



HAL
open science

Contribution à l'étude de l'usage du brouillard d'eau dans la lutte contre les incendies en tunnels ventilés longitudinalement

Raphaël Meyrand

► **To cite this version:**

Raphaël Meyrand. Contribution à l'étude de l'usage du brouillard d'eau dans la lutte contre les incendies en tunnels ventilés longitudinalement. Sciences de l'ingénieur [physics]. ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers, 2009. Français. NNT: . tel-00554721

HAL Id: tel-00554721

<https://theses.hal.science/tel-00554721>

Submitted on 13 Jan 2011

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.



THESE

Pour l'obtention du Grade de
Docteur de l'ENSMA

Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique
(Diplôme National - Arrêté du 7 août 2006)

Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur & Aéronautique

Secteur de Recherche : Energie, Thermique, Combustion

Présentée par

Raphaël MEYRAND

* * * * *

Contribution à l'étude de l'usage du brouillard d'eau dans la lutte contre les incendies en tunnels ventilés longitudinalement

* * * * *

Directeur de thèse

J.P. GARO
J.P. VANTELON

Laboratoire de Combustion et de Détonique

* * * * *

Soutenue le 14 décembre 2009
devant la Commission d'Examen

~ JURY ~

P. BOULET	Professeur, Université de Nancy, LEMTA
E. CASALÉ	Directeur Technique, FluidAlp, Thrônes
E. CESMAT	Responsable Développement Sécurité Feu, CSTB, Paris
J.P. GARO	Maître de Conférences, Université de Poitiers, LCD
D. LACROIX	Directeur Scientifique, CETU, Bron
D. LEMONNIER	Directeur de Recherche, Poitiers, LET
B. PORTERIE	Professeur, Université de Provence, IUSTI
J.P. VANTELON	Directeur de Recherche, LCD, Poitiers
O. VAUQUELIN	Professeur, Université de Provence, IUSTI

Remerciements

Procédant par ordre, j'aimerais tout d'abord remercier Eric Cesmat de m'avoir proposé ce sujet motivant, et de m'avoir fait confiance pour le mener durant ces années.

Je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de thèse Jean Pierre Vantelon, pour sa patience et ses conseils tout au long de ce travail, notamment lors des phases de relecture du mémoire où les nerfs de tous sont mis à rude épreuve.

Merci également à Jean Pierre Garo, mon second directeur de thèse qui a pris le relais dans l'encadrement durant ce travail, et notamment pour son aide concernant le plan opacimétrie de la thèse.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à Pascal Boulet et Olivier Vauquelin d'avoir accepté d'être les rapporteurs de mon mémoire, malgré son épaisseur et pour l'émission rapide de leur rapport. Merci également aux autres membres du jury d'avoir accepté de juger mon travail : messieurs Eric Casalé, Didier Lacroix, Denis Lemonnier et bien entendu Bernard Porterie.

Je tiens aussi à remercier l'équipe du CSTB avec qui j'ai travaillé pendant un an et demi lors de la réalisation des essais : Sébastien Morat pour la leçon du jour et sa patience pour rendre opérationnel un type sorti des bouquins, Khalid Kilani pour le soutien logistique et son impressionnante capacité à être partout à la fois, ainsi que Bernadette et Sylvie pour leur patience détermination à réussir à me faire remplir les bons papiers correctement. Merci aussi aux gars du hall, sans lesquels les essais n'aurait pu être mis en place. Merci également à Erich Berger pour les pauses salutaires autour d'une cigarette et d'un café. Enfin, comment ne pas citer Gabriel Giovannelli, dont l'aide et le soutien au cours de ce travail furent impressionnants et plus qu'appréciés, le tout avec le chantant accent de Marseille.

La vie de tous les jours d'un thésard est faite d'usure des yeux sur un écran, de jeu de cache cache avec le sommeil et de consommation excessive de caféine, mais l'entourage tant au travail que familial compte. Merci à ceux avec qui j'ai été amené à collaborer au cours de cette thèse : Vincent Montassier et Alain Claverie notamment pour leur disponibilité malgré des demandes de dernière minute sur les expérimentations au LCD.

Une mention toute particulière au gens du bureau des Doktorants (oui, le k est important) : Arnaud pour la collaboration efficace lors du bouclage du mémoire avec les concours de poches sous les yeux et le boursicotage virtuel effréné et Yann pour les improbables objets du lundi ainsi que le n'importe quoi général des pauses, Funix pour avoir construit des machines à café joueuses avec lesquelles prendre sa caféine quotidienne tient de l'acrobatie et aux pizzerias qui ferment tard. Merci à Karine pour (elle aussi) sa patience et à Gadjjo, félin et dormeur invétéré pour son non-intérêt général pour la frénésie de fin de rédaction. Merci aussi à Jocelyne, la maman du LCD pour son écoute, et à mes parents pour leur patience lors de ces trois années. Merci également aux anciens, de

l'électrique Philippe au placide Vianney, à Laurence pour être toujours de bonne humeur (mais comment fais-tu ?) qui m'ont rendu les débuts de thèse bien sympathiques.

Merci au cercle parisien, pour les week end de changement d'ambiance. A François pour les discussions improbables de quatre ou cinq heures, à Christophe pour continuer de porter Sa lumière, à Manée pour ... son caractère, ce furent des coupures bienvenues qui remettent d'attaque.

Enfin, un merci amer au radar placé le 17 juin 2009 à onze heures du soir sur le trajet de mon domicile au laboratoire, il demeurera inoubliable.

Table des matières

Table des figures	xiv
Liste des tableaux	xvi
Introduction	1
A Contexte et conditions de l'étude	5
I Généralités sur les incendies	7
I.1 Incendies en milieu tunnel	9
I.1.1 Aspects généraux	9
I.1.1.1 Modes de combustion	9
I.1.1.2 Mécanismes et structure de la flamme de diffusion	11
I.1.1.3 Développement du feu	12
I.1.2 Problématique des incendies en milieu tunnel	14
I.1.2.1 Effets sur les usagers	16
I.1.2.2 Effets sur les véhicules	18
I.1.2.3 Effets sur la structure du tunnel	18
I.1.3 Ventilation en tunnel	18
I.1.3.1 Ventilation naturelle	20
I.1.3.2 Ventilation longitudinale	21
I.1.3.3 Ventilation transversale	23
I.1.4 Mécanismes d'extinction d'un feu	24
I.2 Brouillards d'eau	27
I.2.1 Action sur un feu	27
I.2.1.1 Refroidissement par puits de chaleur	27
I.2.1.2 Déplacement d'oxygène	28
I.2.1.3 Atténuation des transferts de chaleur rayonnée	29
I.2.2 Caractérisation des brouillards d'eau	34
I.2.2.1 Distribution de taille des gouttelettes	35
I.2.2.2 Quantité d'eau utilisée	36
I.2.2.3 Quantité de mouvement du spray	38
I.2.2.4 Ajout d'additif	38
I.2.3 Technologie	38
I.2.4 Etat de l'art sur l'usage du concept brouillard d'eau dans la lutte contre les feux	39

I.2.5	Conclusion	46
II	Réduction d'échelle - Similitudes	49
II.1	Identification des groupements adimensionnels de paramètres mis en jeu dans la problématique considérée	51
II.1.1	Feu en configuration tunnel ventilé longitudinalement	51
II.1.1.1	Conservation de la masse	52
II.1.1.2	Quantité de mouvement	53
II.1.1.3	Energie	54
II.1.1.4	Transferts thermiques vers les parois	55
II.1.2	Brouillards d'eau	58
II.1.2.1	Travaux de Heskestad [64]	58
II.1.2.2	Travaux de Jayaweera [65] et Yu et coll. [66]	61
II.2	Récapitulatif des relations de similitude	63
III	Moyens expérimentaux	65
III.1	Dispositifs expérimentaux	67
III.2	Démarche expérimentale	68
III.2.1	Galerie d'essai	68
III.2.2	Représentation du foyer	69
III.2.3	Foyers d'heptane	70
III.2.4	Foyers à combustible solide	71
III.2.4.1	Feux de bûchers	71
III.2.4.2	Feux de palettes	73
III.3	Métrologie	76
III.3.1	Mesures de température	77
III.3.2	Mesures de flux rayonnés	80
III.3.3	Mesures de vitesse	81
III.3.4	Mesure de perte de masse du foyer	82
III.3.5	Mesures de concentrations de gaz	82
III.3.6	Mesures d'opacité	83
III.3.7	Dispositif d'acquisition	83
III.3.8	Système d'aspersion par brouillard d'eau	83
III.4	Liste des essais	87
B	Résultats expérimentaux	89
IV	Résultats expérimentaux - Essais sans aspersion	91
IV.1	Méthodes d'évaluation de la puissance du foyer	93
IV.1.1	Evaluation par mesure du débit massique de combustible	93
IV.1.2	Evaluation par mesure de la consommation d'oxygène	93
IV.2	Essais de référence en tunnel	95
IV.2.1	Particularités aérauliques liées à la configuration	95
IV.2.1.1	Vitesse critique	95
IV.2.1.2	Modification du débit d'entrée d'air par la présence de l'incendie	97

IV.2.2	Foyers heptane	99
IV.2.2.1	Essais de référence en milieu ouvert	99
IV.2.2.2	Essais en milieu tunnel ETun	101
IV.2.2.3	Puissance du foyer	101
IV.2.2.4	Températures et stratification des fumées	107
IV.2.2.5	Flux rayonnés	122
IV.2.2.6	Opacimétrie	127
IV.2.3	Foyers bûcher	129
IV.2.3.1	Puissance du Foyer	130
IV.2.3.2	Températures et stratification des fumées	132
IV.2.3.3	Flux rayonnés	138
IV.2.3.4	Opacimétrie	140
IV.2.4	Foyers palettes	142
IV.2.4.1	Puissance du foyer	142
IV.2.4.2	Températures et stratification des fumées	143
IV.2.4.3	Flux rayonnés	149
IV.2.4.4	Opacimétrie	152
IV.2.5	Synthèse des essais de référence en tunnel	154
V	Résultats expérimentaux - Essais avec aspersion	161
V.1	Reflexion sur la validité des mesures de température sous brouillard d'eau	163
V.1.1	Résultats	164
V.1.2	Conclusion	167
V.2	Essais avec aspersion - Foyers heptane	167
V.2.1	Essais avec foyers heptane non couverts	168
V.2.1.1	Puissance du foyer	168
V.2.1.2	Evaluation de la quantité utile d'eau injectée dans le tunnel	177
V.2.1.3	Températures	181
V.2.1.4	Flux rayonnés	184
V.2.2	Essais avec foyers heptane couverts	186
V.2.2.1	Puissance du foyer	186
V.2.2.2	Flux rayonnés	187
V.2.3	Cas d'une activation sectorielle du brouillard d'eau	188
V.2.3.1	Influence sur la puissance du foyer	189
V.2.3.2	Influence sur les températures dans le tunnel et les flux rayonnés	191
V.3	Essais avec aspersion - Foyers bûchers	194
V.3.1	Puissance du foyer	194
V.3.2	Evaluation de la quantité d'eau utile injectée dans le tunnel	198
V.3.3	Températures et stratification des fumées	201
V.3.4	Flux rayonnés	208
V.4	Essais avec brouillard d'eau - Foyers palettes	210
V.4.1	Puissance du foyer	210
V.4.2	Evaluation de la quantité d'eau utile injectée dans le tunnel	212
V.4.3	Températures	214
V.4.4	Flux rayonnés	218

V.5	Retour en vraie grandeur	220
V.6	Comparaison avec les résultats du projet SOLIT	221
V.6.1	Détermination et validation du facteur d'échelle.	221
V.6.2	Correspondance des points de mesure	222
V.6.3	Dispositif de brouillard d'eau	224
V.6.4	Résultats de puissance	224
V.6.5	Résultats de température	225
V.6.6	Conclusion	228
V.7	Synthèse des essais avec aspersion en tunnel	228
VI	Caractérisation des fumées sous aspersion	231
VI.1	Mesures d'opacimétrie lors des essais avec aspersion	233
VI.1.1	Foyers à combustible liquide	233
VI.1.2	Foyers à combustible solide	236
VI.2	Caractérisation de mélanges fumées/brouillard d'eau, en terme d'interaction avec le rayonnement, à l'échelle laboratoire	239
VI.2.1	Position du problème et mise en œuvre de la méthode	239
VI.2.2	Dispositif expérimental	239
VI.2.3	Résultats des essais AOF	242
VI.2.3.1	Essais sans aspersion	242
VI.2.3.2	Essais avec aspersion	245
VI.2.4	Détermination et analyse des propriétés d'absorption et de diffusion du mélange	247
VI.3	Synthèse	251
C	Conclusion	253

Table des figures

I.1	Représentation des mécanismes de la flamme de diffusion	11
I.2	Evolution de la puissance d'un feu de combustible liquide en milieu ouvert	13
I.3	Evolution de la puissance d'un feu de combustible solide en milieu ouvert .	13
I.4	Evolution de la puissance de feux de liquide confinés ventilés	15
I.5	Evolution de la puissance de feux de solide confinés ventilés	15
I.6	Niveaux d'incendie et seuils de tenabilité	16
I.7	Ventilation longitudinale : Différents régimes	19
I.8	Schématisation de l'écoulement des fumées dans un tunnel en déclivité sous l'effet de la ventilation naturelle	20
I.9	Principe d'extraction des fumées par cheminées verticales	21
I.10	Utilisation de la ventilation longitudinale dans le cas d'un incendie dans un tunnel à un seul sens de circulation	21
I.11	Utilisation de la ventilation longitudinale dans le cas d'un incendie dans un tunnel à double sens de circulation	22
I.12	Principe de la ventilation transversale pure	23
I.13	Principe de la ventilation semi-transversale en mode confort et de désenfumage	23
I.14	Schématisation de l'équilibre énergétique à la surface du combustible (source : [3])	25
I.15	Description schématique de l'interaction rayonnement brouillard d'eau . . .	29
I.16	Description schématique du modèle de diffusion à deux flux	30
I.17	Evolution du taux de transmission τ en fonction du diamètre des gouttelettes	31
I.18	Evolution du taux de transmission τ en fonction de la quantité d'eau injectée lorsqu'on tient compte de la diffusion ou non	32
I.19	Evolution du taux de transmission τ en fonction de la quantité d'eau injectée pour différents diamètres de gouttelettes	32
I.20	Transmittance d'un mur d'air humide. (source : [7])	33
I.21	Localisation des mesures pour la classification des sprays proposée par Mawhinney [4]	36
I.22	Classification des sprays par Mawhinney et coll. [16]	36
I.23	Différents types d'injecteurs de brouillard d'eau	39
II.1	Evolution du coefficient de traînée C d'un gouttelette sphérique en fonction de son nombre de Reynolds Re_D	62
III.1	Vue d'ensemble de la galerie d'essai	68
III.2	Vue du convergent et de l'unité de ventilation	69
III.3	Vue de la couverture du foyer heptane	70

III.4	Schéma et dimensions d'un bûcher	72
III.5	Schéma et dimensions d'un empilement de palettes normalisées	74
III.6	Evolution du débit calorifique pour un empilement de palettes normalisées (source : [72])	75
III.7	Evolution du débit calorifique d'un empilement de palletes en fonction de sa hauteur (source : [72])	75
III.8	Schéma d'implantation des sections de mesure dans le tunnel	76
III.9	Répartition des capteurs dans le tunnel	77
III.10	Schéma d'instrumentation des sections amont de thermocouples (ici la section T-9)	78
III.11	Schéma d'instrumentation des sections aval de thermocouples (ici la section T+4)	78
III.12	Vue de la fixation des thermocouples	79
III.13	Schéma d'instrumentation des sections de thermocouples de paroi	79
III.14	Schéma d'instrumentation des sections de radiomètres (ici la section FM-7)	80
III.15	Vue d'un radiomètre installé	80
III.16	Vue de la section de vitesse V-5	81
III.17	Schéma d'instrumentation des sections de mesure de vitesse (ici la section V-5)	81
III.18	Schéma d'instrumentation de la section de mesure de concentrations de gaz	82
III.19	Vue de la pompe de pression utilisée	84
III.20	Vue d'une des buses d'aspersion en action	84
III.21	Vue de la zone d'interférence au cours de la caractérisation d'une des buses (source : [73])	85
III.22	Distribution de taille en nombre de gouttelettes par classe N_p , mesurée pour l'injecteur central à différentes distances de la buse	85
III.23	Distribution de taille en nombre de gouttelettes par classe N_p , mesurée pour l'injecteur central à différentes positions sur un cercle de rayon 30cm, $\alpha < 30^\circ$	86
III.24	Distribution de taille en nombre de gouttes par classe N_p , mesurée pour l'injecteur central à différentes positions sur un cercle de rayon 30cm, $\alpha > 30^\circ$	86
IV.1	Schéma de principe de la détermination du débit calorifique par consommation d'oxygène (source : [76])	94
IV.2	Détermination de la vitesse critique dans la galerie	97
IV.3	Comparaison des résultats des essais de référence hors tunnel avec l'évolution selon la relation (III.1) du débit massique surfacique en fonction du diamètre de la nappe	100
IV.4	Essais ETun 01 et ETun 02 - Evolution temporelle de la puissance du foyer	102
IV.5	Essais ETun 01 et ETun 02 - Evolution temporelle des niveaux des températures de surface de la paroi du tunnel en section S+15	102
IV.6	Phénomène d'ébullition en volume - Allure des gradients de température au sein de la phase liquide	103
IV.7	Influence de la vitesse de ventilation sur la puissance des foyers heptane découverts	104
IV.8	Variation de la projection du volume de flamme sur la nappe de combustible, cas d'un essai sans couverture	105

TABLE DES FIGURES

IV.9 Essai ETun07 et ETun08 - Evolution de la puissance du foyer	106
IV.10Influence de la vitesse de ventilation sur la puissance des foyers heptane couverts	106
IV.11Essai ETun01 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4	109
IV.12Essai ETun02 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4	109
IV.13Essai ETun01 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+8	110
IV.15Essai ETun01 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12	110
IV.14Essai ETun02 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+8	111
IV.16Essai ETun02 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12	111
IV.17Essai ETun01 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+24	112
IV.18Essai ETun02 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+24	112
IV.19Essai ETun01 - Zones de tenabilité thermique - t=300s	114
IV.20Essai ETun02 - Zones de tenabilité thermique - t=300s	115
IV.21Essai ETun01 - Répartition de la température par section - t=300s	116
IV.22Essai ETun02 - Répartition de la température par section - t=300s	116
IV.23Essai ETun07 - Zones de tenabilité thermique - t=300s	117
IV.24Essai ETun07 - Répartition de la température par section - t=300s	118
IV.25Essai ETun08 - Répartition de la température par section - t=300s	118
IV.26Essai ETun01 - Profils verticaux de température	119
IV.27Essai ETun02 - Profils verticaux de température	119
IV.28Essai ETun01 - Evolution temporelle du critère de stratification S	121
IV.29Essai ETun01 - Comparaison des parts respectives du numérateur et du dénominateur du critère de stratification S	121
IV.30Essai ETun02 - Evolution temporelle du critère de stratification S	122
IV.31Essai ETun01 - Evolution temporelle des flux rayonnés en section FM-7	123
IV.32Essai ETun01 - Evolution temporelle des flux rayonnés en section FM+7	123
IV.33Essai ETun02 - Evolution temporelle des flux rayonnés en section FM-7	124
IV.34Essai ETun02 - Evolution temporelle des flux rayonnés en section FM+7	124
IV.35Essai ETun07 - Evolution temporelle des flux rayonnés en section FM-7	125
IV.36Essai ETun07 - Evolution temporelle des flux rayonnés en section FM+7	126
IV.37Essai ETun08 -Evolution temporelle des flux rayonnés en section FM-7	126
IV.38Essai ETun08 -Evolution temporelle des flux rayonnés en section FM+7	127
IV.39Essai Etun01 - Evolution de la visibilité en section S+23	128
IV.40Essai ETun02 - Evolution de la visibilité en section S+23	128
IV.41Essai ETun07 - Evolution de la visibilité en section S+23	129
IV.42Essai ETun08 - Evolution de la visibilité en section S+23	129
IV.43Essai ETun 03 - Evolution temporelle de la puissance du foyer	130
IV.44Essai ETun 04 - Evolution temporelle de la puissance du foyer	131

IV.45	Essai ETun 03 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4	132
IV.46	Essai ETun 04 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4	133
IV.47	Essai ETun 03 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12	133
IV.48	Essai ETun 04 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12	134
IV.49	Essai ETun03 - Zones de tenabilité thermique - t=600s	135
IV.50	Essai ETun04 - Zones de tenabilité thermique - t=600s	136
IV.51	Essai ETun03 - Evolution temporelle du critère de stratification S	137
IV.52	Essai ETun04 - Evolution temporelle du critère de stratification S	137
IV.53	Essai ETun 03 - Evolution temporelle des niveaux de flux rayonnés vers l'aval à 7 m du foyer	138
IV.54	Essai ETun 04 - Evolution temporelle des niveaux de flux rayonnés vers l'aval à 7 m du foyer	139
IV.55	Essai ETun 03 - Evolution temporelle des niveaux de flux rayonnés vers l'amont à 7 m du foyer	139
IV.56	Essai ETun 04 - Evolution temporelle des niveaux de flux rayonnés vers l'amont à 7 m du foyer	140
IV.57	Variation de l'aspect de la flamme pour un feu de bûcher. Evolution de la géométrie globale de la flamme en fonction de la vitesse de ventilation . . .	140
IV.58	Essai Etun03 - Evolution de la visibilité en section S+23	141
IV.59	Essai Etun04 - Evolution de la visibilité en section S+23	141
IV.60	Essai ETun 05 - Evolution temporelle de la puissance du foyer	142
IV.61	Essai ETun 06 - Evolution temporelle de la puissance du foyer	143
IV.62	Essai ETun05 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4	144
IV.63	Essai ETun05 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12	144
IV.64	Essai ETun06 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4	145
IV.65	Essai ETun06 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12	145
IV.66	Essai ETun05 - Evolution temporelle du critère de stratification S	146
IV.67	Essai ETun06 - Evolution temporelle du critère de stratification S	146
IV.68	Essai ETun05 - Zones de tenabilité thermique - t=300s	148
IV.69	Essai ETun06 - Zones de tenabilité thermique - t=300s	149
IV.70	Essai ETun05 - Evolution temporelle des flux rayonnés vers l'aval	150
IV.71	Essai ETun05 - Evolution temporelle des flux rayonnés vers l'amont	150
IV.72	Essai ETun06 - Evolution temporelle des flux rayonnés vers l'amont	151
IV.73	Essai ETun06 - Evolution temporelle des flux rayonnés vers l'aval	151
IV.74	Essai Etun05 - Evolution de la visibilité en section S+23	152
IV.75	Essai Etun06 - Evolution de la visibilité en section S+23	153
IV.76	ETun01 - Allure de l'effet de confinement sur la puissance du foyer dans le cas d'un feu de nappe	155

IV.77	Influence de la vitesse de ventilation sur la puissance du foyer	155
IV.78	Essais ETun01 et ETun07 - Limite basse des zones de tenabilité	157
IV.79	Essais ETun03 et ETun05 - Limite basse des zones de tenabilité	157
IV.80	Essais ETun02 et ETun08 - Limite basse des zones de tenabilité	158
IV.81	Essais ETun04 et ETun06 - Limite basse des zones de tenabilité	158
V.1	Vues d'un capot de protection de thermocouple	163
V.2	Essai T ² C 4 - Evolution temporelle de l'écart de température entre les thermocouples avec capots de protection (TC) et sans capots de protection (TN) en section T+4	165
V.3	Essai T ² C 4 - Evolution temporelle de l'écart de température entre les thermocouples avec capots de protection (TC) et sans capots de protection (TN) en section T+8	165
V.4	Essai T ² C 5 - Evolution temporelle de l'écart de température entre les thermocouples avec capots de protection (TC) et sans capots de protection (TN) en section T+4	166
V.5	Essai T ² C 5 - Evolution temporelle de l'écart de température entre les thermocouples avec capots de protection (TC) et sans capots de protection (TN) en section T+8	167
V.6	Représentation de la zone du tunnel équipée de buses d'aspersion	168
V.7	Essai ETun11 - Evolution temporelle de la puissance du foyer par mesure de perte de masse	169
V.8	Essai ETun09 - Evolution temporelle de la puissance du foyer par mesure de perte de masse	170
V.9	Essai ETun12 - Evolution temporelle de la puissance du foyer par mesure de perte de masse	170
V.10	Essai ETun09 et ETun10 - Evolution temporelle de la puissance moyennée du foyer par mesure de perte de masse	172
V.11	Essai ETun12 - Evolution temporelle de la puissance moyennée du foyer par mesure de perte de masse	172
V.12	Essais ETun09, ETun10 et ETun12 - Evolution temporelle de la masse d'eau ajoutée par l'aspersion dans le bac	173
V.13	Essai ETun09 - Evolution temporelle de la puissance du foyer	174
V.14	Essai ETun10 - Evolution temporelle de la puissance du foyer	175
V.15	Essai ETun12 - Evolution temporelle de la puissance du foyer	175
V.16	Bilan des débits volumiques dans le tunnel	177
V.17	Essai ETun09 - Illustration des différents termes de baisse de puissance dus à l'échauffement de l'eau et à sa vaporisation	179
V.18	Essai ETun09 et ETun10 - Efficacité η^{BE} du brouillard d'eau	180
V.19	Essai ETun12 - Efficacité η^{BE} du brouillard d'eau	180
V.20	Essai ETun09 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4	181
V.21	Visualisation du foyer depuis l'entrée, sans brouillard d'eau (à gauche) et avec brouillard d'eau (à droite)	181
V.22	Essai ETun09 - Zones de tenabilité thermique - t=300s	182
V.23	Essai ETun09 - Zones de tenabilité thermique - t=300s	183

V.24 Essai ETun09 - Evolution temporelle du critère de stratification S	184
V.25 ETun09 - Evolution temporelle des flux radiatifs reçus en amont (section FM-7)	185
V.26 Essais ETun17 et ETun18 - Evolution temporelle de la puissance d'un foyer heptane couvert, la vitesse de ventilation étant supérieure à la vitesse critique	187
V.27 ETun17 - Evolution temporelle des flux radiatifs reçus en amont (section FM-7)	187
V.28 Essai ETun27 et ETun28 - Emplacement des secteurs d'aspersion	188
V.29 Essais ETun27 et ETun28 - Evolution temporelle de la puissance du foyer .	189
V.30 Essai ETun27 - Efficacité η^{BE} du brouillard d'eau	190
V.31 Essai ETun27 - Evolution de la Température de l'écoulement à la section T+8	191
V.32 Essai ETun28 - Evolution de la Température de l'écoulement à la section T+8	191
V.33 Essais ETun02, ETun12, ETun27 et ETun28 - Evolution de la moyenne des radiomètres amont	192
V.34 Essais ETun02, ETun12, ETun27 et ETun28 - Evolution de la moyenne des radiomètres aval	193
V.35 Essais bûchers ETun19 et ETun20 - Evolution temporelle de la puissance par perte de masse	194
V.36 Essais bûchers ETun21 et ETun22 - Evolution temporelle de la puissance par perte de masse	195
V.37 Essais bûchers ETun19 et ETun20 - Evolution temporelle de la puissance par mesure de consommation d'oxygène	195
V.38 Essais bûchers ETun21 et ETun22 - Evolution temporelle de la puissance par mesure de consommation d'oxygène	196
V.39 Essai bûcher ETun21 - Evolution temporelle des fractions volumiques d'O ₂ , CO ₂ et CO	197
V.40 Essai bûcher ETun21 - Evolution temporelle de la puissance du foyer par O ₂ et CO ₂	198
V.41 Essai bûcher ETun21 - Evolution temporelle de l'écart $\Delta(O_2, CO_2)$ entre les concentrations de O ₂ et de CO ₂	199
V.42 Essai bûcher ETun21 - Evolution temporelle des débits volumiques	200
V.43 Essai bûcher ETun19 et ETun20 - Evolution temporelle de l'efficacité η^{BE} du brouillard d'eau	200
V.44 Essai bûcher ETun21 et ETun22 - Evolution temporelle de l'efficacité η^{BE} du brouillard d'eau	201
V.45 Essai ETun19 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4	202
V.46 Essai ETun19 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+8	202
V.47 Essai ETun19 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12	203
V.48 Essai ETun19 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+24	203

TABLE DES FIGURES

V.49 Essai ETun21 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4	204
V.50 Essai ETun21 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+8	204
V.51 Essai ETun21 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12	205
V.52 Essai ETun21 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+24	205
V.53 Essai ETun21 - Profils verticaux de température	206
V.54 Essai ETun19 - Evolution temporelle du critère S	207
V.55 Essai ETun21 - Evolution temporelle du critère S	207
V.56 Essai ETun19 - Evolution temporelle des niveaux de flux radiatifs en section FM+7	208
V.57 Essai ETun21 - Evolution temporelle des niveaux de flux radiatifs en section FM+7	208
V.58 Essais ETun25 et ETun26 - Evolution temporelle de la puissance	211
V.59 Essais ETun23 et ETun24 - Evolution temporelle de la puissance	211
V.60 Essai ETun23 - Evolution temporelle de la concentration de monoxyde de carbone	212
V.61 Essais ETun23 et ETun24 - Evolution temporelle de l'efficacité η^{BE} du brouillard d'eau	213
V.62 Essais ETun25 et ETun26 - Evolution temporelle de l'efficacité η^{BE} du brouillard d'eau	213
V.63 Essai ETun24 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4	215
V.64 Essai ETun24 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+8	215
V.65 Essai ETun24 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12	216
V.66 Essai ETun24 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+24	216
V.67 Essai ETun25 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4	217
V.68 Essai ETun25 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+8	217
V.69 Essai ETun25 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12	218
V.70 Essai ETun25 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+24	218
V.71 Essai ETun24 - Evolution temporelle des niveaux flux radiatifs en section FM-7	219
V.72 Essai ETun24 - Evolution temporelle des niveaux flux radiatifs en section FM+7	219
V.73 Schéma d'implantation des mesures lors de la campagne SOLIT. Source : [81]	223
V.74 Correspondance des capteurs SOLIT et des capteurs ETun	224

