plus courts dans le passé (-5s et -10s), ainsi le fait qu'elles contiennent autant de fluctuations que le signal brut rend difficile l'analyse de leurs entrecroisements.

La moyenne mobile à (-1min) « figure c » donne également des informations utiles, mais les plateaux de température à 550 °C et 750 °C ne sont plus clairement visibles. Cette moyenne mobile pourrait être utilisée, mais pour des incendies dont le temps caractéristique est plus long, comme par exemple les feux d'entrepôt.

Enfin, il est clair que les moyennes mobiles à (-5min) et (-10min) n'ont aucun sens pour la durée du feu de l'expérience présentée dans cette étude, même si elles peuvent être utiles pour d'autres cas d'incendies de plus longue durée.

## 5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par définir les moyennes mobiles et leur utilisation dans différents domaines. Nous avons aussi démontré théoriquement que la comparaison de leurs entrecroisements et leur évolution permet de déterminer la tendance de la courbe de température étudiée.

Par la suite, nous avons appliqué cette nouvelle méthode d'analyse sur deux cas d'étude différents, un cas simplifié (incendie de compartiment avec foyer en buchettes de bois) et un deuxième cas plus complexe réalisé en conditions réelles (incendie de chambre d'hôpital avec foyer composé de divers immobiliers).

Dans les deux cas, l'étude a permis de montrer d'une part que l'analyse en temps réel des enregistrements de températures donnent des informations sur l'évolution du feu et d'autre part que la comparaison de deux moyennes mobiles dans le passé, calculées avec les températures, l'une à court terme l'autre à long terme, permet de détecter les dangers potentiels et ainsi de s'en protéger.

Comme nous l'avons déjà évoqué dans ce chapitre, la lutte contre les feux de compartiments comporte un certain nombre de dangers pour les sapeurs-pompiers dont, en particulier, l'explosion de fumées et l'embrassement généralisé éclair, qui peuvent entraîner des conséquences fatales pour les sapeurs-pompiers.

La possibilité de détecter les risques d'apparition de ces dangers constitue une amélioration considérable pour la sécurité et l'efficacité dans les interventions sur feux de compartiments.

\* \* \*





## **Chapitre 4**

**Détection en temps réel des dangers  
générés par les fumées lors de  
l'attaque des feux de compartiments**

**- Méthode B -**

**Comparaison de deux moyennes  
mobiles prises au même instant à  
deux endroits différents dans l'espace**

## Présentation

La présente partie est consacrée à la seconde méthode d'analyse de risque qui consiste à comparer deux moyennes mobiles, à la même distance dans le temps, de deux points différents de l'espace.

De même que pour le chapitre précédent, ce chapitre est composé aussi de trois parties : En premier lieu, une présentation et définition générale de la méthode d'analyse. Ensuite son application sur un cas simple d'incendie de compartiment avec foyer et une seule cible (objet combustible), et finalement, l'application de la méthode sur un cas plus complexe où il a été utilisé un foyer de buchettes étagées croisées et plusieurs cibles représentant les différents objets combustibles présents lors d'un cas réel d'incendie.

### 1 Définition générale de la méthode d'analyse par comparaison de moyennes mobiles dans l'espace

Contrairement à la méthode d'analyse de risque que nous avons développé dans le chapitre précédent et qui consiste à comparer l'évolution de deux moyennes mobiles du même point dans l'espace à deux distances différentes dans le temps, la méthode que nous allons étudier dans cette partie se base quant à elle sur la comparaison de plusieurs moyennes mobiles de différents points dans l'espace calculées à la même distance dans le temps.

L'objectif principal de cette méthode est de traiter les phénomènes qui sont liés à l'espace afin d'avoir plus d'informations en temps réel, comme par exemple pouvoir définir la zone de danger (ex : emplacement de la source de l'incendie...) et la zone de sécurité (ex : où les températures pourront être supportables par les intervenants...).

Il serait possible d'utiliser cette méthode en prévention aussi, car elle nous permettra de définir l'emplacement idéal des thermocouples afin que leur utilisation soit la plus optimale.

#### 1.1 Exemple d'étude de cas

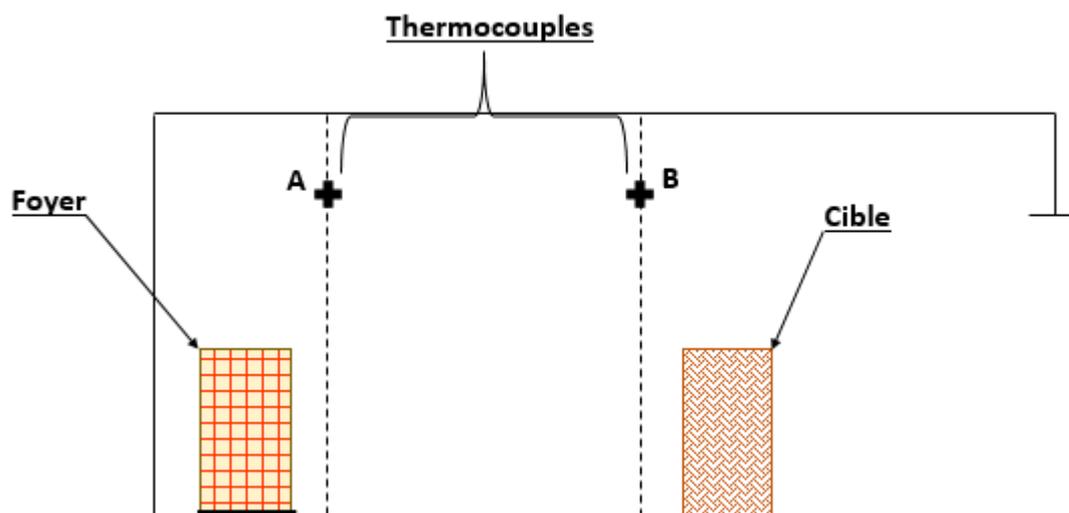
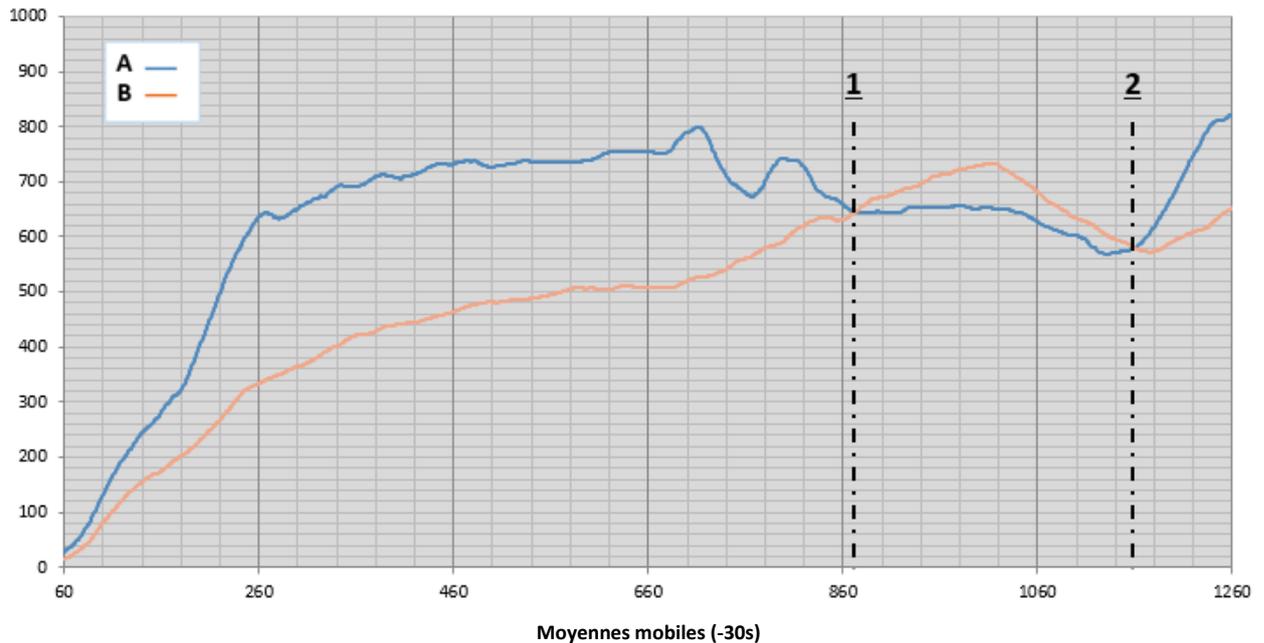


Figure 4. 1: Schéma représentant un cas d'incendie d'une pièce (foyer+ 1 cible)

La figure 4.1 représente le cas d'exemple d'un incendie qui a lieu dans une pièce contenant un foyer d'où l'incendie démarre et d'une cible qui représente un objet inflammable qui permettra la propagation du feu. Le point A représenté le thermocouple le plus proche du foyer et le point B le thermocouple le plus proche de la cible. Nous allons par la suite étudier la moyenne mobile de l'évolution des températures de chacun des deux thermocouples.



**Figure 4. 2:** Moyennes mobiles à (-30s) des températures enregistrées dans le foyer et au niveau de la cible

Les deux courbes représentent l'évolution des températures dans deux points différents dans l'espace. La courbe « A » est la moyenne mobile à (-30s) de l'enregistrement des températures par le thermocouple le plus proche du foyer principal, et la courbe « B » est la moyenne mobile à (-30s) des températures enregistrées par le thermocouple proche de la cible.

**De 60s à 860s :** Les courbes A et B sont toutes les deux en croissance, mais les températures de la courbe A sont deux fois plus élevées que les températures de la courbe B, ceci est expliqué par le fait que le thermocouple A est le plus proche du foyer tandis que le thermocouple B est proche de la porte d'entrée. Ce qui fait que les deux courbes ne se croisent pas.

**De 860s à 1160s :** Au point désigné par verticale 1, la courbe B croise la courbe A et passe au-dessus, tandis que cette dernière commence relativement à décroître en passant par une phase plateau. Cette partie est la plus importante dans l'utilisation de comparaison de deux moyennes mobiles de deux points différents dans l'espace. Le fait que les températures prise par le thermocouple le plus éloigné du foyer dépassent celles enregistrées au niveau du foyer signifie que la cible a pris feu. Quant à la baisse des températures du thermocouple A (proche du foyer), elle est causée aussi par la combustion de la cible qui empêche l'aire d'atteindre le foyer, ce dernier est sous-ventilé.

**Entre 1160s et 1260s :** A partir de la verticale 2 la combustion du foyer reprend, les deux courbes suivent leur évolution initiale. La courbe B continue à croître, ça veut dire que la cible n'a pas cessé de brûler.

## 1.2 Bilan

Nous concluons de cet exemple, que l'utilisation des moyennes mobiles de même distance dans le temps dans l'analyse des courbes de températures de différents points clés de l'espace nous permettra de déterminer l'emplacement du danger et de s'en protéger en cas de non connaissance des lieux incendiés ou lors de manque de visibilité en phase d'attaque.

## 2 Application sur un cas simple

### 2.1 Dispositif expérimental

L'essai que nous allons étudier dans cette partie a été effectué dans le couloir expérimental. Nous avons utilisé un foyer de buchettes étagées croisées de 9 étages chacun étant constitué de 6 buchettes avec support du foyer par 6 buchettes, 3 de chaque côté reposant sur leur base la plus étroite.

Les buchettes sont de dimension et masses initiales suivantes :  $D=48\text{mm} \times 75\text{mm} \times 600\text{mm}$ , et  $M=48,8\text{ kg}$

Nous avons utilisé pour carburant de l'essence et du gasoil (0,9L).

L'entrée du couloir a été réduite dans sa partie haute par des plaques de béton cellulaire. Elle est de dimensions suivantes : largeur = 0,29m \* hauteur = 1,25m.

La cible que nous avons utilisée est une planche de bois aggloméré d'1m de long, 0.6m de large et 0.02m d'épaisseur. Elle a été placée horizontalement au milieu du couloir à hauteur des thermocouples 7 des profils P4 et P5, comme indiqué sur le schéma ci-dessous.

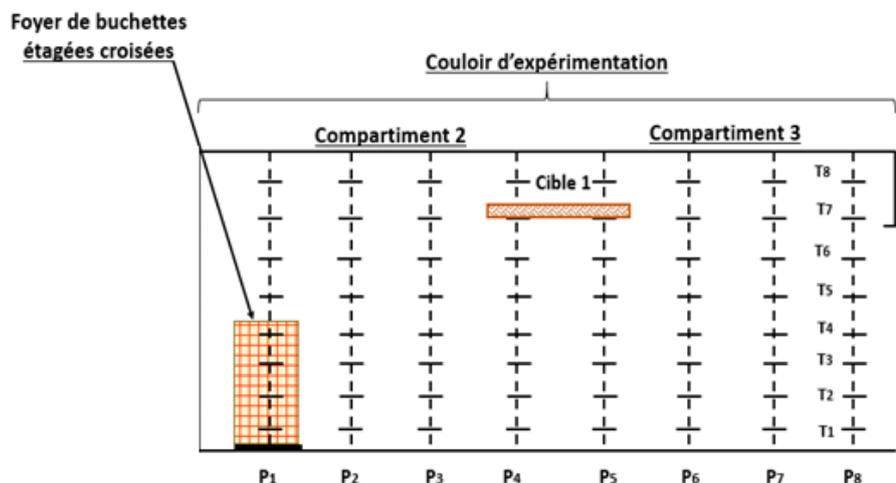


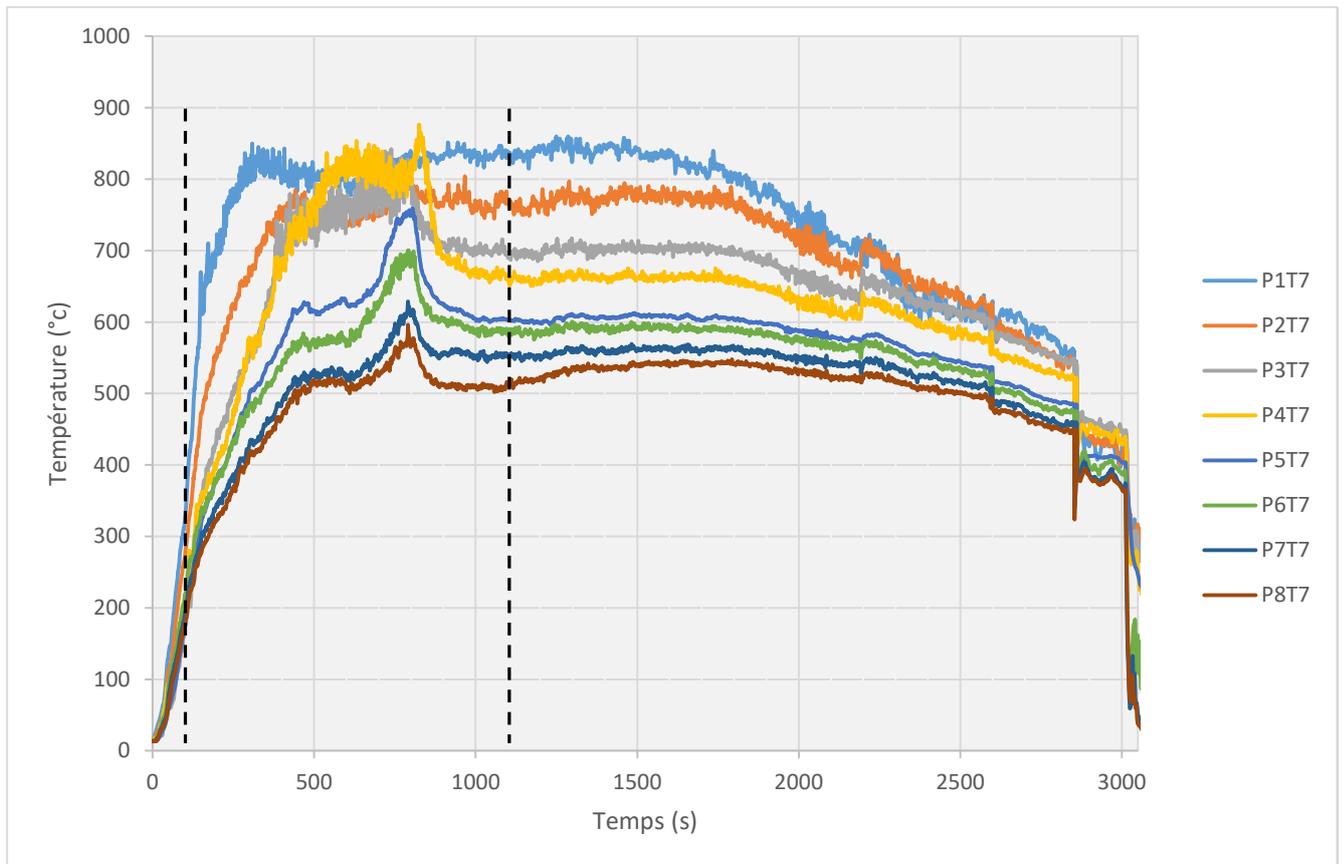
Figure 4. 3: Schéma explicatif représentant le dispositif expérimental utilisé

### 2.2 Choix de la distance dans le passé des moyennes mobiles la plus adaptée

Avant d'utiliser les moyennes mobiles, nous allons tout d'abord nous intéresser au signal brut.