V.75 Campagnes SOLIT et ETun - Evolution temporelle des puissances de foyer	225
V.76 Section ETunT+4 - Comparaison des évolutions temporelles de température de la campagne ETun et SOLIT - Section ETunT+4	226
V.77 Section ETunT+8 - Comparaison des évolutions temporelles de température de la campagne ETun et SOLIT - Section ETunT+4	227
V.78 Section ETunT+12 - Comparaison des évolutions temporelles de température de la campagne ETun et SOLIT - Section ETunT+4	227
VI.1 Essai Etun09 - Evolution de la visibilité en section S+23	234
VI.2 Essai Etun12 - Evolution de la visibilité en section S+23	235
VI.3 Essai Etun27 - Evolution de la visibilité en section S+23	235
VI.4 Essai Etun28 - Evolution de la visibilité en section S+23	236
VI.5 Essai Etun19 - Evolution de la visibilité en section S+23	237
VI.6 Essai Etun21 - Evolution de la visibilité en section S+23	237
VI.7 Essai Etun24 - Evolution de la visibilité en section S+23	238
VI.8 Essai Etun25 - Evolution de la visibilité en section S+23	238
VI.9 Distribution de taille en nombre de gouttelettes de la buse utilisée	241
VI.10 Schéma du dispositif de caractérisation des fumées	241
VI.11 Vue de la zone de mesure	242
VI.12 Vue du foyer en phase sèche	242
VI.13 Essais AOF sans brouillard d'eau - Evolution temporelle du coefficient d'extinction	243
VI.14 Essais AOF-SEC03 et BEO2 - Puissance du Foyer	246
VI.15 Essais AOF150 avec brouillard d'eau - Evolution temporelle du coefficient d'extinction	247
VI.16 Essais AOF - Evolution temporelle de la température au point de mesure	247
VI.17 Schéma de principe de la mesure de l'atténuation de rayonnement	248

Liste des tableaux

I.1	Puissances typiques de feux de véhicules et de leur chargement	16
I.2	Critères de tenabilité pour les usagers et les services de secours	17
II.1	Récapitulatif des relations de similitude proposées par Heskestad [64] pour le brouillard d'eau, s étant le facteur d'échelle ($s = \frac{l_2}{l_1}$)	61
II.2	Récapitulatif des relations de similitude proposées par Jayaweera et Yu [65] pour un brouillard d'eau - s étant le facteur d'échelle ($s = \frac{l_2}{l_1}$)	62
II.3	Récapitulatif des relations de similitude utilisées dans le présent travail . .	63
III.1	Récapitulatif des essais de référence et de performance	87
IV.1	Récapitulatif des débits massiques surfaciques d'heptane relevés lors des essais préliminaires	100
IV.2	Récapitulatif des essais ETun heptane de référence	101
IV.3	Récapitulatif des essais ETun bûcher de référence	130
IV.4	Récapitulatif des essais ETun de référence d'empilement de palettes	142
V.1	Liste des essais T^2C	164
V.2	Récapitulatif des essais avec brouillard d'eau - Foyers heptane non couverts	168
V.3	Vitesses de perte de masse et puissances moyennes pour les essais ETun09, ETun10 et ETun12 sous aspersion	171
V.4	Energie libérée au cours des essais à foyer heptane découvert (puissance P_{moy}) et comparaison avec l'essai de référence correspondant	171
V.5	Niveaux de puissance lors des essais ETun09, ETun10 et ETun12 : niveau avant déclenchement de l'aspersion, P_{inf}^{asp} niveau minimum pendant l'aspersion, P_{sup}^{asp} niveau maximum pendant l'aspersion.	176
V.6	Ecart entre l'énergie libérée au cours de l'essai par le foyer, par rapport à l'essai de référence, selon les différentes méthodes de déterminations de la puissance	176
V.7	Foyers heptane découverts - Atténuation des flux rayonnés mesurés vers l'amont par l'aspersion	185
V.8	Foyers heptane découverts - Baisse des flux rayonnés lors de l'aspersion . .	185
V.9	Foyers heptane couverts - Récapitulatif des essais avec brouillard d'eau . .	186
V.10	Foyers heptane couverts - Atténuation des flux rayonnés mesurés vers l'amont par l'aspersion	188
V.11	Masses d'eau actives lors des essais ETun12 et ETun27	190

V.12 Essais de sectorisation - Atténuation des flux rayonnés mesurés vers l'amont par l'aspersion, au niveau de puissance P_{inf}^{asp}	193
V.13 Essais de sectorisation - Evaluation de l'effet de rideau d'eau, au niveau de puissance P_{inf}^{asp}	193
V.14 Récapitulatif des essais avec brouillard d'eau - Foyers bûcher	194
V.15 Foyers bûchers - Principaux résultats des essais avec aspersion	201
V.16 Essais bûchers - Atténuation des flux rayonnés mesurés vers l'amont par l'aspersion	209
V.17 Essais bûchers - Evaluation de l'effet de rideau d'eau	209
V.18 Récapitulatif des essais avec brouillard d'eau - Foyer palettes	210
V.19 Essais Palettes - Puissance moyenne du foyer sous aspersion	212
V.20 Foyers palettes - Principaux résultats des essais avec aspersion	214
V.21 Essais Palettes - Atténuation des flux rayonnés mesurés vers l'amont par l'aspersion	220
V.22 Essais Palettes - Evaluation de l'effet de rideau d'eau	220
V.23 Détermination des caractéristiques des essais menée à l'échelle réelle, suivant les relations de Yu [65] pour le brouillard d'eau	221
V.24 Position des sections de mesure SOLIT ramenées à l'échelle du prototype	223
V.25 Correspondance des capteurs du plan médian longitudinal entre les campagnes SOLIT et ETun	224
V.26 Récapitulatif de la baisse du débit calorifique et de l'efficacité du brouillard d'eau, selon la nature et la configuration du foyer ainsi que selon la vitesse de ventilation	229
VI.1 Valeurs du facteur B pour les longueurs d'onde utilisées dans le présent travail	245
VI.2 Valeurs du rendement en particules de suies ε_p pour les essais sans aspersion	245
VI.3 Essais AOF - Ecart du coefficient d'extinction mesurés entre la phase sèche et la phase humide	246
VI.4 Résultat des calculs des efficacités énergétiques et du facteur R_λ , du coefficient d'absorption des suies et du coefficient de diffusion des gouttelettes sous phase d'aspersion et du coefficient d'absorption des suies lors des essais sans aspersion	251

Nomenclature

Note préliminaire : les grandeurs écrites en gras sont des grandeurs vectorielles.

Symbole	Unité SI	Désignation
A	[W.s ⁻²]	Facteur préparabolique de montée en puissance d'un foyer à combustible solide. $\dot{Q} = A \cdot t^2$
B	[m ⁴ .s ⁻³]	Flottabilité
B _λ	[-]	Facteur fonction des indices optiques des particules
C _{D,g}	[-]	Coefficient de traînée d'une gouttelette
C _m	[J.kg ⁻¹]	Chaleur latente de vaporisation de l'eau
C _{ste}	[-]	Constante
C _p	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Capacité calorifique à pression constante du milieu
C _r	[-]	Coefficient traduisant le caractère plus ou moins complet de la réaction dépendant de la nature du combustible et de l'environnement
d	[m]	Diamètre d'une gouttelette
D	[-]	Critère D de stratification de Newman
D ₃₂	[m]	Diamètre de Sauter
D _{bag.}	[m]	Côté de la section des baguettes du bûcher
D _n	[m]	Diamètre de la buse
D _{nappe}	[m]	Diamètre de la nappe de combustible d'un feu de nappe
D _{ne}	[m]	Diamètre efficace de la buse
D _{v y}	[m]	Diamètre frontière en dessous duquel on retrouve la fraction y de gouttelettes d'un spray, en volume
Da	[-]	Nombre de Damkohler. $Da = \frac{\tau_m}{\tau_c}$
E	[kg.m ⁻²]	Flux massique d'eau
F	[-]	Facteur de vue quantifiant les aspects géométriques de l'interaction du foyer avec la cible.
f	[-]	Fraction non radiative de la puissance du foyer
f _v	[-]	Fraction volumique de suies
Fr	[-]	Nombre de Froude. $Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot l}}$

g	[m.s ⁻²]	Accélération gravifique
h	[m]	Hauteur du bûcher
H	[m]	Hauteur du tunnel
h _p	[m]	Hauteur de l'empilement de palettes
h _{C,O₂}	[J.kg ⁻¹]	Chaleur de combustion massique ramenée à un kilogramme de dioxygène
I	[cd]	Intensité lumineuse en phase d'essai
I ₀	[cd]	Intensité lumineuse de référence
k	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Conductivité thermique
K	[L.min ⁻¹ .Pa ^{-½}]	Facteur K d'une buse d'aspersion
K _{abs}	[m ⁻¹]	Coefficient d'absorption
K _c	[m ⁻¹]	Coefficient caractéristique du combustible considéré
K _{dif}	[m ⁻¹]	Coefficient de diffusion
K _{ext}	[m ⁻¹]	Coefficient d'extinction
K _T	[-]	Facteur de proportionnalité
K _{CO₂}	[-]	Coefficient d'allègement d'écriture concernant le dioxyde de carbone dans l'équation bilan massique de la combustion d'un alcane
K _{H₂O}	[-]	Coefficient d'allègement d'écriture concernant l'eau dans l'équation bilan massique de la combustion d'un alcane
K _{N₂}	[-]	Coefficient d'allègement d'écriture concernant le diazote dans l'équation bilan massique de la combustion d'un alcane
K _{O₂}	[-]	Coefficient d'allègement d'écriture concernant le dioxygène dans l'équation bilan massique de la combustion d'un alcane
K _p	[-]	Coefficient de pente du tunnel (K _p = 1 pour une pente nulle)
L	[m]	Epaisseur du brouillard d'eau
L _{dif}	[cd.m ⁻²]	Luminance de l'onde diffusée en un point du capteur
L _{v^{H₂O}}	[J.kg ⁻¹]	Chaleur latente de vaporisation de l'eau
l	[m]	Longueur caractéristique du tunnel
l _{bag}	[m]	Longueur des baguettes constituant le bûcher
m	[kg]	Masse d'une gouttelette d'eau
m	[kg]	Masse
m _{C₇H₁₆,asp,0}	[kg]	Masse d'heptane restant dans le bac au déclenchement de l'aspersion
M	[kg.m ⁻³]	Quantité d'eau injectée par volume
M	[-]	Taux d'humidité du bois
M	[kg.m ⁻¹ .s ⁻²]	Quantité de mouvement des gouttelettes en sortie de buse

NOMENCLATURE

\dot{M}	[kg.s ⁻¹]	Taux d'évaporation total des gouttelettes
M_{CO_2}	[kg.mol ⁻¹]	Masse molaire du dioxyde de carbone
M_{CO}	[kg.mol ⁻¹]	Masse molaire du monoxyde de carbone
$M_{C_xH_y}$	[kg.mol ⁻¹]	Masse molaire de l'alcane C _x H _y
M_{O_2}	[kg.mol ⁻¹]	Masse molaire du dioxygène
$m_{0,bûcher}$	[kg]	Masse initiale du bûcher
\dot{m}_a	[kg.s ⁻¹]	Débit massique d'air entrainé par le panache du foyer
\dot{m}_e	[kg.s ⁻¹]	Débit massique d'eau d'une buse
$\dot{m}_{eau,vap}$	[kg.s ⁻¹]	Débit massique d'eau du brouillard vaporisée
$\dot{m}_{g,e}$	[kg.s ⁻¹]	Débit massique par vaporisation d'une gouttelette d'eau
\dot{m}_p	[kg.s ⁻¹]	Débit massique de particules de suies
\dot{m}_{eau}^*	[kg.m ⁻² .s ⁻¹]	Débit d'eau moyen traversant une surface de référence en l'absence de flamme
\dot{m}_l^*	[kg.s ⁻¹]	Densité de flux par unité de surface
$\dot{m}_{O_2}^{ex}$	[kg.s ⁻¹]	Débit massique d'oxygène dans les effluents
$\dot{m}_{O_2}^{in}$	[kg.s ⁻¹]	Débit massique d'oxygène entrant dans le tunnel
$\dot{m}_{chauff}^{10 \rightarrow T_{asp}}$	[kg.s ⁻¹]	Débit massique d'eau du brouillard échauffée mais ne se vaporisant pas
\dot{m}_c''	[kg.s ⁻¹ .m ²]	Débit massique surfacique de combustible
$\dot{m}_{c,0}''$	[kg.s ⁻¹ .m ²]	Débit massique surfacique limite de combustible
\dot{m}_{BE}'''	[kg.m ³ .s ⁻¹]	Densité de flux du brouillard d'eau
N_p	[-]	Nombre de gouttelettes d'eau par classe
n_1	[-]	Partie réelle de l'indice optique complexe du milieu
n_2	[-]	Partie imaginaire de l'indice optique complexe du milieu
n	[s ⁻¹ .m ⁻²]	Densité de flux de gouttelettes
n'''	[m ⁻³]	Densité de gouttelettes
Nu	[-]	Nombre de Nusselt $Nu = \frac{h \cdot l}{k}$
p	[Pa]	Pression
p_a	[Pa]	Pression ambiante du milieu
p_c	[Pa]	Ecart de pression caractéristique
$p_{circuit}$	[Pa]	Pression du circuit d'eau
\hat{p}	[Pa]	Ecart de pression par rapport à l'ambiante. $\hat{p} = p - p_a$
P_{ext}	[cd]	Puissance lumineuse
P_{dif}	[cd]	Puissance lumineuse diffusée sur le capteur
P_{inf}^{asp}	[W]	Borne inférieure de puissance du foyer sous aspersion
P_{sup}^{asp}	[W]	Borne supérieure de puissance du foyer sous aspersion
P_{moy}	[W]	Puissance moyenne du foyer sous aspersion
Pr	[-]	Nombre de Prandtl . $Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$
$Q_{abs,s,\lambda}$	[-]	Efficacité énergétique d'absorption des suies à la longueur d'onde λ

$Q_{abs,g,\lambda}$	[-]	Efficacité énergétique d'absorption des gouttelettes d'eau à la longueur d'onde λ
$Q_{dif,g,\lambda}$	[-]	Efficacité énergétique de diffusion des gouttelettes d'eau à la longueur d'onde λ
\dot{Q}	[W]	Débit calorifique du foyer
\dot{Q}_e	[m ³ .s ⁻¹]	Débit volumique d'eau d'une buse
$\dot{Q}_{pal,max}$	[W]	Débit calorifique maximal de l'empilement de palettes
$\dot{Q}_{prototype}$	[W]	Débit calorifique du foyer dans le prototype
$\dot{Q}_{réel}$	[W]	Débit calorifique du foyer à échelle réelle
$\dot{Q}''_{voûte}$	[W.m ⁻²]	Flux de chaleur surfacique transféré à la voûte
\dot{Q}'''	[W.m ⁻³ .s ⁻¹]	Terme source volumique d'énergie
\dot{Q}''_F	[W.m ²]	Flux de chaleur fourni par la flamme au combustible
\dot{Q}''_{Foy}	[W.m ⁻²]	Flux total rayonné par le feu
\dot{Q}''_P	[W.m ²]	Flux de chaleur global perdu exprimé comme un flux à travers une surface
\dot{Q}''_{evap}	[W.m ²]	Flux de chaleur absorbée par vaporisation de l'eau exprimé comme un flux au travers d'une surface
r	[m.s ⁻¹]	Vitesse de régression de la surface combustible
r_d	[m]	Distance du centre la zone de mesure au capteur
$r_{vap/liq}$	[-]	Rapport de volume entre un kilogramme d'eau à l'état liquide et à l'état gazeux
R	[-]	Facteur de réflexion de la cible
R_a	[-]	Rapport d'aspect du tunnel. $R_a = \frac{S_{tunnel}}{H^2}$
R_λ	[-]	Facteur quantifiant l'énergie diffusée vers le capteur par rapport à l'énergie diffusée totale
Re	[-]	Nombre de Reynolds
Re_g	[-]	Nombre de Reynolds d'une gouttelette
Ri	[-]	Nombre de Richardson
s	[-]	Facteur d'échelle
s_{bag}	[-]	Distance entre les baguettes d'une couche du bûcher
S	[-]	Critère S de stratification de Newman
$S_{baguette}$	[m ²]	Surface frontale occupée par les baguettes
$S_{bûcher}$	[m ²]	Surface frontale totale du bûcher
$S_{sol,pal}$	[m ²]	Surface au sol de l'empilement de palettes
S_c	[m ²]	Surface combustible
S_{paroi}	[m ²]	Surface de la paroi
t	[s]	Temps
t'	[-]	Temps adimensionné
t_{vie}	[s]	Durée de vie d'une gouttelette d'eau
T	[K]	Température
T_{source}	[K]	Température de la source radiative

NOMENCLATURE

T'	[-]	Température adimensionnée
T_0	[K]	Température initiale du milieu
T_∞	[K]	Température dans le matériau loin de la paroi
T_{asp}	[K]	Température mesurée dans le tunnel sous aspersion
T_f	[K]	Température de flamme
T_{inj}	[K]	Température de l'eau du brouillard lors de son injection dans le tunnel
T_{max}	[K]	Température moyenne dans la section aval (hors zone de flamme)
T_{moy}	[K]	Température moyenne déduite par intégration du profil vertical de température
T_s	[K]	Température au niveau du sol du tunnel
T_v	[K]	Température au niveau de la voûte du tunnel
u	[m.s ⁻¹]	Vitesse
u'	[-]	Vitesse adimensionnée
u_0	[m.s ⁻¹]	Vitesse de l'air entrant dans le tunnel (avant échauffement)
u_c	[m.s ⁻¹]	Vitesse critique
u_{ec}	[m.s ⁻¹]	Vitesse de l'écoulement
u_g	[m.s ⁻¹]	Vitesse de la gouttelette d'eau considérée
u_{inj}	[m.s ⁻¹]	Vitesse d'injection des gouttelettes
V	[m.s ⁻¹]	Vitesse caractéristique de l'écoulement longitudinal
Vis	[-]	Visibilité des fumées. $Vis = \frac{I}{I_0}$
V_a	[m ³]	Volume caractéristique de l'action du brouillard d'eau sur le foyer
\dot{V}	[m ³ .s ⁻¹]	Débit volumique des fumées
\dot{V}_{frais}	[m ³ .s ⁻¹]	Débit volumique d'air frais dans le tunnel
\dot{V}_c	[m ³ .s ⁻¹]	Débit volumique d'air entraîné par le foyer
\dot{V}_{eau}	[m ³ .s ⁻¹]	Débit volumique d'injection d'une buse d'aspersion
\dot{V}^{ex}	[m ³ .s ⁻¹]	Débit volumique d'effluents
$\dot{V}_{gaz,foyer}$	[m ³ .s ⁻¹]	Débit volumique des gaz générés par le foyer
$\dot{V}_{extract}$	[m ³ .s ⁻¹]	Débit volumique extrait par le ventilateur
\dot{V}_{vap}	[m ³ .s ⁻¹]	Débit volumique généré par la vaporisation des gouttelettes du brouillard d'eau
We	[-]	Nombre de Weber $We = \frac{\rho u^2 l}{\sigma}$
x	[m]	Coordonnée longitudinale
x'	[-]	Coordonnée longitudinale adimensionnée
$X_{CO_2}^{AP}$	[-]	Fraction volumique de CO ₂ des effluents
$X_{N_2}^{AP}$	[-]	Fraction volumique de N ₂ des effluents
$X_{O_2}^{AP}$	[-]	Fraction volumique de O ₂ des effluents

$X_{CO_2}^{in}$	[-]	Fraction volumique de CO ₂ de l'air frais
$X_{N_2}^{in}$	[-]	Fraction volumique de N ₂ de l'air frais
$X_{O_2}^{in}$	[-]	Fraction volumique de O ₂ de l'air frais
x_g	[-]	Position de la gouttelette considérée
z	[-]	Distance normale à la voûte

Symbole	Unité SI	Désignation
α	[-]	Coefficient quantifiant la production de H ₂ O, CO et CO ₂ en fonction de la fraction volumique de dioxygène entrante
β	[-]	Paramètre de taille des gouttelettes
δ	[m]	Profondeur de pénétration thermique dans la voûte
ΔH_c	[J.kg ⁻¹]	Chaleur de combustion du combustible
ΔH_v	[J.kg ⁻¹]	Chaleur latente de vaporisation du combustible
ΔK_{ext}	[m ⁻¹]	Ecart de coefficient d'extinction
Δt_{asp}	[s]	Durée de la phase d'aspersion
ΔP	[W]	Baisse de puissance du foyer lors de l'aspersion par rapport à sa valeur avant aspersion
$\Delta P_{chauff,vap}$	[W]	Puissance absorbée par l'échauffement de l'eau du brouillard qui va se vaporiser
$\Delta P_{eau\ échauffée}$	[W]	Puissance absorbée par l'échauffement de l'eau du brouillard qui ne va pas se vaporiser
Δp_{inj}	[Pa]	Différence de pression entre le circuit d'eau et la pression ambiante
ΔP_{vap}	[W]	Puissance du foyer absorbée par la vaporisation de l'eau
ΔT	[K]	Élévation de température des gaz de combustion
ε_p	[-]	Rendement en particules de suies
η^{BE}	[-]	Efficacité du brouillard d'eau
η_{rap}^{BE}	[-]	Efficacité rapportée du brouillard d'eau
λ	[m]	Longueur d'onde
μ	[Pa.s ⁻¹]	Viscosité dynamique
ν	[m ² .s ⁻¹]	Viscosité cinématique
Π	[-]	Groupement adimensionnel
ρ	[kg.m ⁻³]	Masse volumique
ρ'	[-]	Masse volumique adimensionnalisée
ρ_0	[kg.m ⁻³]	Masse volumique initiale du milieu
ρ_{ec}	[kg.m ⁻³]	Masse volumique de l'écoulement
ρ_{H_2O}	[kg.m ⁻³]	Masse volumique de l'eau

NOMENCLATURE

ρ_{O_2}	[kg.m ⁻³]	Masse volumique du dioxygène
ρ_p	[kg.m ⁻³]	Masse volumique des particules
σ	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]	Constante de Stephan-Boltzman. $\sigma = 5,67.10^8$
σ_{eau}	[N.m ⁻¹]	Tension superficielle de l'eau
$d\Sigma_p$	[m ²]	Surface élémentaire du capteur
τ	[s]	Temps caractéristique
τ_c	[s]	Temps caractéristique de la réaction chimique
$\tau_{c,sp}$	[s]	Temps à partir duquel une des conditions de tenabilité pour les services de secours n'est plus assuré
$\tau_{c,u}$	[s]	Temps à partir duquel une des conditions de tenabilité pour les usagers n'est plus assuré
τ_m	[s]	Temps de mélange
τ_{trans}	[-]	Taux de transmission du brouillard d'eau
$\Phi_{a,\lambda}$	[-]	Fonction de phase
Ω	[sr]	Angle solide

Introduction

Le concept de voie de communication ou de transport souterrain est très ancien. Si les Romains l'utilisaient surtout pour la captation ou l'acheminement d'eau, ils avaient déjà construit vers l'an 37 avant Jésus Christ un tunnel de près de 900 m entre Pansilippe et le port de Pouzzole, alors une place commerciale très active.

Cependant, la multiplication des voies souterraines est assez récente. Le premier tunnel routier répertorié dans le massif Alpin, près du col du Saint Gothard, remonte à 1707. Mais ce n'est véritablement qu'au XIX^{ème} siècle avec l'apparition du chemin de fer et la difficulté pour les locomotives d'alors de gravir des dénivelés supérieurs à 3%, que la construction de tunnels s'est généralisée.

Utiliser le sous-sol pour se déplacer est, de toute façon, incontestablement avantageux. Les tracés des voies, plus fluides, raccourcissent les distances. Le passage en souterrain permet de réduire les nuisances à la surface (bruit, pollution ...) et de franchir des zones difficiles, tant en terme de relief que de conditions climatiques.

Mais, que ce soit en communication routière ou ferroviaire, il faut assurer aux usagers des conditions de transit "acceptables et sécurisantes", au sens où :

- Il faut maintenir une ambiance de tenabilité pour les personnes au sein de l'ouvrage. L'atmosphère doit y être respirable et la visibilité suffisante. Cette exigence revêt une importance toute particulière s'agissant de tunnels routiers, du fait des rejets de gaz de combustion et de particules des véhicules. Assurer une bonne ventilation de l'ouvrage, en fonction de ses caractéristiques propres (longueur, section, simple ou double sens de circulation, importance du trafic) est indispensable.

La France compte environ 800 tunnels routiers, dont les trois quarts sont de faible longueur (inférieure à 200 m). Si ceux-ci ne nécessitent pas d'équipements importants, dès que la longueur s'accroît, la mise en œuvre d'appareillages spécifiques de ventilation (entre autres) devient incontournable.

- Il est impératif de prendre en considération les risques d'accidents ou d'incidents, ceux-ci pouvant conduire à l'événement le plus redouté qui soit en tunnel, à savoir l'incendie.

D'une façon générale, les causes d'éclosion d'un incendie peuvent être multiples, qu'elles soient accidentelles ou qu'elles fassent intervenir un facteur humain (par inadvertance ou à dessein). En tunnels, qu'ils soient routiers ou ferroviaires, les causes accidentelles sont essentiellement liées aux véhicules ou trains qui les empruntent : collision, inflammation moteur, dysfonctionnement électrique ou, plus spécifiquement pour les poids lourds, échauffement des pneumatiques ou combustion lente, pouvant transiter en combustion vive, au sein des cargaisons transportées. Or, le risque ne fait qu'empirer au fil des ans, du fait d'une intensification du trafic, certains ouvrages routiers étant en limite de saturation aux heures ou périodes de pointe. Les cadences de circulation des trains sont optimisées,

parfois à la limite du raisonnable et les cargaisons transportées sont souvent sensibles et dangereuses. Par ailleurs, l'acte de malveillance ou déraisonné ne peut être ignoré, comme la mise à feu volontaire d'une voiture de métro en Corée en février 2003, commise par un homme déséquilibré. L'acte terroriste n'est pas lui non plus à exclure.

Quoi qu'il en soit, les incendies en tunnel ayant des conséquences véritablement tragiques sont rares. La dernière décennie a pourtant été marquée par une série d'incendies graves :

- 18 novembre 1996, Tunnel sous la Manche, pas de victimes grâce à une procédure sécuritaire performante.
- 24 mars 1999, Tunnel du Mont-Blanc, 39 victimes.
- 29 mai 1999, Tunnel du Tauern, 12 victimes.
- 24 octobre 2001, Tunnel du Saint Gothard, 11 victimes.
- 4 juin 2005, Tunnel du Fréjus, 2 victimes.
- 30 août 2005, Tunnel du Fréjus, aucune victime.
- 11 septembre 2008, Tunnel sous la Manche, aucune victime.

Lors des deux derniers accidents, l'incendie, s'il n'a heureusement pas fait de victimes, a occasionné de sérieuses dégradations de la structure et de l'équipement de l'ouvrage. Concernant l'accident du Mont-Blanc, de graves dysfonctionnements en matière de gestion des équipements (systèmes de ventilation), des personnels et de la procédure de mise en œuvre des secours furent mis en évidence.

La sécurité feu en tunnel doit donc être une préoccupation majeure et constante, en recherchant des moyens ou des procédures d'intervention toujours plus performants.

La configuration tunnel constitue un véritable piège du fait de son caractère confiné. Si le feu prend de l'importance, les fumées produites en abondance vont se répandre dans l'ouvrage sous l'effet de la ventilation (naturelle ou imposée). L'agression directe du foyer (niveaux de température élevés, flux thermiques) n'est ressentie que dans son voisinage, tandis que les fumées portent leurs effets néfastes loin (toxicité, perte de visibilité et élévation de la température) et constituent le risque le plus élevé pour les personnes. Le couplage entre le foyer (combustion) et les effets de ventilation (aéraulique) est complexe et se trouve au centre de la problématique.

De longue date, on a cherché à maîtriser le mouvement des fumées en jouant sur la ventilation. A l'heure actuelle, l'appréhension des effets de la ventilation sur le mouvement des fumées et sur la stratification plus ou moins prononcée qui en résulte, peut s'appuyer sur de nombreux travaux, tant expérimentaux que numériques. Certains aspects fondamentaux liés à ces effets seront présentés au cours du présent travail.

A contrario, la maîtrise du foyer, pourtant à l'origine de la production des fumées, n'a pas encore vraiment fait l'objet d'une attention particulière dans ce contexte bien spécifique. En cas d'incendie en tunnel, les foyers sont traités à l'aide de moyens d'extinction conventionnels (eau pulvérisée, mousses ou poudres, selon la nature des combustibles impliqués). Ceci nécessite donc que les équipes d'intervention puissent approcher du lieu du sinistre, approche rendue difficile par les écoulements de fumées chaudes et toxiques ainsi que par l'encombrement des voies de circulation (situation particulièrement redoutée en tunnels routiers). Les délais d'intervention sont donc souvent importants et pénalisants, et ce d'autant plus que l'ouvrage est de grande longueur, ce qui est le cas de la majorité des tunnels mis en service actuellement (par exemple le Tunnel sous la Manche est long de 49.7 km et l'un des tunnels de la future liaison Lyon-Turin serait long de 53,5 km!).

Des réflexions sont naturellement menées pour tenter de pallier cette difficulté d'intervention sur les foyers, et s'orientent vers la mise en œuvre d'installations fixes à projection d'eau. Le but recherché est, après la détection et la localisation du foyer naissant, de l'empêcher de croître en puissance et de s'étendre, de réduire les niveaux de température et de limiter la production de fumées pendant le délai nécessaire aux équipes d'intervention pour accéder à la zone sinistrée et procéder aux opérations de lutte contre l'incendie jusqu'à l'extinction finale. De plus, un tel système permet de protéger la structure de l'ouvrage qui, lors d'un incendie, est dégradée voire ruinée sous les effets de la chaleur. S'agissant de structures en béton, on redoute les phénomènes d'instabilité thermique : écaillage, éclatement, éclatement explosif.

Si le concept est séduisant, son défaut majeur apparaît clairement : le risque de déstratification des fumées au voisinage du foyer et d'enfumage total du volume. Envisager l'usage de systèmes d'arrosage fixes implique donc d'élaborer une stratégie d'intervention couplant la ventilation, le système d'aspersion proprement dit et l'évacuation des usagers.

Les systèmes d'aspersion peuvent être de deux types : eau pulvérisée (sprinkler) et brouillards d'eau. Les premiers font appel à de grosses gouttes (d'un diamètre de l'ordre du millimètre ou plus), les seconds à une granulométrie plus fine (typiquement inférieure à 400 μm). L'intérêt actuel se porte de préférence sur le brouillard d'eau, essentiellement pour deux raisons :

- le brouillard d'eau, plus finement divisé, offre une surface d'échange plus importante pour la vaporisation, et laisse donc présager une efficacité plus grande pour des quantités d'eau utilisées bien moindres.
- du fait de la taille de ses gouttelettes, le brouillard d'eau peut jouer un rôle d'écran au rayonnement bien plus efficace que l'eau pulvérisée, et ainsi protéger les structures, équipements et personnes environnantes.

Ces aspects fondamentaux, que ce soit la stratégie d'utilisation ou les avantages offerts par le brouillard d'eau, seront développés plus avant dans le corps du travail.

L'usage du brouillard d'eau pour la lutte contre les feux en tunnel apparaît donc comme un concept récent. Toutefois le niveau actuel de compréhension de son action n'a pas atteint un degré suffisant pour permettre de concevoir sans expérimentation un système sur la base de principes généraux. Si, dans la pratique, un grand nombre d'installations brouillards d'eau a déjà été réalisé dans le monde pour la protection dans des domaines aussi divers que : salles des machines ou cabines ou espaces publics à bord de navires, turbines à gaz de plate-formes pétrolières, moteurs d'avions, armoires électriques et électroniques, chemins de câbles, centraux téléphoniques, transformateurs électriques, salles d'archives, musées, bibliothèques, édifices religieux en bois (comme de très nombreuses églises en Norvège), etc., on ne possède toutefois actuellement qu'une connaissance empirique des raisons qui font que le brouillard d'eau est efficace ou non, dans ces cas bien déterminés.

L'approche expérimentale demeure donc toujours la seule procédure de validation des performances d'une installation pour une application spécifique. L'expérimentation en vraie grandeur offre sans doute la meilleure garantie de validité. Cependant, elle nécessite des infrastructures conséquentes et dédiées, ainsi que des moyens lourds en équipements et en personnes qui la rendent onéreuse. Se pose donc le problème de la reproduction des essais qui seule peut garantir de s'affranchir des effets de paramètres mal maîtrisés.

S'offre alors une alternative : l'expérimentation en réduction d'échelle, avec respect

des lois de similitude associées. Les coûts s'en trouvent considérablement réduits et les expérimentations, bien qu'encore lourdes, peuvent être conduites par une équipe restreinte, à l'échelle d'un laboratoire. C'est l'option qui a été retenue pour développer le présent travail.

Concrètement, dans le cas d'un sinistre en tunnel, plusieurs autres paramètres que ceux présentés précédemment peuvent intervenir : les conditions de contrepression atmosphérique et de pistonement dans le tunnel qui peuvent influencer le mouvement des fumées, le trafic qui peut, par son état (fluide ou bloqué), compliquer l'application de la stratégie de traitement de l'incendie, ainsi que le mode de fonctionnement du tunnel (unidirectionnel ou bidirectionnel). Nous considérerons ici que l'utilisation de l'aspersion de brouillard d'eau est étudiée en vue de son utilisation pour contribuer à :

- la protection des usagers,
- la protection des services d'intervention et de secours,
- la protection de l'infrastructure.

L'ambition de ce travail est d'apporter des éléments de réflexion sur les conditions dans lesquelles l'aspersion de brouillard d'eau peut, ne peut pas ou peut sous certaines conditions contribuer à atteindre ces objectifs. L'impact du brouillard d'eau sur les phénomènes physiques mis en œuvre est étudié, mais une réflexion sur la stratégie d'application est également indispensable afin de répondre à cette problématique.

A cette fin, le présent mémoire est composé de deux parties. En premier lieu, une exposition du cadre du travail et des contraintes et paramètres expérimentaux et techniques, et dans un second lieu une présentation des différents résultats expérimentaux retenus pour soutenir cette étude. La première partie est scindée en trois chapitres. Le premier consiste en un rappel des phénomènes mis en jeu de façon générale lors d'un incendie, et plus précisément dans le cas d'un incendie en milieu tunnel. Une présentation des paramètres à garder à l'esprit est également faite, ainsi qu'un état de l'art sur les travaux scientifiques effectués dans le cadre du thème de ce travail. Le deuxième montre le raisonnement de mise en similitude des essais réalisés avec le scénario "à échelle réelle" retenu. Le troisième chapitre présente le dispositif expérimental utilisé lors de cette étude, ainsi que le dimensionnement des différents paramètres et la présentation du plan d'essais. La seconde partie est elle aussi décomposée en trois chapitres. Le chapitre quatre résume les résultats obtenus lors d'essais sans aspersion sur un tunnel expérimental situé au CSTB, présentant notamment le comportement de la puissance du foyer et de la stratification des fumées. Le chapitre cinq condense quant à lui les résultats obtenus concernant l'impact de l'aspersion de brouillard d'eau, ainsi que les méthodes utilisées pour analyser les données. Le dernier chapitre présente les résultats obtenus à partir d'un dispositif annexe, dédié à l'étude de l'interaction entre le brouillard d'eau et les fumées.

Première partie

Contexte et conditions de l'étude

Chapitre I

Généralités sur les incendies

Sommaire

I.1 Incendies en milieu tunnel	9
I.1.1 Aspects généraux	9
I.1.1.1 Modes de combustion	9
I.1.1.2 Mécanismes et structure de la flamme de diffusion	11
I.1.1.3 Développement du feu	12
I.1.2 Problématique des incendies en milieu tunnel	14
I.1.2.1 Effets sur les usagers	16
I.1.2.2 Effets sur les véhicules	18
I.1.2.3 Effets sur la structure du tunnel	18
I.1.3 Ventilation en tunnel	18
I.1.3.1 Ventilation naturelle	20
I.1.3.2 Ventilation longitudinale	21
I.1.3.3 Ventilation transversale	23
I.1.4 Mécanismes d’extinction d’un feu	24
I.2 Brouillards d’eau	27
I.2.1 Action sur un feu	27
I.2.1.1 Refroidissement par puits de chaleur	27
I.2.1.2 Déplacement d’oxygène	28
I.2.1.3 Atténuation des transferts de chaleur rayonnée	29
I.2.2 Caractérisation des brouillards d’eau	34
I.2.2.1 Distribution de taille des gouttelettes	35
I.2.2.2 Quantité d’eau utilisée	36
I.2.2.3 Quantité de mouvement du spray	38
I.2.2.4 Ajout d’additif	38
I.2.3 Technologie	38
I.2.4 Etat de l’art sur l’usage du concept brouillard d’eau dans la lutte contre les feux	39
I.2.5 Conclusion	46

Généralités sur les incendies

I.1 Incendies en milieu tunnel

I.1.1 Aspects généraux

Un incendie se caractérise souvent par des flammes de grandes dimensions et peut impliquer les combustibles les plus divers, le comburant étant généralement l'air. Dans ce chapitre, nous nous limiterons aux foyers que l'on peut rencontrer en cas de feu en tunnel, à savoir ceux de véhicules ou de leur chargement. Cependant, avant d'aborder l'étude d'un incendie proprement dit, il convient de présenter les aspects fondamentaux de la combustion, la façon dont les espèces combustibles se combinent avec l'oxygène de l'air ainsi que les différents types de flammes que l'on peut obtenir. Sous la notion apparemment simple de flamme se cachent des phénomènes complexes tant chimiques que physiques, fonction pour partie de la nature du combustible. D'un point de vue général, une flamme est une réaction d'oxydation qui se développe en phase gazeuse. La gamme de combustibles envisageable est très vaste, allant des hydrocarbures gazeux comme le méthane, aux matières solides chimiquement complexes comme la cellulose ou les polymères, en passant par des hydrocarbures liquides comme les alcanes.

I.1.1.1 Modes de combustion

Lorsqu'un gaz brûle, la réaction d'oxydation se produit là où les espèces combustibles et l'oxydant sont en présence. La nature de la flamme dépend de la manière dont sont combinés ces deux éléments. On distingue deux familles de flammes : les flammes *de prémélange* et les flammes *de diffusion*. Il est à noter que ce qu'on appelle communément flamme n'est en réalité que la région de la zone de réaction dans laquelle les suies issues de la combustion rayonnent dans le spectre visible.

La flamme de prémélange La flamme de prémélange est un mode de combustion propre aux gaz. Le combustible et l'oxydant sont mélangés avant que la réaction de combustion ait lieu. La combustion peut être stœchiométrique ou non, suivant la quantité d'oxygène injectée dans le mélange. Dans le cas d'une réaction stœchiométrique (rapport de mélange combustible/oxydant optimal pour une combustion complète), ce prémélange conduit à une réaction quasi-complète, avec très peu de formation de suies. Il existe de multiples façons d'obtenir une flamme de prémélange mais, classiquement, on retiendra l'image du gaz et de l'oxygène injectés tous les deux dans une *chambre de mélange* avant de brûler à la sortie de celle-ci.

La flamme de diffusion La flamme de diffusion est la forme la plus élémentaire de combustion. Le combustible et l'oxygène sont au préalable séparés et la flamme prend naissance aux endroits où ils entrent en contact. C'est la flamme que l'on rencontre avec des combustibles solides ou liquides et dont l'exemple typique est la bougie. Nous avons signalé précédemment que la réaction de combustion n'a lieu qu'entre espèces gazeuses et ici le processus de combustion est différent suivant la nature du combustible impliqué.

Le combustible doit être en phase gazeuse pour pouvoir participer à la combustion. Dans le cas d'un combustible liquide, il s'agit d'une vaporisation, étape au cours de laquelle se créent des espèces gazeuses, rarement identiques à celles du liquide mais le plus souvent plus légères. Pour un combustible solide, les espèces organiques le composant sont gazéifiées et s'échappent de la structure carbonée : on parle de dégradation thermique. Si au début du feu les vapeurs issues des espèces organiques de la surface du combustible sont libérées rapidement, une fois que la dégradation progresse en profondeur elles doivent souvent d'abord migrer au sein du squelette carboné résiduel (milieu solide poreux) pour atteindre sa surface et ensuite gagner la zone de réaction (cas classique de la combustion du bois par exemple).

La réaction de vaporisation ou de dégradation thermique est entretenue par le flux de chaleur émis par la flamme vers la surface du combustible. Les vapeurs vont ensuite migrer vers la zone de réaction.

Dans les deux cas, une fois la combustion amorcée, son régime va fortement dépendre du temps que vont mettre les vapeurs combustibles et l'oxygène à atteindre cette zone réactionnelle. C'est ce temps dit *de mélange* qui va piloter l'évolution temporelle des caractéristiques du foyer.

On peut introduire ici le nombre de Damkohler Da , représentant le rapport du temps de mélange τ_m sur le temps caractéristique de la réaction chimique τ_c . Dans le cas d'une flamme de diffusion, ce nombre est élevé.

$$Da = \frac{\tau_m}{\tau_c} \gg 1 \quad (\text{I.1})$$

Un foyer d'incendie est typiquement caractérisé par le débit calorifique qu'il dégage. Ce débit calorifique s'exprime par :

$$\dot{Q} = \dot{m}_c'' S_c C_r \Delta H_c \quad (\text{I.2})$$

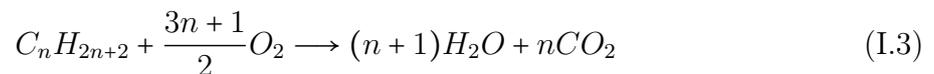
avec :	\dot{Q}	[W]	Débit calorifique libéré par le foyer
	\dot{m}_c''	[kg.s ⁻¹ .m ⁻²]	Débit massique surfacique de combustible
	S_c	[m ²]	Surface de combustible
	C_r	[-]	Coefficient traduisant le caractère plus ou moins complet de la réaction dépendant de la nature du combustible et de l'environnement
	ΔH_c	[J.kg ⁻¹]	Chaleur de combustion du combustible

Ce débit calorifique ou puissance est dissipé aussi bien par convection que par rayonnement thermique. Il est constaté que la puissance rayonnée par les flammes de diffusion

varie selon le combustible utilisé. On retient dans la plupart des cas la valeur de 30 % du débit calorifique, le reste étant entraîné par convection dans le panache thermique et les fumées. La flamme de prémélange, qui présente une combustion plus complète, rayonne en revanche beaucoup moins (moins de 15 % de la puissance totale).

I.1.1.2 Mécanismes et structure de la flamme de diffusion

La majorité des combustibles rencontrés dans le cadre d'incendies est à base carbonée. Une réaction chimique de combustion complète ne produit que de l'eau et du dioxyde de carbone, comme par exemple dans le cas de la combustion stœchiométrique d'un alcane dans l'oxygène :



Cependant la réaction n'est jamais totalement complète et la flamme rejette souvent d'autres espèces. Celles-ci peuvent être des gaz tels que le monoxyde de carbone CO, mais aussi des espèces moléculaires comme des hydrocarbures aromatiques polycycliques et des polyacétylènes. Lorsque la température est suffisamment élevée, ces molécules peuvent réagir à leur tour avec l'oxygène et former le CO₂ et l'H₂O. Dans le cas contraire, leur nombre et leur taille augmentant, elles vont s'agglomérer pour former des particules macroscopiques, les *suies*. Ces suies sont responsables de l'éclat jaune de la flamme de diffusion. En s'échappant de celle-ci, elles sont convectées au sein du *panache thermique*.

La structuration de la flamme de diffusion est schématisée sur la figure I.1.

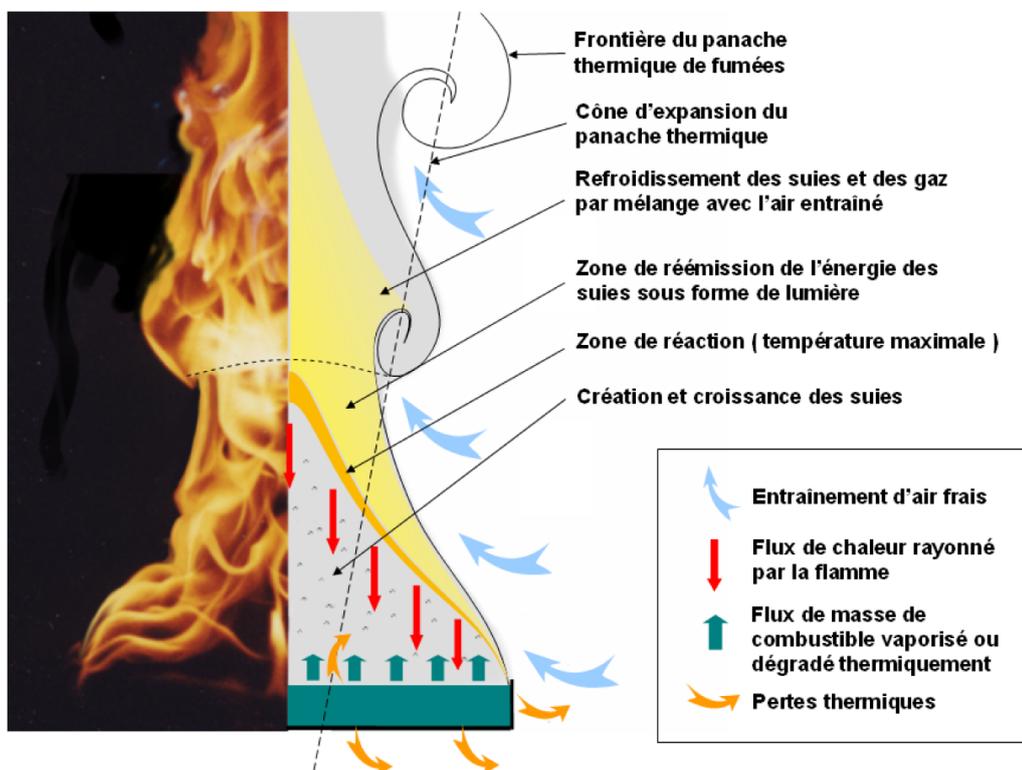


FIG. I.1 – Représentation des mécanismes de la flamme de diffusion

L'écoulement des gaz dans une flamme de diffusion est gouverné par les forces de flottabilité. Ces forces sont dues à la différence de température entre les gaz chauds et l'atmosphère ambiante. La colonne convective, le *panache thermique*, s'élève au-dessus de la surface combustible et sa structure résulte de son interaction avec l'atmosphère environnante. Cette structure dépend de la puissance de la source de chaleur - c'est-à-dire de son débit calorifique - et de la compétition entre les forces de flottabilité $g(\rho_\infty - \rho)$ et les forces de viscosité du fluide.

Le panache s'élève, en atmosphère libre, jusqu'à ce que les forces de viscosité viennent compenser les forces de flottabilité. Le ralentissement de cette ascension et l'expansion du panache sont dus à l'entraînement du fluide environnant par celui-ci, ce qui provoque sa dilatation ainsi que son refroidissement par dilution. Le cisaillement provoqué par l'ascension des gaz chauds dans une atmosphère au repos crée des structures tourbillonnaires le long du panache. La différence de température avec l'environnement étant moindre, l'effet des forces de flottabilité s'estompe. C'est ce qui conduit globalement à la stagnation et à la dilution des fumées dans l'air, une fois atteinte une certaine altitude.

On peut observer que la base de la flamme est sujette à un battement dont la fréquence dépend de la taille du foyer. L'enrichissement soudain de la combustion par l'oxygène augmente la production de gaz brûlés et, par la même occasion, le volume de la base de la flamme. Les gaz brûlés issus de cette combustion et se trouvant au cœur de la flamme sont soumis à leur tour à une accélération plus importante que celle de l'air frais extérieur. Cette différence de vitesse occasionne alors le resserrement du cône de flamme. Ces pulsations contribuent elles-aussi à générer des tourbillons visibles en bordure du panache.

I.1.1.3 Développement du feu

Comme nous l'avons mentionné précédemment, lors d'un sinistre en tunnel, différents types de matières peuvent brûler : carburant des véhicules, garniture de carrosserie, chargement contenu dans les véhicules, etc. Le débit calorifique du foyer est directement lié au débit massique de vapeurs combustibles émises par la source, lui même dépendant fortement de la surface en feu.

Feu de combustible liquide Lors d'un feu de combustible liquide, comme nous l'avons mentionné plus haut, le flux de chaleur émis par la flamme apporte au combustible l'énergie nécessaire à sa vaporisation. La figure I.2 schématise l'évolution de la puissance d'un tel foyer (dans le cas d'un combustible liquide pur). La flamme va se propager à toute la surface à partir du point d'allumage. En atmosphère ouverte, sans intervention d'autres sources ou de confinement, l'équilibre énergétique à la surface est obtenu très rapidement et le débit calorifique reste pratiquement constant, jusqu'à ce que tout le combustible soit consommé, ce qui conduit à l'extinction.

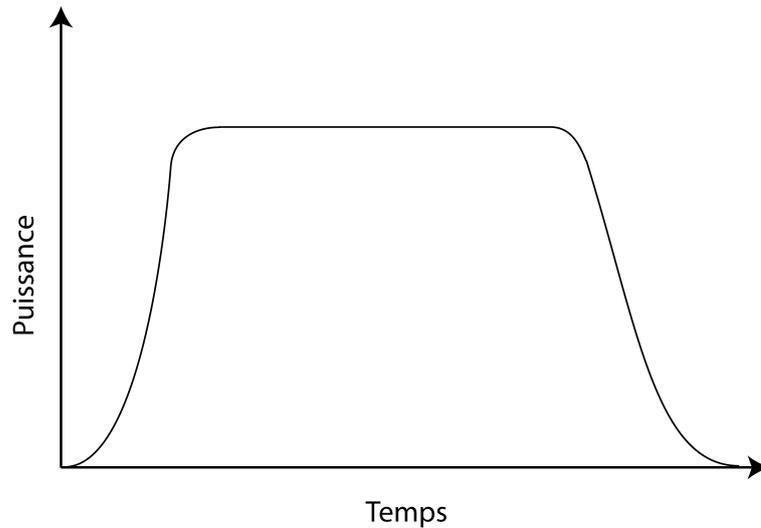


FIG. I.2 – Evolution de la puissance d'un feu de combustible liquide en milieu ouvert

Feu de combustible solide Dans le cas d'un feu de combustible solide, la flamme s'établit de façon similaire. Au sein du combustible, les espèces organiques vont se vaporiser et diffuser jusqu'au lieu de la réaction. Ce genre de foyer est plus complexe à étudier car, si dans la majeure partie des feux de liquide la surface est horizontale, dans le cas de feux de solides la géométrie de l'objet peut être complexe et ainsi influencer sur la combustion.

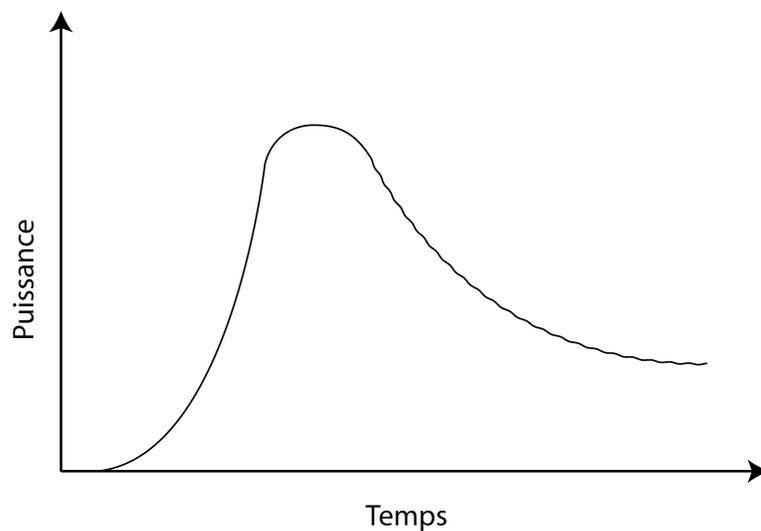


FIG. I.3 – Evolution de la puissance d'un feu de combustible solide en milieu ouvert

Comme le schématise la figure I.3, la montée en régime est moins rapide que pour un feu de liquide, car la propagation de la flamme le long des surfaces est plus lente du fait du processus de dégradation. Concernant l'évolution, par exemple, d'un feu de bûcher, on peut distinguer plusieurs phases. Une *phase d'incubation*, pendant laquelle le feu est localisé sur une partie du bûcher et le débit calorifique reste faible. Vient ensuite une *phase de croissance* dont la durée dépend beaucoup de la géométrie du bûcher et du point d'allumage. Cette phase va se poursuivre jusqu'à ce que l'on atteigne le maximum de débit calorifique, correspondant au moment où le maximum de surface du bûcher

participe à la combustion. Ensuite, on trouve la *phase de décroissance*, pendant laquelle le débit calorifique décroît jusqu'à disparition progressive de la flamme. Cependant, on peut observer ensuite une *phase de combustion sans flamme*, pendant laquelle le foyer continue de dégager de la chaleur. Cette phase n'existe que lorsque le combustible forme en brûlant un résidu carboné. Lorsqu'il ne reste plus d'espèces organiques, le squelette carboné réagit avec l'oxygène de l'air, donnant naissance à du dioxyde de carbone ou du monoxyde de carbone (phénomène d'*incandescence* ou de *glowing*).

Sur la base d'un grand nombre de résultats expérimentaux obtenus avec toutes sortes de combustibles solides, il est usuel d'assimiler l'évolution de puissance lors de la phase de croissance à une loi parabolique de la forme $\dot{Q} = A \cdot t^2$, A dépendant du caractère plus ou moins combustible du matériau et des conditions d'environnement.

I.1.2 Problématique des incendies en milieu tunnel

Un incendie en milieu tunnel est un cas particulier de feu confiné ventilé pour lequel une dimension du confinement est très grande par rapport à la section.

Dans un feu confiné ventilé en général, le foyer est en présence d'autres objets ou de parois qui s'échauffent. Tout d'abord, les parois en s'échauffant vont émettre un flux de chaleur, essentiellement radiatif, dont une partie en retour vers la surface du combustible. Ce flux de chaleur s'ajoute à celui émis par la flamme et accélère l'émission de vapeurs combustibles et donc le débit calorifique global du foyer. Cette montée de débit calorifique implique une montée en température. Les objets présents dans le local (mobilier, objets stockés ...) sont susceptibles, avec la montée en température du local, de dégager des vapeurs combustibles qui peuvent s'enflammer à leur tour, augmentant également le débit calorifique de l'incendie dans le compartiment. Trois scénarios permettant de distinguer les différentes configurations possibles sont schématisés sur les figures I.4 et I.5 pour des combustibles respectivement liquides et solides.

Grand Compartiment Le feu peut avoir une puissance insuffisante pour échauffer de façon notable les parois ou les autres objets, ou alors le compartiment est suffisamment grand par rapport à la puissance du foyer. Dans ce cas il se comportera comme un feu en milieu ouvert (courbes noires sur les figures I.4 et I.5).

Compartiment "Non-Participant" Le compartiment ne contient pas d'objets et ses parois ne sont pas inflammables. Dans ce cas les parois en s'échauffant vont renvoyer un flux de chaleur vers le foyer et accélérer sa combustion. L'évolution du débit calorifique est représentée par la courbe jaune.

Compartiment "Participant" Le compartiment contient des objets inflammables, ou ses parois le sont. Ceux-ci peuvent s'échauffer et émettre eux aussi des vapeurs combustibles. Une fois l'ensemble du compartiment à haute température et la concentration des vapeurs suffisante, on observe alors un embrasement généralisé - ou *flashover* -. On parle alors de débit calorifique global du compartiment puisque le foyer originel n'est plus le seul à brûler. L'évolution est montrée par la courbe rouge (arrêtée après flashover puisque ce n'est plus uniquement le foyer origine qui développe le débit calorifique).

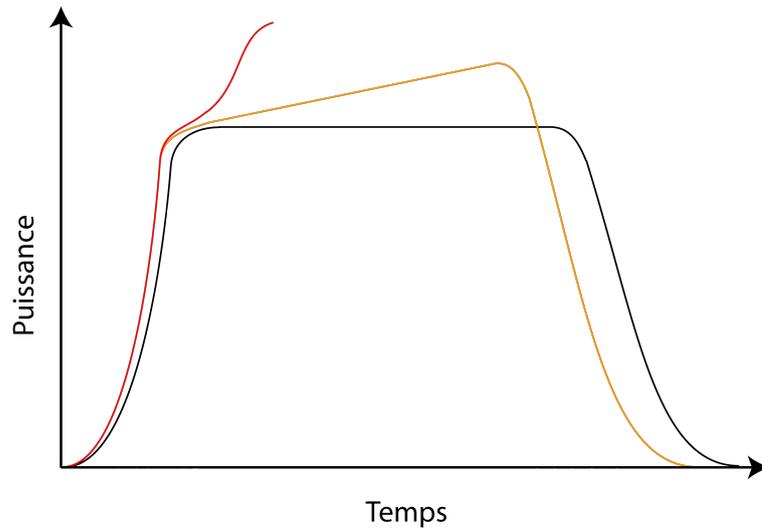


FIG. I.4 – Evolution de la puissance de feux de liquide confinés ventilés - (—) : feu en Grand Compartiment, (—) : feu en Compartiment Non-Participant, (—) : feu en Compartiment Participant

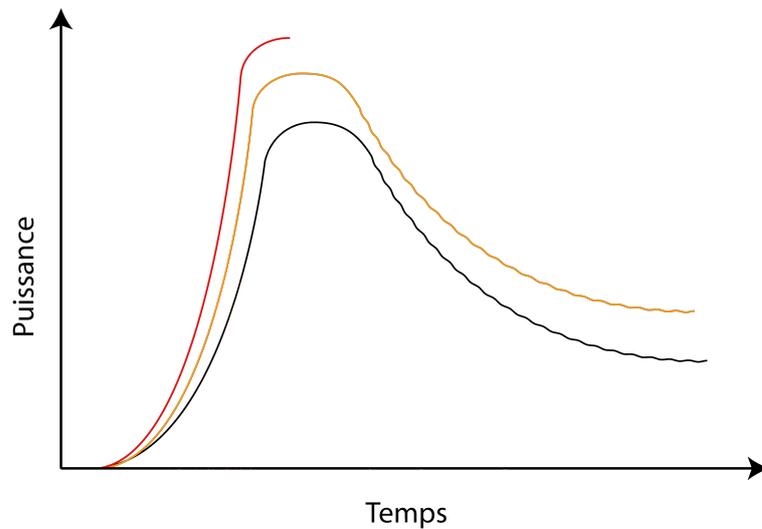


FIG. I.5 – Evolution de la puissance de feux de solide confinés ventilés - (—) : feu en Grand Compartiment, (—) : feu en Compartiment Non-Participant, (—) : feu en Compartiment Participant

De plus, pour un feu dans ce type de milieu, les fumées émises représentent en elles-mêmes un danger, tant au niveau de leur température que de leur toxicité.

Dans le cas particulier de feux en tunnel, l'origine de l'incendie est, pour la grande majorité, un incident à bord d'un véhicule ou un accident impliquant un ou plusieurs véhicules. La puissance calorifique dégagée dépend des matériaux constituant le ou les véhicules impliqués mais surtout de leur chargement. On retient généralement les ordres de grandeur mentionnés dans le tableau I.1 :

Type de véhicule	Puissance moyenne (MW)	Puissance maximum possible (MW)
Véhicule de tourisme	6 à 8	10
Autobus	20	30
Camion frigorifique	100	150
Matières dangereuses	180	200

TAB. I.1 – Puissances typiques de feux de véhicules et de leur chargement

I.1.2.1 Effets sur les usagers

En cas d'incendie, le danger principal pour les usagers est la montée en température dans le tunnel : par transferts de chaleur convectifs ou radiatifs, mais surtout à cause de la couche de fumée qui se propage dans l'ouvrage et transmet essentiellement par rayonnement des flux pouvant être importants. A ceci s'ajoute un risque d'intoxication, principalement dû à l'élévation du taux de monoxyde de carbone dans le milieu.

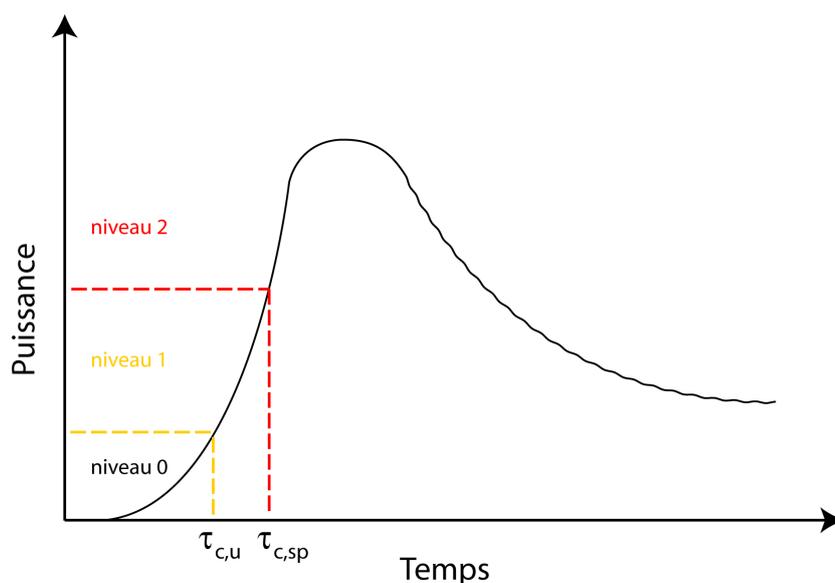


FIG. I.6 – Niveaux d'incendie et seuils de tenabilité

La figure I.6 montre l'allure générale de l'évolution de la puissance d'un feu en tunnel (similaire à un feu de solide confiné). On peut distinguer deux instants critiques (voir la référence [1]) :

- $\tau_{c,u}$ correspondant à l'instant où est observée une des conditions de non tenabilité pour les usagers,
- $\tau_{c,sp}$ correspondant à l'instant où les conditions de non tenabilité pour les services de secours sont atteintes.