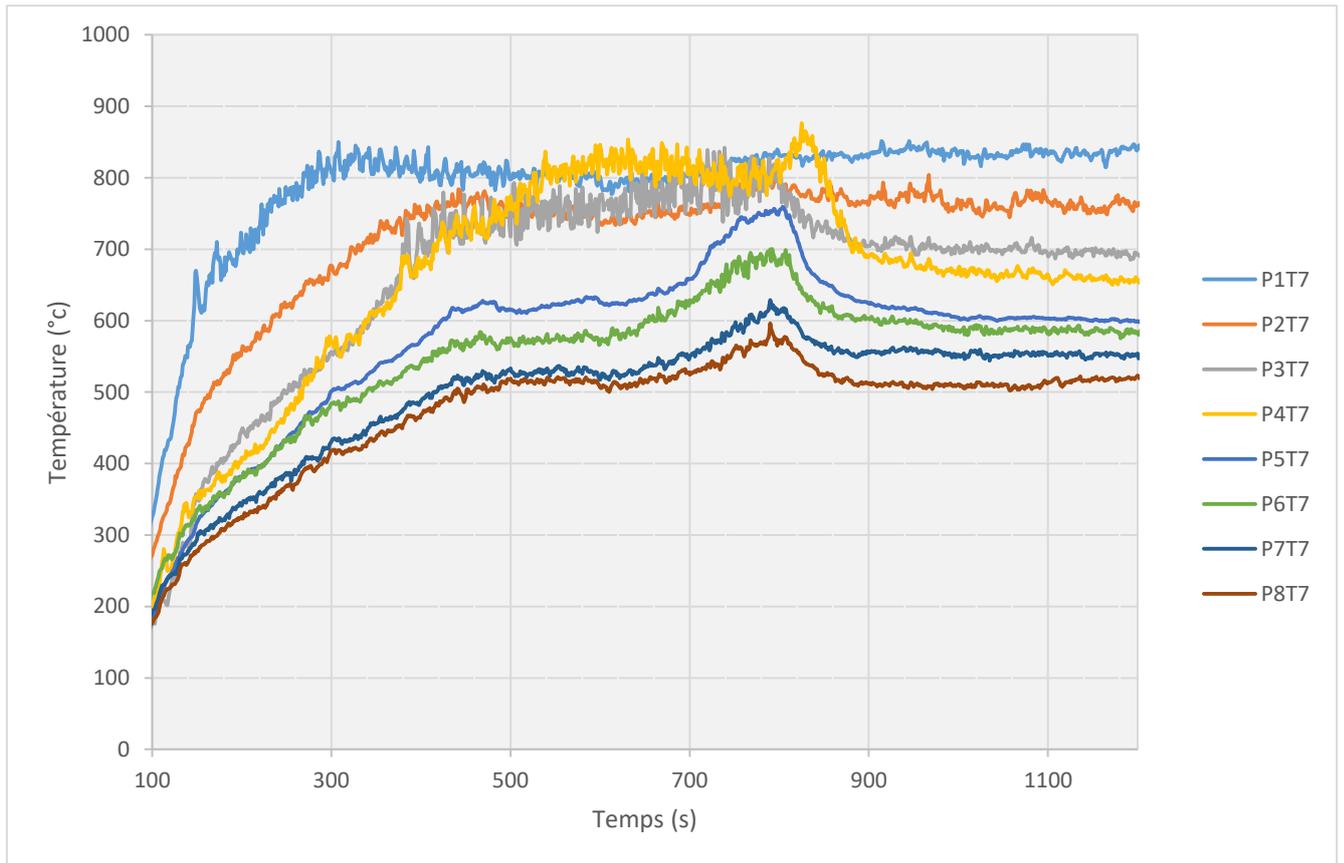
Afin d'étudier efficacement les événements liés à l'espace grâce à la comparaison des moyennes mobiles des températures de fumée, il faut tout d'abord déterminer la distance dans le temps des moyennes mobiles qui sera la plus adaptée à nos besoins. Pour cela nous allons

comparer les résultats obtenus en utilisant 4 distances différentes dans le passé  $d_1 = -15s$ ,  $d_2 = -30s$ ,  $d = -60s$  et  $d = -120s$ .



**Figure 4. 4:** Signal brut de l'évolution des températures enregistrées par les 8 thermocouples placés tout au long du couloir expérimental

Dans ce qui suit, nous avons choisi de ne présenter que l'analyse qui a été faite sur la partie délimitée par les deux verticales (Figure 4.4, compris entre 100s et 1100s) car elle comporte les événements clés de l'étude.

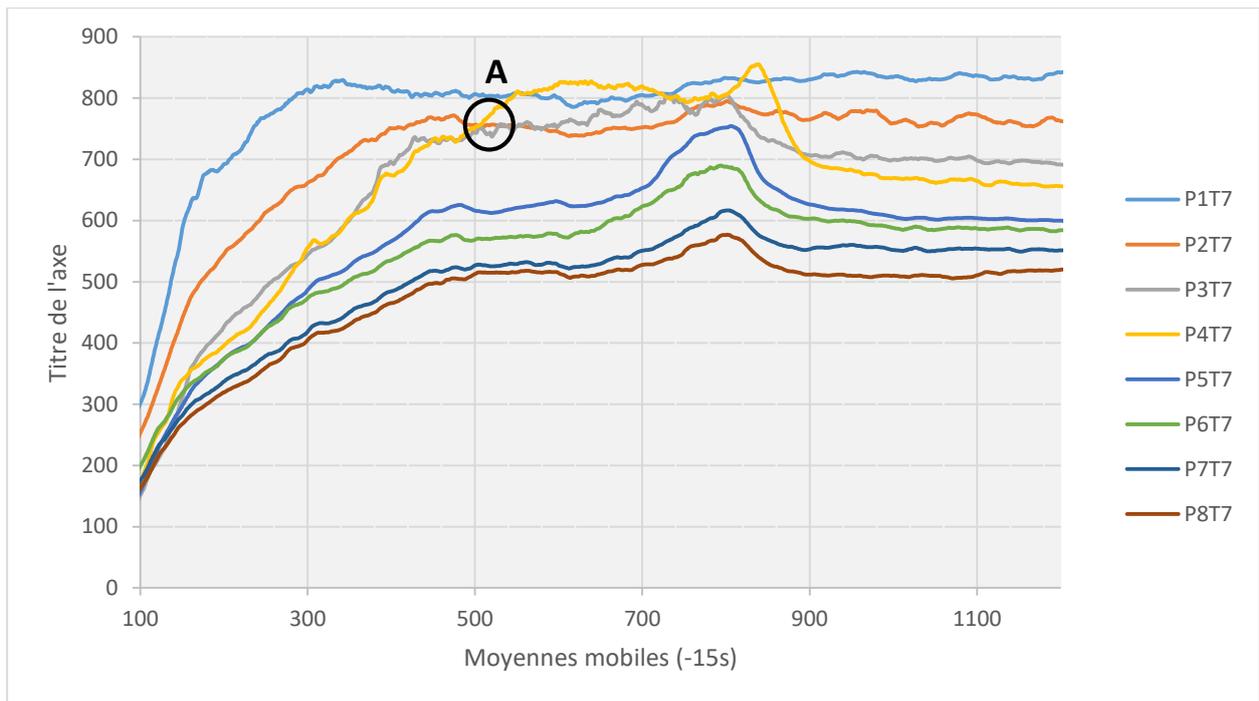


**Figure 4. 5:** Zoom sur la partie étudiée comprise entre 100s et 1100s

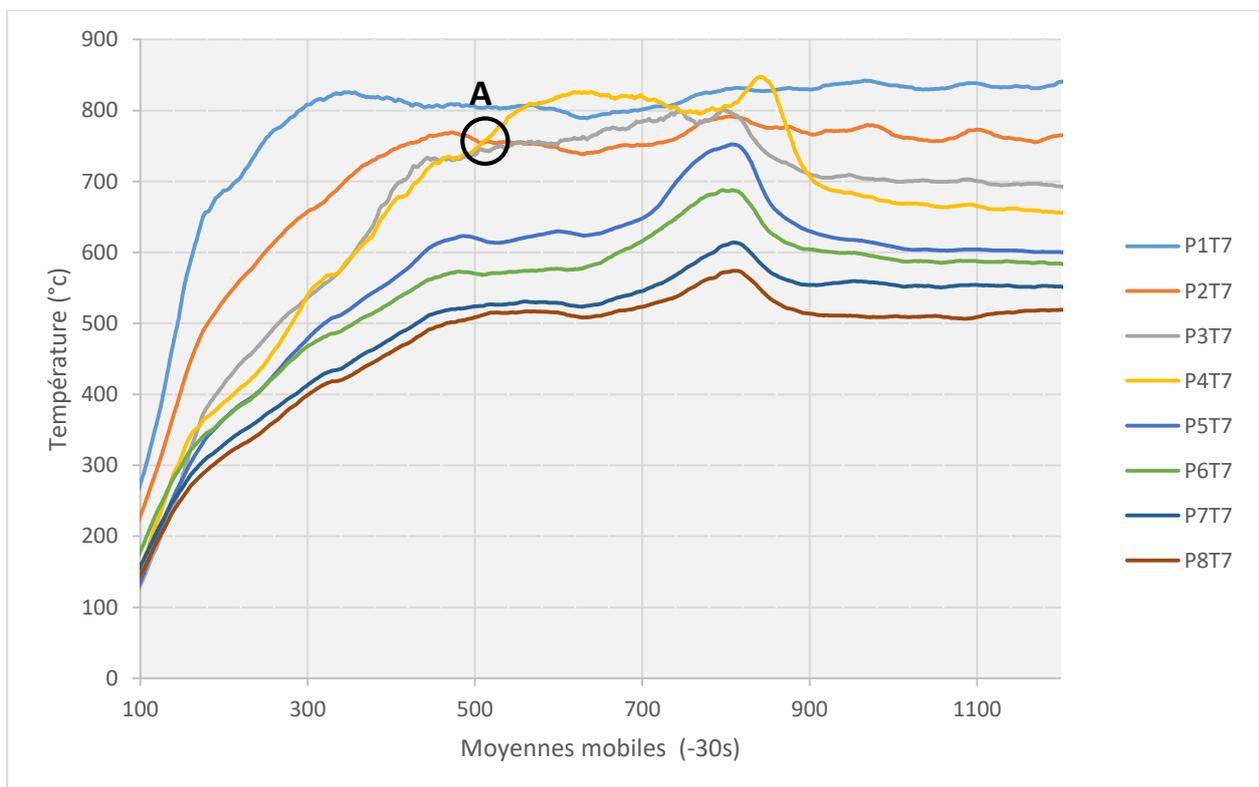
La figure 4.5 montre qu'il est très difficile voire impossible d'extraire des informations du signal brut. Les fluctuations entraînent plusieurs entrecroisements entre les courbes ce qui pourrait induire en erreur notre interprétation des événements.

Ainsi, il devient primordial d'utiliser les moyennes mobiles afin lisser le signal et simplifier l'interprétation des résultats.

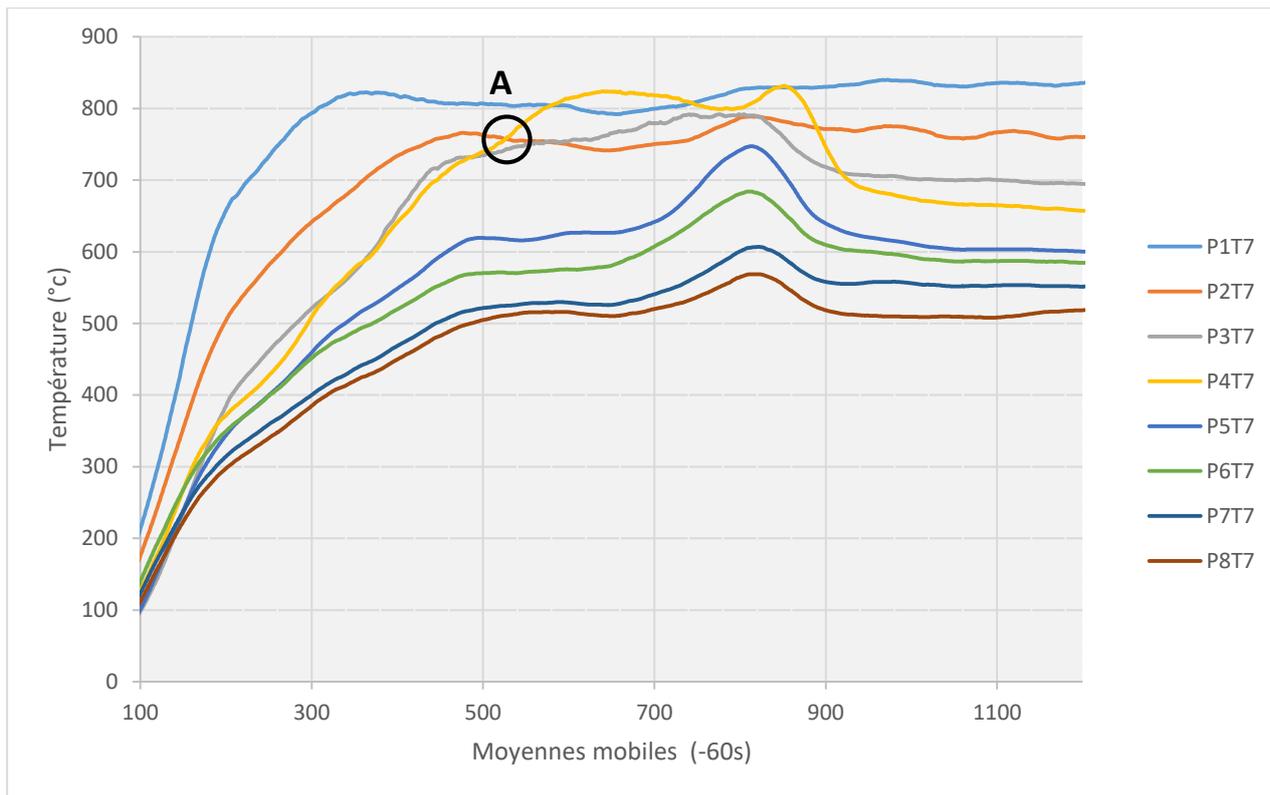
Pour ce qui suit, nous allons prendre comme point de référence le point de croisement « A » qui correspond à l'instant où la courbe de température du thermocouple P4T7 commence à croître pour ensuite passer au-dessus de toutes les autres courbes, cette élévation de température pourrait correspondre à un phénomène dangereux dont il serait nécessaire de détecter le plus rapidement et efficacement possible. A savoir que les analyses que nous effectuons seront faites sur le terrain en temps réel, c'est pour cela qu'il est nécessaire de déterminer la distance dans le temps la plus adaptée à nos besoins.



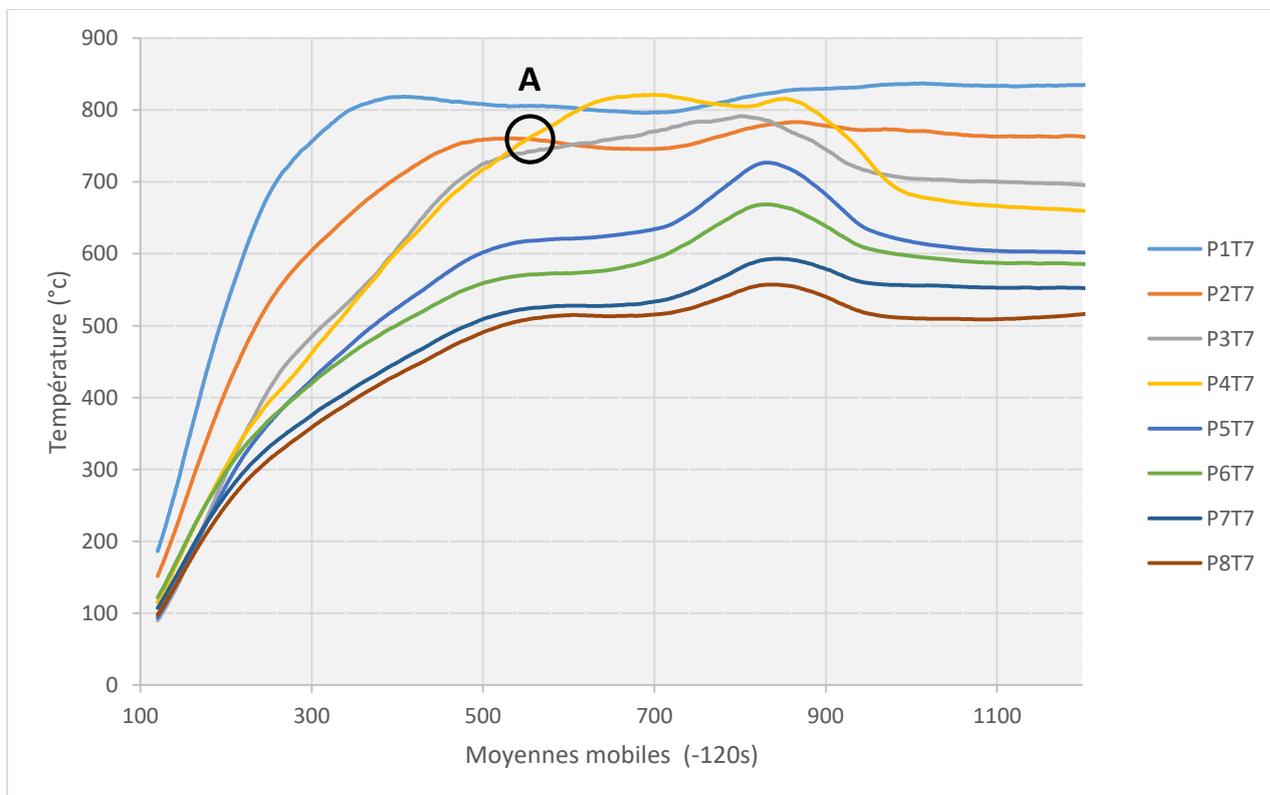
**Figure 4. 6:** Moyennes mobiles à (-15s) des températures mesurées, le long du local expérimental, de 100s à 1100s du temps de combustion



**Figure 4. 7:** Moyennes mobiles à (-30s) des températures mesurées, le long du local expérimental, de 100s à 1100s du temps de combustion



**Figure 4. 8:** Moyennes mobiles à (-60s) des températures mesurées, le long du local expérimental, de 100s à 1100s du temps de combustion



**Figure 4. 9:** Moyennes mobiles à (-120s) des températures mesurées, le long du local expérimental, de 100s à 1100s du temps de combustion

## **Bilan :**

Distance de la moyenne mobile (s)	Instant (t) de croisement au point (A)	Retards (s)
d= -15s	t= 505s	-
d= -30s	t= 509s	4s
d= -60s	t= 526s	21s
d= -120s	t= 556s	51s

**Tableau 4. 1:** Tableau comparatif représentant l'instant de croisement de deux courbes de température au point A à différentes distances de moyennes mobiles

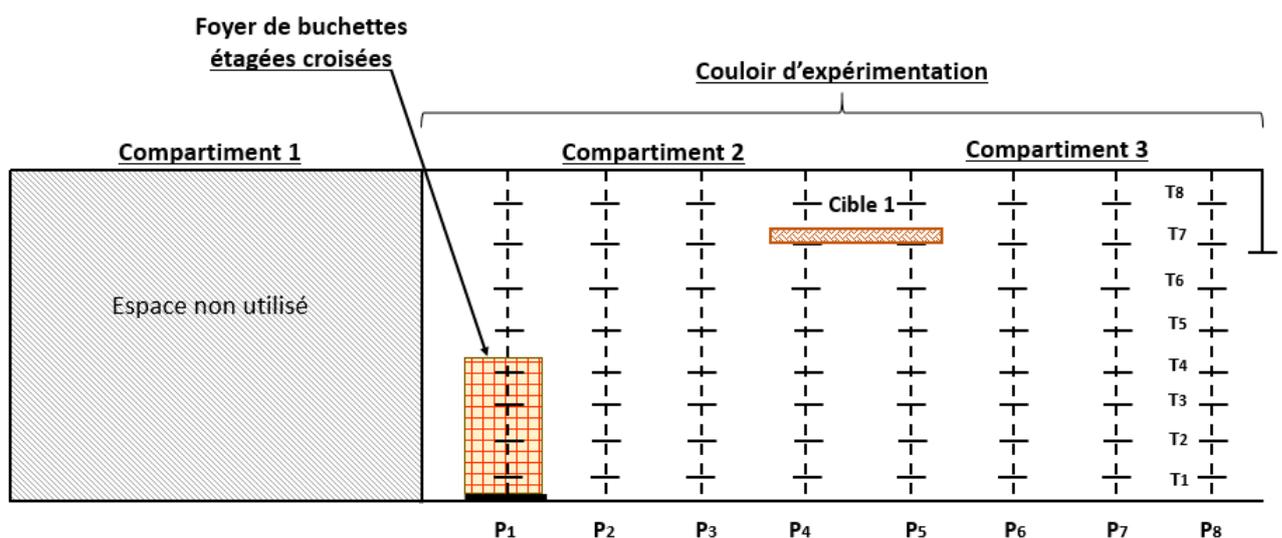
La moyenne mobile à (-15s) donne l'information plutôt que les autres moyennes, mais nous pouvons remarquer que les courbes sont restées bruitées. Les fluctuations rendent difficile l'interprétation de l'évolution des températures et donc l'analyse spatiale des moyennes mobiles.

Pour les deux distances (-60s) et (-120s), les courbes sont trop lisses ce qui entraîne une grande perte d'information et surtout un retard important dans l'évolution des températures. Nous ne pouvons pas les utiliser.

La moyenne mobile à (-30s) est la plus adaptée et la plus efficace. Elle nous a permis d'avoir un signal assez lisse pour simplifier son interprétation tout en évitant une perte d'information et de temps. Comme on peut le constater il n'y a eu que 4 secondes par rapport à l'analyse faite par la moyenne mobile à (-15s).

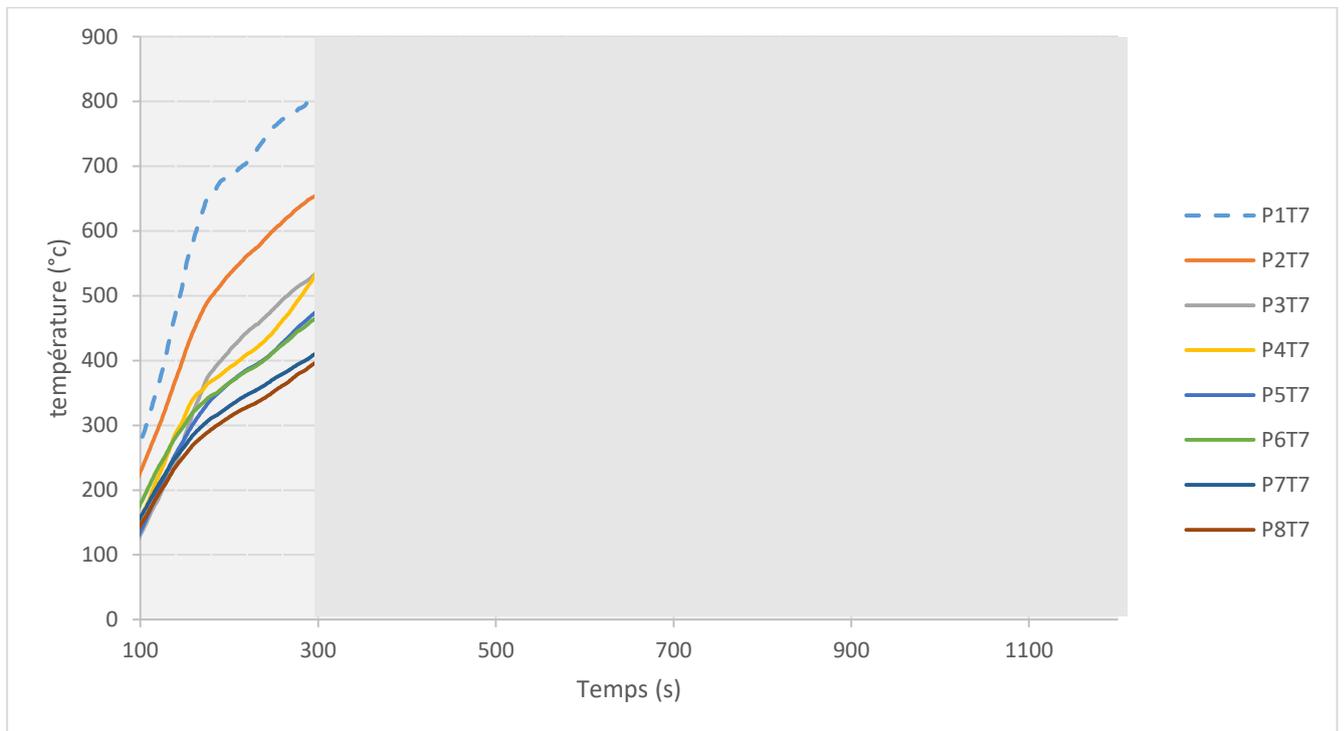
Ainsi, dans la suite de l'étude nous allons utiliser que les moyennes mobiles d'une distance de 30s dans le passé.

### **2.3 Analyse par comparaison de moyennes mobiles de températures dans l'espace et bilan comparatif**



**Figure 4. 10:** Schéma explicatif représentant le dispositif expérimental utilisé

Pour l'étude de cette partie, nous avons choisi de procéder par fenêtre de temps en affichant l'évolution des températures toutes les 200s. Ainsi nous pouvons analyser les courbes comme en situation d'intervention en appliquant la méthode d'analyse en temps réel tout en ignorant les événements futurs.

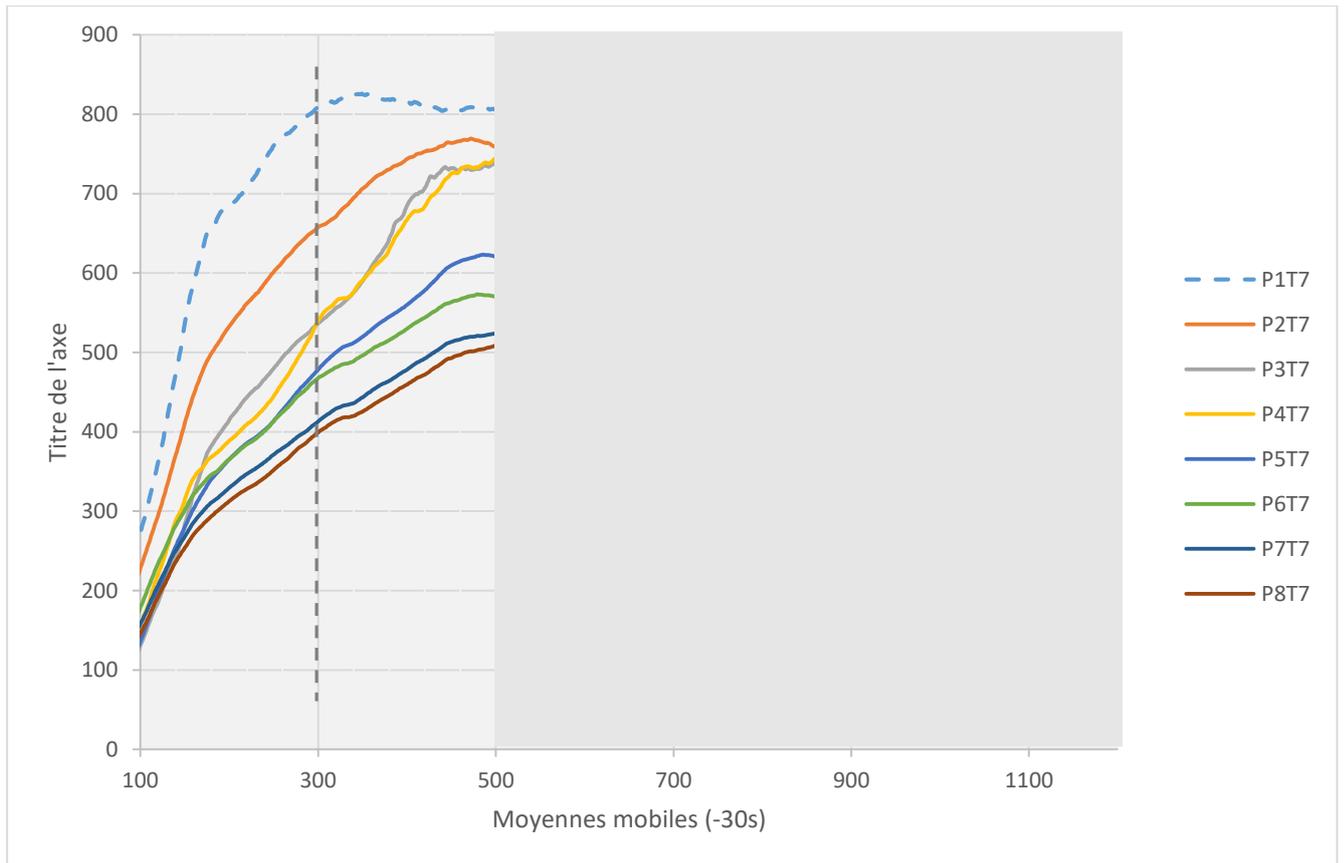


**Figure 4.11 : a)** Moyennes mobiles à (-30s) des températures mesurées dans le caisson d'expérimentation entre 100s et 300s du temps de combustion

### Fenêtre analysée : De 100s à 300s

Le feu est en pleine phase de croissance, c'est le foyer qui diffuse la chaleur mesurée le long du local, c'est pourquoi la courbe dont les températures sont les plus hautes est celle qui se situe dans le foyer (P1T7).

A la fin de cette fenêtre, nous remarquons que la courbe « en violet » correspondante au thermocouple P4T7 qui se situe dans la cible se rapproche de la courbe « verte » (P3T7) qui est plus proche du foyer. Ceci pourrait indiquer peut-être que la combustion de la cible a démarré.



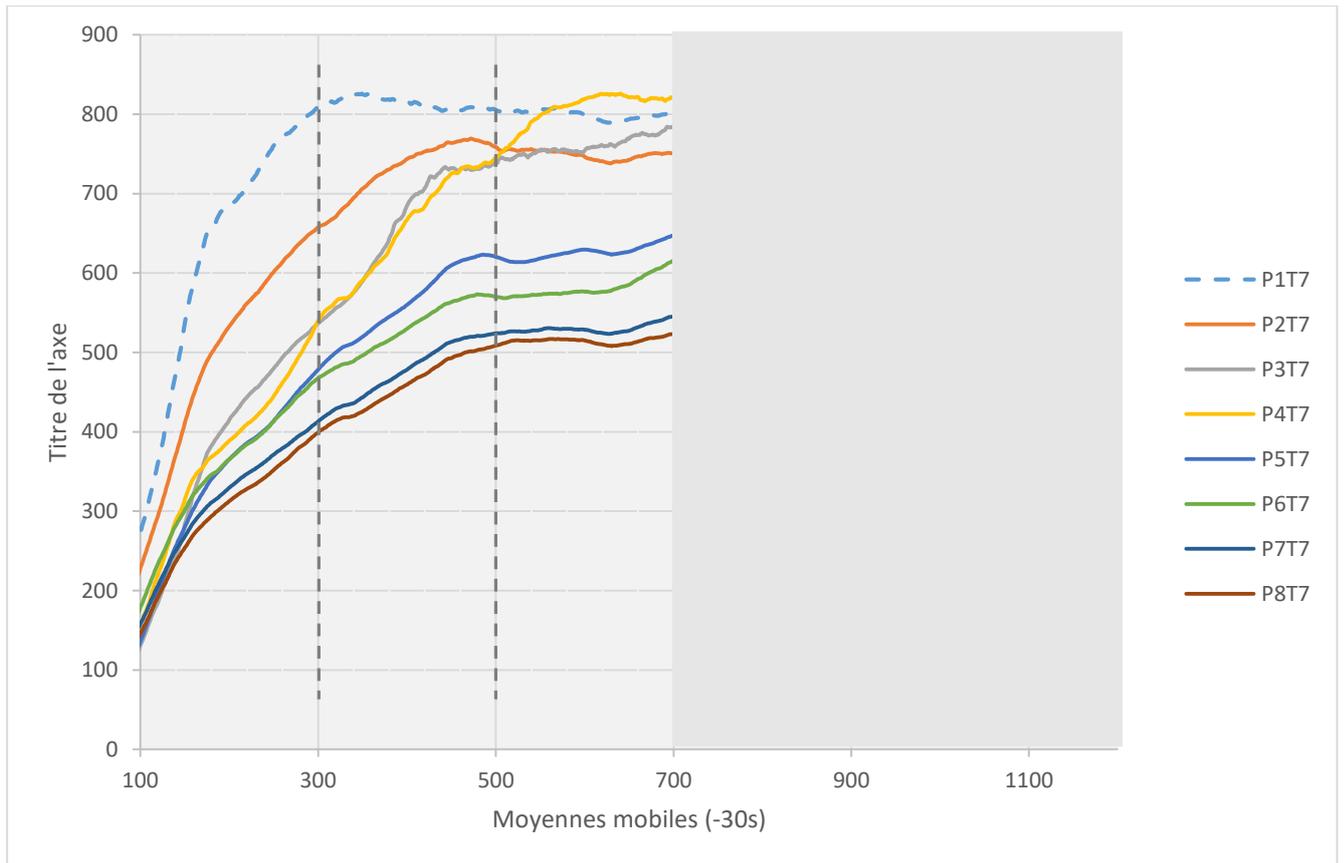
**Figure 4.11 : b)** Moyennes mobiles à (-30s) des températures mesurées dans le caisson d'expérimentation entre 100s et 500s du temps de combustion

### Fenêtre analysée : De 300s à 500s

La courbe P1T7 qui représente les températures du foyer est rentrée en phase de plein développement.

Au début de cette fenêtre la courbe P4T7 croise la courbe P3T7 et passe au-dessus. Cela indique que les températures, au moment de ce dépassement, sont légèrement plus élevées au niveau du thermocouple P4T7. Cette hausse de température ne peut parvenir que de la cible. Ceci vérifie donc l'hypothèse faite au moment de l'analyse de la fenêtre précédente.

Les deux moyennes mobiles (P4T7 et P3T7) s'entrecroisent beaucoup. Les fluctuations de ces deux courbes est signe d'un événement thermique présent ou imminent.



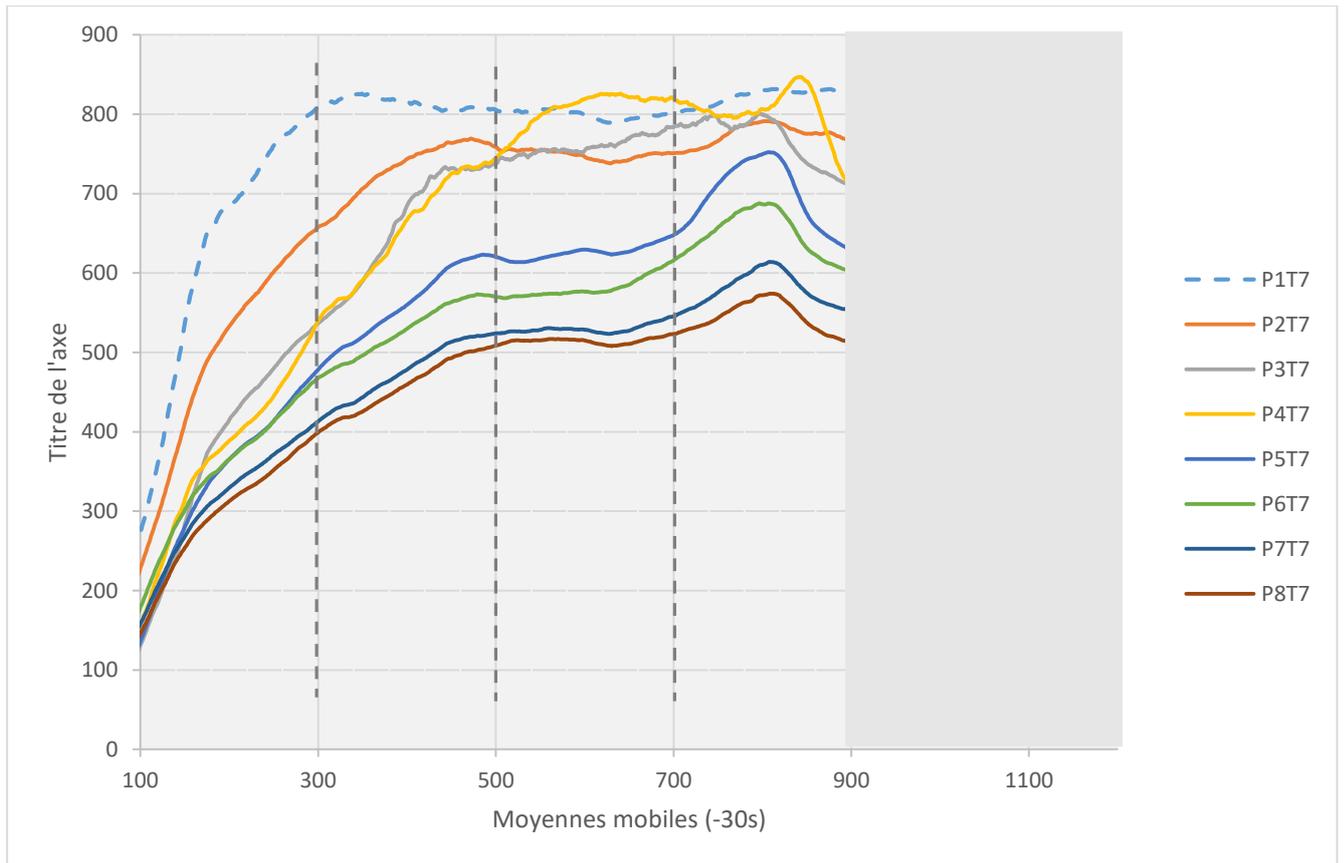
**Figure 4.11 : c)** Moyennes mobiles à (-30s) des températures mesurées dans le caisson d'expérimentation entre 100s et 700s du temps de combustion

### Fenêtre analysée : De 500s à 700s

L'analyse de la fenêtre précédente avait signalé la production d'un événement thermique imminent.