On retient généralement les valeurs suivantes (tableau I.2) :

Critère	Usagers	Services de secours
Température maximale d'exposition	50°C	100°C
Flux thermique radiatif maximal	2 kW.m ⁻²	5 kW.m ⁻²
Concentration maximale de CO	300 ppm	sous ARI ¹

TAB. I.2 – Critères de tenabilité pour les usagers et les services de secours

Ces deux instants délimitent trois gammes de puissance, qu'on appelle niveaux d'incendie :

- **niveau 0** : de durée $\tau_{c,u}$. C'est durant cette phase que les usagers peuvent évacuer le tunnel sans assistance.
- **niveau 1** : de durée $\tau_{c,sp} - \tau_{c,u}$. Durant cet intervalle de temps, l'évacuation des usagers peut encore être conduite par les services de secours et le foyer peut être attaqué directement.
- **niveau 2** : au-delà du temps $\tau_{c,sp}$, les conditions de tenabilité des services de secours sont dépassées et le foyer ne peut plus être maîtrisé.

Le risque principal pour un usager pris dans un incendie en tunnel vient des gaz présents dans l'atmosphère de l'ouvrage. En effet, la combustion est très souvent incomplète et produit donc des gaz toxiques, notamment le monoxyde de carbone CO mais aussi l'acide cyanhydrique (dû à la pyrolyse de certains matériaux polymères). Le monoxyde de carbone est un composé très toxique qui se substitue à l'oxygène dans le sang et peut provoquer des étourdissements, des pertes de connaissances, voire conduire à la mort.

Un deuxième danger est le rayonnement thermique provenant du foyer ou de la couche de fumées chaudes qui se développe sous voûte. Ce rayonnement peut occasionner des brûlures cutanées et les gaz chauds inhalés peuvent provoquer de graves lésions internes.

Aussi, pour les services de secours, une atmosphère tenable pour les usagers sera bien sûr une atmosphère tenable thermiquement mais également exempte de toute trace de fumée.

De plus, l'intervention des services de secours est nécessairement retardée par rapport à la déclaration de l'incendie. La mise en sécurité des usagers des tunnels routiers repose en premier lieu sur le principe de leur autoévacuation au moyen d'itinéraires à l'abri des fumées jusqu'aux aménagements destinés à les isoler du tunnel (issues de secours, passages intertubes, galeries de sécurité, abris \check{E}). De ce fait, le comportement des usagers influence leur mise en sécurité ; en particulier, si leur délai de réaction est élevé à cause de l'absence de perception immédiate du danger encouru, leur sécurité peut être compromise par la suite.

Le désenfumage, associé aux aménagements pour l'évacuation des usagers, constitue un élément essentiel à la mise en sécurité de ceux-ci. Pour autant, il ne peut raisonnablement pas faire face à toutes les situations car, dans un tel cas, les gaines d'extraction des fumées seraient de dimensions supérieures à la section des ouvrages et les puissances, déjà très élevées, des équipements de désenfumage seraient disproportionnées par rapport aux risques encourus. Ce point est expliqué plus avant en section I.1.3.

¹ARI : Appareil Respiratoire Isolant

I.1.2.2 Effets sur les véhicules

Lors d'un incendie en tunnel, les véhicules autres que le véhicule foyer principal peuvent poser deux problèmes :

- effet domino : s'ils sont à proximité du foyer principal, ils peuvent prendre feu à leur tour (ou leur chargement dans le cas de camions),
- leur présence peut retarder les services de secours, voire leur interdire l'approche du foyer principal.

En terme de propagation de l'incendie, ce sont non seulement les composants en matière plastique qui posent problème, car ils peuvent dégager des gaz très toxiques, mais aussi les cargaisons transportées. Lors de l'accident du Tunnel du Mont Blanc, c'est le chargement de margarine d'un des camions impliqués dans l'accident d'origine qui a contribué à la croissance forte et rapide de l'incendie. Si le carburant contenu dans les réservoirs peut être une source de danger, il faut garder à l'esprit qu'un véhicule léger n'en contient qu'une faible quantité (de 35 à 70 litres) et qu'une voiture en flamme ne dégage somme toute qu'une puissance limitée. Toutefois, même des foyers de puissance relativement basse peuvent retarder les équipes de secours, voire les empêcher d'accéder au foyer principal.

I.1.2.3 Effets sur la structure du tunnel

Un tunnel routier a communément une structure en béton. La faible taille relative des tunnels par rapport aux véhicules et la puissance dégagée par des foyers confinés font que le transfert de chaleur lors d'un incendie est très important et sollicite la structure. Cette chaleur peut être transmise, soit de façon directe par rayonnement du foyer et par impact du panache sur la structure, soit par transport par les fumées. Le béton a une tenue à la température limitée (communément située entre 150 et 200°C) car sa teneur en eau est importante. En cas d'élévation de la température au-dessus de 100°C dans le tunnel, l'eau proche de la surface sollicitée (intérieur du tunnel) s'évapore, rendant le béton cassant. De plus, si l'incendie se prolonge, l'eau peut se vaporiser dans le corps même du béton, conduisant à son éclatement, c'est le phénomène d'*écaillage*. Les structures portantes peuvent alors se briser sous les contraintes internes induites par cette vaporisation, pouvant provoquer la ruine locale de l'ouvrage.

Enfin, un tunnel routier contient de nombreux équipements de natures diverses : dispositifs d'alerte, système d'éclairage, système de ventilation, signalisation, qui peuvent être aussi dégradés lors d'un sinistre. Si lors d'un incendie on donne la priorité au sauvetage des personnes, on ne doit pas ignorer l'endommagement des équipements et de la structure elle-même.

I.1.3 Ventilation en tunnel

Au cours d'un incendie se développant dans un tunnel non ventilé, les fumées se propagent sous voûte de part et d'autre du foyer. Mais, lorsque le tunnel est soumis à une ventilation longitudinale, leur expansion dans la zone en amont du foyer est freinée.

En-deçà d'une valeur de la vitesse de ventilation, appelée *vitesse critique*, au-delà de laquelle toutes les fumées sont repoussées dans la zone aval du foyer, il subsiste une couche de fumée remontant à contre-courant de la ventilation que l'on nomme la *couche de retour*.

A mesure que la vitesse de ventilation augmente, l'air frais s'engouffrant sous la couche de retour amenuise celle-ci par entraînement. L'effet de la ventilation longitudinale sur les fumées peut se schématiser comme suit (figure I.7).

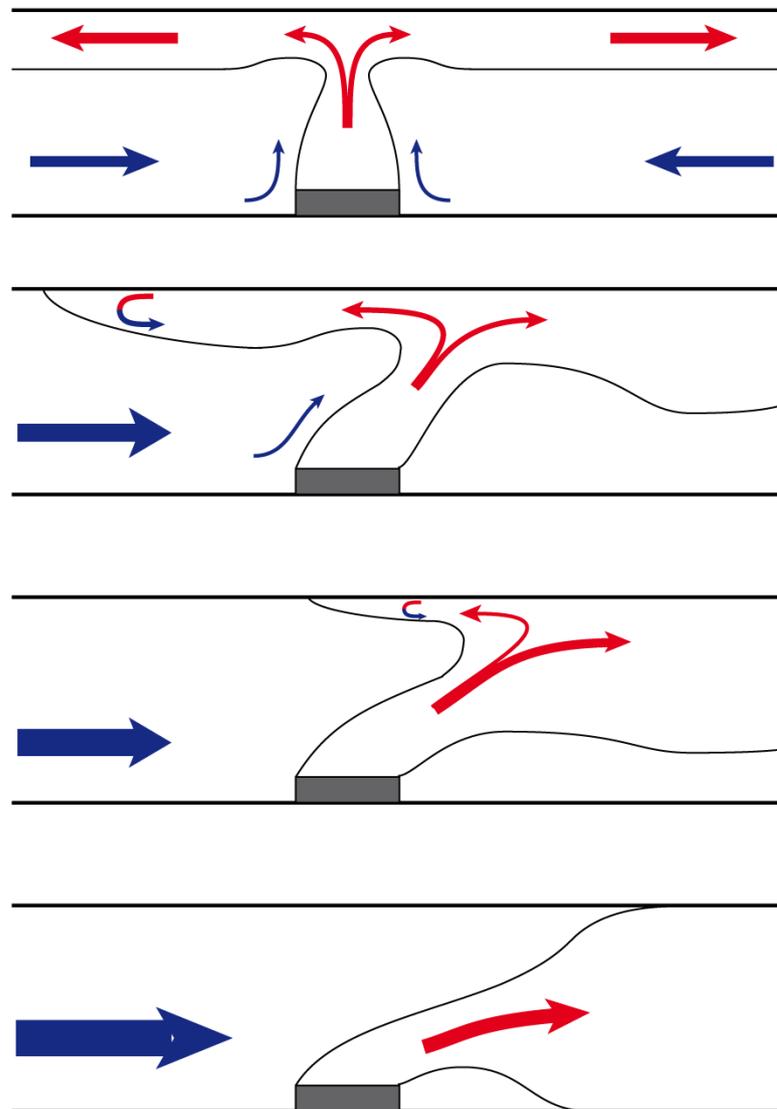


FIG. I.7 – De haut en bas : Expansion symétrique des fumées en l'absence de ventilation - Formation d'une couche de retour - Couche de retour à l'approche de la vitesse critique - Fumées repoussées dans leur totalité vers l'aval pour une vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique.

Au cours de la conception d'un tunnel, la ventilation est dimensionnée pour permettre, lors de l'exploitation de l'ouvrage, l'évacuation des fumées et de la chaleur générés par les véhicules. Le choix d'un système de ventilation se fait suivant plusieurs critères comprenant la topologie du site, la longueur du tunnel et le trafic prévu. On distingue en fait trois types de ventilation : naturelle, longitudinale ou transversale.

Pour les tunnels de gabarit routier supérieur à 3,50 m dont la circulation est interdite au Transport de Marchandises Dangereuses (TMD) au sens de la réglementation internationale (cas le plus fréquent), le désenfumage est dimensionné pour faire face à un feu de

30 MW développant un débit de fumées de $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Assurer la maîtrise des fumées dans toutes les situations de développement de feu, de nature de trafic et de contrepressions atmosphériques se révèle hors de portée technique ou économique de la maîtrise d'ouvrage. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle l'évaluation du niveau de sécurité d'un tunnel routier s'appuie sur la détermination de la gravité des différents scénarios étudiés au regard de leur probabilité d'occurrence (voir la référence [2] pour plus de détail sur l'élaboration de l'Etude Spécifique de Dangers). Ainsi, les autorités en charge de la doctrine de sécurité des tunnels routiers acceptent qu'un scénario d'incendie présente une gravité élevée si sa fréquence d'occurrence est très faible. Pour ces raisons, la réglementation accepte que le désenfumage ne puisse faire face à toutes les situations. Par conséquent, dès lors que l'on s'intéresse à la contribution éventuelle de l'aspersion à la sécurité des usagers, il faut bien entendu considérer les cas qui sont hors de portée des équipements de sécurité du tunnel prévus par la réglementation.

I.1.3.1 Ventilation naturelle

Ce type de ventilation n'utilise aucun équipement mécanique pour créer le déplacement d'air dans le tunnel. L'écoulement est alors généré, soit par la différence de pression climatique entre les deux extrémités du tunnel, soit par l'écoulement induit par le déplacement des véhicules, appelé *effet piston*. Dans le premier cas, l'écoulement se crée tout naturellement vers l'extrémité de plus basse pression. En cas d'incendie dans un tunnel présentant une déclivité, c'est à la convection naturelle de prendre le relais et d'évacuer les fumées vers l'extrémité haute (effet de cheminée), comme illustré sur la figure I.8.

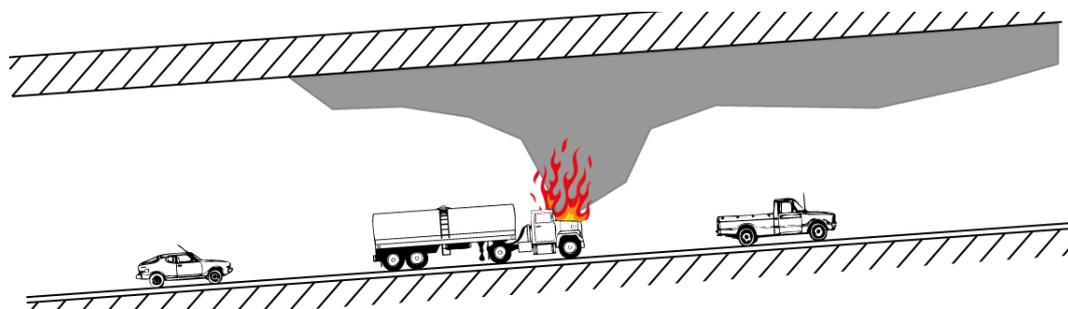


FIG. I.8 – Schématisation de l'écoulement des fumées dans un tunnel en déclivité sous l'effet de la ventilation naturelle

Lorsque l'écoulement est induit par la circulation, c'est le *pistonement* produit par l'occupation de la section du tunnel par les véhicules qui générera l'écoulement. Cet effet est surtout utilisé dans les tunnels ferroviaires car l'encombrement des trains occupe presque toute la section de l'ouvrage. Dans le cas des tunnels routiers, ce mode de ventilation est surtout utilisé dans des tunnels à un seul sens de circulation de faible longueur (pas plus de quelques centaines de mètres). Dans certaines configurations, notamment lorsque le tunnel est situé à une profondeur peu importante, des cheminées d'extraction naturelles peuvent être disposées tout le long de l'ouvrage, limitant l'impact des fumées chaudes sur la structure et les usagers en cas d'incendie (figure I.9).

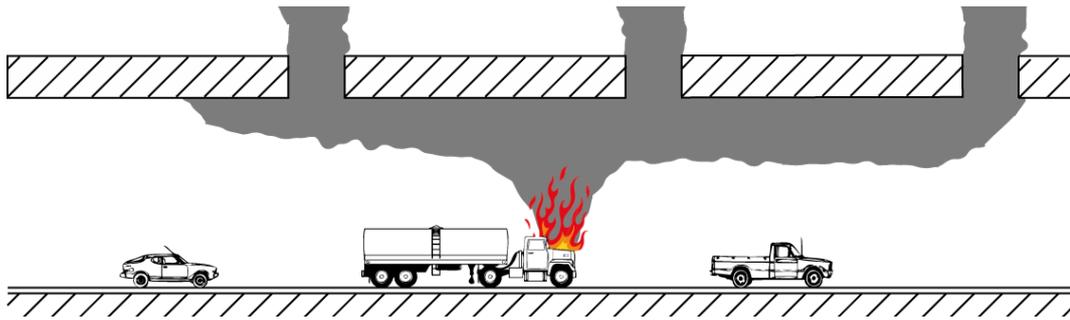


FIG. I.9 – Principe d'extraction des fumées par cheminées verticales

I.1.3.2 Ventilation longitudinale

La ventilation longitudinale est, dans son principe, le système le plus intuitif à mettre en œuvre. L'écoulement d'air est assuré par des accélérateurs disposés sous plafond. Dans le cas de tunnels à un seul sens de circulation, l'effet piston vient s'ajouter à cette ventilation forcée. Ce dispositif n'est cependant pas utilisé dans les tunnels de longueur trop importante, car les vitesses de ventilation nécessaires pour y renouveler l'air seraient trop importantes pour le confort des usagers.

En situation d'incendie, deux cas peuvent se présenter :

Un seul sens de circulation Dans un tunnel unidirectionnel, la ventilation est poussée au-delà de la vitesse critique (figure I.10) et les véhicules se trouvant en aval du sinistre peuvent évacuer les lieux sans risque (sauf en situation de suraccident), tandis que ceux bloqués en amont se trouvent de fait protégés des fumées qui sont repoussées dans leur totalité vers l'aval.

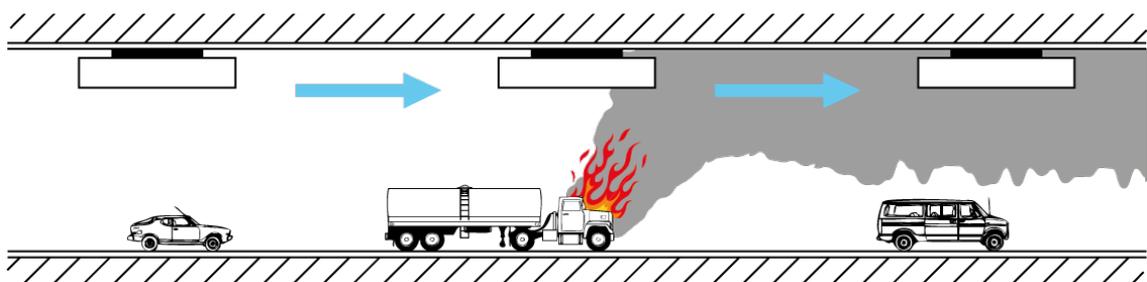


FIG. I.10 – Utilisation de la ventilation longitudinale dans le cas d'un incendie dans un tunnel à un seul sens de circulation

Deux sens de circulation Dans ce cas, le problème vient du double sens de circulation : on ne peut enfumer l'aval du foyer. Une stratégie peut consister à chercher à évacuer d'abord les usagers présents dans le tunnel. Pendant cette phase, on limite la ventilation pour conserver autant que faire se peut la stratification des fumées de part et d'autre du feu. C'est une tâche difficile car la vitesse à appliquer est de l'ordre de $1,5$ à 2 m.s^{-1} , et est délicate à contrôler et à stabiliser. Les fumées sont alors maintenues sous voûte, ce qui permet de conserver une couche de gaz frais près du sol et de sécuriser au maximum cette évacuation (figure I.11). Un fois cette évacuation achevée, on peut augmenter la vitesse

de ventilation pour repousser les fumées et permettre l'approche du foyer aux services de secours. On retrouve alors la situation précédente (figure I.10).

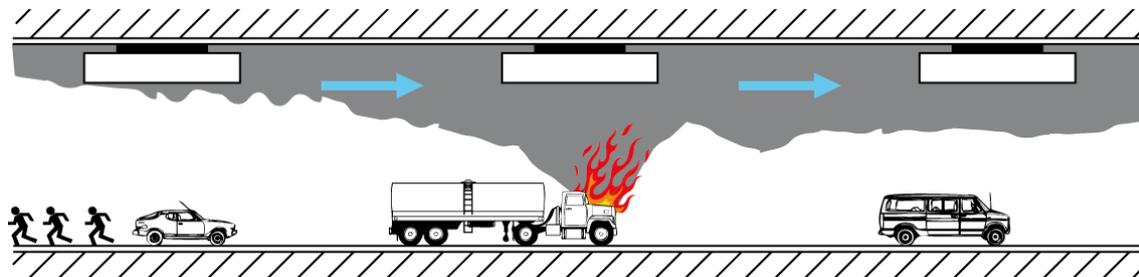


FIG. I.11 – Utilisation de la ventilation longitudinale dans le cas d'un incendie dans un tunnel à double sens de circulation

Limites du désenfumage longitudinal Le système de désenfumage longitudinal est relativement robuste, pour les tunnels à circulation unidirectionnelle, à condition que ceux-ci ne soient pas sujets à des problèmes de congestion du trafic. En effet, si le trafic est fluide, en cas d'incendie, les véhicules peuvent évacuer en aval du foyer et la mise en sécurité des usagers situés en amont est assurée par le balayage des fumées au moyen des accélérateurs. Pour les tunnels interdits au Transport de Matières Dangereuses, la réglementation demande d'assurer une vitesse de balayage d'au moins 3 m.s^{-1} pour une contrepression atmosphérique adverse dépassée moins de 5 % du temps. En revanche, si le trafic est bloqué en aval, à cause d'un embouteillage ou d'un incendie induit par un sur-accident (par incendie provoqué par un sur-accident on entend l'incendie déclenché par l'accident qui se produit à l'extrémité amont d'un bouchon en formation - cas du tunnel des Tauern, 29 mai 1999, 11 morts), on se trouve dans une situation où des usagers sont présents des deux cotés de l'ouvrage, ce qui revient en fait à la configuration d'un tunnel bidirectionnel doté d'une ventilation longitudinale. Dans un tel cas, la ventilation doit être pilotée en deux temps : dans une première phase, on cherche à conserver la stratification par un objectif de vitesse la plus faible possible pour un tunnel bidirectionnel et un objectif de vitesse comprise entre 1 et 2 m.s^{-1} pour un tunnel unidirectionnel pour lequel on privilégie un léger balayage de l'amont vers l'aval. Dans ces deux cas, l'atteinte des objectifs requiert d'être en mesure d'évaluer la vitesse de l'air dans l'ouvrage en temps réel afin de commander les accélérateurs selon un algorithme spécifique et de bien localiser la position du foyer afin d'éviter de faire fonctionner des accélérateurs dans la zone où le feu prend naissance. Il est à noter que, pour un tunnel de faible longueur, il ne sera pas possible d'activer les accélérateurs à cause du risque d'interaction entre le jet des turbomachines et les fumées.

Possible en théorie, le pilotage automatisé de la ventilation longitudinale s'avère très délicat en pratique, en particulier pour les ouvrages de courte longueur très sensibles aux différences de pression entre les têtes. En conclusion, le désenfumage longitudinal est vulnérable pour les tunnels bidirectionnels, ainsi que pour les tunnels unidirectionnels soumis à une congestion du trafic ou exposés à un incendie induit par un sur-accident.

I.1.3.3 Ventilation transversale

Ce mode de ventilation est décrit brièvement ici pour mémoire. En partie haute de ces tunnels sont aménagées des gaines de ventilation, servant au renouvellement de l'air lors de l'exploitation normale et à l'évacuation des fumées en cas d'incendie. Deux configurations existent : la ventilation transversale pure et la ventilation semi-transversale. Leurs principes sont rappelés en figure I.12 pour la ventilation transversale et en figure I.13 pour la ventilation semi-transversale. L'avantage présenté par ce mode de ventilation, par rapport au mode longitudinal, est qu'il préserve la stratification des fumées, la nappe chaude formée par celles-ci se confinant naturellement.

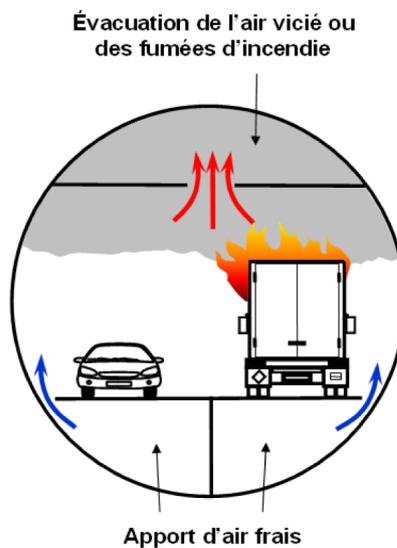


FIG. I.12 – Principe de la ventilation transversale pure

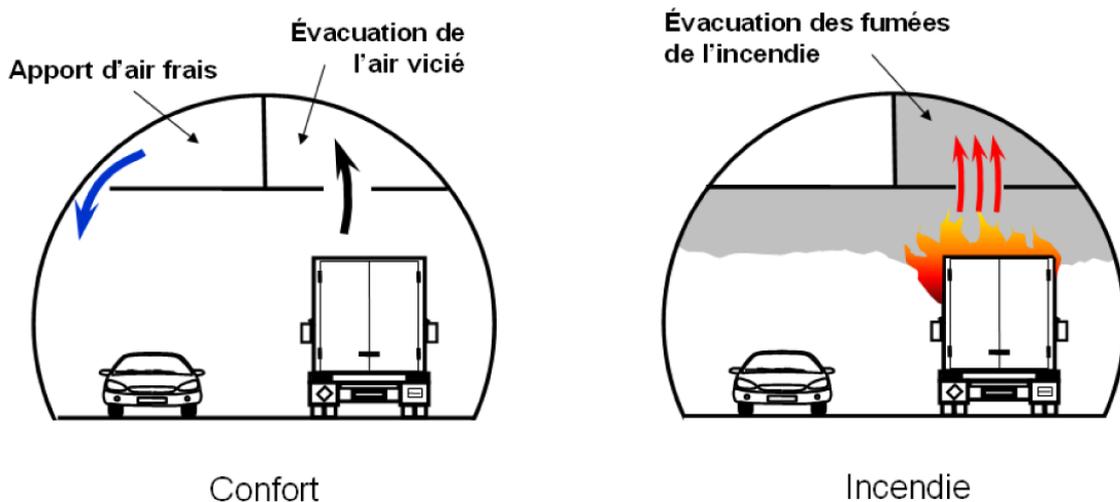


FIG. I.13 – Principe de la ventilation semi-transversale en mode confort et de désenfumage

Limites du désenfumage transversal Ce type de désenfumage est adapté à la fois à la circulation unidirectionnelle et bidirectionnelle, car il repose sur l'extraction des fumées

produites par le feu et sur la conservation dans la zone du foyer de conditions aérauliques favorables à la stratification naturelle des fumées. Deux éléments peuvent mettre à mal l'efficacité du désenfumage transversal : une production de fumées plus importante que le scénario de dimensionnement et une mauvaise maîtrise du courant d'air longitudinal qui impacte de facto la stratification des fumées. Là encore, la maîtrise du courant d'air longitudinal, possible en théorie, s'avère délicate dans la pratique. Lorsque le feu se développe rapidement au-delà du niveau de dimensionnement du désenfumage, alors que certains usagers n'ont pas évacué, parce que, par exemple, ils n'ont pas pris conscience du danger suffisamment rapidement, leur sécurité peut être mise à l'épreuve à cause de l'envahissement progressif de toute la section par les fumées, de la toxicité et de la chaleur de ces dernières, des flux rayonnés ...

I.1.4 Mécanismes d'extinction d'un feu

Dans une flamme de diffusion, l'énergie servant à vaporiser ou dégrader le combustible provient, nous l'avons vu, du flux de chaleur émis par la flamme. C'est cet équilibre énergétique à la surface du combustible, illustré sur la figure I.14, qui permet d'entretenir la flamme.

$$\dot{m}_c'' = \frac{\dot{Q}_F'' - \dot{Q}_P''}{\Delta H_v} \quad (\text{I.4})$$

avec :	\dot{m}_c''	[kg.s ⁻¹ .m ⁻²]	Débit massique surfacique de combustible
	\dot{Q}_F''	[W.m ⁻²]	Flux de chaleur fourni par la flamme à la surface de combustible
	\dot{Q}_P''	[W.m ⁻²]	Flux de chaleur global perdu exprimé comme un flux à travers la surface
	ΔH_v	[J.kg ⁻¹]	Chaleur latente de vaporisation du combustible

C'est sur cet équilibre énergétique que l'on peut agir pour éteindre un feu. On peut alors jouer sur le nombre de Damkohler Da (relation I.1), soit en réduisant le temps pendant lequel les espèces coexistent et peuvent réagir, soit en augmentant le temps de réaction chimique. Si $Da \rightarrow 0$, l'existence de la flamme est compromise. On peut sinon ajouter des flux de perte de chaleur dans l'équilibre énergétique de surface.

Diminution du temps de mélange τ_m La diminution du temps de mélange revient à réduire statistiquement la possibilité de rencontre entre molécules réactives. Ceci implique une distorsion de la zone de réaction à l'intérieur de la flamme, de manière à réduire son épaisseur, et donc le temps de résidence. Si la zone de réaction est trop mince, alors la combustion sera incomplète et la flamme sera efficacement refroidie, jusqu'à un stade où elle ne pourra plus être maintenue. C'est ce qui se passe lorsqu'on souffle sur une flamme pour l'éteindre.

Augmentation du temps caractéristique de la réaction chimique τ_c Si la réaction de combustion est souvent présentée sous la forme d'une réaction globale, elle consiste en réalité en un schéma cinétique complexe faisant intervenir de nombreux mécanismes

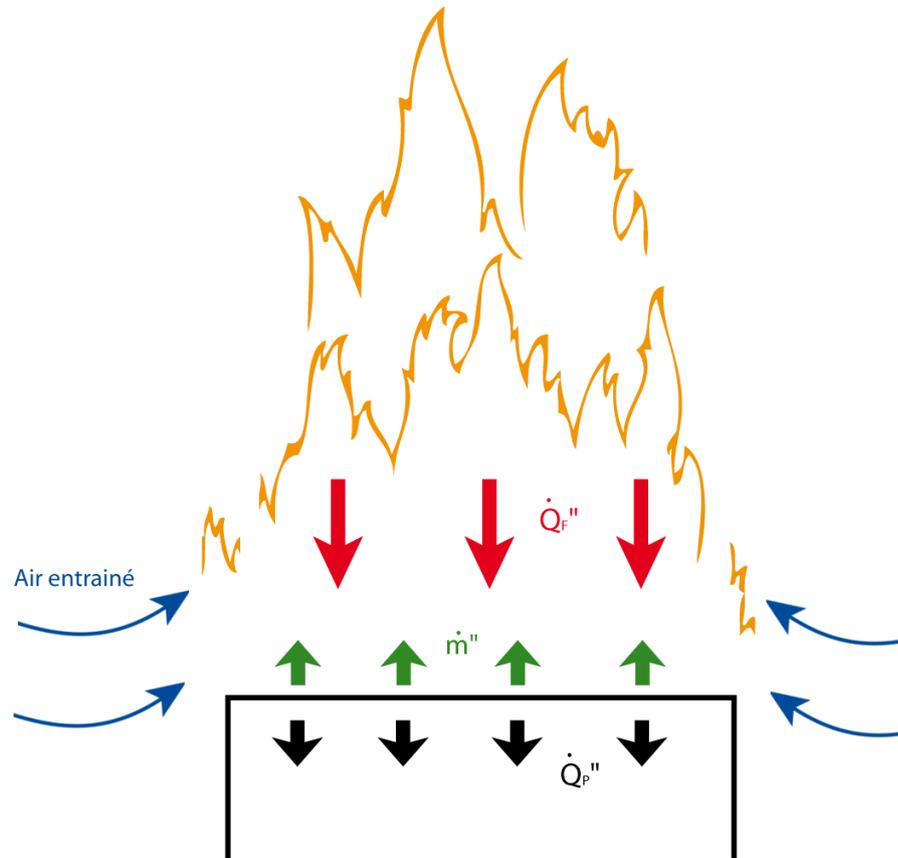


FIG. I.14 – Schématisation de l'équilibre énergétique à la surface du combustible (source : [3])

élémentaires. Lors d'une réaction de combustion, il existe un vecteur de chaîne qui intervient dans un grand nombre de ces mécanismes élémentaires : le radical $H\cdot$. L'idée est alors d'inhiber ce radical $H\cdot$ avec un composé afin de ralentir la réaction. Des composés tels que les halons contiennent du brome, du chlore, du fluor et du carbone qui produisent des halogénures d'hydrogène en présence de ce radical. Le rendement de la combustion s'en trouve abaissé et la température de flamme peut alors chuter en-deçà de la limite d'extinction.