A partir de 500s, on observe une croissance de la moyenne mobile des températures au point P4T7 qui croise et passe au-dessus de toutes les courbes. C'est un embrasement généralisé des fumées.

Nous remarquons aussi que suite à cet embrasement des fumées au niveau de la cible, les températures du foyer ont légèrement baissé. La cible qui brûle empêche l'air d'atteindre le foyer qui finit par s'étouffer.

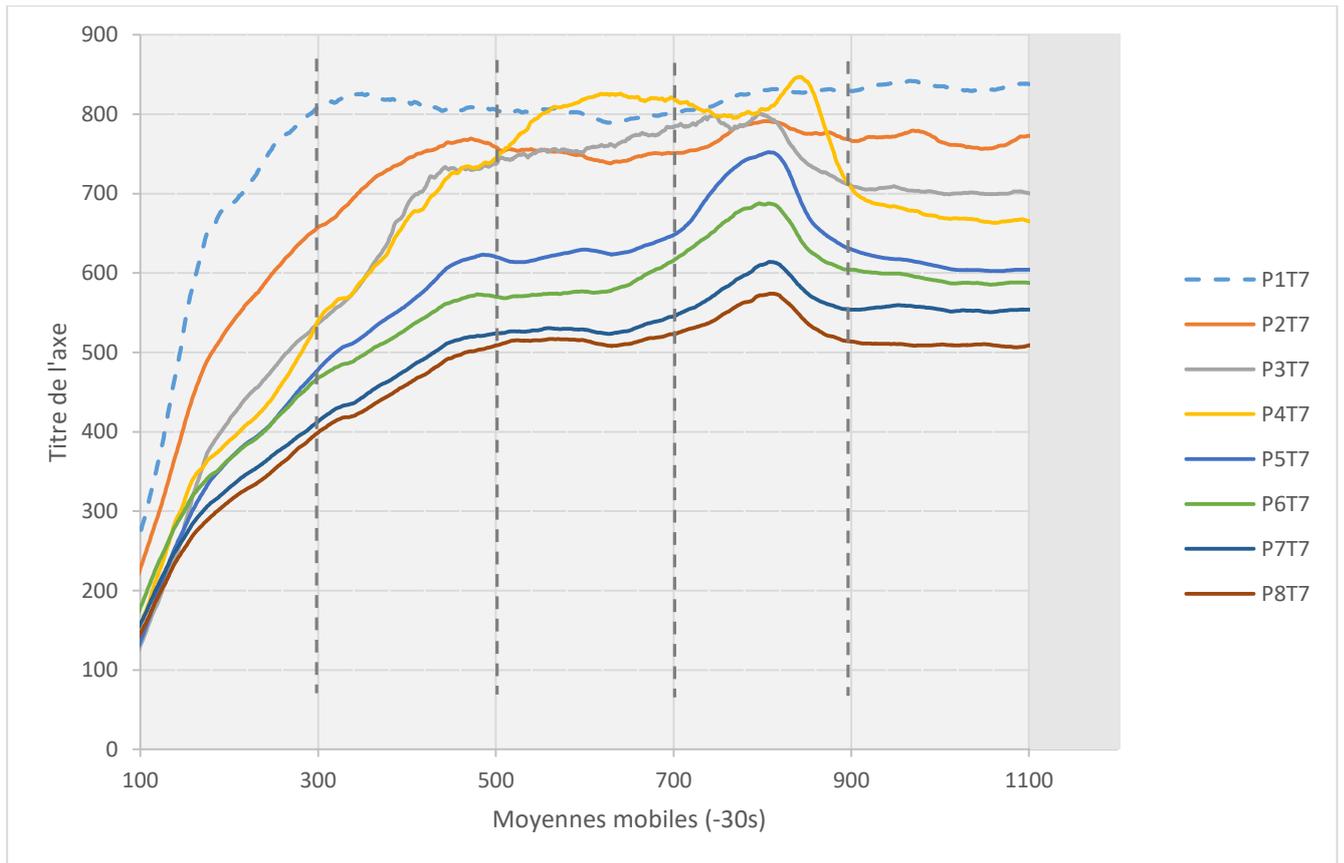


**Figure 4.11 : d)** Moyennes mobiles à (-30s) des températures mesurées dans le caisson d'expérimentation entre 100s et 900s du temps de combustion

#### Fenêtre analysée : De 700s à 900s

La moyenne mobile des températures au niveau du foyer reprend son ordre initial et passe au-dessus de la moyenne mobile des températures mesuré au point P4T7 (proche de la cible). Le foyer a repris sa combustion.

A partir de  $t=850s$ , or la P1T7, toutes les courbes de moyennes mobiles sont en décroissance. Le danger est toujours présent car elles sont toutes au-dessus des  $500^{\circ}C$ .



**Figure 4.11 : e)** Moyennes mobiles à (-30s) des températures mesurées dans le caisson d'expérimentation entre 100s et 1100s du temps de combustion

**Figure 4. 11:** Etude par partie des moyennes mobiles à (-30s) des températures mesurées dans le caisson d'expérimentation entre 100s et 1100s du temps de combustion (a, b, c, d et e)

#### Fenêtre analysée : De 900s à 1100s

La courbe P4T7 croise la courbe P3T7 et passe en dessous. C'est la fin de combustion de la cible. Les courbes ont repris l'ordre initial de la combustion où seul le foyer est source de chaleur.

### **Bilan comparatif :**

<b>Sur le terrain</b>		<b>Analyse des moyennes mobiles</b>		<b>Conclusion</b>
<i>Temps de combustion</i>	<i>Evènements observés sur le terrain</i>	<i>Temps de combustion</i>	<i>Résultats de l'analyse</i>	
t= 480s	La cible est en feu	t= 300s  t= 350s	Nous supposons le début de combustion de la cible  Nous confirmons la combustion de la cible	La détection du début de combustion de la cible par comparaison de moyennes mobiles a eu lieu environ <u>3 minutes en avance</u> comparé à sa détection par simple observation sur le terrain
t= 660s	Les flammes de la cible se prolongent vers la sortie	t= 500s  t=510s	Nous avons signalé la production imminente d'un phénomène thermique dangereux  Nous confirmons la production du phénomène et le localisons. C'est l'embrasement généralisé des fumées au niveau de la cible.	Plus de <u>2 minutes</u> de retard entre l'observation du phénomène thermique sur le terrain et la détection de danger par comparaison de moyennes mobiles

**Tableau 4. 2:** Tableau comparatif représentant le temps de signalement des évènements par simple observation sur le terrain et par analyse des moyennes mobiles (cas simple)

### **3 Application sur un cas complexe**

Nous allons maintenant appliquer la méthode de comparaison de moyennes mobiles sur un cas de simulation d'incendie plus complexe. Nous avons choisi de garder la même configuration du local et le même foyer utilisés pour l'étude de cas simplifié et d'y ajouter 4 cibles différentes afin d'étudier la propagation du feu en présence de différents combustibles d'analyser aussi le cas de création de nouveaux foyers.

### 3.1 Dispositif expérimental

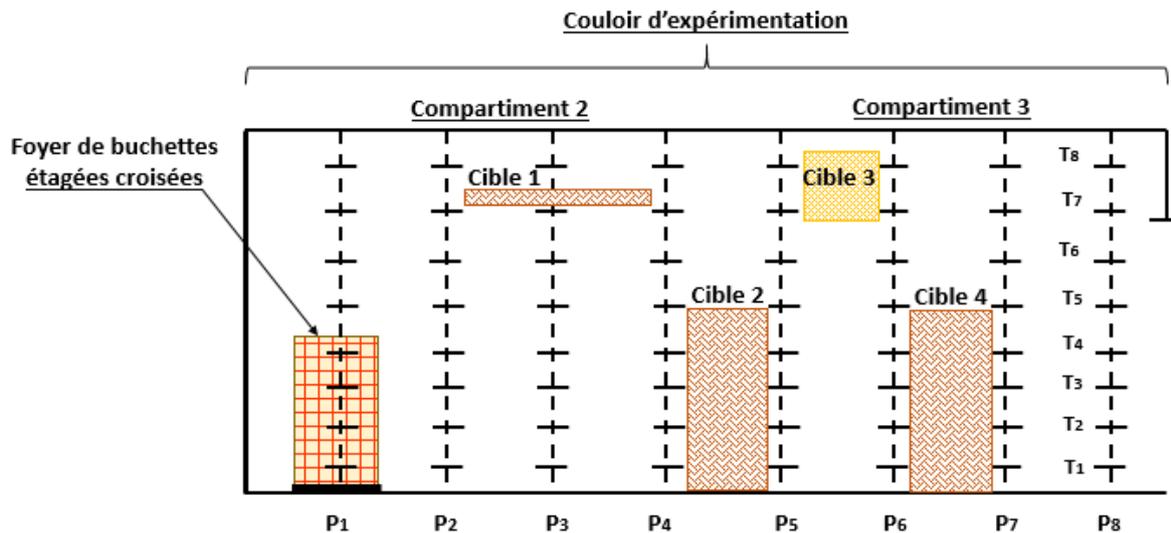


Figure 4. 12: Schéma explicatif du dispositif expérimental utilisé

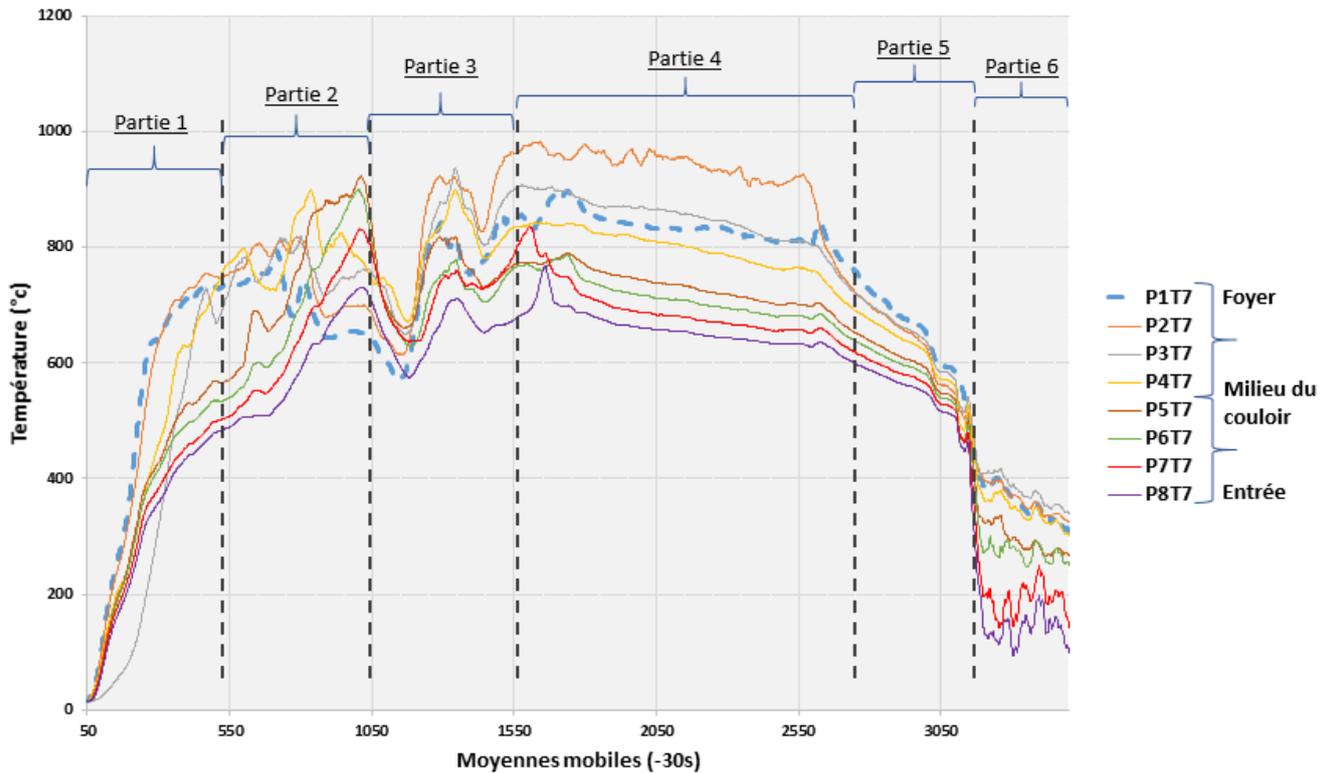
Les différentes cibles utilisées sont les suivantes :

**Cible 1** : Planche en bois aggloméré (0,6m x 1m) placée horizontalement.

**Cible 2** : Composé d'une planche en bois aggloméré (0.6m x 1m) et de la mousse (0.08m x 0.6m x 0,86m), posées verticalement au sol.

**Cible 3** : Morceau de mousse (0,15m x 0,7m x 0,15m) posée en travers.

**Cible 4** : Composé d'une planche en bois aggloméré (0.6m x 1m) et de la mousse (0,15m x 0,35m x 0,7m), posées verticalement au sol.



**Figure 4. 13:** Moyennes mobiles à (-30s) de l'évolution des températures tout au long du couloir expérimental

Afin d'analyser ces courbes et en sortir les informations utiles, nous allons étudier l'évolution des moyennes mobiles en répartissant le temps de combustion en plusieurs fenêtres de temps (figure 4.12).

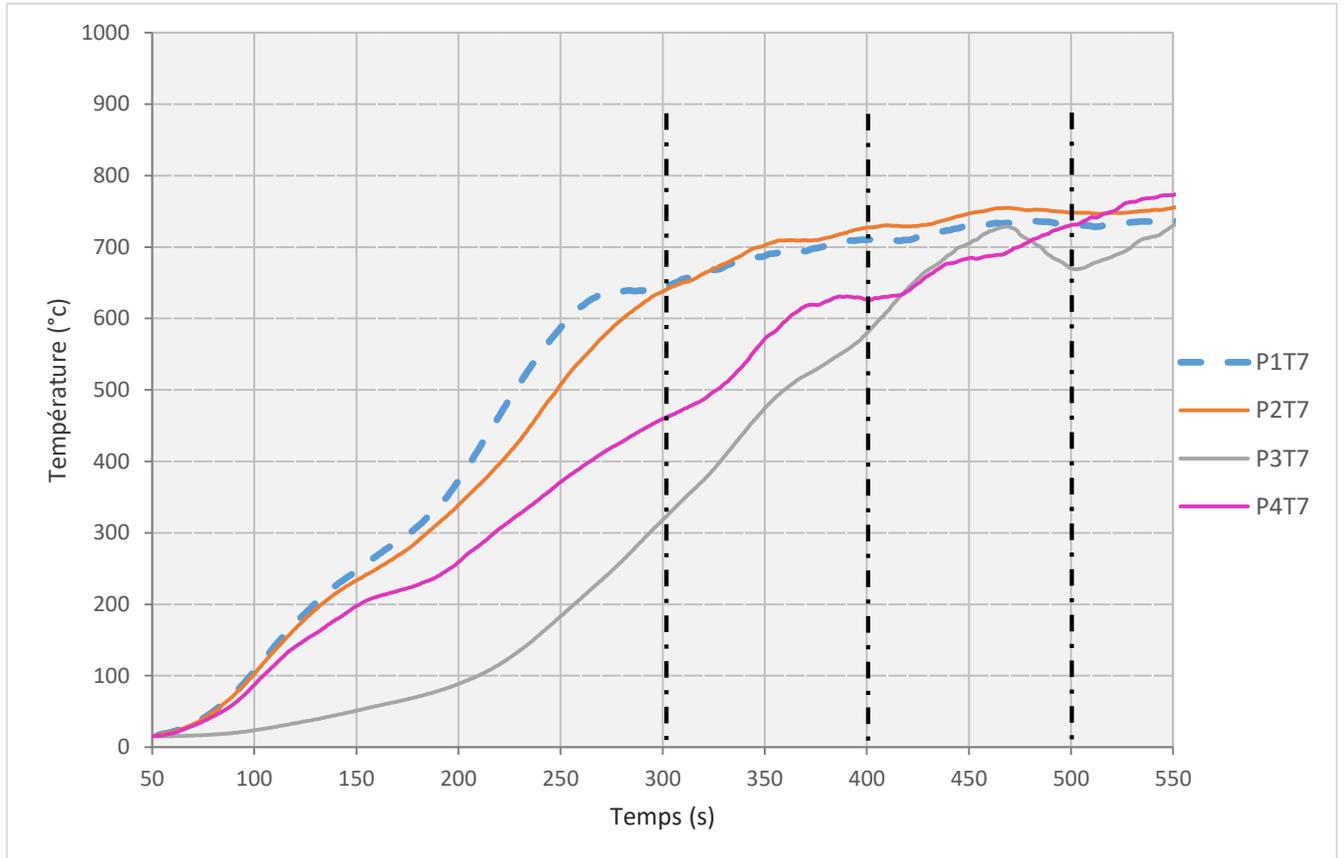
Quant à l'espace, nous allons étudier les thermocouples placés le long du couloir, en comparant d'abord le thermocouple placé dans le foyer avec les thermocouples placés entre le foyer et le milieu du couloir, ensuite avec les thermocouples placés entre le milieu du couloir et l'entrée.

Enfin, afin d'étudier l'efficacité de la méthode nous allons conclure l'étude de chaque partie par la comparaison des résultats de l'analyse des moyennes mobiles avec les observations faites sur le terrain.

### 3.2 Analyse de l'évolution des températures

- **Fenêtre analysée :** de 50s à 550s du temps de combustion

**Thermocouples comparés :** Les 4 thermocouples placés entre le foyer et le milieu du couloir



**Figure 4. 14:** Comparaison de l'évolution de la moyenne mobile à (-30s) des thermocouples situés entre le foyer et le milieu du couloir, de 50s à 550s du temps de combustion

**Du début de la combustion à 300s :** L'évolution du feu est en pleine croissance où seul le foyer est source de chaleur. La courbe « P3T7 » est sensée être au-dessus de la courbe « P4T7 » car elle est plus proche du foyer. C'est à cause de l'emplacement de la cible 1 qui couvre le thermocouple P4T7.

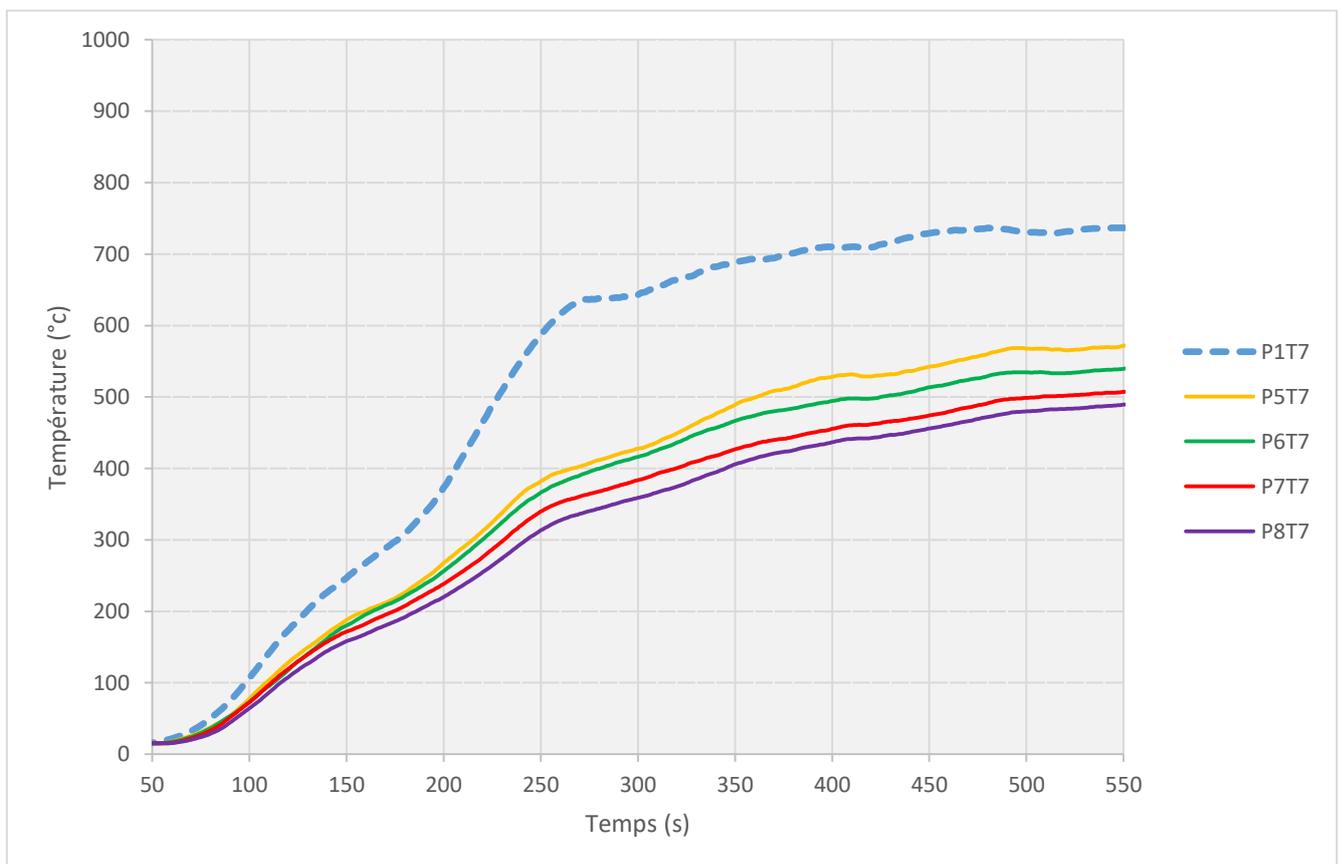
**De 300s à 400s :** La moyenne mobile « P2T7 » croise et passe au-dessus de la moyenne mobile des températures du foyer « P1T7 ». Sachant que le thermocouple « P2T7 » est plus proche de la *cible 1* que du foyer, nous pouvons en déduire que le moment ( $t=300s$ ) où la courbe « P2T7 » croise la courbe « P1T7 » représente le début de combustion de la cible 1.

**De 400s à 500s :** La courbe P2T7 est toujours au-dessus de la P1T7. Quant à la courbe P3T7 elle continue à croître puis croise et passe au-dessus de la courbe

P3T7 en se rapprochant beaucoup de la courbe P1T7 puis commence à décroître légèrement pour repasser en dessous de la courbe P3T7. Cette évolution pourrait représenter de la propagation du feu au niveau de la cible 1.

**De 500s à 550s :** La moyenne mobile P4T7 passe au-dessus des trois autres thermocouples les plus proches du foyer. Ceci est soit dû à la combustion de la cible 1 qui empêche l'air d'atteindre le foyer, ou soit c'est la combustion de la cible 2 qui a démarré. Nous pourrions vérifier ces deux suppositions dans ce qui suit.

**Zone étudiée :** Du milieu au foyer



**Figure 4. 15:** Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés dans le foyer et entre le milieu et l'entrée du couloir, de 50s à 550s du temps de combustion

**Du début de la combustion à 550s :** Sur toute cette partie les courbes de températures suivent une évolution parallèle à celle des températures du foyer. Cela signifie que les cibles placées dans cette zone n'ont pas encore pris feu.

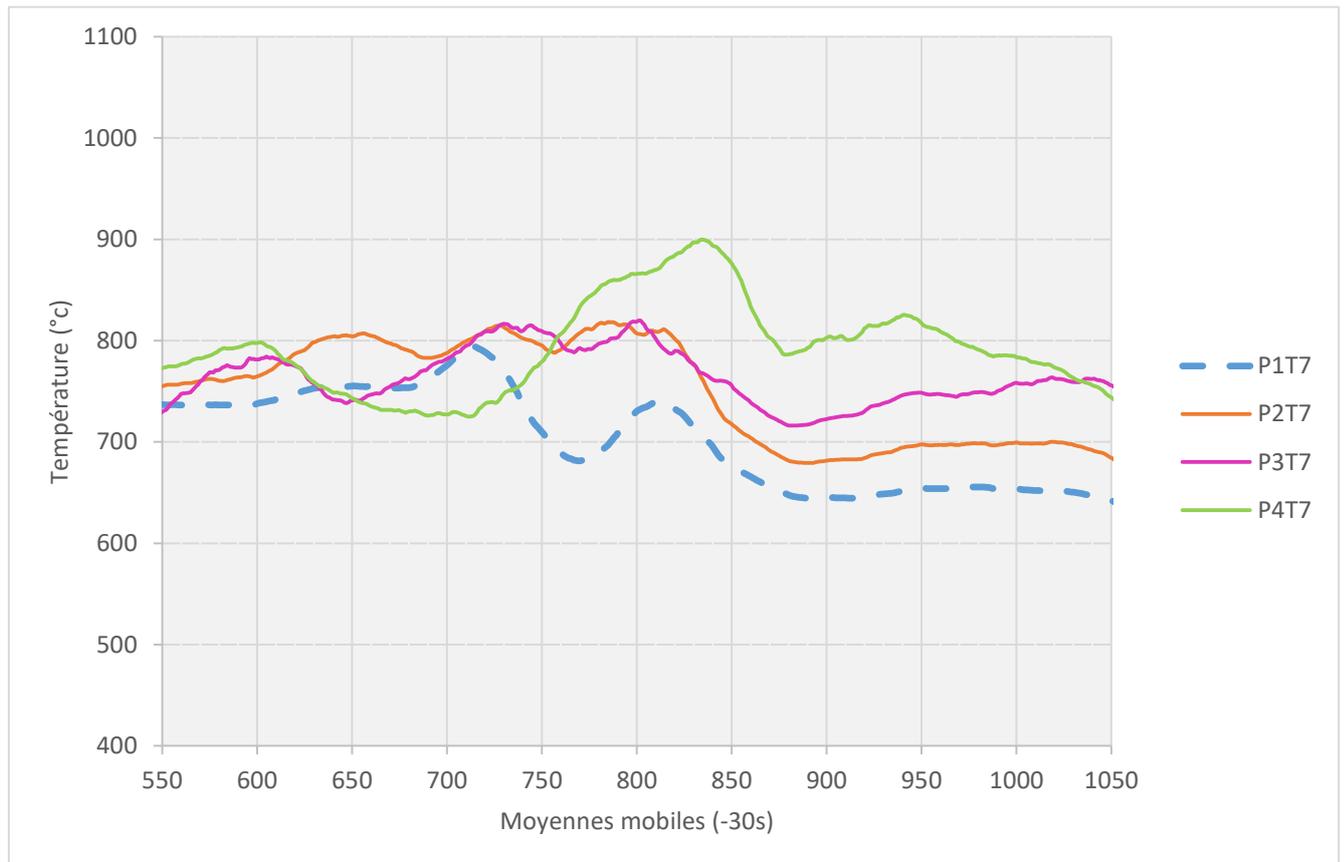
**Bilan comparatif :**

Sur le terrain		Analyse des données		Conclusion
Temps de combustion	Evènements observés sur le terrain	Temps de combustion	Analyse spatiale des moyennes mobiles des températures	
t= 400s	La fumée empêche de voir s'il y a combustion de la cible 1.	t= 300s	Début de combustion de la cible 1	L'analyse des moyennes mobiles nous a permis de déterminer le début de combustion de la cible 1 (t=300s). Ceci nous était impossible sur le terrain à cause de l'opacité des fumées.
t= 510s	Plafond de fumée à mi-hauteur du couloir. Nous ne voyons plus la cible 1.	t= 515s	P4T7 (cible 1/cible 2) passe au-dessus de toutes les courbes.	Nous ne pouvons pas préciser si c'est la cible 1 ou la cible 2 qui représente le point le plus chaud du dispositif à cet instant.
			Plus de 200°C de différence de températures entre P4T7 (cible 1/cible 2) et P5T7 (cible 2).  P5T7 (cible 2) est en dessous de toutes les courbes de thermocouples proches de la cible 1	Ces informations prouvent que la cible 2 n'a toujours pas pris feu, et confirme que c'est la cible 1 qui a causé la hausse de température enregistrée par P4T7

**Tableau 4. 3:** Tableau comparatif représentant le temps de signalement des évènements par simple observation sur le terrain et par analyse des moyennes mobiles (cas complexe: de 50s à 550s)

- **Fenêtre analysée :** De 550s à 1050s du temps de combustion

## Zone étudiée : Du foyer au milieu du couloir

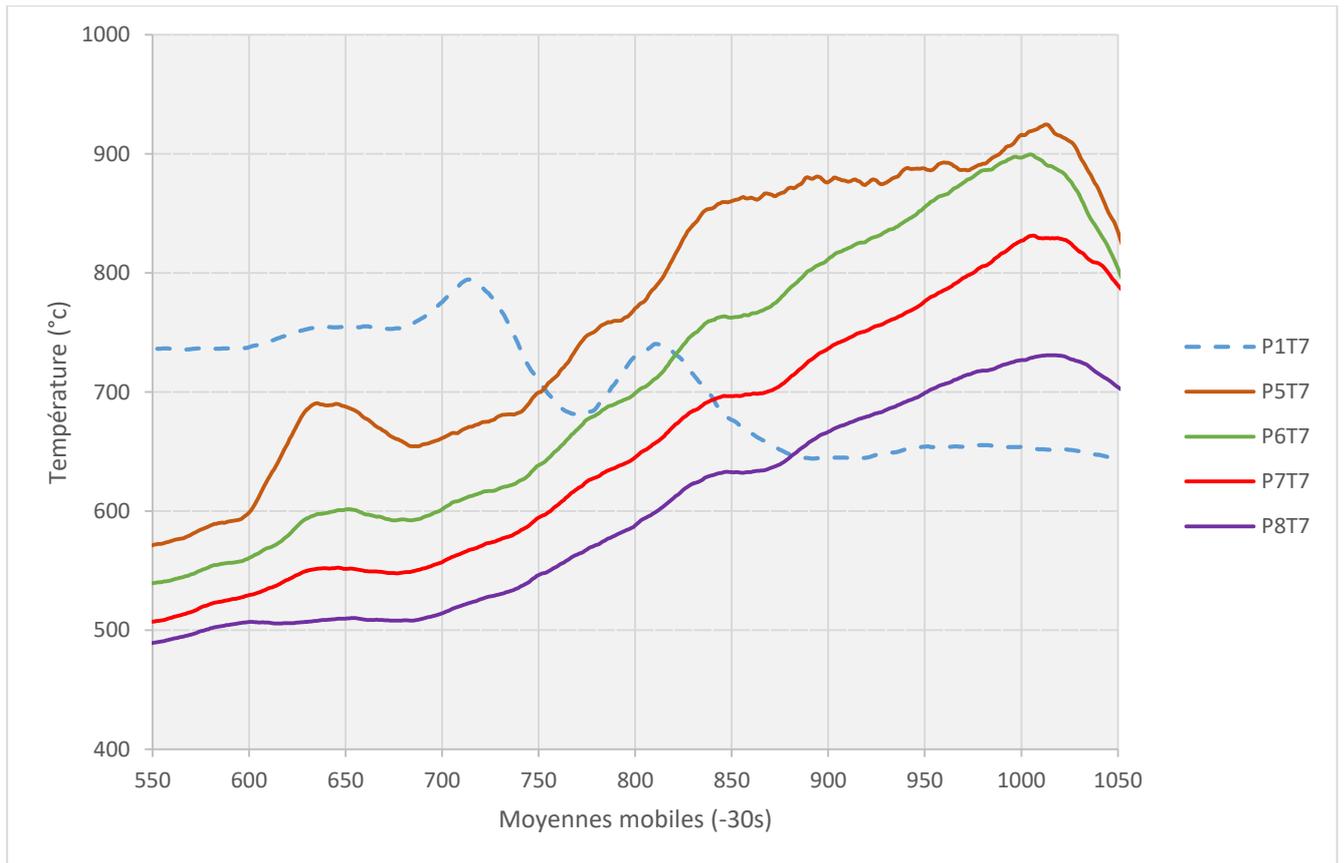


**Figure 4. 16:** Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés entre le foyer et le milieu du couloir, de 550s à 1050s du temps de combustion

**De 550s à 760s :** Plusieurs entrecroisements entre les moyennes mobiles indiquent une situation instable dans la partie étudiée, comprise entre le foyer et le milieu du couloir. A 740s la moyenne mobile P4T7 croise la moyenne mobile P1T7 et passe au-dessus. L'évolution de ces deux dernières moyennes mobiles indique que les températures du foyer commencent à décroître et que celles de la cible 2 croient. C'est le début de combustion de la cible 2.

**A partir de 760s :** L'ordre des moyennes mobiles s'est inversé indiquant que la combustion de la cible 2 empêche l'air d'atteindre le foyer, ce qui explique le fait que la moyenne mobile des températures du foyer se retrouve en dessous des autres courbes.

## Zone étudiée : Du milieu du couloir à l'entrée



**Figure 4. 17:** Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés dans le foyer et entre le milieu et l'entrée du couloir, de 550s à 1050s du temps de combustion

Les quatre moyennes mobiles des températures mesurées entre le milieu et l'entrée du couloir sont en croissance et ont une évolution parallèle. Leur ordre indique qu'elles suivent l'évolution des températures émises par la cible 2.

Le fait que la moyenne mobile des températures du foyer « P1T7 » passe en-dessous des quatre autres moyennes mobiles indique que la partie intérieure du couloir est sous-ventilée.