Ajout d'eau L'ajout d'eau dans la flamme est, de loin, la technique d'extinction la plus utilisée. Son efficacité résulte de plusieurs effets :

- puits de chaleur : absorption d'une partie de la puissance du feu par évaporation et refroidissement de la surface en feu.
- dilution du milieu lors du changement de phase de l'eau.

Le puits de chaleur est particulièrement efficace, dans la mesure où l'eau présente une chaleur latente de vaporisation élevée ($2410 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ à 25°C). Cette évaporation ajoute dans l'équilibre énergétique de surface un terme \dot{Q}_{evap}'' . La vitesse de combustion s'écrit alors :

$$\dot{m}_c'' = \frac{\dot{Q}''_F - \dot{Q}''_P - \dot{Q}''_{evap}}{\Delta H_v} \quad (\text{I.5})$$

avec :	\dot{m}_c''	[kg.s ⁻¹ .m ⁻²]	Débit massique surfacique de combustible
	\dot{Q}''_F	[W.m ⁻²]	Flux de chaleur fourni par la flamme à la surface de combustible
	\dot{Q}''_P	[W.m ⁻²]	Flux de chaleur global perdu exprimé comme un flux à travers une surface
	\dot{Q}''_{evap}	[W.m ⁻²]	Flux de chaleur absorbé par la vaporisation de l'eau exprimé comme un flux à travers une surface
	ΔH_v	[J.kg ⁻¹]	Chaleur latente de vaporisation du combustible

Si ce terme \dot{Q}''_{evap} devient suffisamment important pour abaisser \dot{m}_c'' au-dessous d'une valeur critique, la quantité de combustible vaporisée devient insuffisante pour entretenir la réaction. Le problème est alors d'amener suffisamment d'eau utile dans le milieu pour faire passer \dot{m}_c'' au-dessous de cette valeur critique. On entend ici par eau utile l'eau qui sera vaporisée.

La vaporisation d'eau dans la flamme va avoir une seconde conséquence. Une quantité d'eau sous forme vapeur occupe un volume environ 1900 fois supérieur à celui qu'elle occupe sous forme liquide. Une fois vaporisée, une goutte d'eau injectée dans la flamme va donc occuper un volume bien supérieur et provoquer un appauvrissement de la concentration en oxygène (effet de dilution).

Inertage L'ajout dans la flamme d'un gaz inerte (qui ne participera donc pas à la réaction de combustion) permet d'augmenter la capacité calorifique du milieu et donc de diminuer l'apport énergétique de la flamme à la surface et par conséquent la vitesse de combustion, ceci en jouant sur la température de flamme T_f :

$$T_f = \frac{\Delta H_c}{C_p} + T_0 \quad (\text{I.6})$$

avec :	T_0	[K]	Température du milieu avant le feu
	C_p	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Capacité calorifique massique du milieu
	ΔH_c	[J.kg ⁻¹]	Chaleur de combustion du combustible

A ce phénomène d'inertage de l'atmosphère s'ajoute le processus de dilution. Ce type de réponse au problème de l'incendie demande des équipements peu coûteux et permet d'intervenir sur le feu dans des endroits où l'application d'eau est dommageable, par exemple dans des locaux informatiques. Mais, l'espace concerné doit être suffisamment clos pour maintenir la concentration nécessaire en agents extincteurs. De plus, le phénomène d'inertage recherché peut se révéler dangereux pour d'éventuels occupants, ce qui pose un problème d'utilisation.

I.2 Brouillards d'eau

I.2.1 Action sur un feu

L'eau peut être appliquée sur un feu de manière plus ou moins divisée. Avec de l'eau sous forme brouillard, la petite taille des gouttes fait que la surface d'échange entre le milieu et l'eau est très importante et ceci en augmente considérablement l'efficacité sur le foyer. Par exemple, si l'on compare un litre d'eau divisé en gouttelettes de 1 mm de diamètre à ce même litre divisé en gouttelettes de 30 μm de diamètre, on a respectivement une surface d'échange avec le milieu de 6 m² et de 200 m².

Aux modes d'action de l'eau (puits de chaleur et dilution) vient alors s'ajouter l'atténuation des transferts de chaleur rayonnés, qui dépend de nombreux paramètres, dont les plus notables sont la distribution de taille des gouttelettes et leur concentration.

Il est important de garder à l'esprit que ces différents modes d'action sur le feu coexistent toujours. Seule leur importance relative varie en fonction de la configuration du foyer, du type de combustible et de la ventilation.

I.2.1.1 Refroidissement par puits de chaleur

Lorsque de l'eau est projetée sur un feu, elle va tout d'abord s'échauffer, absorbant une partie du débit calorifique. Une fois qu'elle atteint 100°C, l'eau va se vaporiser. Lorsqu'on compare la capacité calorifique massique de l'eau (environ 4,186.10³ J.kg⁻¹.K⁻¹) à sa chaleur latente de vaporisation (2410 kJ.kg⁻¹), on conçoit aisément que la vaporisation est plus efficace que l'échauffement pour absorber de l'énergie. Le pouvoir de refroidissement des brouillards d'eau est particulièrement important (nous l'avons mentionné ci-dessus), ceci étant dû au caractère finement divisé des gouttelettes (typiquement de diamètre inférieur à 400 μm). Le processus de vaporisation est rapide et permet donc de soustraire de la flamme et de son panache une fraction importante de l'énergie produite par le foyer. On estime généralement qu'il suffit d'absorber 30 à 60% de la chaleur dégagée par le foyer pour le conduire à l'extinction.

Dans un incendie, quand l'eau est dirigée en direction du foyer, de la chaleur est absorbée :

- dans la zone réactive et le panache,
- à la surface du combustible où a lieu la gazéification.

L'évaporation du brouillard d'eau refroidit ainsi la flamme et les flux de chaleur dirigés vers la surface du combustible sont réduits, avec un effet résultant sur la vitesse de combustion. Dans tous les cas, l'avantage primordial des brouillards d'eau est d'augmenter la vitesse avec laquelle l'eau absorbe la chaleur des gaz et de la flamme en utilisant un petit volume d'eau. Si cet effet d'absorption est suffisant, la température de la phase gazeuse peut être abaissée au-dessous du niveau nécessaire à l'entretien de la combustion et la flamme peut s'éteindre.

Les feux de liquides dont le point éclair est bien supérieur à la température ambiante sont aisés à éteindre par cet effet. En revanche, ceux dont le point éclair est inférieur ou voisin de la température ambiante le sont plus difficilement par simple refroidissement. C'est le cas par exemple de l'heptane dont le point éclair est d'environ -4°C. En effet, le refroidissement du foyer ne l'empêche alors pas de dégager suffisamment de vapeurs combustibles et le moindre point chaud peut être cause de réallumage.

Dans le cas d'un feu de combustible solide, on observe le même mécanisme de refroidissement. La diminution de la température de la flamme va conduire à une réduction de la vitesse de dégradation du solide. Néanmoins, si la flamme peut être éteinte et donc la combustion arrêtée, le matériau peut encore se dégrader par combustion lente, phénomène se déroulant au sein du matériau et contre lequel le brouillard d'eau est peu efficace. La seule façon de stopper cette réaction est de mouiller et refroidir la surface du solide afin de limiter la persistance du phénomène (que l'on peut trouver à des températures aussi basses que 200 à 300°C).

Pour que le refroidissement de la phase gazeuse réactive soit efficace, il est nécessaire que les gouttelettes soient :

- de taille suffisamment petite afin de se vaporiser efficacement pendant leur temps de séjour dans la flamme,
- distribuées avec suffisamment d'énergie pour pénétrer dans la flamme,
- injectées avec une turbulence suffisante pour qu'elles se répartissent dans l'ensemble de la flamme.

I.2.1.2 Déplacement d'oxygène

Le déplacement d'oxygène a deux origines. Il peut provenir de l'air entraîné avec le jet. Celui-ci dilue le mélange air/vapeur de combustible. Mais, dans la pratique, ce mélange est turbulent et non uniforme, de sorte qu'il y a toujours une région dans laquelle les concentrations du mélange air/vapeur de combustible sont dans la gamme d'inflammabilité. Cependant, la cause la plus importante du déplacement d'oxygène est la vaporisation des gouttelettes déjà évoquée plus haut. L'injection d'un brouillard d'eau dans un volume chaud produit une évaporation rapide, l'expansion et finalement le déplacement d'air dans le volume. Si la concentration en oxygène nécessaire pour la combustion est réduite au-dessous d'un seuil critique, le combustible brûle mal et le feu pourra être éteint. En feu de nappe ouvert, la simple pénétration des gouttelettes dans la flamme, donc l'utilisation de jets de gouttelettes ayant une quantité de mouvement suffisante, peut conduire à l'extinction du foyer, la vapeur d'eau étant générée au voisinage de la surface de combustible. Le jet doit alors être orienté vers celle-ci pour obtenir un effet notable. Dans le cas de feux confinés, l'injection du brouillard peut également abaisser le taux d'oxygène dans le local, ce qui peut suffire à le faire chuter au-dessous d'un niveau critique. La combustion en sera perturbée et le feu pourra s'éteindre par étouffement. L'apport minimum d'oxygène nécessaire pour entretenir la combustion varie selon le type de combustible. En général, les vapeurs d'hydrocarbures cessent de brûler en-deçà d'une concentration en oxygène de l'ordre de 13 %, tandis que les combustibles solides donnant lieu à une carbonisation peuvent continuer de brûler dans une atmosphère présentant une concentration en oxygène de l'ordre de 7 %.

Il est apparu dans plusieurs études que le délai d'application du brouillard d'eau est un paramètre à ne pas négliger dans l'extinction d'un incendie. Concernant un feu en milieu clos, il semble préférable de laisser le feu se développer. Un foyer plus puissant génère beaucoup plus de chaleur qui évapore plus de gouttelettes d'eau. La dilution en oxygène se fait alors plus rapidement. Mawhinney [4] préconise même de laisser une couche chaude de fumées s'établir pendant quelques minutes dans un local avant de déclencher le brouillard d'eau. Enfin, il faut garder à l'esprit qu'un abaissement du taux d'oxygène dans le milieu contribue certes à diminuer la puissance d'un foyer, voire à l'éteindre, mais peut

ne pas être souhaitable dans une situation de sinistre réel, dans laquelle des personnes peuvent être encore présentes.

I.2.1.3 Atténuation des transferts de chaleur rayonnée

L'atténuation des transferts de chaleur rayonnée a deux conséquences. Tout d'abord, elle va servir à protéger les cibles inflammables dans les environs du foyer (autres véhicules, chargements sensibles à proximité ...) et ainsi éviter la création de foyers secondaires. Ensuite, si le brouillard parvient à pénétrer dans la flamme, il va atténuer le flux radiatif émis par celle-ci en retour vers la surface du combustible, et ainsi déplacer l'équilibre énergétique de surface. Ceci peut contribuer à diminuer la puissance globale du foyer.

En situation de lutte contre l'incendie, le brouillard d'eau est un milieu semi-transparent comprenant une phase liquide constituée de gouttelettes de taille, densité de distribution et vitesse de déplacement différentes, ainsi qu'une phase gazeuse composée essentiellement de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone provenant de la flamme.

Les premières études fondamentales décrivant l'atténuation du rayonnement par un brouillard d'eau ne prenaient en compte que la présence de gouttelettes. Elles sont dues à Ravigururajan et Baltran [5], ainsi qu'à Coppalle et coll. [6] et utilisent un modèle dit *modèle à deux flux* qui, s'il permet d'obtenir des résultats qualitatifs, ne prend en compte l'anisotropie du phénomène que de manière approchée. L'approche physique du phénomène est schématisée sur la figure I.15. Il est supposé que l'atténuation du rayonnement est due à l'absorption et à la diffusion des gouttelettes, qui ont un diamètre donné (brouillard monodisperse). Cette taille conditionne les caractéristiques optiques des gouttelettes. Il faut donc déterminer les flux directement transmis, mais aussi les flux diffusés et redirigés vers la surface cible. Le modèle utilisé, dit à deux flux, réduit tous les flux diffusés par une gouttelette à deux directions, l'une dans le sens de la propagation, l'autre en sens inverse (figure I.16).

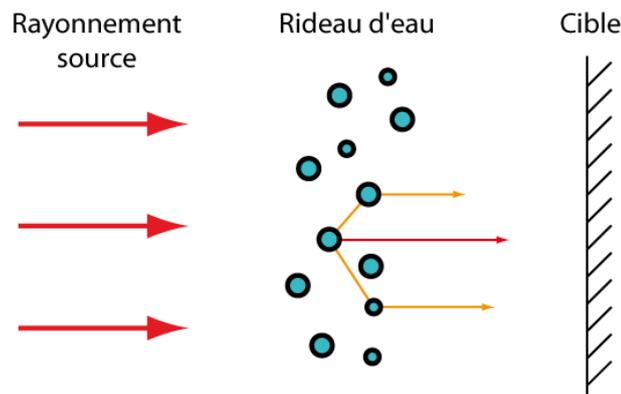


FIG. I.15 – Description schématique de l'interaction rayonnement brouillard d'eau : — : flux transmis — : flux diffusé puis redirigé

Le flux total rayonné \dot{Q}_{Foy}'' par un feu de température T sur une cible de facteur de réflexion R au travers d'un milieu d'épaisseur L chargé d'une concentration M de gouttelettes de diamètre d est donné par :

$$\dot{Q}_{Foy}'' = \int_0^\infty \dot{Q}_{F,\lambda}''(L, T_s, R, M, d) d\lambda \quad (I.7)$$

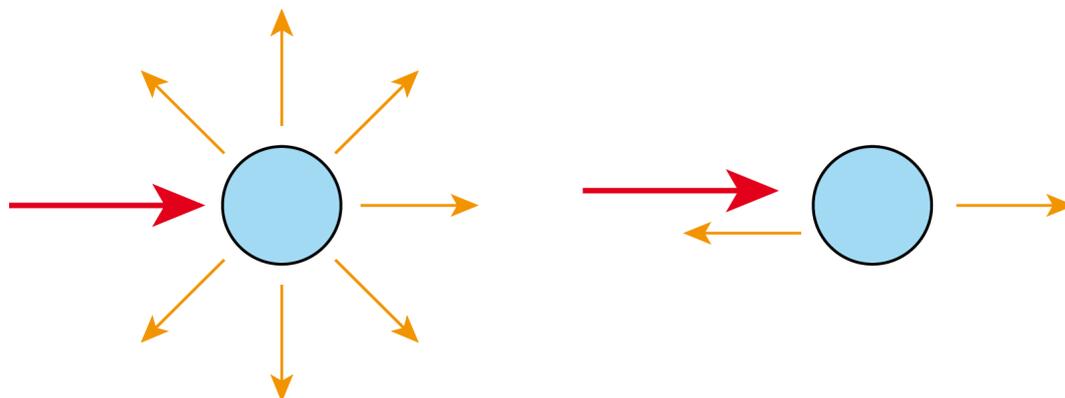


FIG. I.16 – Description schématique du modèle de diffusion à deux flux

avec :	\dot{Q}_{Foy}''	[W.m ⁻²]	Flux total rayonné par le feu
	M	[kg.m ⁻³]	Quantité d'eau injectée par unité de volume
	d	[m]	Diamètre des gouttelettes
	λ	[μ m]	Longueur d'onde
	L	[m]	Épaisseur du brouillard d'eau
	R	[-]	Facteur de réflexion de la cible
	T _s	[K]	Température de la source

En considérant la source comme un corps noir à la température T, le taux de transmission τ du brouillard d'eau pour cette épaisseur L est défini par :

$$\tau = \frac{\dot{Q}_F''}{F\sigma T^4} \quad (\text{I.8})$$

avec :	σ	5,67.10 ⁸ [W.m ⁻² .K ⁻⁴]	Constante de Stephan-Boltzmann
	F	[-]	Facteur de vue quantifiant les aspects géométriques de l'interaction du foyer avec la cible

Compte tenu des niveaux de température rencontrés dans une flamme d'incendie, on peut limiter l'intégration sur le domaine de longueur d'onde du proche infrarouge correspondant à une gamme d'environ 1 à 10 μ m. Pour déterminer le flux monochromatique selon le modèle à deux flux, on doit connaître ou déterminer, la taille des gouttelettes, leur concentration, mais aussi les efficacités énergétiques d'absorption et de diffusion ainsi que la fonction de phase de celles-ci. Ces trois derniers paramètres caractérisent les propriétés optiques de gouttelettes de diamètre d. Une fois ces caractéristiques calculées pour une gouttelette de diamètre donné d, on calcule le flux $\dot{Q}_{F,\lambda}''$ que l'on intègre sur le spectre utile.

Si l'on calcule le taux de transmission selon la relation (I.8), pour une température de feu de 1300 K et une épaisseur de brouillard de 50 cm, on obtient l'évolution du taux de transmission représentée sur la figure I.17.

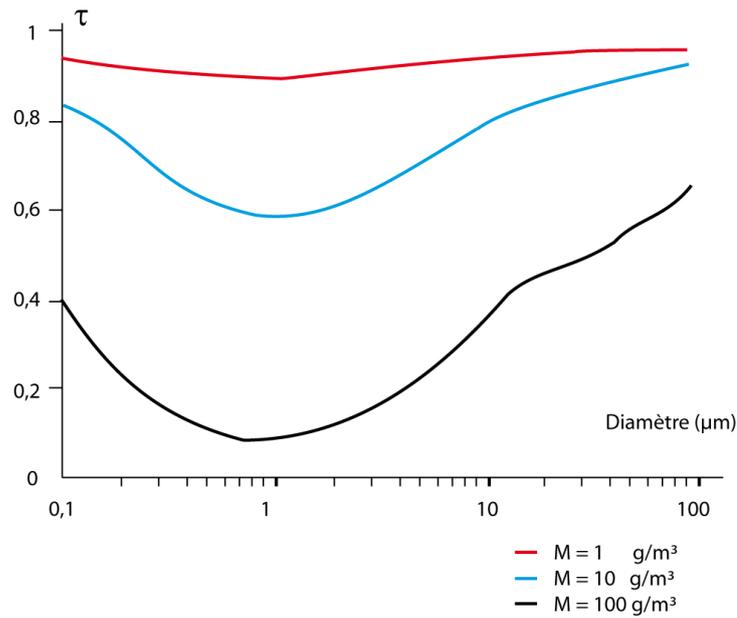


FIG. I.17 – Evolution du taux de transmission τ en fonction du diamètre des gouttelettes ($L=0,5$ m, $T_s=1300$ K, $R=0$) [6]

On observe que le maximum d'atténuation est obtenu pour des gouttelettes dont le diamètre est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde correspondant au maximum d'émission de la source (à 1300 K, le maximum d'émission d'un corps noir est de $1,93 \mu\text{m}$). Ceci pose une difficulté dans le cas pratique puisqu'il est ardu d'amener des gouttelettes aussi petites à proximité et au cœur du foyer.

Lorsque la taille des gouttelettes augmente, l'atténuation du flux rayonné devient faible. Des gouttelettes de grande dimension diffusent beaucoup, plutôt en direction avant, ce qui fait qu'une grande partie de l'énergie diffusée est redirigée vers la cible. Il est en outre intéressant de tester l'influence du facteur de réflexion de la cible (qui caractérise la partie du rayonnement incident que la cible renvoie). Les résultats obtenus montrent que le pouvoir réfléchissant de la cible n'a pas d'influence sur le taux de transmission [6].

On peut ensuite s'interroger sur la question de savoir quelle est la part de la diffusion dans le taux de transmission du brouillard d'eau (figure I.18). Dans le cas où l'on ne prend pas en compte la diffusion, les valeurs de τ , que nous noteront ici τ_{BL} sont obtenues par la loi d'atténuation de Beer-Lambert :

$$\tau_{BL} = \int_0^\infty \frac{\dot{Q}_{F,\lambda}''}{F\sigma T^4} e^{-K_{ext} \cdot L} d\lambda \quad (I.9)$$

K_{ext} étant le coefficient d'extinction.

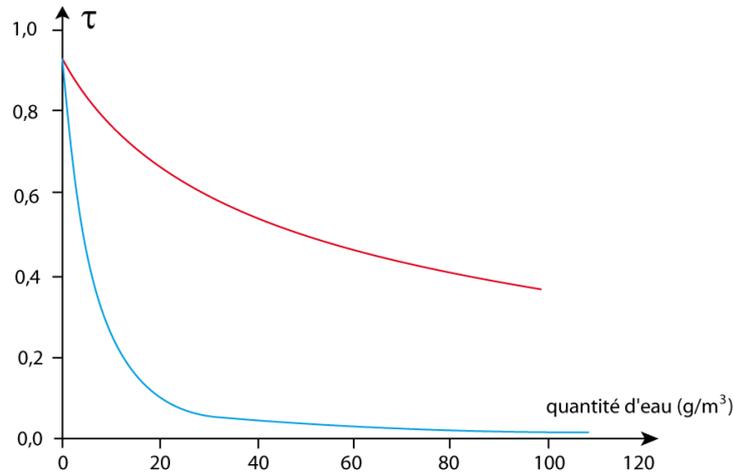


FIG. I.18 – Evolution du taux de transmission τ en fonction de la quantité d'eau injectée lorsque l'on tient compte de la diffusion ou non ($L=0,5$ m, $T_s = 1300$ K, $R=0$, $d=10$ μm)
 - (—) : taux de transmission τ_{BL} , (—) : taux de transmission τ [6]

On peut observer que les deux coefficients sont proches pour une faible quantité d'eau, mais dès que celle-ci croît, le taux de transmission calculé sans diffusion est bien trop faible. Ceci vient du fait qu'en ignorant la diffusion, on néglige la partie du rayonnement qui est diffusé et renvoyé en direction de la cible. On peut également tracer l'évolution de τ , en tenant compte de la diffusion, en fonction de la quantité d'eau pour différents diamètres de gouttes (figure I.19). On observe que plus la quantité d'eau injectée augmente, plus l'énergie rayonnée vers la cible diminue. Cependant, il est intéressant de noter que l'on peut obtenir le même effet, soit en augmentant la quantité d'eau, soit en modifiant la taille des gouttelettes.

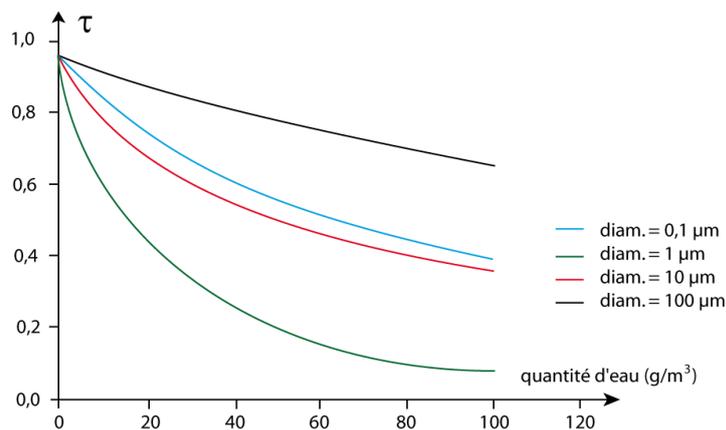


FIG. I.19 – Evolution du taux de transmission τ en fonction de la quantité d'eau injectée pour différents diamètres de gouttelettes ($L = 0,5$ m, $T_s = 1300$ K, $R = 0$) [6]

En conclusion, on peut tirer de tout ce qui précède :

- que le maximum d'atténuation du flux de chaleur est obtenu pour une taille de gouttelettes de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde du maximum d'émission de la flamme.

- que l'atténuation à diamètre de gouttelettes donné augmente avec leur concentration.
- qu'une même atténuation peut être obtenue aussi bien avec des gouttelettes plus grosses qu'avec des petites, à condition d'en accroître la concentration.

Ces deux études ([5] et [6]) ont été menées en résolvant l'équation de transfert de chaleur par rayonnement à l'aide du modèle à deux flux qui n'est plus très usité actuellement. En effet, si la diffusion des gouttelettes devient isotrope, alors cette approximation ne rend plus complètement compte du phénomène. On lui préfère maintenant des méthodes plus sophistiquées prenant en compte la discrétisation spatiale. De plus, dans ce qui a été présenté, seules les gouttelettes sont considérées. La prise en compte de la phase gazeuse (vapeur d'eau et CO_2) peut s'avérer nécessaire et ce d'autant plus que le brouillard est proche de la flamme. Spectralement (figure I.20), on distingue une zone continue où l'atténuation est essentiellement due aux gouttelettes et des bandes spectrales d'absorption caractéristiques de la vapeur d'eau ($1,78 \mu\text{m}$, $2,8 \mu\text{m}$ et $6 \mu\text{m}$) ainsi que du CO_2 ($4,3 \mu\text{m}$). On estime généralement que négliger l'atténuation liée à la phase gazeuse peut conduire à une sous-estimation, qui peut aller jusqu'à 15%.

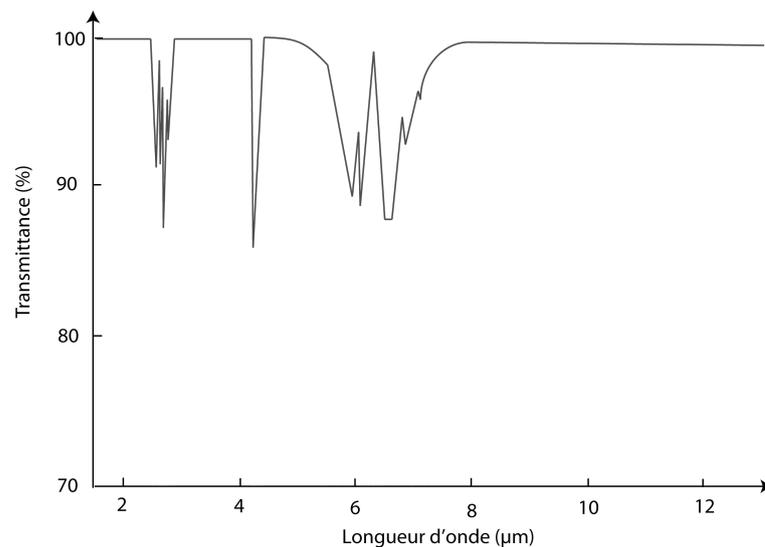


FIG. I.20 – Transmittance d'un mur d'air humide. (source : [7])

Les travaux précédents ont été complétés ces dernières années par des modélisations plus fines, surtout en terme de diffusion et par la prise en compte de la vapeur d'eau. On notera en particulier les travaux développés il y a une dizaine d'années au Centre de Thermique de l'INSA de Lyon (CETHIL) [7–9]. La méthode de résolution adoptée est la Méthode des Ordonnées Discrètes (MOD). C'est une méthode basée sur l'utilisation de quadratures numériques pour calculer les intégrales selon les angles solides. La fonction de phase n'est pas, là encore, la fonction de phase rigoureuse déduite de la théorie. Elle est représentée par une fonction modélisée dite de Henye-Greenstein, basée sur la notion de facteur d'asymétrie et qui donne des résultats tout à fait satisfaisants pour le type de milieu considéré.

Quant à la contribution de la vapeur d'eau, elle nécessite la caractérisation de ses propriétés radiatives en termes de coefficients d'absorption. Les modèles de bandes étroites,

largement employés dans le cas des milieux non gris et non diffusants pour leur bon compromis précision-temps de calcul, ne peuvent être utilisés lorsqu'il y a de la diffusion, puisqu'ils sont basés sur le concept de transmittivité moyenne sur un étroit intervalle de fréquence. La procédure idéale serait d'utiliser une méthode raie par raie, mais les temps de calcul seraient trop conséquents. L'alternative choisie par les auteurs a été d'utiliser la méthode de corrélation-k (CK) qui constitue un bon compromis précision-temps de calcul. Cette méthode consiste à passer d'une intégration sur l'espace des fréquences à une intégration sur l'espace des coefficients d'absorption, pour un gaz non gris et non homogène en concentration.

Des essais menés sur le terrain ont confirmé le grand potentiel d'atténuation de rayonnement par les brouillards d'eau. Il a ainsi été possible d'atténuer de près de 70 % le rayonnement de feux de Gaz Naturel Liquéfié (GNL) ou d'essence.

Les travaux présentés dans la référence [10] et réalisés pour une grande partie en collaboration avec l'Institut Von Karman (IVK) de Bruxelles, ont été davantage consacrés aux aspects hydrodynamiques et de transferts de matière (dynamique du spray) associés à l'usage des rideaux d'eau comme écran au rayonnement thermique.

Il convient également d'évoquer les travaux récents menés au Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée de Nancy (LEMTA) [11–14]. L'objectif de ceux-ci a été de comprendre les différents phénomènes d'interaction rayonnement-matière mis en jeu et de développer un outil de simulation performant afin d'optimiser l'efficacité d'atténuation des brouillards d'eau. Un code de calcul, associant une technique Eulerienne-Lagrangienne pour décrire l'écoulement des gouttelettes et de la phase gaz, et une méthode de Monte Carlo spécifique pour simuler la propagation du rayonnement, a été développé. Notons qu'un modèle de dispersion de type stochastique du premier ordre a été intégré au code afin de prendre en compte l'influence de la turbulence du fluide sur le mouvement des gouttelettes. Pour ce qui est de l'aspect énergétique, le modèle inclut le transfert de chaleur par convection et par évaporation entre le fluide et les gouttelettes. Deux spécificités sont à souligner : le caractère tridimensionnel du modèle et la mise en œuvre d'une méthode de Monte Carlo modifiée permettant de traiter de manière plus efficace les milieux hétérogènes diffusant le rayonnement de manière fortement anisotrope.

Une autre approche développée par l'IUSTI de Marseille [15] utilise comme méthode de résolution de l'équation de transfert radiatif la méthode des volumes finis. Celle-ci est associée à la théorie de Mie et l'étude permet d'évaluer les erreurs introduites lorsque l'on fait l'hypothèse d'un milieu gris.