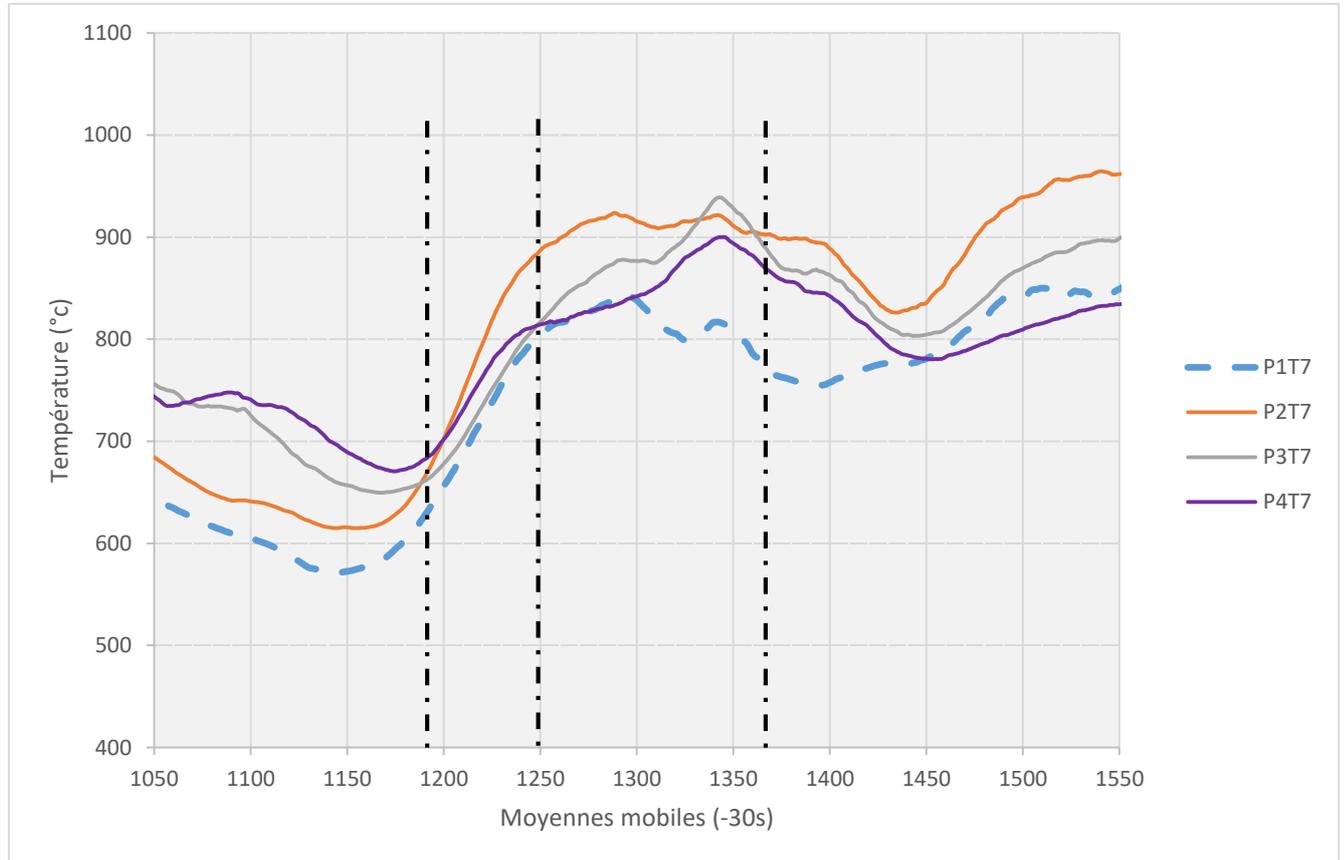
**Bilan comparatif :**

Sur le terrain		Analyse des données		Conclusion
Temps de combustion	Evènements observés sur le terrain	Temps de combustion	Analyse spatiale des moyennes mobiles des températures	
t= 900s	les fumées commencent à s'enflammer suivi d'un embrasement généralisé à l'intérieur du couloir sans sortie des flammes	Entre t= 850s et t= 880s	Les deux moyennes mobiles des températures mesurées par les thermocouples P5T7 (cible 2/cible 3) et P6T7 (cible 3/cible 4) passent au-dessus de toutes les autres courbes.  A ce moment, la zone de danger se situe au milieu du couloir entre les deux profils P5 et P6.	L'analyse des courbes montre que l'embrasement des fumées a eu lieu au milieu du couloir entre P5 et P6, ce qui explique aussi le fait que les flammes n'ont pas pu atteindre l'entrée du couloir.  L'information a été signalée 20s avant qu'on s'en aperçoive sur le terrain.
t= 1020s	Très peu de visibilité sur le foyer qui semble presque éteint	A partir de t= 1010s	Toutes les courbes sont en décroissance.	Nous ne pouvant pas dire que la situation est sécurisée car les températures sont toujours très élevées (entre 650°C et 920°C).

**Tableau 4. 4:** Tableau comparatif représentant le temps de signalement des évènements par simple observation sur le terrain et par analyse des moyennes mobiles (cas complexe: de 550s à 1050s)

- **Fenêtre analysée:** de 1050s à 1550s du temps de combustion

**Zone étudiée :** Du foyer au milieu du couloir



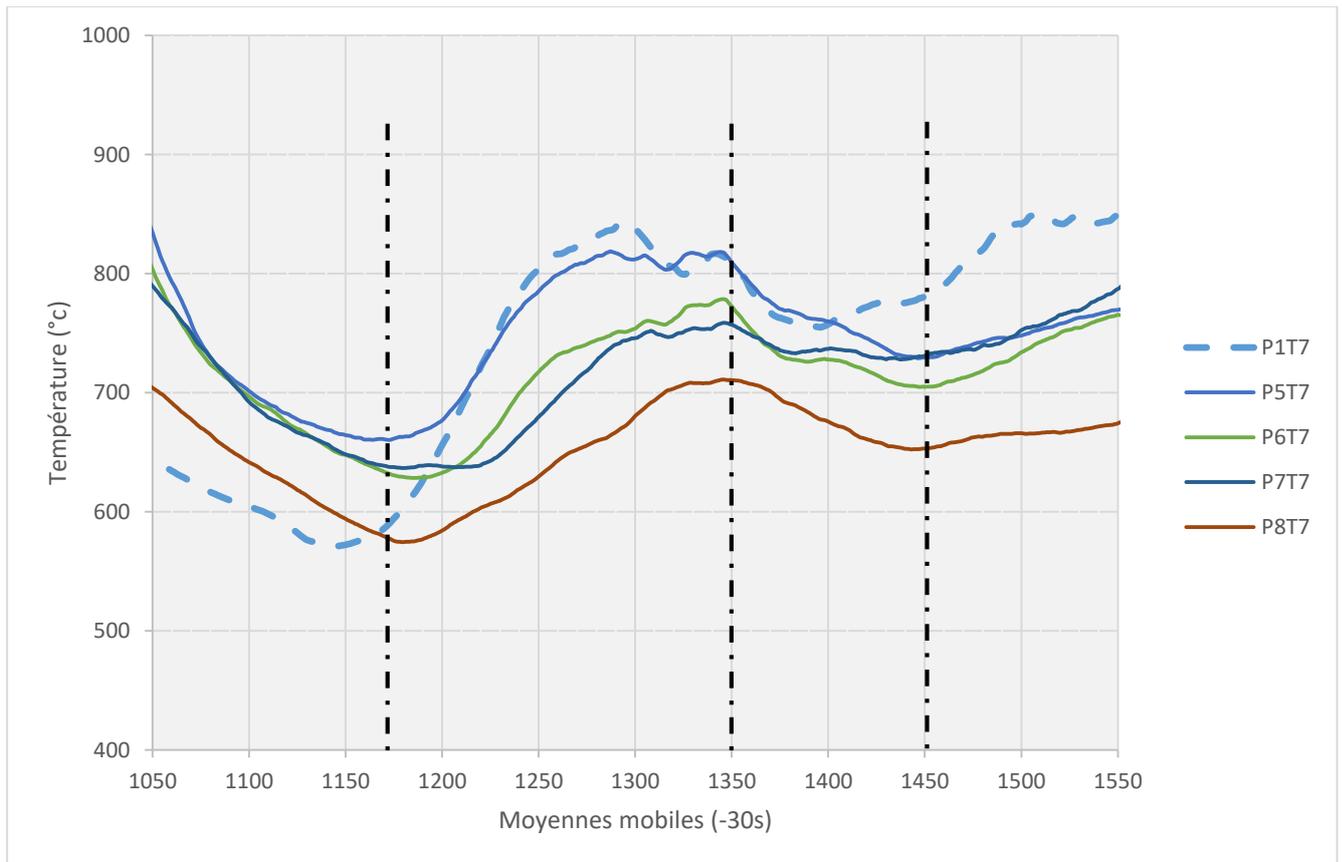
**Figure 4. 18:** Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés entre le foyer et le milieu du couloir, de 1050s à 1150s du temps de combustion

**De 1050s à 1170s :** L'ordre des moyennes mobiles des températures enregistrées tout le long du couloir montre que durant cette durée de combustion le foyer est la zone où les températures sont les plus basses. La courbe P4T7 est au-dessus des autres courbes.

**A t=1177s :** La courbe P2T7 passe au-dessus de toutes les autres courbes indiquant ainsi la zone de danger, le foyer et la cible 1.

**De 1177s à 1250s :** Toutes les courbes sont en croissance. La moyenne mobile des températures mesurées par le thermocouple P2T7 (proche de la cible 1) passe au-dessus de toutes les autres courbes, ça veut dire que cela provient de la cible 1 et non du foyer car la courbe P1T7 reste en-dessous.

### Zone étudiée : Du milieu du couloir à l'entrée



**Figure 4. 19:** Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés dans le foyer et entre le milieu et l'entrée du couloir, de 1050s à 1550s du temps de combustion

**De 1050s à 1170s :** La moyenne mobile des températures du thermocouple P4T7 reste au-dessus de toutes les autres courbes, et comme nous pouvons voir sur la figure 4.18 elle est suivie de la courbe P3T7, ce qui veut dire que cela provient de la partie de la cible 1 placée entre P3T7 et P4T7.

**A 1170s :** La courbe caractéristique du foyer P1T7 commence à croître et dépasse progressivement les autres courbes, ce qui signifie que la combustion du foyer a repris.

**Entre 1170s et 1350s :** Suite à la reprise de combustion du foyer, les quatre courbes des thermocouples placées entre le milieu et l'entrée P5T7, P6T7, P7T7 et P8T7, reprennent l'ordre qu'ils avaient au début de la combustion quand la seule source des fumées était le foyer.

**De 1350s à 1450s :** Toutes les courbes commencent à décroître, sauf P7T7 qui passe au-dessus de P6T7. Ceci provient de la partie droite de la cible 4 qui est proche de l'entrée.

**A partir de 1450s :** La courbe P1T7 qui représente les températures du foyer commence à croître et passe au-dessus de toutes les courbes des thermocouples placés entre le milieu et l'entrée du couloir. Ce qui veut dire que la zone la plus chaude se situe entre le foyer et le milieu du couloir.

**Bilan comparatif :**

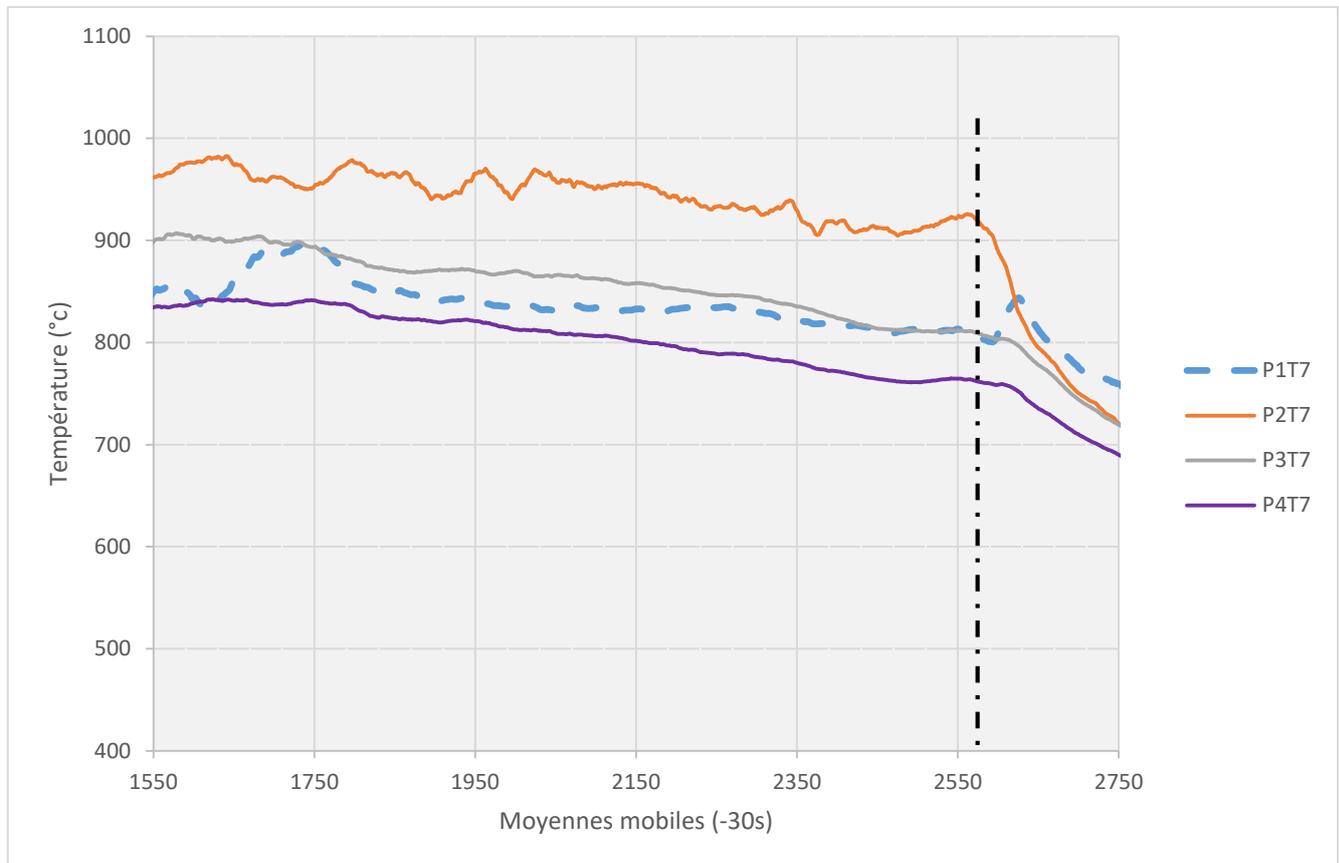
Sur le terrain		Analyse des données		Conclusion
<i>Temps de combustion</i>	<i>Evènements observés sur le terrain</i>	<i>Temps de combustion</i>	<i>Analyse spatiale des moyennes mobiles des températures</i>	
t=1080s	La combustion du foyer reprend	T=1070s	P4T7 passe au-dessus de toutes les courbes.	Contrairement à ce qu'on a pu constater sur le terrain, la reprise de combustion est celle de la cible 1 et non celle du foyer.
t= 1320s	La cible 1 est tombée	t= 1320s	La courbe P3T7 (cible 1) croit et passe au-dessus des deux autres courbes P2T7 (foyer/cible 1) et P4T7 (cible 1/cible 2) proches de la cible 1.  Ces derniers ont commencé à décroître.	Lors de l'analyse des courbes de températures au début de la combustion, nous avons constaté que la cible 1 couvrait le thermocouple P3T7.  Le pic de température enregistré par ce dernier et qui dépasse les températures du P2T7 et P4T7, prouve la chute de la cible 1.
t=1390s	La cible 4 brule	t= 1366s	La courbe P7T7 (cible 4/ entrée) croise et passe au-dessus de la courbe P6T7 (cible 3/ cible 4)	Le thermocouple P7T7 est placé entre la cible 4 et l'entrée du couloir.  Le fait que sa courbe caractéristique passe au-dessus de la courbe du thermocouple P6T7, qui est placé plus loin de l'entrée d'air que le P7T7, prouve que ce dépassement est causé

				<p>par la partie de la cible 4 la plus proche du thermocouple P7T7.</p> <p>L'analyse a permis détecter cet évènement 20s plutôt que sur l'observation terrain.</p>
t=1410s	La cible 1 ne brule plus	t= 1400s	Les trois courbes de thermocouples placés au niveau de la cible 1 ont commencé à décroître.	L'observation faites lors de l'expérimentation appui et confirme les résultats de l'analyse des courbes.

**Tableau 4. 5:** Tableau comparatif représentant le temps de signalement des évènements par simple observation sur le terrain et par analyse des moyennes mobiles (cas complexe : de 1050s à 1550s)

- **Fenêtre analysée :** De 1550s à 2750s du temps de combustion

**Zone étudiée :** Du foyer au milieu du couloir



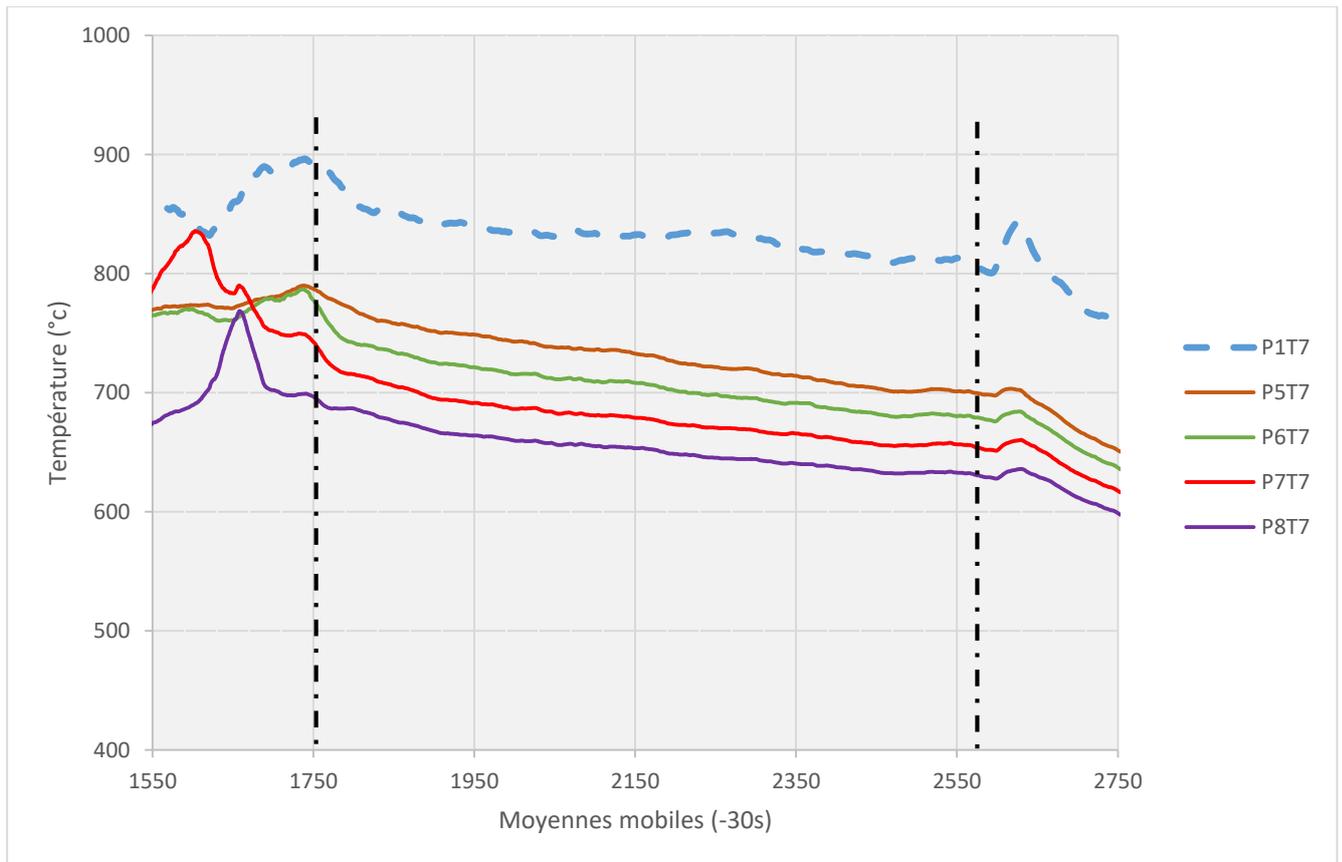
**Figure 4. 20:** Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés entre le foyer et le milieu du couloir, de 1550s à 2750s du temps de combustion

**De 1550s à 2580s :** Les quatre courbes ont une évolution parallèle, mais les courbes P2T7 et P3T7 sont celles dont les températures sont les plus élevées, ceci est dû à la cible 1 qui n'a toujours pas fini de brûler.