Il ressort de tout ce qui précède que la protection par rideau d'eau doit mettre en œuvre de fines gouttelettes avec une forte concentration massique ainsi qu'une épaisseur de rideau appréciable. Cependant, la difficulté d'amener de fines gouttelettes au sein du foyer est problématique : par leur petite masse elles sont très sensibles aux courants convectifs et peuvent se vaporiser avant d'avoir atteint le voisinage du feu. Un compromis doit être trouvé en choisissant des gouttelettes plus grosses, certes moins efficaces en termes d'atténuation, mais plus facilement contrôlables.

1.2.2 Caractérisation des brouillards d'eau

Si l'on appelle l'injection d'eau pulvérisée dans un écoulement un spray, le terme de brouillard d'eau est de façon usuelle réservé aux sprays dont la taille de gouttelettes

maximale est de l'ordre de 400 μm .

Un brouillard d'eau est caractérisé par quatre paramètres :

- la distribution de taille des gouttelettes
- la quantité d'eau utilisée
- la quantité de mouvement des gouttelettes
- la présence ou l'absence d'additif

I.2.2.1 Distribution de taille des gouttelettes

Il existe plusieurs grandeurs susceptibles de décrire un spray en terme de taille de gouttelettes. Une d'entre elles, couramment utilisée, est le diamètre moyen de Sauter D_{32}

$$d_{32} = \frac{\sum_i N_i (d_g^3)_i}{\sum_i N_i (d_g^2)_i} \quad (\text{I.10})$$

où i est un indice associé à la classe de gouttelette considérée, N_i est le nombre de gouttelettes appartenant à la classe i et $(d_g)_i$ est le diamètre médian de la classe i . Ce diamètre de Sauter sert usuellement lors de l'étude de la combustion d'un brouillard combustible.

Afin de distinguer un brouillard d'eau d'un spray classique généré par un sprinkler conventionnel, Mawhinney et coll. [16] utilisent une grandeur notée d_{vy} . Elle est définie en posant $d_{vy} = x$ ce qui signifie qu'une proportion y du volume d'eau pulvérisée est injectée sous forme de gouttelettes dont le diamètre est inférieur à x . Ceci permet de définir le diamètre moyen volumétrique $D_{v0,5}$, souvent utilisé pour caractériser la granulométrie d'un spray. Cependant, ce diamètre moyen volumétrique n'est pas suffisant pour caractériser son efficacité. Mawhinney [4] utilise $D_{v0,9}$ pour scinder les brouillards d'eau en trois classes, suivant leur spectre de diamètre de gouttelettes, réservant la dénomination de brouillard d'eau à ceux dont $D_{v0,9} = 400 \mu\text{m}$. Cet auteur utilise pour ceci trois mesures de distribution de taille, à 1 m de la buse d'aspersion, sur des axes inclinés de 0, 15 et 30 degrés par rapport à l'axe de la buse (figure I.21).

On reporte les courbes représentant y en fonction de x correspondant à chacune des distributions. Les sprays pour lesquels l'enveloppe de ces courbes est entièrement à gauche du premier segment seront dits de classe 1, ceux pour lesquels l'enveloppe des courbes est entièrement à la gauche du second segment seront dits de classe 2 et enfin, ceux n'appartenant ni à l'une ni à l'autre des catégories précitées seront dits de classe 3 (figure I.22). Il s'ensuit donc que les sprays dénommés brouillards d'eau appartiennent aux classes 1 et 2, la classe 3 regroupant les systèmes d'aspersion de type sprinkler, comprenant beaucoup de grosses gouttes. Dans une optique d'extinction d'un feu, ces systèmes sont adaptés pour éteindre des feux de combustible solides, où le mécanisme de refroidissement de la surface du combustible est prépondérant. Cependant, les brouillards d'eau ne sont pas toujours recommandés lorsqu'il s'agit d'intervenir sur des feux de liquides où l'interaction de gouttelettes sur la surface du combustible peut poser quelques problèmes, notamment des micro-explosions.

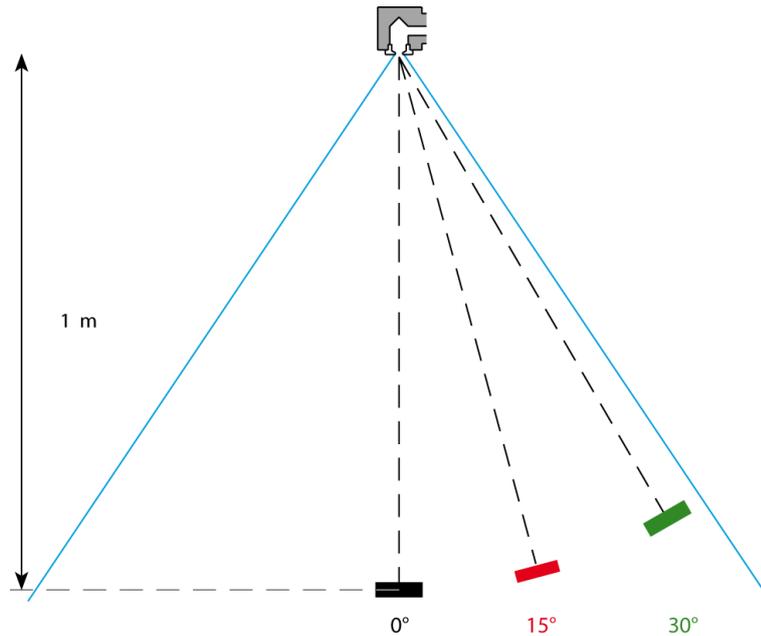


FIG. I.21 – Localisation des mesures pour la classification des sprays proposée par Mawhinney [4]

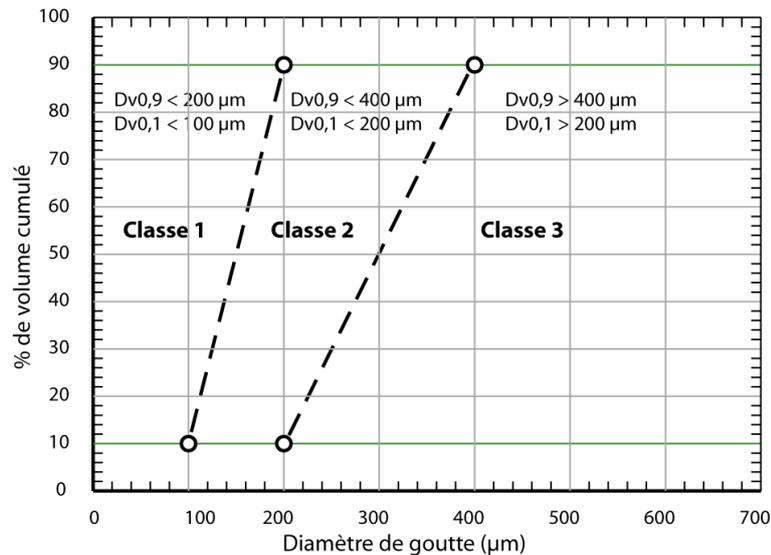


FIG. I.22 – Classification des sprays par Mawhinney et coll. [16]

I.2.2.2 Quantité d'eau utilisée

Une définition purement granulométrique du brouillard d'eau n'est cependant pas suffisante. En effet, la capacité du brouillard d'eau à absorber une proportion significative de la puissance dégagée par le feu dépend aussi largement du volume d'eau pulvérisé vers le foyer. Un des arguments en faveur de l'utilisation des brouillards d'eau dans la lutte anti-incendie est justement l'utilisation d'une quantité d'eau moindre qu'un sprinkler conventionnel. On conçoit alors que le volume d'eau injecté est également un paramètre important quant à la caractérisation des brouillards.

Un premier reflexe est d'utiliser le débit massique d'eau \dot{m}_{eau} alimentant la buse pour caractériser cette quantité. Cependant, on lui préfère souvent les grandeurs suivantes :

$$\dot{m}''' = \frac{\dot{m}_{eau}}{V_a} \quad (\text{I.11})$$

avec : \dot{m}''' [kg.m⁻³.s⁻¹] Densité de flux du brouillard d'eau
 V_a [m³] Volume caractéristique de l'action du brouillard d'eau sur le foyer

Cette grandeur peut être utilisée dans le cas de feux en enceintes où, en première approximation, le volume V_a peut être pris égal au volume du compartiment. Le brouillard est ici supposé homogène. Cependant, dans le cas de feux en milieu ouvert, V_a est difficile à déterminer et l'application de cette définition devient compliquée. Certains, dont Kim et coll. [17] préfèrent alors exprimer la densité de flux par unité de surface :

$$\dot{m}''_l = \frac{\dot{m}_{eau}^*}{\Sigma_a} \quad (\text{I.12})$$

avec : \dot{m}''_l Densité de flux par unité de surface
 \dot{m}_{eau}^* [kg.m⁻²s⁻¹] Débit massique d'eau moyen traversant Σ en l'absence de flamme
 Σ_a [m²] Surface traduisant l'interaction entre le brouillard et le foyer

Pour s'affranchir du caractère arbitraire du choix de Σ_a , Mawhinney [4] introduit la densité de flux nominale :

$$\dot{m}''_l = \frac{\dot{m}_{eau}}{\Sigma^*} \quad (\text{I.13})$$

avec : Σ^* [m²] Aire de la section du spray à un mètre de l'ajutage

La densité de flux nominale a l'avantage d'être facilement mesurable et elle peut être employée pour comparer des sprays entre eux. En revanche, elle peut difficilement être considérée comme un paramètre de l'étude de l'interaction entre le brouillard d'eau et le foyer car elle ne contient plus, dans sa définition, l'information sur la forme du jet.

Bien que la quantité d'eau utilisée soit un paramètre important reconnu pour caractériser un brouillard d'eau, peu d'auteurs ont proposé des valeurs pour différencier brouillard d'eau et spray classique. Cependant, on peut citer par exemple Grosshandler et coll. [18] qui, outre une condition sur la granulométrie du spray (comprise entre 30 μm et 300 μm), proposent de définir un brouillard d'eau comme un spray qui utilise dix fois moins d'eau (voire moins) qu'un sprinkler conventionnel.

I.2.2.3 Quantité de mouvement du spray

La quantité de mouvement des gouttelettes joue un rôle important dans les performances d'un brouillard d'eau. Dans une optique d'attaque directe du foyer, si les gouttelettes d'eau ont une vitesse suffisante en sortie de buse, elles peuvent alors pénétrer dans la flamme et agir de façon efficace. Si la quantité de mouvement est trop faible, les gouttelettes vont être éjectées de la flamme et rester confinées hors de la zone de réaction, où elles sont inefficaces en terme d'extinction. Cependant, comme nous l'avons déjà mentionné, les sprays de faible quantité de mouvement peuvent être efficaces dans le cas d'incendies se déclarant dans une pièce à ventilation contrôlée, si le foyer est assez important pour vaporiser une très grande partie du brouillard environnant : la concentration en oxygène baisse alors et peut devenir insuffisante pour entretenir la combustion.

I.2.2.4 Ajout d'additif

Tamanini [19] fait état de plusieurs études qui montrent que l'ajout de différents sels augmente l'efficacité d'un spray conventionnel. Plus tard, Mawhinney [20] étudie l'influence de l'ajout d'eau salée et de mousse à l'eau sur les caractéristiques d'un brouillard d'eau. Il relève que la présence d'un additif a tendance à décaler la granulométrie vers les grosses gouttelettes mais que cet effet est négligeable en comparaison d'autres phénomènes qui peuvent affecter la distribution de taille dans les grands compartiments.

Mesli [21] étudie l'influence de l'ajout de chlorure de sodium à l'eau, en proportion équivalente à l'eau de mer sur une flamme. Il s'appuie pour partie sur les travaux de Zheng et coll. [22], et tous notent une amélioration de l'efficacité d'un brouillard d'eau salée sur les flammes. Ceci est principalement dû à l'intervention du radical chlore Cl^\cdot à haute température qui joue un rôle d'inhibiteur sur les radicaux O^\cdot , OH^\cdot et H^\cdot . Une autre action du sel est due à la présence de sodium Na^\cdot , montré comme inhibiteur par Kim [23] pour des flammes de prémélanges méthane/air. Ces auteurs concluent que le sel NaCl est efficace dans une gamme de température de flamme comprise entre 1200°C et 2000°C , ce qui exclut alors toute action majeure sur des flammes de prémélange riches. Ainsi, l'utilisation d'eau de mer, lorsqu'elle est envisageable, diminue la densité de flux nécessaire à l'extinction.

Xiaomeng et coll. [24] étudient l'influence d'un brouillard d'eau chargé d'un additif multi-composition sur l'extinction de trois foyers de référence : éthanol, diesel et bûcher bois. Leurs expériences à l'échelle laboratoire montrent l'existence d'un taux d'additif optimum pour lequel le temps d'extinction est minimum, quel que soit le type de foyer.

I.2.3 Technologie

Il existe trois systèmes principaux pour générer un brouillard d'eau :

- à l'aide d'injecteurs à déflecteur
- à l'aide d'injecteurs monofluides
- à l'aide d'injecteurs bifluides

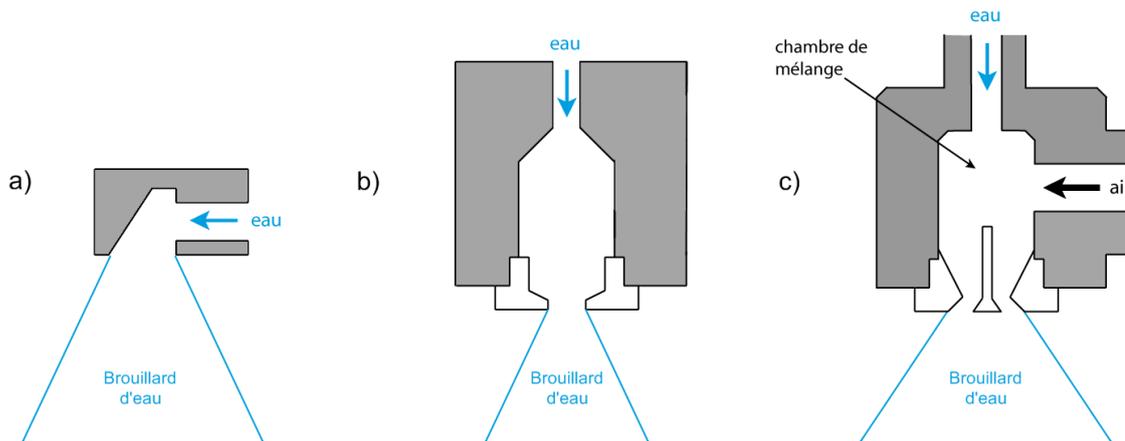


FIG. I.23 – Injecteurs à déflecteur (a)), monofluide (b)) et bifluide (c))

Injecteurs à déflecteur Dans ces injecteurs, un jet d'eau heurte un déflecteur pour être dissocié en fines gouttelettes. On peut jouer sur le diamètre de l'orifice et sur la pression de décharge pour obtenir une distribution de taille caractéristique d'un brouillard. Ce type d'injecteur présente l'avantage de produire des brouillards à des pressions relativement faibles, inférieures à 10 bars.

Injecteurs monofluides Il s'agit de simples ajutages, de très petit diamètre, à travers lesquels de l'eau est projetée à très haute vitesse. Le jet obtenu devient instable et se désintègre en fines gouttelettes sans avoir à heurter un déflecteur. Ces injecteurs peuvent opérer à basse pression (inférieure à 10 bars) ou à pression très élevée (supérieure à 200 bars). Ils peuvent produire des brouillards présentant des distributions de taille plus fines et une quantité de mouvement plus grande que les injecteurs à déflecteur, particulièrement à haute pression. En revanche, le faible diamètre des ajutages nécessite plus d'énergie pour produire le même débit d'eau et beaucoup plus d'attention pour prévenir les obturations accidentelles.

Injecteurs bifluide Un jet d'eau à basse pression est cisailé dans une cavité appropriée, par de l'air injecté également à basse pression. Le brouillard formé est pulvérisé vers l'extérieur par un orifice de diamètre relativement large par rapport au cas précédent. Ces injecteurs ont l'avantage de produire des brouillards présentant des distributions de taille de gouttelettes bien définies, une quantité de mouvement élevée, d'opérer à des pressions d'air et d'eau aisément disponibles et de ne pas s'obturer facilement. Mais ils nécessitent un stockage d'air comprimé et beaucoup plus d'investissement dans l'installation de la distribution d'air et d'eau.

I.2.4 Etat de l'art sur l'usage du concept brouillard d'eau dans la lutte contre les feux

L'eau, nous l'avons vu, est l'agent d'extinction par excellence, mais souvent employée avec un faible rendement du fait qu'elle n'exerce pas ses propriétés extinctrices majeures (refroidissement important de la flamme et de la surface de combustible, ainsi qu'inertage)

tant qu'elle n'a pas été vaporisée. L'eau fut ainsi pendant longtemps le seul moyen de combattre les feux. Mais étant utilisée sous forme de projections importantes en volume sur les flammes (à l'aide de récipient ou sous forme de jets dits "bâton" par exemple), sa capacité extinctrice était loin d'être exploitée au maximum.

L'idée d'utiliser l'eau sous forme divisée pour accroître cette capacité et, en conséquence, économiser ce "précieux" liquide, n'est pas nouvelle. Toutefois, les progrès en ce sens souffrirent longtemps d'un défaut de capacité d'études. Les premiers travaux marquants sur le sujet sont à mettre à l'actif de Braidech et coll. [25] ainsi que de Rabash et coll. [26] et [27] qui, dès les années cinquante, surent dégager les caractéristiques et aspects fondamentaux de l'action de système de diffusion d'eau sous forme de fines gouttelettes ou de brouillards sur un feu. Il est à noter que ces travaux, remarquables pour l'époque, sont des travaux de base qui, loin d'avoir été remis en question par la suite, constituent le fondement sur lequel s'appuient toutes les études développées aujourd'hui.

Mais, au début des années soixante, l'apparition des halons (et plus précisément des halons 1301 CF_3Br et 1211 CF_2ClBr), inhibiteurs chimiques dont le mode d'action a été évoqué plus haut, a réduit considérablement les efforts de recherche en matière d'extinction. Peu coûteux, faciles d'utilisation et surtout remarquablement efficaces, ces agents gazeux furent préconisés dans bon nombre d'applications. Si des études furent bien encore menées sur les brouillards d'eau dans les années soixantes-dix, elles n'ont concerné que quelques applications très spécifiques : Vincent et Howard [28] se sont par exemple intéressés à l'application de sprays finement divisés pour la prévention des explosions de brouillards d'hydrocarbures, et Lugar [29] et [30] pour la lutte contre les incendies dans les sous-marins.

En réalité, c'est une prise de conscience écologique qui a remis l'intérêt porté au brouillard d'eau sur le devant de la scène. En effet, les halons font partie de la famille des chlorofluorocarbones (CFC), composés qui sont responsables, en partie, de la dégradation de la couche d'ozone. L'usage des halons s'est donc trouvé concerné par les dispositions du protocole de Montreal (1987), visant à réduire leur utilisation. Cette résolution s'étant montrée insuffisante, leur fabrication a été interdite à partir de 1994 à la suite des accords de Copenhague (1992). Aujourd'hui, les halons ne peuvent donc plus être produits (en théorie) par les signataires de ces accords. Seul l'usage des stockages existants, et seulement pour des situations bien particulières, est autorisé.

Comme tout relâchement d'intérêt dans quelque domaine de recherche que ce soit, la conséquence de cet intermède a été une perte de temps dommageable pour l'effort de recherche dévolu à l'usage du brouillard d'eau en tant que moyen d'extinction. A partir de ce constat, les études sur le sujet ont été reprises dès la fin des années quatre-vingt, avec une intensification accrue, de par le monde, tant dans les laboratoires de recherche universitaires que dans les sociétés industrielles ou les établissements gouvernementaux intéressés. Ces études, favorisées par les progrès technologiques permettant de disposer de buses plus performantes et d'eau à haute pression, mais aussi de méthodes modernes de caractérisation des jets d'eau pulvérisée, ont donné lieu à une bibliographie très abondante et diversifiée, l'application du concept brouillard d'eau étant présentée précisément comme une alternative de choix à l'usage des halons.

Une présentation exhaustive de tous ces travaux, d'ailleurs bien souvent fort disparates du fait de la grande diversité des applications envisagées, sort bien entendu du cadre de ce travail. Aussi, nous contenterons-nous de ne citer que les articles ayant constitué

une avancée marquante pour une meilleure appréhension des aspects fondamentaux de l'interaction d'un brouillard d'eau avec un feu, avant de nous focaliser sur l'application bien spécifique, objet de ce travail : l'usage de ce concept en configuration tunnel.

En premier lieu, il convient de faire état d'un effet contraire, mais seulement en apparence, à l'extinction recherchée lors de l'application d'un brouillard d'eau sur un feu : à savoir, l'intensification de ce dernier. C'est une situation souvent rencontrée lorsque l'on a affaire à des feux de nappes de combustibles liquides. A l'instant de l'application, une brutale intensification de la combustion est observée. Ce phénomène est d'ailleurs bien connu des services de secours, les intervenants étant entraînés à s'en méfier et à s'en protéger. Cette intensification est généralement suivie par un "effondrement" de la flamme puis, si les conditions propices se trouvent réunies, par son extinction. Par conditions propices, on doit entendre conditions de puits de chaleur, dilution d'oxygène, d'atténuation de transferts de chaleur, c'est-à-dire les différents modes d'action reconnus des brouillards d'eau, adéquates pour conduire à l'extinction. Si ces conditions ne sont pas remplies, le feu continuera à brûler en dépit de l'activation du brouillard. Certains auteurs comme Kokkala [31] ont attribué cet effet d'intensification de la combustion à la vaporisation "explosive" des gouttelettes d'eau atteignant la surface du combustible, entraînant, par éclaboussement, des projections de combustible au sein de la flamme. Toutefois, des essais menés par Dlugogorski et Kim [32] sur des feux de nappe de gasoil et d'heptane, ainsi que le constat d'intensifications semblables observées par Jones et Thomas [33] lors de l'addition d'eau pulvérisée pour inhiber des explosions de gaz, ont montré qu'il s'agissait plutôt d'une activation de la turbulence au sein même des flammes.

Il apparaît donc que ce sont bien les influences conjuguées, et quelquefois opposées, des effets de refroidissement, de dilution, d'inertage, mais aussi d'intensification de la turbulence et des mélanges des espèces réagissantes, qui conditionnent les potentialités d'extinction par brouillard d'eau. Mais ceci explique aussi, en conséquence, le degré élevé d'incertitude dans la prévisibilité d'un succès. Il en résulte également que tout système à brouillard d'eau manifestement sous-dimensionné aura pour seul effet d'activer le foyer à traiter.

A l'aide d'un dispositif expérimental à l'échelle laboratoire constitué d'un jet de brouillard d'eau impactant à contre-courant un petit feu de nappe d'essence de 10 centimètres de diamètre, Kim et coll. [17] et [34] ont confirmé que, si les conditions d'extinction n'étaient pas remplies, l'effet du jet et de l'air entraîné par celui-ci était bien d'activer la combustion. Par ailleurs, en faisant varier la granulométrie des gouttelettes, ces auteurs ont mis en évidence que des gouttelettes trop fines atteignaient difficilement le voisinage de la surface en feu et peinaient à la refroidir et donc à atténuer la vitesse de vaporisation du combustible, réduisant ainsi l'efficacité de l'aspersion. Ces auteurs ont enfin montré qu'il était possible de bien délimiter les deux régimes, régime d'extinction et régime d'activation de la flamme, selon la distance entre la buse et le foyer et la pression d'injection appliquée à la buse, mais que cette limite n'était en fait fonction que d'un seul paramètre dimensionnant appelé *flux d'eau effectif* exprimé en litres par unité de temps et par unité de surface de combustible.

Ndubizu et coll. [35] se sont attachés à étudier les contributions respectives des différents modes d'action des brouillards d'eau sur une flamme de diffusion, toujours à l'échelle laboratoire (brûleur à méthane de type Wolfhand-Parker, modifié pour permettre une injection latérale de mélanges air-brouillard d'eau, air-vapeur d'eau ou air-azote). Leurs

résultats ont montré qu'il y avait bien trois modes d'action prépondérants : l'effet puits de chaleur (chaleur latente de vaporisation), l'effet d'accroissement de la capacité calorifique de la vapeur d'eau (comparée à celle de l'air), l'effet de dilution, mais que c'était le mécanisme de refroidissement au sein de la phase gazeuse (regroupant les deux premiers effets) qui apparaissait comme prépondérant vis-à-vis de l'effet de dilution, tout au moins pour le domaine de granulométrie de gouttelettes considéré (autour de $60 \mu\text{m}$).

Les effets de la localisation de l'injection des gouttelettes dans le feu ainsi que l'influence du point d'ébullition du combustible considéré ont également été étudiés par la même équipe (Ndubizu et coll. [36]), à partir d'un dispositif expérimental en semi-grandeur (feu de nappe de kérosène et d'heptane de 50 centimètres de diamètre). Il a été montré que l'effet optimum d'extinction était obtenu lorsque le brouillard d'eau était injecté à la base du feu et lorsqu'il était constitué de gouttelettes les plus fines. En effet, ces fines gouttelettes s'évaporent plus rapidement dans une zone proche de la surface, là où les modes d'action, refroidissement, accroissement de la capacité calorifique massique par génération de vapeur d'eau et dilution, ont le plus de chance d'être efficaces. Pour ce qui est de la comparaison des essais conduits avec les deux combustibles, il résulte que le brouillard d'eau est plus efficace pour éteindre le feu de combustible dont le point d'ébullition est le plus élevé, ici le kérosène. Son point d'ébullition est variable, comme pour toute coupe de distillation, mais supérieur à 100°C donc à celui de l'eau. L'heptane a, pour sa part, un point d'ébullition de 98°C , donc inférieur à celui de l'eau. Dans le cas du kérosène, lorsque des gouttelettes arrivent jusqu'à la surface, elles se vaporisent de manière "explosive" au contact du liquide très chaud, ce qui entraîne un refroidissement notable de celui-ci et une baisse de la vitesse de combustion, contribuant à favoriser l'extinction. Dans le cas de l'heptane, il ne peut y avoir cette contribution à l'extinction par un tel puits de chaleur par vaporisation à la surface.

Downie et coll. [37] ont examiné, toujours à l'échelle laboratoire, l'influence d'un brouillard d'eau impactant à contre-courant une flamme de diffusion, non pas établie sur une surface de combustible liquide, mais sur un brûleur plan alimenté en méthane (un effet sur la vitesse de combustion ne peut donc pas être observé). En se plaçant dans des conditions telles que la quantité de mouvement de brouillard soit dominée par celle du panache thermique ascensionnel, l'objectif était de ne pas voir les gouttelettes pénétrer le panache mais de les voir seulement entraînées latéralement dans celui-ci, en partie basse de la flamme, par l'air venant l'alimenter. Les résultats ont montré que les températures dans la flamme et le panache, ainsi que leur structuration, n'étaient que très peu affectées mais, qu'en revanche, la température au niveau du brûleur était significativement abaissée, surtout en périphérie de la flamme, là où les gouttelettes sont entraînées. Un abaissement de la concentration en oxygène a de plus été observé, montrant le rôle de l'effet de dilution.

Mesli et coll. [38] ont étudié l'effet d'un brouillard d'eau dans le cas bien particulier de flammes turbulentes prémélangées, stabilisées à l'aide d'un brûleur à jets opposés méthane/air. Les principales informations tirées de ce travail sont que :

- plus les flammes sont riches, plus elles sont difficiles à éteindre,
- plus la concentration en gouttelettes est accrue, plus le brouillard d'eau est efficace,
- l'effet de refroidissement est plus important que l'effet de dilution dans le processus.

Outre les effets de puits de chaleur et de dilution, largement mis en évidence et quantifiés dans nombre de travaux comme nous venons de le voir, il en est un qui n'a été jusqu'à

présent que peu pris en compte : l'atténuation des flux de chaleur rayonnée en retour vers la surface du combustible, mais aussi l'atténuation du flux de chaleur vers des cibles de l'environnement. Ce dernier effet a déjà été mentionné. Il s'agit de l'effet de *rideau d'eau* qui peut se compliquer lorsque les gouttelettes ne constituent pas seulement un écran entre une cible et la flamme, mais viennent pénétrer cette dernière, réduisant sa température et son potentiel énergétique. La question qui se pose alors est la suivante : dans l'atténuation des flux rayonnée, quelle est la part due au refroidissement de la flamme et à la réduction de sa taille d'une part, et au brouillard d'eau par absorption et diffusion de l'énergie thermique d'autre part ? L'effet relatif au flux en retour vers la surface intéresse plus directement le processus d'extinction puisqu'il doit entraîner une diminution de la production de vapeurs combustibles. Des considérations théoriques laissent penser qu'un nuage de gouttelettes ou de vapeur d'eau interposé entre une flamme et une surface de combustible va réduire le flux de chaleur rayonné vers celle-ci. Intuitivement, on peut considérer que ce flux est absorbé par la vapeur d'eau et les gouttelettes non évaporées qui, elles-mêmes, vont rayonner à une température plus basse. Des études ont été développées en ce sens au sein du Laboratoire de Combustion et de Détonique (LCD) de Poitiers [39–42]. Là encore, les expérimentations ont été menées à l'échelle laboratoire sur des feux de nappe d'heptane (cuve de 23 centimètres de diamètre) attaqués par un brouillard d'eau à contre-courant. Le choix des conditions expérimentales a été dicté par le souci d'optimiser les effets, tout en évitant l'extinction de la flamme, afin de pouvoir réaliser les mesures nécessaires à l'étude. Différentes phases ont pu être distinguées dans l'interaction brouillard d'eau/flamme :

- pénétration des gouttelettes au sein de la flamme accompagnée d'un affaissement de celle-ci vers la surface,
- vaporisation quasi-simultanée de la majorité des gouttelettes avec effet d'expansion et de dilution important, entraînant un évasement latéral, la flamme n'existant plus que par son ancrage sur le bord de la cuve,
- restructuration de la flamme pour entamer un nouveau cycle de pénétration du brouillard d'eau.

Il a aussi été montré que c'est au cours de la phase d'expansion, où l'effet de "chasse" de la flamme au niveau de la surface est important, que l'extinction peut être obtenue. Pour ce qui est du flux de chaleur rayonnée surfacique résultant, il apparaît atténué mais pas de façon suffisante pour jouer un rôle notable dans l'extinction. Cette atténuation résulte, en grande partie, du refroidissement de la phase gazeuse et, dans une moindre mesure, d'une baisse de l'émissivité de la flamme et de l'absorption due à la présence de vapeur d'eau. L'efficacité du brouillard d'eau apparaît finalement être due au couplage refroidissement de la phase gazeuse/soufflage. En ce qui concerne le soufflage, deux mécanismes entrent en compétition : l'accélération des transferts de masse vers la zone de réaction chimique, qui avive les phénomènes de combustion, et l'étirement de cette zone de réaction chimique qui correspond à une baisse du temps de résidence des espèces, et donc à une diminution du nombre de Damkohler, diminution favorable à l'extinction, nous l'avons vu. La spécificité de l'action de soufflage du brouillard est qu'elle provient en partie de l'évaporation extrêmement rapide des gouttelettes et qu'elle a un fort caractère instationnaire.