**A partir de 2580s :** Les trois courbes qui représentent les températures enregistrées au niveau de la cible une ont commencé à décroître rapidement (perte de plus de 100°C en moins d'une minute). Ceci est dû à la fin de combustion de la cible 1, car étant donné qu'elle repose sur une grille cela ne pourrait pas être causé par sa chute.

Au même moment nous remarquons que la courbe P1T7 (foyer), croit en formant un pic puis reprend sa décroissance en moins de 50s. C'est l'aire qui n'est plus bloqué par la cible 1 qui a atteint le foyer et a causé cette augmentation de température.

### Zone étudiée : Du milieu du couloir à l'entrée



**Figure 4. 21:** Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés entre le foyer et le milieu du couloir, de 1550s à 2750s du temps de combustion

**De 1550s à 1750s :** Nous remarquons que la courbe P7T7 qui proche de la cible 4 croit, forme un pic puis reprend sa décroissance. Cette augmentation a eu lieu en même temps que la chute de température au niveau du foyer (P1T7). Quelques secondes plus tard la courbe du thermocouple P8T7 qui se trouve entre l'entrée du couloir passe par le même pic puis reprend sa décroissance. Ceci pourrait être causé par un embrasement de fumées au niveau de la cible 4.

**A partir de 1750s à 2580s :** Toutes les courbes suivent une évolution parallèle à celle du foyer, décroissante mais très lentement, elles forment presque un plateau. A partir de 1750s, les cibles placées entre le milieu et l'entrée du couloir ne brûlent plus.

**A 2580s :** A partir de ce point de combustion, nous enregistrons une légère chute de températures au niveau du foyer (P1T7) suivi par un pic de températures puis une reprise d'évolution décroissante. Toutes les courbes ont suivi une évolution parallèle à celle du foyer. L'augmentation de températures n'est pas assez élevée pour être celle d'un embrasement généralisé, moins de 40°C enregistrées dans le foyer. Ceci pourrait provenir d'une action mécanique qui a eu lieu au niveau du foyer.

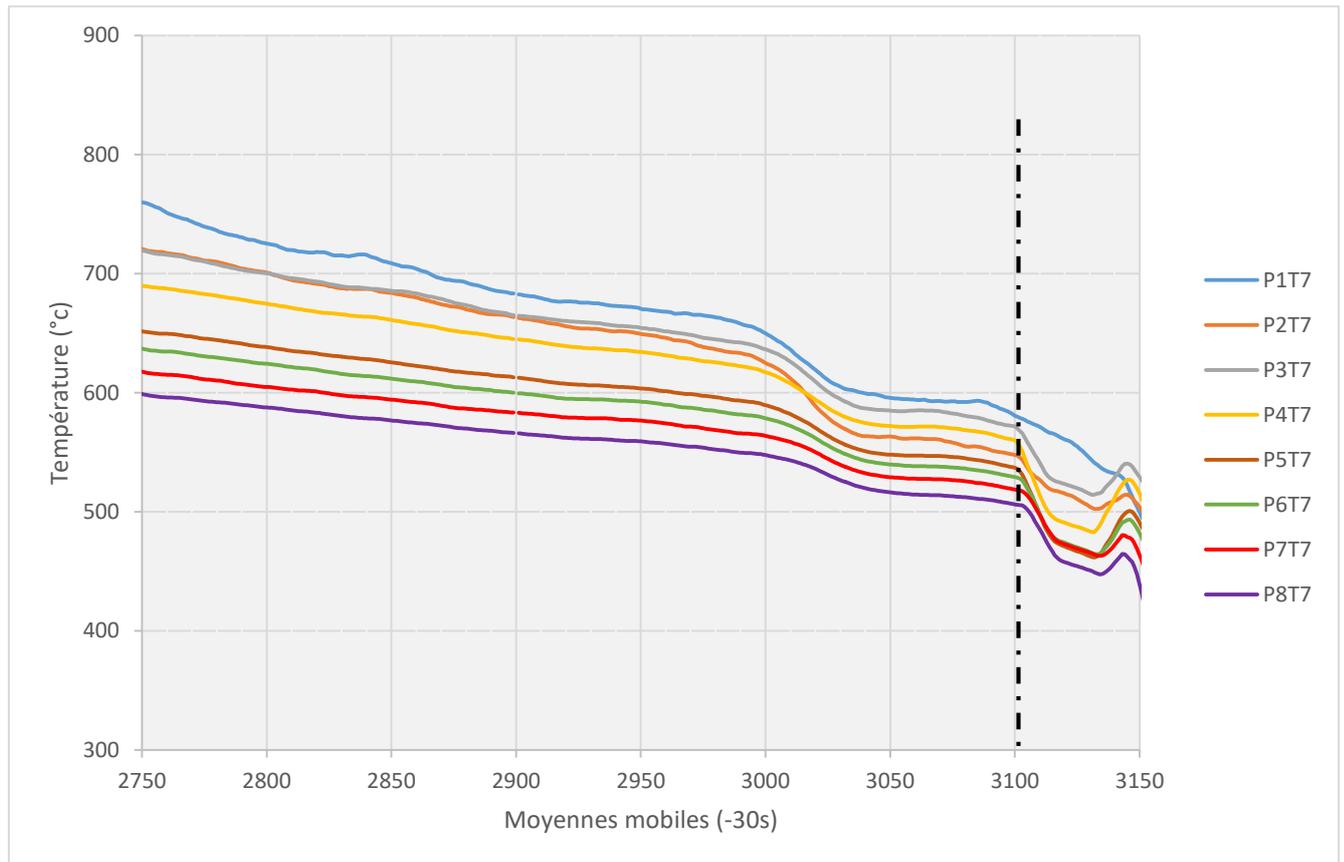
**Bilan comparatif :**

<b>Sur le terrain</b>		<b>Analyse des données</b>		<b>Conclusion</b>
<i>Temps de combustion</i>	<i>Evènements observés sur le terrain</i>	<i>Temps de combustion</i>	<i>Analyse spatiale des moyennes mobiles des températures</i>	
t= 1800s	Il n'y a plus de fumée et la puissance de combustion a fortement augmentée	t= 1750s	La courbe des températures du foyer atteint le seuil de température le plus haut de cette partie de temps étudiée.	L'analyse des données confirme l'observation faite sur le terrain.
t= 1980s	Les cibles 2 et 4 ont finies de brûler, elles fument.	A partir de t= 1750s	Tous les thermocouples placés entre le milieu et l'entrée du couloir (cible3 et cible 4) ne suivent que l'évolution des températures du foyer.  La moyenne mobile de la courbe P2T7 (cible 2) est très bruitée et placée au-dessus de toutes les autres courbes.	L'analyse des courbes ne confirme qu'une partie de l'observation faite sur le terrain, c'est-à-dire, qu'il n y a que la cible 4 qui ne brule plus.

**Tableau 4. 6:** Tableau comparatif représentant le temps de signalement des évènements par simple observation sur le terrain et par analyse des moyennes mobiles (cas complexe: de 1550s à 2750s)

- **Fenêtre analysée :** de 2750s à 3150s du temps de combustion

**Zone étudiée :** tout le couloir



**Figure 4. 22:** Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés le long du couloir, de 2750s à 3150s du temps de combustion

**De 2750s à 3100s :** Toutes les courbes sont en décroissance et suivent une évolution parallèle à celle du foyer dont les températures sont les plus hautes. Nous remarquons que la moyenne mobile P3T7 est au-dessus de P2T7 qui est normalement la plus proche du foyer, c'est parce que le thermocouple P3T7 est en contact avec la cible 1. Même si la cible 1 ne brûle plus elle génère encore de la chaleur, ce qui prouve qu'elle ne s'est pas entièrement consumée.

**A partir de 3100s :** Les courbes continuent à décroître, les températures chutent de plus de 50°C en moins de 10s. La situation commence à être maîtrisée.

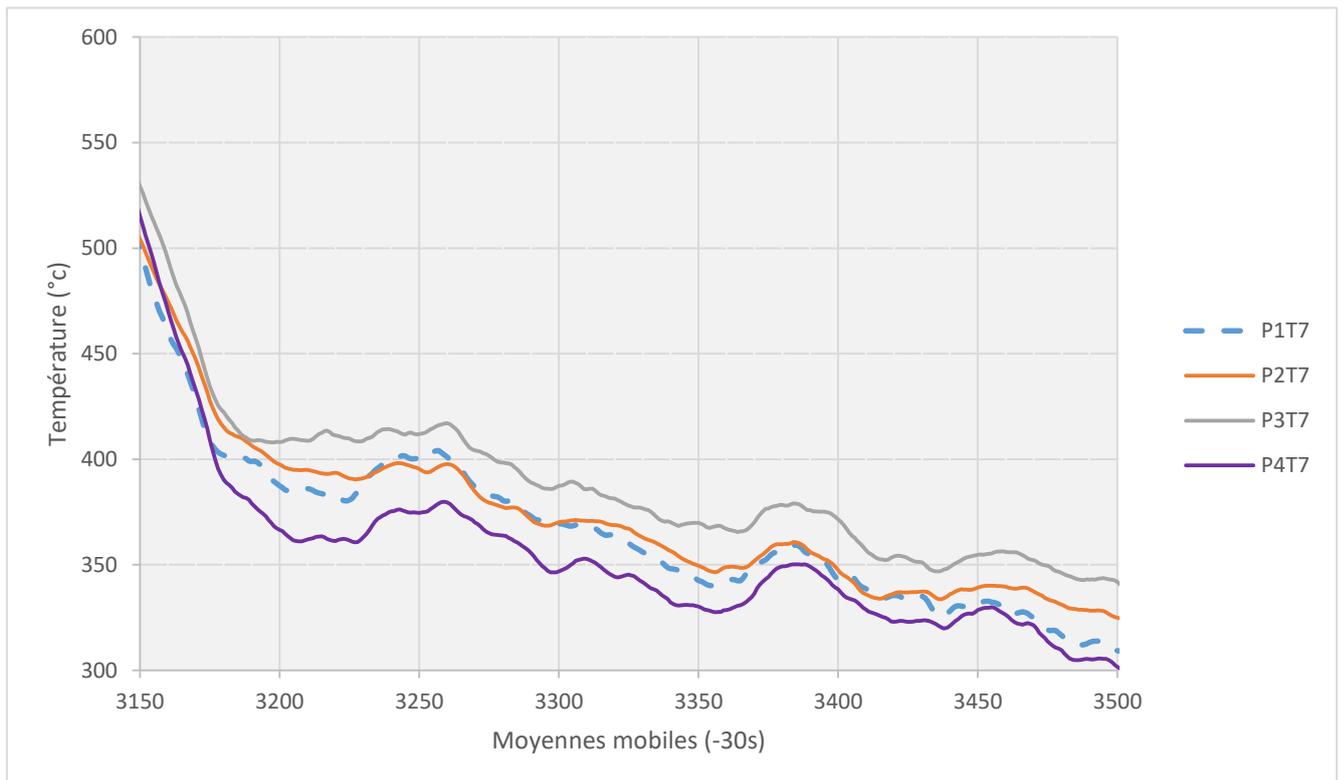
**Bilan comparatif :**

Sur le terrain		Analyse des données		Conclusion
Temps de combustion	Evènements observés sur le terrain	Temps de combustion	Analyse spatiale des moyennes mobiles des températures	
t= 3000s	Le ventilateur est mis en route devant l'entrée du couloir.	t= 3100s	Les températures de toutes les courbes chutent et diminuent de 50°C en moins de 10s.	C'est l'effet de la ventilation.

**Tableau 4. 7:** Tableau comparatif représentant le temps de signalement des évènements par simple observation sur le terrain et par analyse des moyennes mobiles (cas complexe: de 2750 à 3150s)

- **Fenêtre analysée :** De 3150s à 3500s du temps de combustion

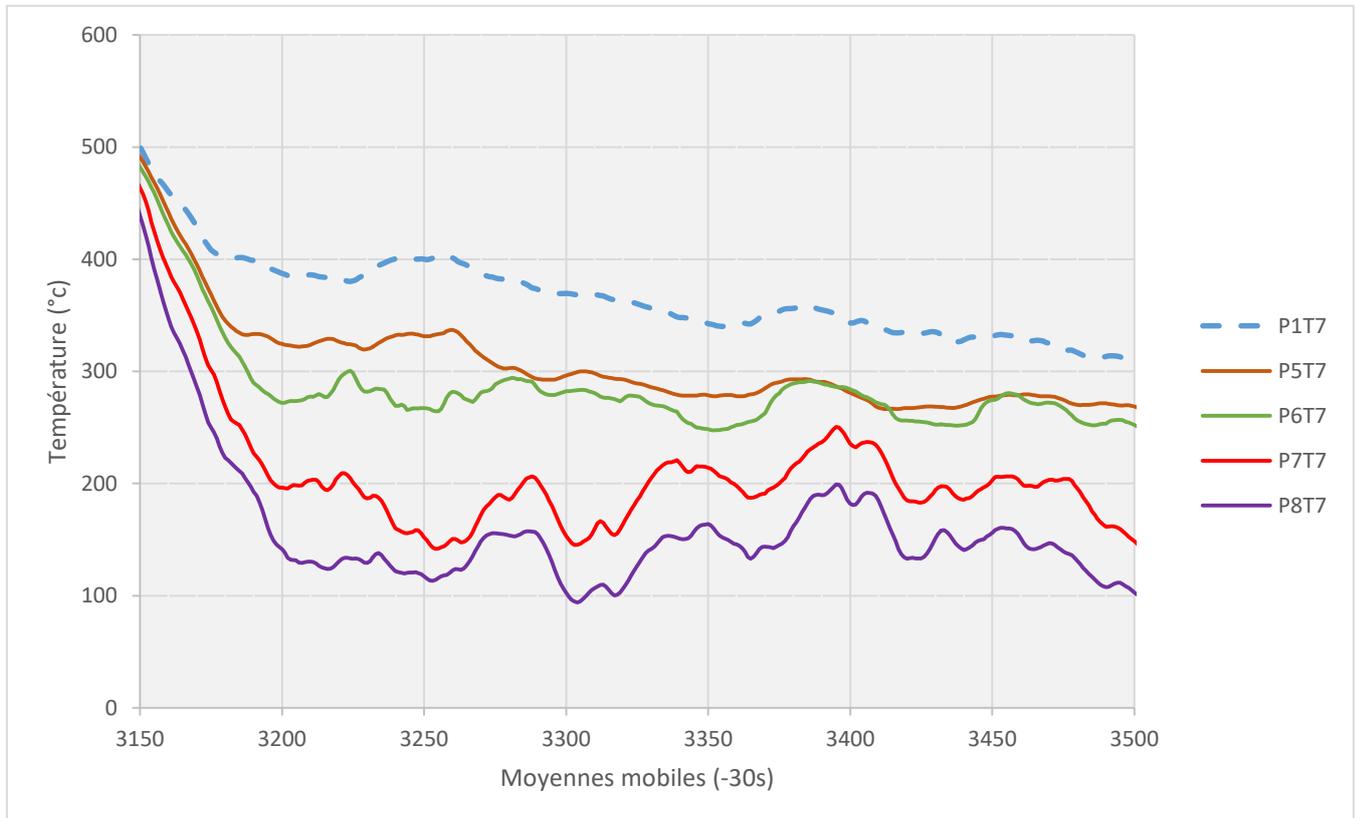
**Zone étudiée :** Du foyer au milieu du couloir



**Figure 4. 23:** Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés entre le foyer et le milieu du couloir, de 3150s à 3500s du temps de combustion

**A partir de 3150s :** Toutes les courbes des températures enregistrées au fond du couloir sont en décroissance, nous sommes sorties de la zone de danger, vu que toutes les courbes sont en-dessous de 450°C. L'intervention est maîtrisée.

**Zone étudiée :** du milieu du couloir à l'entrée



**Figure 4. 24:** Comparaison de l'évolution des moyennes mobiles à (-30s) des thermocouples situés dans le foyer et entre le milieu et l'entrée du couloir, de 3150s à 3500s du temps de combustion

**De 3150s à 3500s :** L'évolution des moyennes mobiles des températures enregistrées entre l'entrée et le milieu du couloir ont repris l'ordre initial où plus on se rapproche de l'entrée et plus les températures sont basses. Malgré les fluctuations, toutes les courbes sont restées en dessous de 400°C pendant plus de 5min. L'intervention est maîtrisée.

## 4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'étude de la méthode d'analyse de risque par comparaison de moyennes mobiles à la même distance dans le temps de différents points clés de l'espace.

L'application de la méthode sur le cas d'étude simplifié a montré que l'utilisation des moyennes mobiles en temps réel permet d'avoir plusieurs minutes d'avance sur la détection du danger comparé à l'observation faite lors de l'intervention.

En l'occurrence, son application sur le cas plus complexe a permis non seulement d'avoir de l'avance sur la détection de danger mais donne aussi plus de visibilité et de précision sur la situation.

Par exemple, elle nous a permis de déterminer le temps précis auquel a démarré la combustion de la première cible, chose que l'on a pas pu voir sur le terrain à cause de l'opacité des fumées.