Ces études ont également montré que l'introduction de vapeur d'eau au sein de la flamme conduisait à une production moindre de suies du fait d'une intensification de leur

oxydation (présence accrue de radicaux OH \cdot) et de la turbulence (meilleure efficacité de la combustion) et favorisait la conversion de CO en CO $_2$ [42].

Tout l'engouement suscité par ce nouveau mode d'extinction, présenté de plus, nous l'avons dit, comme l'alternative de choix à l'usage des halons, est bien reflété par l'abondance d'articles de synthèse dédiés au sujet, produits au cours de cette période de regain d'intérêt ([16], [33], [43–47]).

D'un point de vue ingénierie pure, il peut paraître suffisant de bien mettre à profit les trois mécanismes dominants d'action du brouillard d'eau que sont le puits de chaleur, la dilution et l'atténuation des flux de chaleur rayonnée, pour développer des systèmes à brouillard d'eau performants pour une application donnée. D'un point de vue plus scientifique et pour en arriver jusqu'à un effort de simulation numérique, le modélisateur est plus exigeant. Un code de calcul doit tenir compte de tous les aspects du problème, y compris le complexe couplage avec les processus de combustion. Le développement de la modélisation pour une description fiable de l'interaction brouillard d'eau/feu, pour une application donnée, se présente donc encore comme un défi. Pour traiter ce problème qui est un problème diphasique, il est possible de considérer la phase gazeuse comme une phase continue à l'aide d'une approche Eulerienne et de considérer la phase liquide (les gouttelettes) à partir d'une approche Lagrangienne, nécessitant le suivi statistique de celle-ci. Toutefois, afin de réduire les temps de calcul, le nuage de gouttelettes peut également être considéré comme un fluide, si bien que l'on a en fait deux possibilités d'approche : Eulerienne-Lagrangienne ou Eulerienne-Eulerienne. La première approche a surtout été utilisée dans les études relatives aux pulvérisations d'eau par sprinkler. On peut ainsi citer les travaux d'Alpert [48], de Nam [49] et [50] ou de Novozhilov et coll. [51].

Dans un article généraliste sur le sujet, Novozhilov [52] a analysé et discuté le bien fondé des deux approches. Quoi qu'il en soit, il apparaît clairement que l'option du suivi Lagrangien nécessite des temps et des moyens de calcul prohibitifs. Aussi, les modélisations les plus récentes utilisent-elles plutôt l'approche Eulerienne-Eulerienne. C'est le cas par exemple des travaux de Prasad et coll. [53–55] qu'il convient de citer. Dans la référence [53], les auteurs décrivent une simulation numérique permettant de mieux comprendre les différents processus mis en jeu au cours de l'interaction entre un brouillard d'eau et une flamme de diffusion méthane-air à l'échelle laboratoire. Les contributions relatives des différents mécanismes contribuant à l'extinction y sont étudiées et une comparaison est faite avec les résultats expérimentaux. Dans la référence [54], la simulation numérique concerne l'interaction avec des petits feux de nappe de méthanol. La phase gazeuse et le brouillard d'eau sont traités à l'aide d'équations sous forme Eulerienne. Les résultats montrent qu'au voisinage de la surface, l'effet de refroidissement l'emporte sur l'effet de dilution, mais que lorsque l'on s'éloigne de celle-ci, la contribution des deux effets devient sensiblement équivalente. L'effet de la taille des gouttelettes est également examiné. Il est montré que les gouttelettes les plus fines sont entraînées plus rapidement que les plus grosses dans la flamme, contribuant mieux à son extinction. Dans la référence [55], les auteurs présentent des résultats de simulation d'extinction de feux dans des locaux de grande taille. Des études paramétriques sont menées dans le but d'optimiser les caractéristiques d'injection : effet de la granulométrie des gouttelettes, de la vitesse et de la densité d'injection, de la localisation des buses et de leur orientation. Les zones du local dans lesquelles les gouttelettes s'évaporent le mieux et absorbent le plus d'énergie sont identifiées en fonction de ces paramètres. Les résultats montrent qu'à paramètres

d'injection similaires, l'efficacité d'extinction maximale est obtenue avec une configuration d'injection en partie haute (buses localisées sous plafond). Il est aussi montré que ces résultats obtenus en espace confiné viennent conforter les enseignements tirés des travaux menés précédemment par les auteurs, à petite échelle, sur la dynamique de l'interaction brouillard d'eau/flamme de diffusion.

Plus récemment, Consalvi et coll. [15] ont proposé une modélisation multiclasse basée sur l'approche Eulerienne-Eulerienne du mélange des deux phases. Dans un volume de contrôle, différentes classes de liquide sont présentes dans la phase gazeuse. Chaque classe de liquide est constituée de gouttelettes ayant localement les mêmes propriétés thermophysiques et le même diamètre initial, les mêmes vitesse et angle d'injection. Là encore, l'effet puits de chaleur est montré comme étant la contribution la plus importante à l'extinction. Le rayonnement est modélisé avec une attention toute particulière, incluant les contributions des particules de suie, des gouttelettes d'eau et des produits de combustion. Les résultats montrent que l'atténuation du rayonnement par le brouillard est la conséquence d'un double effet : réduction de l'énergie émise par la flamme et atténuation de cette énergie par les gouttelettes. Le rôle de la diffusion du rayonnement par ces gouttelettes est clairement mis en évidence, tout comme l'influence de la concentration en particules de suie. Dans la gamme de diamètres de gouttelettes considérée, il est établi qu'il y a deux régimes distincts : un régime où le foyer est activé par les gouttelettes les plus fines, et un régime où le feu peut être éteint par les gouttelettes les plus grosses. Les gouttelettes de très petite taille combinent en effet un faible potentiel d'extinction et une aptitude à bien mélanger les vapeurs combustibles et l'air. Notons que ce constat vient conforter les observations reportées dans nombre d'études précédentes. Cette modélisation a été appliquée à deux configurations : la première axisymétrique pour laquelle la buse d'injection est localisée à la verticale du foyer et une seconde plus applicative, représentative d'un système d'aspersion en tunnel ventilé : Nmira [56], Nmira et coll. [57]. Elle a permis d'étudier l'influence des caractéristiques d'un brouillard d'eau sur la puissance d'un foyer ou sur son extinction consécutive à l'inhibition de la dégradation thermique du combustible en feu. La première configuration, de nature plus académique, met en évidence l'importance du caractère polydispersé du brouillard sur l'efficacité et le délai d'extinction. Les brouillards polydispersés apparaissent plus efficaces que les brouillards monodispersés et il existe un débit minimal pour obtenir l'extinction. La seconde configuration, de caractère tridimensionnel, met en évidence le rôle important de la dynamique des gouttelettes, conditionnée par la ventilation. L'interaction entre le brouillard d'eau et le feu se caractérise par l'établissement d'un état stationnaire, pour lequel le taux de pyrolyse, de vaporisation de l'eau, de réaction de combustion, ainsi que le niveau de température dans le tunnel montrent un comportement asymptotique, lorsque le débit d'eau est augmenté.

Pour ce qui est des applications pratiques, les domaines pour lesquels l'installation de systèmes à brouillard d'eau a été envisagée, testée et mise en œuvre avec des résultats probants, ces dernières années, sont extrêmement nombreux. Les travaux correspondants font, pour la plupart, l'objet de rapports d'études techniques qui ne sont généralement pas diffusés en tant que documents de la littérature ouverte et les enseignements que l'on peut en tirer sont le plus souvent spécifiques à chacune des applications, même si on y retrouve toujours les influences conjuguées des modes d'action fondamentaux. Aussi, nous contenterons-nous de décliner, pour mémoire, les multiples domaines de protection

envisagés :

- salles de machines de navires
- cabines ou espaces de circulation à bord de navires
- moteurs d'avions
- soutes d'avions
- espaces passagers des avions
- véhicules militaires de combat
- plates-formes de forage en mer
- bibliothèques
- salles d'archives
- musées
- monuments
- stockages de liquides inflammables
- parkings souterrains
- armoires électriques, transformateurs et chemins de câbles
- salles de contrôle
- salles informatiques
- centraux téléphoniques
- tunnels tant routiers que ferroviaires

I.2.5 Conclusion

La recherche sur l'extinction des feux à l'aide de brouillards d'eau, qui s'est intensifiée au cours de ces dernières années, amène aux constats suivants :

- leur efficacité est incontestable et ils sont caractérisés par une faible consommation d'eau par rapport aux techniques plus conventionnelles,
- ils se révèlent être :
 - ◊ un moyen extincteur de choix, très efficace pour les feux en milieu confiné. Les gaz de combustion pouvant être recyclés dans le panache et pouvant entraîner les gouttelettes en suspension ou la vapeur, le traitement consistera à introduire une quantité d'eau suffisante dans le confinement, ce qui conduira à utiliser comme paramètre dimensionnant une quantité totale d'eau par unité de volume de compartiment.
 - ◊ un moyen extincteur possible pour les feux en milieu ouvert, à la condition que les jets de gouttelettes puissent bien pénétrer au sein de la flamme, pour que soit atteinte simultanément dans toutes les zones de celle-ci, une combinaison critique température/concentration en oxygène telle que la combustion ne puisse plus être entretenue. Le paramètre dimensionnant est alors une quantité d'eau par unité de volume de flamme.

Des systèmes d'aspersion par brouillard d'eau fixes ont déjà été installés au cours des dernières années dans des tunnels européens :

- Italie, Virgolo en 2006
- Espagne, M30, Madrid en 2007
- Russie, Silverforest, Moscou en 2008
- France, A86, Paris en 2006
- Pays-Bas, Roermond en 2007

- Autriche, Mona Lisa en 2004 et Felberntauern en 2007

Néanmoins, en dépit de la quantité et de la qualité des travaux réalisés, il n'apparaît pas encore possible de déterminer à l'avance, par modélisation et sans validation expérimentale, le positionnement et l'espacement des buses, les débits à appliquer, la taille des gouttelettes, pour un système susceptible de traiter un feu de puissance donnée, à l'intérieur d'un espace confiné-ventilé de géométrie et de dimension particulières.

Il en résulte qu'encore aujourd'hui, tout nouveau système de brouillard d'eau doit être validé sur un feu réel à échelle réelle. Cela conduit à un problème de taille déjà souligné : la mise en œuvre d'essais extrêmement coûteux et par conséquent, en nombre limité. D'où l'idée défendue ici, de substituer à ceux-ci des essais en réduction d'échelle.

Chapitre II

Réduction d'échelle - Similitudes

Sommaire

II.1	Identification des groupements adimensionnels de paramètres mis en jeu dans la problématique considérée	51
II.1.1	Feu en configuration tunnel ventilé longitudinalement	51
II.1.1.1	Conservation de la masse	52
II.1.1.2	Quantité de mouvement	53
II.1.1.3	Energie	54
II.1.1.4	Transferts thermiques vers les parois	55
II.1.2	Brouillards d'eau	58
II.1.2.1	Travaux de Heskestad [64]	58
II.1.2.2	Travaux de Jayaweera [65] et Yu et coll. [66]	61
II.2	Récapitulatif des relations de similitude	63

Réduction d'échelle - Similitudes

II.1 Identification des groupements adimensionnels de paramètres mis en jeu dans la problématique considérée

Lors d'une étude d'incendie en tunnel à traiter par un système d'aspersion, il est nécessaire d'être en mesure de prévoir le déroulement du feu, le fonctionnement dudit système, ainsi que l'interaction entre les deux.

Mais, nous l'avons vu, la compréhension des phénomènes n'est pas encore suffisante pour que ce couplage puisse être modélisé sur la base de principes généraux, et la validation des performances par l'expérience reste toujours indispensable. Cependant, la mise en œuvre d'expérimentations en vraie grandeur est toujours complexe et lourde, et donc onéreuse. Les grandes dimensions du dispositif rendent très difficile une instrumentation sophistiquée pour des mesures fiables. De plus, et surtout, le nombre d'essais est le plus souvent limité par la contrainte de coût, et le manque de répétabilité induit des doutes sur la validité des résultats ainsi que sur les conclusions générales que l'on peut en tirer.

Sur des manipulations expérimentales de plus petite taille, ces problèmes de répétabilité et d'instrumentation sont réduits. Néanmoins, il est alors nécessaire d'être certain que les résultats obtenus à échelle réduite sont transposables à la vraie grandeur.

Les études en réduction d'échelle sont d'usage courant dans les domaines aéronautique et hydraulique. Ces dernières années, elles ont été étendues au domaine de la science du feu, où se trouvent étroitement associées combustion et aéronautique. Les bases de la démarche sont détaillées dans de nombreux articles ou ouvrages de référence ([58–63]).

La complexité des phénomènes impliqués fait cependant que, pour assurer une similitude parfaite entre maquette et vraie grandeur, le nombre de groupements de paramètres à préserver est souvent très élevé et que peuvent apparaître des incompatibilités. Ce constat a d'ailleurs parfois servi d'argument aux détracteurs de la méthode (malgré tout de moins en moins nombreux). Cela ne doit pas en effet dissuader d'avoir recours à ce type de démarche dans la mesure où il n'est plus à prouver qu'une similitude même partielle peut se montrer très performante, à la condition que les paramètres prédominants du système soient bien identifiés, pris en compte et correctement corrélés.

II.1.1 Feu en configuration tunnel ventilé longitudinalement

Les lois dictant le respect des similitudes sont établies ici à partir des équations de conservation contrôlant le système. Les équations correspondantes sont rappelées en tenant compte du fait que différents phénomènes ne sont pas considérés dans la mesure

où leur contribution peut être négligée. Ainsi, les flammes de diffusion représentatives d'incendies ne dépendent pas (ou très peu) de la cinétique chimique. De même, les effets thermo-diffusifs et la dissipation visqueuse n'ont qu'une faible importance. Par ailleurs, dans un souci d'allègement de l'écriture, seule la forme monodimensionnelle des équations est présentée.

Les symboles sont ceux classiquement adoptés :

C_p	Capacité calorifique massique	T	Température
g	Accélération gravifique	u	Vitesse
k	Conductivité thermique	x	Coordonnée longitudinale
p	Pression	μ	Viscosité dynamique
t	Temps	ρ	Masse volumique

Les équations peuvent être rendues adimensionnelles en introduisant les paramètres caractéristiques suivants :

T_0, p_a, ρ_0	Valeurs initiales ou ambiantes pour la température, la pression et la masse volumique
l	Dimension caractéristique pour le tunnel ¹
V	Vitesse caractéristique de l'écoulement longitudinal
τ	Temps caractéristique
p_e	Ecart de pression

Les variables adimensionnelles sont notées "prime". On aura donc :

- $\rho' = \frac{\rho}{\rho_0}$
- $u' = \frac{u}{V}$
- $x' = \frac{x}{l}$
- $T' = \frac{T}{T_0}$
- $t' = \frac{t}{\tau}$ mais $t' = \frac{V}{l} \cdot t$ donc $\tau = \frac{l}{V}$

Par ailleurs, les groupes de variables sans dimension sont notés Π . De plus, le symbole \propto représente l'égalité dimensionnelle. Enfin, le symbole s représente le rapport d'échelle entre le prototype et la vraie grandeur. Si l_1 est la dimension caractéristique pour le tunnel prototype et l_2 la dimension caractéristique pour le tunnel en vraie grandeur, $s = \frac{l_1}{l_2}$.

II.1.1.1 Conservation de la masse

L'équation de conservation de la masse s'écrit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0 \quad (\text{II.1})$$

¹Le tunnel expérimental étant de section circulaire, il s'agira par exemple de son diamètre

$$\frac{\rho_0}{\tau} \cdot \frac{\partial \rho'}{\partial t'} + \frac{V \cdot \rho_0}{l} \cdot \frac{\partial \rho' u'}{\partial x'} = 0 \quad (\text{II.2})$$

soit :

$$\frac{l}{V\tau} \cdot \frac{\partial \rho'}{\partial t'} + \frac{\partial \rho' u'}{\partial x'} = 0 \quad (\text{II.3})$$

On voit apparaître un premier groupement adimensionnel $\Pi_1 = \frac{l}{V\tau}$ qui doit être préservé pour que les systèmes soient en similitude. Ce premier groupe définit l'échelle de temps, et on a bien sûr $\tau \propto \frac{l}{V}$.

II.1.1.2 Quantité de mouvement

L'équation de conservation de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial \hat{p}}{\partial x} + g(\rho_0 - \rho) + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (\text{II.4})$$

avec $\hat{p} = p - p_a$ où p_a est la pression ambiante et $\frac{dp_a}{dx} = -\rho g$.

Après quelques simplifications et regroupements, il vient :

$$\rho' \cdot \left(\Pi_1 \frac{\partial u'}{\partial t'} + u' \frac{\partial u'}{\partial x'} \right) = -\Pi_2 \frac{\partial \hat{p}}{\partial x'} + \Pi_4 (1 - \rho') + \Pi_3 \frac{\partial^2 u'}{\partial x'^2} \quad (\text{II.5})$$

On voit apparaître trois autres groupements adimensionnels qui doivent être préservés :

- $\Pi_2 = \frac{p_e}{\rho_0 V^2}$
- $\Pi_3 = \frac{\mu}{\rho V l}$
- $\Pi_4 = \frac{g l}{V^2}$

Poser Π_2 égal à 1 (comme pour Π_1 précédemment), permet de déterminer un paramètre caractéristique simplement fonction des autres variables. Quoi qu'il en soit, dans l'écoulement considéré, les effets de pression sont négligeables.

Π_3 est l'inverse du nombre de Reynolds Re , qui représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité.

Π_4 est l'inverse du nombre de Froude. Ce terme est multiplié par $(1 - \rho') = 1 - \rho/\rho_0 = \frac{\Delta\rho}{\rho_0}$ qui est la variation relative de masse volumique. Le produit $\frac{g l}{V^2} \frac{\Delta\rho}{\rho}$ est en fait le nombre de Richardson qui représente le rapport entre les forces de flottabilité et les forces d'inertie.

Il est important ici de faire deux remarques :

1. En pratique le nombre de Reynolds est très élevé dans les tunnels réels et il ne peut être préservé entre prototype et vraie grandeur. Or, pour des écoulements s'apparentant à des écoulements en conduite, une transition vers l'état turbulent se produit pour une valeur critique du nombre de Reynolds supérieure à 2000. Au-delà d'une valeur suffisamment

supérieure à cette valeur critique, l'écoulement moyen ne dépend pratiquement plus de ce nombre et il suffit donc de s'assurer que, sur le prototype, sa valeur soit au moins égale à 10000 pour garantir un régime d'écoulement turbulent représentatif de la réalité.

2. Préserver le nombre de Richardson dans sa "globalité" reviendrait à définir "une échelle de différence relative de masse volumique". Cette façon de procéder conserverait la similitude géométrique, et donc celle des volumes, mais pas celle des masses volumiques et donc des masses. Cette absence de similitude sur les masses volumiques conduirait, sur le prototype, à des champs de vitesse qui pourraient être très différents de ceux du tunnel réel. Il n'y aurait donc plus de similitude assurée entre prototype et tunnel.

Il convient donc de respecter la similitude séparément pour le nombre de Froude et pour la variation de masse volumique.

Etant donné que pour tous les feux, on peut considérer que l'écart relatif de masse volumique $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$ est sensiblement le même, il conviendra de s'assurer de la seule préservation du nombre de Froude, ce qui revient à conserver l'échelle cinématique : $\frac{l}{V^2}$:

$$V \propto l^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.6})$$

II.1.1.3 Energie

$$\rho \cdot C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{Q}''' + \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{II.7})$$

où \dot{Q}''' représente le terme source volumique d'énergie. En négligeant le terme de variation de pression, il vient :

$$\rho' \left(\Pi_1 \frac{\partial T'}{\partial t'} + u' \cdot \frac{\partial T'}{\partial x'} \right) = \underbrace{\frac{\mu}{\rho_0 V l}}_{\Pi_3} \cdot \frac{k}{\mu C_p} \frac{\partial^2 T'}{\partial x'^2} + \frac{\dot{Q}''' l}{\rho_0 V C_p T_0} \quad (\text{II.8})$$

On voit apparaître à nouveau Π_3 , mais aussi $\Pi_5 = \frac{k}{\mu C_p}$ qui est l'inverse du nombre de Prandtl. Ce nombre, qui fait intervenir les propriétés k , μ et C_p de l'écoulement, se trouve préservé entre prototype et vraie grandeur.

Pour ce qui est du terme source, on peut écrire :

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q}''' l}{\rho_0 V C_p T_0} &= \frac{\left(\frac{\dot{Q}}{l^3} \cdot l \right)}{\rho_0 V C_p T_0} \\ &= \frac{\dot{Q}}{l^2 \rho_0 V C_p T_0} \end{aligned} \quad (\text{II.9})$$

On peut introduire ici le nombre de Froude $Fr = \frac{V^2}{gl}$:

$$\frac{\dot{Q}}{l^2 \rho_0 F r^{\frac{1}{2}} l^{\frac{1}{2}} g^{\frac{1}{2}} C_p T_0} = \frac{\dot{Q}}{\sqrt{F r} \rho_0 l^{\frac{5}{2}} \sqrt{g} C_p T_0} \quad (\text{II.10})$$

On voit alors apparaître un nombre connu sous le nom de *Nombre de Zukoski* du nom du chercheur ayant introduit son usage dans la modélisation des feux :

$$\Pi_6 = \frac{\dot{Q}}{\rho_0 l^{\frac{5}{2}} \sqrt{g} C_p T_0} \quad (\text{II.11})$$

Puisque $\Pi_4 = F r^{-1}$ doit être préservé, on voit qu'il y aura similitude, en terme de puissance du foyer entre prototype et vraie grandeur, si le rapport $\frac{\dot{Q}^2}{l^5}$ est préservé.

II.1.1.4 Transferts thermiques vers les parois

Les études en réduction d'échelle relatives à des feux se développant en milieux confinés-ventilés nécessitent qu'une attention toute particulière soit portée aux échanges et pertes de chaleur.

Pour deux structures géométriquement similaires, on cherche à avoir des températures et des vitesses identiques en des points de coordonnées en similitude ($x' = \frac{x}{l}$, $y' = \frac{y}{l}$ et $z' = \frac{z}{l}$ où l est la grandeur caractéristique) et à un instant respectant l'échelle temporelle $t' = \frac{t}{\tau} = \frac{tV}{l} = t\sqrt{\frac{g}{l}}$ (ici en similitude de Froude).

Or, nous avons vu que le respect du nombre Π_6 imposait que la puissance soit choisie en accord avec la condition $\dot{Q} \propto l^{\frac{5}{2}}$. La conséquence est que, si tous les échanges et pertes de chaleur suivent la même condition ($\propto l^{\frac{5}{2}}$), les températures et les vitesses seront bien en similitude d'une échelle à l'autre.

Au cours d'un incendie, comme nous l'avons mentionné au chapitre I, l'énergie libérée par le foyer est transmise à l'environnement, pour partie par rayonnement (fraction radiative) et pour la partie restante de manière convective par le flux du panache. D'une façon très générale, la fraction radiative dépend du/ou des combustibles considérés mais est de l'ordre de 30 %. Dans la configuration qui nous intéresse ici, tunnel longitudinalement ventilé, l'essentiel de l'énergie générée par le foyer est donc convectée par l'écoulement établi par le ventilateur d'extraction. Puisque les structures vraie grandeur et prototype sont géométriquement en similitude (dimension et vitesse) et que les puissances des foyers le sont aussi, on peut faire l'hypothèse que c'est une fraction constante de l'énergie générée qui sera évacuée ainsi par extraction vers l'extérieur.

Considérons en premier lieu plus particulièrement l'échange de chaleur convectif vers les parois du tunnel. Cet échange peut être exprimé sous la forme d'une simple loi de Newton $\dot{Q}_c = h_c S_p \Delta T$, S_p représentant la surface de paroi. Comme pour le groupe adimensionnel Π_6 qui représente en fait le rapport de la puissance générée par le foyer sur le flux enthalpique, on peut considérer un groupe adimensionnel Π_7 représentant le rapport des pertes d'énergie par convection aux parois sur le flux enthalpique. Il vient alors :

$$\Pi_7 = \frac{h_c l^2 T_\infty}{\rho_0 C_p T_\infty \sqrt{g} l^{\frac{5}{2}}} = \frac{h_c}{\rho_0 C_p g^{\frac{1}{2}} l^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{II.12})$$

Le flux de chaleur convectif est donc tel que :

$$\dot{Q}_c'' = h_c \Delta T \propto l^{\frac{1}{2}}$$

et les pertes de chaleur par convection aux parois varient comme cela est requis $\propto l^2 \times l^{\frac{1}{2}} = l^{\frac{5}{2}}$

En fait, cela peut sans doute se concevoir dans la zone foyer où les flammes et le panache thermique viennent impacter la voûte en structures fortement turbulentes et où h_c ne peut être aisément et simplement corrélé à des conditions d'écoulement. En revanche, lorsqu'on s'éloigne du foyer, ce coefficient de transfert de chaleur convectif aux parois peut être explicitement représenté à partir d'une relation du type $Nu = f(Re, Pr)$, $Nu = \frac{h_c l}{k}$ étant le nombre de Nusselt, représentant le rapport de la résistance conductive sur la résistance convective, et $Pr = \frac{C_p \mu}{k}$ étant le nombre de Prandtl, représentant le rapport entre la viscosité cinématique et la diffusivité thermique. Soit :

$$h_c \propto \frac{k}{l} Re^n Pr^m$$

Comme l'écoulement est turbulent, la relation applicable est de la forme :

$$Nu = f(Re^{\frac{4}{5}}, Pr^{\frac{1}{3}})$$

et il vient :

$$h_c \propto \frac{k}{l} \left(\frac{\rho_0 g l^{\frac{3}{2}}}{\mu} \right)^{\frac{4}{5}} \propto l^{\frac{1}{5}}$$

Le flux de chaleur par convection est donc tel que :

$$\dot{Q}_c'' = h_c \Delta T \propto l^{\frac{1}{5}}$$

et les pertes de chaleur par convection aux parois vont varier selon $\propto l^2 \cdot l^{\frac{1}{5}}$. On voit là que la règle de similitude en $\frac{5}{2}$ requise n'est plus respectée.

Intéressons-nous maintenant aux transferts de chaleur par rayonnement. On sait que ce mode de transfert ne peut être parfaitement préservé en similitude. En effet, pour un milieu optiquement épais, l'émissivité ϵ des gaz peut être exprimée sous la forme :

$$\epsilon \simeq 1 - e^{-k_{abs} l}$$

k_{abs} étant le coefficient d'absorption.

Un groupement adimensionnel Π_8 peut être défini comme l'épaisseur optique du milieu

$$\Pi_8 = k_{abs} l \tag{II.13}$$

Cette condition implique que k_{abs} varie comme l^{-1} . Cela ne serait concevable qu'en utilisant pour le prototype un (ou des) combustibles générant plus de suies, ce qui est bien entendu impossible à envisager.

Se pose également et surtout le problème de l'échauffement des parois par conduction, échauffement qui conditionne leur température de surface et donc le rayonnement en retour

vers la surface du combustible, l'équilibre énergétique à cette surface et, par conséquent en fine, la vitesse de combustion et la puissance du foyer. Cet échauffement conductif va dépendre des caractéristiques thermophysiques des matériaux, conductivité thermique k , capacité calorifique massique C_p , masse volumique ρ , ainsi que de leur épaisseur.

Une similitude rigoureuse des transferts thermiques est donc, d'une façon générale, difficilement envisageable. Toutefois, il est toujours possible d'adopter une stratégie de similitude "partielle", à la condition d'établir celle-ci sur la base d'une analyse pertinente de la contribution des différents phénomènes impliqués, dans le cadre de la configuration d'intérêt.

Pour la configuration tunnel qui nous intéresse ici, nous pouvons adopter la démarche qui suit.

Nous considérons, en première approche, que les échanges thermiques avec la voûte sont prépondérants à l'aplomb du foyer et de son proche voisinage (les transferts thermiques, particulièrement par convection, dus à l'écoulement loin du foyer sont considérés comme négligeables comme évoqué plus haut). Le flux net au niveau de la surface de la voûte est fonction du rayonnement et de la convection depuis le foyer et du rayonnement en retour depuis la voûte. Il convient alors de comparer la température interne de la voûte, qui évolue dans le temps, entre la situation vraie grandeur et le prototype.

Une autre hypothèse peut être faite ici : pour un tunnel vraie grandeur comme pour le prototype, les parois peuvent être considérées comme des milieux semi-infinis où toute la chaleur transmise est emmagasinée (il n'y a aucune perte par rayonnement ou convection vers l'extérieur). Cette hypothèse se montrera vérifiée avec le prototype utilisé pour l'étude dans la mesure où, pour tous les essais réalisés et quelle que soit leur durée (jusqu'à vingt minutes), il n'a jamais été constaté d'échauffement perceptible sur la paroi extérieure du prototype.

Enfin, les parois d'un tunnel vraie grandeur et du prototype sont considérées comme constituées d'un béton présentant des propriétés thermophysiques k , C_p et ρ identiques.

La réponse thermique de la voûte peut être appréciée à partir de la réponse classique d'un mur semi-infini soumis à un niveau de flux constant. L'élévation de température de la paroi interne de la voûte sera alors reproduite pour un temps t tel que :

$$t \propto \dot{Q}_{voûte}^{-2}$$

Si $\dot{Q}_{voûte}^{-2}$ est le flux de chaleur surfacique transmis à la voûte. Or nous avons vu que pour les différentes échelles, la quantité $\frac{\dot{Q}}{l^{\frac{5}{2}}}$ devait être préservée. Les flux de chaleur surfaciques $\dot{Q}_{voûte}$ vont donc varier comme $\frac{l^{\frac{5}{2}}}{l^2}$, c'est-à-dire $l^{\frac{1}{2}}$, et il en résulte que t va varier comme l^{-1} .

Il en résulte que la température de voûte du prototype sera similaire à celle de la vraie grandeur avec un décalage de temps tel que :

$$t_{\text{vraie grandeur}} = 0,3t_{\text{prototype}} \quad (\text{II.14})$$

Cette situation sera celle rencontrée dans le cas d'un feu dont le débit calorifique maximum est établi très rapidement, comme un feu de nappe. Cependant, on peut faire l'hypothèse que l'approche pourra également s'appliquer pour le cas d'un feu de solide pour

lequel l'augmentation de puissance est certes moins rapide, mais qui montre généralement un plateau de puissance assez long vis-à-vis de cette période de croissance.