Elle nous a permis aussi de corriger l'information, car lorsqu'on avait signalé la reprise de la combustion du foyer, c'était des flammes en provenance de la cible 1. La comparaison des courbes a montré que la moyenne mobile des températures du foyer était en dessous des températures enregistrées au niveau de la cible 1.

L'étude spatiale des moyennes mobiles pourrait être utilisée dans la prévention, dans la mesure où elle permet de définir la position optimale des thermocouples afin qu'ils puissent être efficaces lors de l'intervention.

\* \* \*





# **Chapitre 5 : Conclusion générale et perspectives**

Ce travail de thèse a été dédié à la dispersion accidentelle de gaz toxiques dans les espaces semi clos de configuration complexe en application à la lutte contre les feux de bâtiment. Une étude bibliographique générale a été menée sur les feux de compartiments, la propagation des fumées et les différentes techniques de lutte utilisées par les sapeurs-pompiers lors de leurs interventions.

Il a été décidé de mettre à profit les capacités prédictives de la méthode de comparaison de deux moyennes mobiles dans le temps et l'espace pour étudier les éventuels dangers qui peuvent apparaître lors de la lutte contre les feux de bâtiments.

Afin de s'assurer de la fiabilité de la méthode et des résultats obtenus, nous avons procédé en suivant une démarche d'évaluation du système sur des cas expérimentaux de complexité croissante, en allant du simple modèle à l'échelle 1 aux modèles plus complexes à grande échelle reproduisant la réalité.

Lorsque la méthode a été validée, nous avons pu approfondir l'analyse afin de définir les paramètres et éléments qui caractérisent l'apparition des dangers majeurs tels que l'embrasement généralisé éclair ou encore l'explosion des fumées.

Ce travail a donc conduit à l'élaboration d'une nouvelle approche fondamentale et opérationnelle permettant de « prédire » en temps réel l'évolution du feu et l'apparition des accidents thermiques. Cette approche constitue donc un outil d'aide à la décision opérationnelle qui permettrait de sécuriser les interventions de lutte contre les feux de compartiment.

Nous avons tout d'abord commencé par étudier les différents paramètres qui caractérisent les fumées. Notre choix s'est porté sur la température en raison des résultats de l'étude menée par M.LEBEY qui a montré que les températures des fumées sont significatives de l'évolution du feu et porteur d'informations. De plus c'est la grandeur physique la plus simple à mesurer et à analyser.

Grace aux thermocouples, il nous est possible de suivre en temps réel les évolutions des températures à travers le temps et l'espace malgré la complexité de la configuration ou du phénomène analysés.

La particularité de l'étude a été d'examiner ces relevés de températures comme des séries temporelles et d'étudier leurs caractéristiques à partir de deux moyennes mobiles dans le passé, soit sur un même point de mesure soit sur deux points de mesures positionnés en des endroits clés.

Cette méthode a été vérifiée sur un essai reproduisant la réalité, ou l'on a étudié le cas d'un incendie dans une salle d'hôpital. Les températures étaient mesurées à différents endroits par 12 thermocouples

L'utilisation de la comparaison des deux moyennes mobiles dans le passé (-15s et -30s) sur cet essai a montré clairement qu'il est possible de détecter des événements qui peuvent être dangereux comme un flash-over. Elle nous a permis aussi de savoir que la première ventilation utilisée par les sapeurs-pompiers en phase d'attaque n'était pas suffisamment puissante, environ 6 minutes en avance par rapport à l'observation faite sur le terrain.

Quant à la comparaison de deux moyennes mobiles dans l'espace, il a fallu d'abord déterminer la distance dans le temps des moyennes mobiles qui sera la plus adaptée à nos besoins. Pour cela nous avons comparé 4 distances dans le passé  $d_1 = -15s$ ,  $d_2 = -30s$ ,  $d_3 = -60s$  et  $d_4 = -120s$  ; en les appliquant sur un cas d'étude simple de combustion d'un foyer + 1 cible dans le couloir expérimental.

Les résultats obtenus ont montré que la moyenne mobile à (-30s) est la plus adaptée et la plus efficace. Elle nous a permis d'avoir un signal assez lisse pour simplifier son interprétation tout en évitant une perte d'information et de temps. Contrairement à moyenne mobile à (-15s), qui certes était plus rapide de 4s, mais rendais l'interprétation difficile en raison de nombreuses fluctuations qu'elle comportait.

Pour la suite de l'étude, nous avons donc travaillé sur un cas beaucoup plus complexe. Il s'agissait de l'essai ou l'on a étudié la combustion d'un foyer de buchettes avec quatre cibles de tailles et de matières différentes placés dans quatre points stratégiques de l'espace.

Les résultats ont montré que la détection du début de la combustion de la cible par comparaison de moyennes mobiles dans l'espace a eu lieu environ 3 minutes en avance comparé à sa détection par simple observation sur le terrain.

L'application de la méthode sur le cas complexe a permis non seulement d'avoir de l'avance sur la détection de danger mais donne aussi plus de visibilité et de précision sur la situation.

Ces informations sont très importantes pour le commandant de l'opération de secours et peuvent lui permettre d'améliorer ses capacités de décision en temps réel. Ceci est possible car tous les calculs peuvent être réalisés en temps réel avec un retard de 30s (intervalle de calcul de la moyenne mobile à long terme).

Comme nous l'avons rappelé au début de cette étude, la lutte contre les feux de compartiments comporte un certain nombre de dangers pour les sapeurs-pompiers dont, en particulier, l'explosion de fumées et l'embrasement généralisé éclair, lesquels peuvent entraîner des conséquences fatales pour les sapeurs-pompiers. La possibilité de détecter les risques d'apparition de ces dangers constitue une amélioration considérable pour améliorer la sécurité et l'efficacité dans les interventions sur feux de compartiments.

Cette étude a permis de montrer d'une part que l'analyse en temps réel des enregistrements de températures donnent des informations sur l'évolution du feu et d'autre part que la comparaison de deux moyennes mobiles dans le passé, calculées avec les températures, l'une à court terme l'autre à long terme, permet de détecter les dangers potentiels et ainsi de s'en protéger. Et que la comparaison de deux moyennes mobiles de deux points différents de l'espace permet en plus de localiser le danger.

À l'issue de cette étude, plusieurs perspectives relatives à l'application des deux méthodes en temps réel sur site peuvent être envisagées :

La comparaison de deux voir plusieurs séries temporelles de températures que ce soit dans le temps ou dans l'espace, peut se faire en relevant ces données à partir de capteurs de différents types, placés à des endroits stratégiques.

Plusieurs solutions se présentent pour placer ces capteurs. Elles peuvent être classées en deux catégories : soit les capteurs ont pu être placés avant l'intervention, c'est-à-dire à la construction, soit ils le sont pendant l'intervention.

Avant l'intervention, c'est-à-dire pendant la construction ou lors d'une réhabilitation de bâtiments, un ensemble composé de capteurs de températures et d'une centrale d'acquisition et de transmission vers un centre de secours permettront d'obtenir rapidement une situation du sinistre avant même que les sapeurs-pompiers n'arrivent sur les lieux, puis de suivre en temps réel l'évolution du feu et aussi d'avoir des informations qualitatives sur l'efficacité des moyens mis en œuvre.

Ces capteurs auront pu être placés à des endroits stratégiques à partir d'études préventives que nous pouvons mener grâce à la comparaison de moyennes mobiles dans l'espace qui indiquent le nombre nécessaire et l'emplacement idéal des thermocouples.

Pendant l'intervention, deux cas peuvent se présenter, soit des capteurs ont pu être placés préventivement, ce qui vient d'être détaillé, soit rien n'a pu être fait. Dans ce cas, il s'agit d'autres types de capteurs qui peuvent être, soit portés par les sapeurs-pompiers, soit déposés par eux sur leur parcours lors de leur pénétration dans le feu, soit des capteurs intelligents lancés dans le feu et en mesure de donner leur localisation avec des informations sur leur environnement, température et autres. Il est aussi possible d'avoir des informations de températures obtenues de l'extérieur par une caméra infrarouge comme l'a montré H. Besnard [29]. Cette caméra peut être au sol ou portée au sol ou par un drone. Le drone aurait l'avantage de faire le tour du feu et ainsi de donner une vue d'ensemble depuis l'extérieur, sachant que la nature du panache des différentes sorties de fumées donne des informations sur ce qui se passe à l'intérieur.

Nous pensons que l'ensemble de ces moyens peut permettre au commandant d'opération de secours de mieux savoir ce qui se passe et ainsi l'aider à mieux définir les actions à mettre en œuvre afin de sécuriser l'intervention de ses personnels. Par voie de conséquences, cela permettrait d'envisager des améliorations importantes sur la sécurité et l'efficacité des sapeurs-pompiers dans leurs opérations sur les feux de compartiments. Enfin, des biens et surtout des vies pourront être sauvés.

\* \* \*  
\* \*  
\*





## Références bibliographiques

- [1] M. CURTAT. Physique du feu pour l'Ingénieur. Traité de physique du bâtiment. CSTB, 2001
- [2] H. DE LUMLEY. L'Homme premier. Préhistoire, évolution, culture. Odile Jacob, 2000
- [3] M. EL-ABBADIE, Vie et destin de l'ancienne bibliothèque d'Alexandrie, Paris, UNESCO - PNUD, 1992
- [4] J. BEAUJEU, L'incendie de Rome en 64 et les chrétiens, Bruxelles, coll. Latomus XLIX, 1960
- [5] N. HANSON, The Dreadful Judgement : The True Story of the Great Fire of London, New York, Doubleday, 2001
- [6] Paul-Henry Thibaut, Les Pompiers de Paris de la Révolution française à Napoléon Ier : Organisation et militarisation, Éditions universitaires européennes, 2004
- [7] Drysdale Dougal, An introduction to fire dynamics, 2 nd edition, 1998
- [8] LACKNER.M : Maximilian Lackner (éd.), Franz Winter (éd.), Avinash K. Agarwal (éd.), Handbook of Combustion, John Wiley & Sons, juin 2010
- [9] V. BABRAUSKAS. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third edition, chapitre Heat Release Rates, pages 3–1, 3–37. National Fire Protection Association, Quincy, 2002
- [10] E. SJOSTROM. Wood chemistry : Fundamentals and Applications. Academic press, Inc., 1981.
- [11] M. L. JANSSENS. Modeling of the thermal degradation of structural wood members exposed to fire. Fire and Materials, 28 : 199–207, 2004
- [12] Les bases de la mécanique des fluides et des transferts de chaleur et de masse pour l'ingénieur, Esteban Saadjian, Sapientia Éditions 2009
- [13] B. Debray, N. Gobeau et F. Waymel. 'Incendie en milieu confiné - Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs'. Rapport d'études – INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques), 11/01/2007.
- [14] Encyclopédie de sécurité et de santé au travail du Bureau International du Travail
- [15] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2002 / INERIS – DRA – N° 46055-CL57149
- [16] Thomas PH. Fires and flashover in rooms - a simplified theory. Fire Safety Journal 1980/81, vol 3, p67–76.
- [17] Luo M, Beck V. A study of non-flashover and flashover fires in a full-scale multi-room building. Fire Safety Journal 1996, vol 29, p 191–219

- [18] Holborn PG, Bishop SR, Drysdale DD, Beard AN. Experimental and theoretical models of flashover. *Fire Safety Journal* 1993, vol 21, p 257–66
- [19] Référence image : <http://tpe-feux-phenomenes-thermiques.e-monsite.com/>
- [20] Gottuk. D, Peatross. M, Farley. J, Williams. F, The development and mitigation of backdraft: a real-scale shipboard study, *Fire Safety Journal*, 1999, vol 33, p 261-282.
- [21] P. Grimwood, K. Desmet, A Comprehensive Guide To Compartment Firefighting & Live Fire Training (CFBT), Version 1.1, 2013.
- [22] M. Lebey, Contribution à l'Etude des Systèmes Hétérogènes à Pression constante ; Application à l'Incendie, Thèse DDI, (Dir Philippe Arques), ENSAM CER Paris / PARIS VI, nov. 1986.
- [23] M. Lebey, Ventilation dans les Incendies, SERAM / ENSAM CER Paris, Contrat Ministère de l'Industrie, 1979,1980, 1981 et 1982
- [24] M. Lebey, E. Lambert & O. Cite, Démonstration de l'efficacité de la ventilation dans les incendies en configuration réelle d'intervention, rapport interne brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris, 2004
- [25] Cooper. P, Hunt. G, Ventilation and Stratification in Naturally Ventilated Spaces Driven by Heated Internal Vertical Surfaces, First International One day Forum on Natural and Hybrid Ventilation, HybVent Forum'99, 09/1999, Sydney, Australia.
- [26] L. THOMAS & G. ARCHAMBAULT. Sécurité incendie. Technical report, Arcelor, Collection Memento Acier, 2002
- [27] Accidents Thermiques, Guide du Formateur, version 5.12, 2000
- [28] J. Francis, T.M. Yau, "On radiant network models of thermocouple error in pre and post flashover compartment fires", *Fire technology*, 2004, vol. 40, p 277-294
- [29] H. Besnard, Détermination de grandeurs caractéristiques d'un incendie localisé en espace semi-confiné, Thèse (dir M. Lebey) Université Le-Havre, Laboratoires d'Ondes et Milieux Complexes (CNRS, UMR 6294) 2010, p 13-25
- [30] A. Sorjamaa, J. Hao, N. Reyhani, Y. Ji, A. Lendasse, Methodology for long-term prediction of time series, *Neurocomputing* 70 (16–18) (2007) 2861–2869
- [31] A. Weigend, N. Gershenfeld (Eds.), *Times Series Prediction: Forecasting the Future and Understanding the Past*, Addison-Wesley Publishing Company, 1994.
- [32] A. Lendasse, E. Oja, O. Simula, M. Verleysen, Time series prediction competition: the CATS benchmark, *Neurocomputing* 70 (13–15) (2007) 2325–2329, doi:10.1016/j.neucom.2007.02.013.
- [33] Lendasse (Ed.), in: *ESTSP 2007: Proceedings*, Multiprint Oy / Otamedia, 2007.
- [34] A. Lendasse (Ed.), in: *ESTSP 2008: Proceedings*, Multiprint Oy/Otamedia, 2008.
- [35] T.Honkela, M.-S.Paukkeri, M.P" oll" a,O.Simula (Eds.), in *Proceedings of AKRR'08, International and Interdisciplinary Conference on Adaptive Knowledge Representation and Reasoning*, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 2008.

- [36] R. Rosen, Anticipatory Systems, Pergamon Press, Oxford, UK, 1985.
- [37] YAN. X, CHOWDHURY. N, Mid-term electricity market clearing price forecasting utilizing hybrid support vector machine and auto-regressive moving average with external input, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 63, December 2014, Pages 64-70
- [38] KVARNSTRÖM. M, PODGORSKI. K, RYCHLIK. I, Laplace moving average model for multi-axial responses in fatigue analysis of a cultivator, Probabilistic Engineering Mechanics, Volume 34, October 2013, Pages 12-25
- [39] M. Lebey Et Ph. Arques; Etats Unis, Université de Technologie de l'Etat de Virginie:" A Study of The Combustion of Single Fire Aiming at a Better Knowledge of Accidental Fires ", 1984.
- [40] ABANTO. J, REGGIO. M, BARRERO. D, PETRO. E, Prediction of fire and smoke propagation in an underwater tunnel, Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, vol 22, 90-95
- [41] Gao. R, Li. A, Hao. X, Lei. W, Deng. B, Prediction of the spread of smoke in a huge transit terminal subway station under six different fire scenarios, Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, vol 31, p 128-138
- [42] Real-time probabilistic classification of fire and smoke using thermal imagery for intelligent firefighting robot, Fire Safety Journal, 2015, vol 72, p 40-49
- [43] Yu. C, Mei. Z, Zhang. X, A real-time video fire flame and smoke detection algorithm, Procedia Engineering, 2013, vol 62, p 891-898

\* \* \*

## **Résumé :**

Dans les feux de compartiment, les fumées représentent un danger majeur lors de l'intervention des sapeurs-pompiers. Elles sont souvent à très hautes températures et sont surtout très mobiles. De ce fait, elles provoquent la propagation du feu et peuvent engendrer des phénomènes thermiques, imprévisibles et incontrôlables, tels que les explosions de fumées ou l'embrasement généralisé éclair.

L'étude présentée se propose de contribuer à construire des méthodes et des moyens pour pallier aux manques d'informations lors de l'intervention des sapeurs-pompiers sur feux de compartiments. Il s'agit de proposer une méthode de diagnostic en temps réel afin, en particulier de détecter l'occurrence de dangers potentiels spécifiques à ces situations.

Pour une approche plus rationnelle, l'incendie a été étudié comme un phénomène physique, ce qu'il est, et analysé à partir des relevés de température au cours de l'évolution du feu.

La particularité de l'étude a été d'examiner ces relevés de températures comme des séries temporelles et d'étudier leurs caractéristiques à partir de deux moyennes mobiles dans le passé, soit sur un même point de mesure soit sur deux points de mesures positionnés en des endroits clés.

Cette méthode a permis de montrer que l'entrecroisement des moyennes mobiles donne des informations pertinentes sur l'évolution à venir du feu et sur la possibilité de détecter l'apparition possible de phénomènes thermiques catastrophiques.

**Mots clés :** Feux de compartiment / Décision opérationnelle / Sécurité incendie / Moyennes mobiles / Détection de danger / Température des fumées / Séries temporelles

---

## **Abstract :**

In compartment fires smokes are a major danger during firemen intervention. Most of the time, they are at high temperature and they flow everywhere through many kinds of ducts, which leads to the propagation of the combustion by the creation other fires in places which may be far from the initial fire.

Besides, since the appearance of the new building materials and with the heat insulations which lead to the concentration of heat during a fire, the compartments fire became even more dangerous for firefighters during their phases of attack.

In the presente study we will introduce a new approach of the problem, which allows to better follow the fire behavior and especially to detect the dangers that may appear and endanger firefighters.

This approach consists in a mathematical analysis based on the comparison of moving averages, calculated on the temperature recordings of the smokes. As a consequence, this method may allow improving decision support in real time and therefore to improve the security and the efficiency of firefighters in their operations against that kind of fires.

**Keywords :** Compartment fire / Décision support in real time / Moving average / Danger detection / Times series