Mais, en situation d'usage d'un système d'aspersion fixe automatisé, on pourra, dans tous les cas, s'attendre à une puissance contenue à un niveau peu élevé et donc à une sollicitation thermique faible des parois.

II.1.2 Brouillards d'eau

II.1.2.1 Travaux de Heskestad [64]

Heskestad [64] fut le premier à proposer des lois de similitude dans le cas de feux confinés soumis à une aspersion d'eau. Pour ce faire, il s'est basé sur les corrélations établies pour des feux sans aspersion présentées dans la référence [61], préservant le nombre de Froude et les différences de température. Sont pris en compte :

- l'interaction dynamique entre les gouttelettes et un écoulement et leur évaporation
- l'atténuation du rayonnement
- les paramètres d'injection de l'eau

Premièrement, le respect de la similitude concernant l'interaction dynamique entre les gouttelettes et un écoulement impose une condition sur la mise à l'échelle du diamètre de goutte d . La démarche est la suivante :

Le coefficient de traînée $C_{D,g}$ d'une gouttelette est exprimé sous la forme :

$$C_{D,g} = C_{ste} \cdot \underbrace{\left(\frac{d \cdot |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_{ec}|}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}}}_{Re_D} \quad (\text{II.15})$$

avec :	$C_{D,g}$	[-]	Coefficient de traînée d'une gouttelette
	C_{ste}	[-]	Constante numérique
	Re_D	[-]	Nombre de Reynolds de la gouttelette
	u_g	[m.s ⁻¹]	Vitesse de la gouttelette
	u_{ec}	[m.s ⁻¹]	Vitesse de l'écoulement
	ν	[m ² .s ⁻¹]	Viscosité cinématique de l'eau

Le nombre de Reynolds de la gouttelette s'exprimant comme :

$$Re_D = \frac{d \cdot |u_g - u_{ec}|}{\nu_{ec}} \quad (\text{II.16})$$

avec :	Re_D	[-]	Nombre de Reynolds de la gouttelette
	d	[m]	Diamètre de la gouttelette
	u_g	[m.s ⁻¹]	Vitesse de la gouttelette
	u_{ec}	[m.s ⁻¹]	Vitesse de l'écoulement
	ν_{ec}	[m ² .s ⁻¹]	Viscosité cinématique de l'écoulement

L'équation de mouvement d'une seule gouttelette s'écrit :

$$m \frac{d\mathbf{u}_g}{dt} = m\mathbf{g} - C_{D,g} S_g \frac{1}{2} \rho_{ec} |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_{ec}| (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_{ec}) \quad (\text{II.17})$$

avec :	m	[kg]	Masse d'une gouttelette d'eau
	\mathbf{u}_g	[m.s ⁻¹]	Vitesse d'une gouttelette
	\mathbf{g}	[m.s ⁻²]	Accélération de la pesanteur
	$C_{D,g}$	[-]	coefficient de traînée de la gouttelette
	S_g	[m ²]	Surface frontale de la gouttelette
	ρ_{ec}	[kg.m ⁻³]	Masse volumique du gaz de l'écoulement
	\mathbf{u}_{ec}	[m.s ⁻¹]	Vitesse de l'écoulement

On peut remplacer $C_{D,g}$ par son expression II.15, écrire que $\mathbf{u}_g = \frac{d\mathbf{x}_g}{dt}$ puis normaliser les vitesses par u_0 , les temps par t_0 , les coordonnées par l :

$$\frac{d^2 \frac{\mathbf{x}_g}{l}}{d \frac{t^2}{\tau^2}} = \frac{t_0^2}{l} \mathbf{g} - \left(\frac{3B\rho_{ec}\nu^{\frac{1}{2}}}{4\rho_{H_2O}} \right) \left(\frac{\tau^2 V^{\frac{3}{2}}}{ld^{\frac{3}{2}}} \right) \times \left| \frac{l}{\tau V} \frac{d \frac{\mathbf{x}_g}{l}}{d \frac{t}{\tau}} - \frac{\mathbf{u}_{ec}}{V} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.18})$$

D'après l'équation II.18, les trajectoires des gouttelettes sont similaires si l'on préserve les rapports $\frac{\tau^2}{l}$, $\frac{l}{\tau V}$ et $\frac{V}{d}$. Or $V \propto l^{\frac{1}{2}}$ et $\tau = \frac{l}{V} \propto l^{\frac{1}{2}}$. On peut en déduire que :

$$d \propto u_0 \propto l^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.19})$$

Deuxièmement, la perte de masse par évaporation d'une gouttelette d'eau $\dot{m}_{g,e}$ dans l'air, m étant la masse de la gouttelette, sous réserve que les températures du gaz et de l'eau sont conservées, s'écrit :

$$\dot{m}_{g,e} \propto |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}|^{\frac{1}{2}} d^{\frac{3}{2}} \quad (\text{II.20})$$

Soit :

$$\dot{m}_{g,e} \propto V^{\frac{1}{2}} d^{\frac{3}{2}} \quad (\text{II.21})$$

Ce qui amène à :

$$\dot{m}_{g,e} \propto l \quad (\text{II.22})$$

De plus, la durée de vie t_{vie} d'une gouttelette peut s'écrire, à partir de II.19 et II.6 :

$$t_{vie} \propto \frac{m}{\dot{m}_{g,e}} \propto \frac{d^3}{\dot{m}_{g,e}} \propto \frac{l^{\frac{3}{2}}}{l} = l^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.23})$$

On peut conclure de l'analyse de l'évaporation des gouttelettes que le taux d'évaporation total \dot{M} doit respecter la relation suivante en fonction de n''' , nombre de gouttelettes par unité de volume :

$$\dot{M} \propto (n''' l^3) \dot{m} \quad (\text{II.24})$$

On peut exprimer le nombre de gouttelettes par unité de volume $n''' = \frac{n}{V}$, n étant la densité de flux de gouttelettes (nombre de gouttelettes par unité de temps et de surface). Cette densité de flux peut s'exprimer en fonction de la densité de flux massique d'eau E (variation de masse par unité de surface)

$$n = \frac{E}{m} \propto \frac{E}{d^3} \quad (\text{II.25})$$

Heskestad exprime la densité de flux massique d'eau E par $E \propto L^{\frac{1}{2}}$, ce qui donne, avec (II.19), (II.6) et (II.24) :

$$\dot{M} \propto l^{\frac{5}{2}} \quad (\text{II.26})$$

Troisièmement, l'atténuation du rayonnement ne peut être mise à l'échelle de façon rigoureuse (voir paragraphe II.1.1.4 en page 56). Heskestad [64] montre que la transmission du rayonnement au sein d'un espace chargé en gouttelettes a tendance à diminuer avec l'augmentation de la longueur caractéristique, donc que le rayonnement dans une installation à échelle réduite se transmet plus loin que dans le cas à échelle réelle. A contrario, l'évaporation des gouttelettes par absorption du rayonnement augmente avec la longueur caractéristique, donc une installation à échelle réduite minimisera ce phénomène.

En ce qui concerne les caractéristiques de la buse, on peut définir un "diamètre efficace de buse" D_{ne} . Ce diamètre permet de considérer deux buses de même angle de brumisation, générant un même type de jet de brouillard (cône plein ou vide par exemple) et de même diamètre efficace comme deux buses géométriquement semblables :

$$D_{ne} = \left[\frac{4 \times \dot{m}_e^2}{(\pi M \rho_{H_2O})} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.27})$$

avec :	D_{ne}	[m]	Diamètre efficace de la buse
	\dot{m}_e	[kg.s ⁻¹]	Débit massique d'eau de la buse
	M	[N ou kg.m.s ⁻²]	Quantité de mouvement des gouttelettes en sortie de buse
	ρ_{H_2O}	[kg.s ⁻¹]	Masse volumique de l'eau

Sous réserve que la buse utilisée à échelle réduite et celle utilisée à échelle réelle soient de même diamètre efficace, les relations de similitude introduites par Heskestad (résumées dans le tableau II.1) se montrent pertinentes. L'auteur a en effet effectué des essais sous hotte qui en attestent [64], mais sur des expérimentations à échelle laboratoire. Il préconise donc de tester ces relations dans des configurations réelles.

Heskestad [64] raisonne à partir de la similitude du débit volumique d'eau en tant que condition nécessaire. Il écrit donc :

$$Q_e \propto D_n^2 \Delta p_{inj}^{\frac{1}{2}} \propto l^{\frac{5}{2}} \quad (\text{II.28})$$

Δp_{inj} est la différence de pression entre le circuit d'eau et la pression ambiante, qui se met en similitude par :

$$\Delta p_{inj}^{1/2} \propto u_{inj} \propto l^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.29})$$

Ce qui donne une condition sur le diamètre de la buse D_n :

$$D_n \propto l \tag{II.30}$$

En ce qui concerne la taille des gouttelettes, l'auteur suppose que pour des buses de géométrie similaire, la taille des gouttes adimensionnée d/D_n dépend du nombre de Weber : $We = \frac{\rho_{H_2O} u_{inj}^2 D_n}{\sigma_{eau}}$ (D_n étant le diamètre de la buse, σ_{eau} la tension superficielle de l'eau et u_{inj} la vitesse d'injection des gouttelettes). Dombrowski et Wolfsohn ont préalablement constaté que les tailles de gouttelettes de buses d'aspersion sont proportionnelles à $\frac{\dot{Q}}{u_{inj}}$.

$$d/D_n \propto We^{-\frac{1}{3}} \tag{II.31}$$

et :

$$d/D_n \propto (\Delta p_{inj} D_n)^{-\frac{1}{3}} \tag{II.32}$$

Ceci donnant une condition sur le diamètre de gouttelette :

$$d \propto l^{\frac{1}{3}} \tag{II.33}$$

Ceci contredit la relation de similitude écrite en II.19. Heskestad considère que tant que l'écart entre les deux échelles considéré est faible (et donc tant que s est relativement proche de 1), on peut retenir $d \propto l^{\frac{1}{2}}$ et que l'erreur commise est minime.

Grandeur	Unité	Relation
Débit d'eau	[m ³ .s ⁻¹]	$\frac{Q_{e2}}{Q_{e1}} = s^{\frac{5}{2}}$
Diamètre de goutte	[m]	$\frac{d_2}{d_1} = s^{\frac{1}{2}}$
Vitesse d'éjection	[m.s ⁻¹]	$\frac{u_{inj,2}}{u_{inj,1}} = s^{\frac{1}{2}}$

TAB. II.1 – Récapitulatif des relations de similitude proposées par Heskestad [64] pour le brouillard d'eau, s étant le facteur d'échelle ($s = \frac{l_2}{l_1}$)

Ces relations permettent de travailler à échelle réduite pour dimensionner un système de brouillard d'eau vraie grandeur dont les facteurs dimensionnants sont :

- le débit d'eau dans la buse,
- la vitesse d'éjection des gouttelettes d'eau,
- la taille des gouttelettes.

II.1.2.2 Travaux de Jayaweera [65] et Yu et coll. [66]

Dans la référence [64], Heskestad fait intervenir le coefficient de traînée d'une goutte pour établir les lois de similitude concernant l'interaction dynamique entre les gouttelettes d'eau et les écoulements. Jayaweera et Yu [65] introduisent un raffinement concernant le coefficient de traînée de la gouttelette (qui dépend fortement de son nombre de Reynolds, voir relation II.16). L'évolution du coefficient de traînée d'un gouttelette sphérique en

fonction de son nombre de Reynolds est illustrée en figure II.1. On peut décomposer cette courbe en deux parties :

- Si $Re_D < 1$, alors le coefficient de traînée varie en Re_D^{-1}
- Si $10 < Re_D < 500$, alors le coefficient de traînée varie en $Re_D^{\frac{1}{2}}$

La mise en évidence de ces deux comportements conduit à ajuster le coefficient de traînée en fonction de ce nombre de Reynolds de la gouttelette. Jayaweera et Yu [65] et Yu et coll. [66] ont étendu les relations proposées par Heskestad [64] aux gouttelettes à très faible nombre de Reynolds que l'on peut rencontrer dans le cas des brouillards d'eau. Ces lois complétées sont résumées dans le tableau II.2

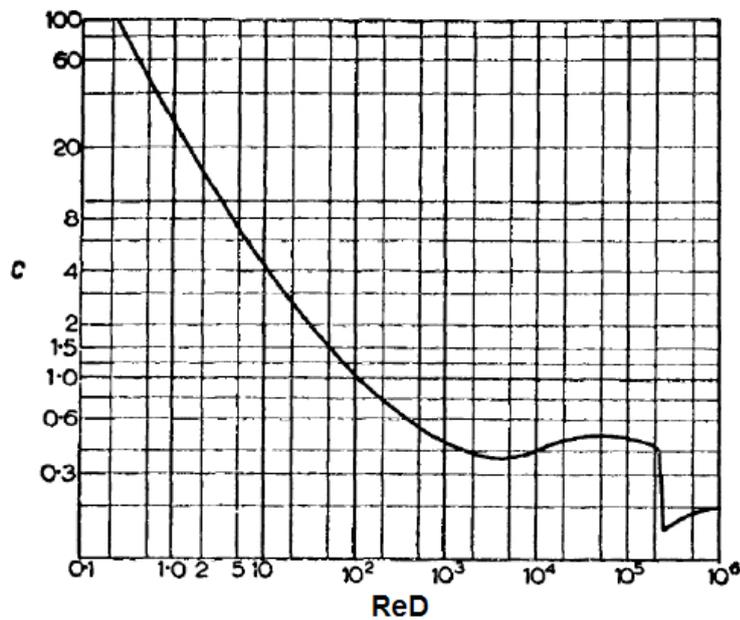


FIG. II.1 – Evolution du coefficient de traînée C d'un gouttelette sphérique en fonction de son nombre de Reynolds Re_D

Grandeur	Symbole	Unité	Relation	Relation
			$Re_D < 1$	$10 < Re_D < 500$
Longueur caractéristique	l	[m]	s	s
Temps	τ	[s]	$s^{\frac{1}{2}}$	$s^{\frac{1}{2}}$
Densité numérique de gouttelettes	N_g	[m ⁻³]	$s^{\frac{3}{4}}$	$s^{\frac{3}{2}}$
Débit volumique d'eau	\dot{V}_{eau}	[m ³ .s ⁻¹]	$s^{\frac{1}{2}}$	$s^{\frac{1}{2}}$
Vitesse d'éjection	u_d	[m.s ⁻¹]	$s^{\frac{1}{2}}$	$s^{\frac{1}{2}}$
Diamètre de goutte	d	[m]	$s^{\frac{1}{4}}$	$s^{\frac{1}{2}}$

TAB. II.2 – Récapitulatif des relations de similitude proposées par Jayaweera et Yu [65] pour un brouillard d'eau - s étant le facteur d'échelle ($s = \frac{l_2}{l_1}$)

II.2 Récapitulatif des relations de similitude

L'ensemble des relations de similitudes utiles dans le présent travail sont résumées dans le tableau II.3

Grandeur	Symbole	Unité	Relation	
			$Re_D < 1$	$10 < Re_D < 500$
Temps	τ	[s]	$s^{\frac{1}{2}}$	$s^{\frac{1}{2}}$
Vitesse	V	[m.s ⁻¹]	$s^{\frac{1}{2}}$	$s^{\frac{1}{2}}$
Puissance du Foyer	\dot{Q}	[W]	$s^{\frac{5}{2}}$	$s^{\frac{5}{2}}$
Débit volumique d'eau	\dot{V}_{eau}	[m ³ .s ⁻¹]	$s^{\frac{1}{2}}$	$s^{\frac{1}{2}}$
Vitesse d'éjection	u_d	[m.s ⁻¹]	$s^{\frac{1}{2}}$	$s^{\frac{1}{2}}$
Diamètre de gouttelettes	d	[m]	$s^{\frac{1}{4}}$	$s^{\frac{1}{2}}$

TAB. II.3 – Récapitulatif des relations de similitude utilisées dans le présent travail, s étant le facteur d'échelle ($s = \frac{l_2}{l_1}$)

Chapitre III

Moyens expérimentaux

Sommaire

III.1 Dispositifs expérimentaux	67
III.2 Démarche expérimentale	68
III.2.1 Galerie d'essai	68
III.2.2 Représentation du foyer	69
III.2.3 Foyers d'heptane	70
III.2.4 Foyers à combustible solide	71
III.2.4.1 Feux de bûchers	71
III.2.4.2 Feux de palettes	73
III.3 Métrologie	76
III.3.1 Mesures de température	77
III.3.2 Mesures de flux rayonnés	80
III.3.3 Mesures de vitesse	81
III.3.4 Mesure de perte de masse du foyer	82
III.3.5 Mesures de concentrations de gaz	82
III.3.6 Mesures d'opacité	83
III.3.7 Dispositif d'acquisition	83
III.3.8 Système d'aspersion par brouillard d'eau	83
III.4 Liste des essais	87

Moyens expérimentaux

III.1 Dispositifs expérimentaux

Comme nous l'avons déjà mentionné au chapitre précédent, les études en maquette représentent une alternative intéressante aux essais en vraie grandeur pour les incendies en milieu tunnel. De part leur taille plus réduite qu'une installation réelle, elles permettent une plus grande souplesse d'utilisation, ainsi qu'une plus grande facilité d'adaptation à l'étude envisagée : il est plus aisé de procéder à des modifications d'instrumentation ou de modifier le dispositif. On regroupe généralement ces maquettes en deux catégories principales :

Les maquettes froides Dans ces maquettes, le mouvement de convection généré par le panache thermique du feu est reproduit par l'injection d'un mélange fluide dans le milieu, dont on fait varier la vitesse et la masse volumique pour reproduire différentes puissances d'incendie. On en distingue deux types : les maquettes gazeuses ou liquides. L'important ici est de conserver la variation relative de masse volumique entre le fluide représentant le panache et celui de l'écoulement. Par exemple, Vauquelin [67] a travaillé avec une maquette à l'échelle 1/20^e, d'une longueur de 9m pour une section rectangulaire de 23,7 cm de hauteur et 40,6 cm de largeur. Le foyer est représenté par injection d'un mélange air-hélium dont le dosage restitue les différences de masse volumique entre l'air ambiant et les gaz de combustion issus du foyer. L'objectif de son étude était de caractériser les écoulements se développant dans la zone de l'incendie, de déterminer les conditions d'existence d'une éventuelle couche de retour et de stratification des fumées.

Pour ce qui est des maquettes liquides, la solution retenue est une analogie hydraulique avec mélange d'un alcool ou d'une saumure (eau salée) pour représenter les fumées chaudes (dans ce cas, similitude avec inversion de la gravité par retournement de la maquette). Mais, dans un incendie, les variations relatives de masse volumique sont importantes (par exemple -80 % pour une élévation de température de 1200°C). Or, de telles valeurs ne peuvent être obtenues avec des alcools ou avec de l'eau salée en similitude inverse, où l'on ne peut guère aller au-delà de ± 20 %.

On voit là la limite majeure de ce type de similitude : on est conduit à respecter la similitude du nombre de Richardson mais pas de façon séparée la similitude du nombre de Froude et de la masse volumique. Il en résulte, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, une masse volumique sur la maquette qui n'est pas en similitude avec celle du tunnel réel.

De plus, sur les maquettes froides gazeuses ou liquides, les pertes thermiques au parois ne peuvent être considérées.

Les maquettes chaudes Ces dispositifs utilisent une source de chaleur de puissance adaptée pour simuler le foyer, permettant de prendre en compte les effets thermiques des phénomènes observés. Différents dispositifs sont envisageables : plaque chaude, brûleur ou véritable foyer (feu de nappe ou de bûcher par exemple).

Vantelon et coll. [68], Guelzim et coll. [69], par exemple, ont mené des études ayant pour support expérimental une maquette à l'échelle 1/30^e, représentation simplifiée d'une galerie de métro parisien, d'une longueur de 3 m et d'une section droite semi-circulaire de 30 cm de diamètre. Le but de l'étude était de déterminer, d'une part, le comportement des fumées et de l'éventuelle formation d'une couche de retour lors de l'application d'une ventilation longitudinale et, d'autre part, l'efficacité de la ventilation et la maîtrise des fumées à proximité d'une station de métro. Le foyer était modélisé à l'aide d'un brûleur à propane de 20 mm de diamètre, pouvant fournir une puissance de 560 W à 1300 W.

Un autre exemple est la maquette utilisée par Saito [70], à l'échelle 1/25^e, qui mesure 21,6 m de long et a une section carrée de 0,3 m de côté disposant d'une portion inclinable. L'objectif était d'étudier l'influence de la vitesse de ventilation et de la pente du tunnel sur l'évolution de la puissance du feu. Pour ce faire, le foyer était représenté par une cuve d'heptane ou de méthanol dont le niveau était maintenu constant. La ventilation, de type longitudinal, permettait d'appliquer des vitesses de ventilation de 0,1 à 1 m.s⁻¹.

Dans notre étude, puisque nous nous intéressons à l'influence des brouillards d'eau sur un foyer, il est nécessaire que celui-ci soit représenté de façon aussi proche que possible d'une situation réelle. Nous utilisons donc une maquette *chaude*.

III.2 Démarche expérimentale

III.2.1 Galerie d'essai

La galerie d'essai retenue pour l'étude est située sur le site du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) de Champs sur Marne, en région parisienne, partenaire de l'étude. Cette galerie d'essai, visible en figure III.1, est composée de 18 tronçons cylindriques en béton armé (dédiés usuellement aux réseaux d'assainissement), d'un diamètre extérieur de 3 m, d'un diamètre intérieur de 2,5 m et d'une longueur de 2,3 m chacun. L'ensemble, une fois assemblé, mesure 43 m de long. La hauteur libre à l'intérieur est de 1,90 m.



FIG. III.1 – Vue d'ensemble de la galerie d'essai

Pour protéger la structure des sollicitations thermiques du foyer, la paroi intérieure

du prototype est protégée par un mortier à base ciment, projeté sur une épaisseur de 50 mm. Afin de reproduire la configuration réelle d'un tunnel, une dalle de béton représente la chaussée. Cette dalle est percée de fourreaux souterrains, dans le sens longitudinal de l'ouvrage, servant à guider et protéger les câbles des capteurs jusqu'à un local métrologie où sont rassemblés les dispositifs d'acquisition des données et d'analyse.

L'écoulement d'air longitudinal dans l'ouvrage est établi par une unité de ventilation mécanique, pouvant fonctionner dans un flux d'air chaud (jusqu'à 350°C). Cette unité est reliée à la galerie par un convergent en acier galvanisé. Celui-ci est équipé de quatre trappes permettant, si nécessaire, de diluer les gaz chauds avant leur contact avec le ventilateur. Cette partie de l'installation est visible en figure III.2.



FIG. III.2 – Vue du convergent et de l'unité de ventilation

Les dimensions de la galerie sont telles que le rapport d'échelle s entre ce prototype et un tunnel routier réel est compris entre 0,25 et 0,35 (ce qui correspond à des tunnels d'une hauteur libre comprise entre 7,5 m et 5,5 m, dimensions usuellement rencontrées). Notons que les rapports d'échelle des diamètres hydrauliques seraient sensiblement identiques. Pour le présent travail, nous avons retenu comme facteur d'échelle $s = 0,3$.

III.2.2 Représentation du foyer

Le travail entrepris a pour but d'étudier l'influence des brouillards d'eau sur des feux de puissance moyenne en tunnel routier. La valeur de référence retenue concernant la puissance du foyer en vraie grandeur est de 30 MW, ce qui correspond à un feu de poids lourd sans chargement dangereux. De plus, d'une façon générale, les systèmes de ventilation des tunnels routiers sont dimensionnés pour extraire les fumées générées par des feux dont la puissance n'excède pas la valeur de référence.

Cette puissance, ramenée à l'échelle de la galerie en utilisant la relation $\dot{Q}_{prototype} = \dot{Q}_{réel} \cdot s^{\frac{5}{2}}$ conduit à un foyer de 1479 kW. Trois types de foyer sont utilisés : feu de nappe d'heptane, feu de bûcher bois et feu de palettes en bois.

III.2.3 Foyers d'heptane

Le premier type de foyer retenu est un feu de nappe d'heptane. L'intérêt de ce type de foyer est que la puissance est directement liée à la surface de la nappe, et que sa montée en régime est rapide. On simule ainsi, par exemple, un feu d'épandage de combustible suite à un accident. En pratique, le combustible est placé dans un bac au-dessus d'une couche d'eau, afin d'éviter que le bac en acier ne monte trop en température et ne réchauffe trop l'heptane. De plus, afin de simuler un feu à l'intérieur de l'habitacle d'un véhicule, chaque essai heptane est doublé d'un essai dit *couvert*, pour lequel une plaque isolante est placée au-dessus du bac, simulant alors le pavillon d'une voiture ou du toit d'une remorque de poids-lourd (figure III.3).



FIG. III.3 – Vue de la couverture du foyer heptane

Nous avons mentionné au chapitre I (relation I.2), que le débit calorifique (ou puissance) d'un foyer était directement lié au débit massique de combustible. Un feu de nappe voit son débit massique surfacique croître avec sa surface, jusqu'à une valeur limite pour des nappes de grande dimension (usuellement 1 ou 2 mètres de diamètre). On peut, d'une manière générale exprimer le débit massique surfacique d'un hydrocarbure liquide selon :

$$\dot{m}'' = \dot{m}_{c,0}'' \cdot (1 - e^{-K \cdot D_{nappe}}) \quad (\text{III.1})$$

avec :	\dot{m}''	[kg.m ⁻² .s ⁻¹]	Débit massique surfacique de combustible
	$\dot{m}_{c,0}''$	[kg.m ⁻² .s ⁻¹]	Débit massique surfacique limite de combustible
	K	[m ⁻¹]	Coefficient caractéristique du combustible considéré
	D_{nappe}	[m]	Diamètre de la nappe

Pour les essais, les données de l'heptane utilisé sont :

- $\dot{m}_{c,0}'' = 0,101 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
- $K = 1,1 \text{ m}^{-1}$

La chaleur de combustion de l'heptane est $\Delta H_c = 44,97 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. La relation III.2 nous donne la puissance d'un feu pour une réaction complète (pour laquelle toutes les vapeurs de combustible générées sont brûlées) :

$$\dot{Q} = S_c \cdot \dot{m}_c'' \cdot \Delta H_c \quad (\text{III.2})$$

avec :	\dot{Q}	[W]	Débit calorifique du foyer
	S_c	[m ²]	Surface de la nappe combustible
	\dot{m}_c''	[kg.m ⁻² .s ⁻¹]	Débit massique surfacique de l'heptane
	ΔH_c	[J.kg ⁻¹]	Chaleur de combustion de l'heptane

Connaissant le débit calorifique du foyer à dimensionner (1479 kW), on détermine la surface de nappe à utiliser : $S=0,543 \text{ m}^2$, correspondant à une nappe circulaire de diamètre 83 cm. On en déduit le débit massique de combustible par unité de surface : $\dot{m}'' = 59 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Le fait d'utiliser une telle cuve sans alimentation en continu (régression de la surface) peut conduire à des effets de bord difficilement quantifiables, mais, de toute façon négligeables dans le cas présent compte tenu de la surface de la nappe.

Pour des raisons d'encombrement, les bacs utilisés doivent être rectangulaires et de largeur 50 cm. On en déduit une longueur de bac de 1,09m. De manière pratique, cette longueur est arrondie à 1 m, nous donnant une surface de nappe de 0.5 m².

III.2.4 Foyers à combustible solide

Deux types de foyers à combustible solide sont utilisés : foyers de type bûcher et foyer d'empilements de palettes. Ces foyers sont plus représentatifs, en gabarit, en répartition de "surfaces cachées" et en cinétique de montée en puissance, de feux de véhicules.

III.2.4.1 Feux de bûchers

Le bûcher considéré ici est un empilement de plusieurs lits croisés de baguettes de section carrée (figure III.4). Ce type de foyer est représentatif de feux de grande surface combustible dont la majorité est plus ou moins cachée. Le caractère compact du foyer fait qu'il est peu ventilé et que l'oxygène n'accède pas facilement aux surfaces intérieures. Cet empilement repose sur un bac dans lequel est versé une mince couche d'heptane servant à l'allumage.

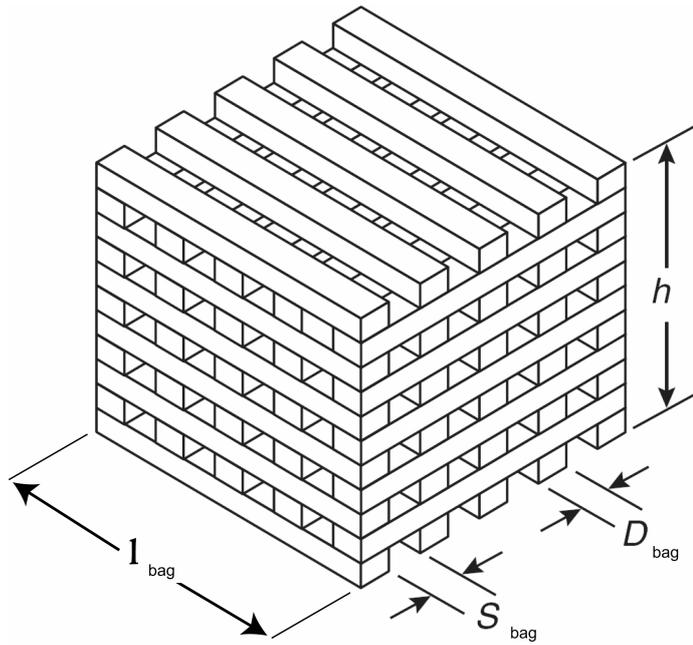


FIG. III.4 – Schéma et dimensions d'un bûcher

avec : D_{bag} [m] Côté de la section des baguettes
 l_{bag} [m] Longueur des baguettes
 h [m] Hauteur du bûcher
 s_{bag} [m] Distance entre les baguettes

La combustion d'un tel bûcher est régie par trois facteurs principaux :

- la surface de combustible mise en jeu
- l'accessibilité du comburant (oxygène) au combustible au travers des interstices
- la ventilation ambiante

L'expression du débit massique couramment utilisée pour ce type de foyer est la suivante [71] :

$$\dot{m}_c = \frac{4}{D_{bag}} \cdot m_{0,bcher} \cdot r \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot r \cdot t}{D_{bag}}\right) \quad (\text{III.3})$$

avec : \dot{m}_c [kg.s⁻¹] Débit massique de combustible
 D_{bag} [m] Côté de la section des baguettes
 $m_{0,bcher}$ [kg] Masse initiale du bûcher
 r [m.s⁻¹] Vitesse de régression de la surface des baguettes de bois constitutives du bûcher
 t [s] Temps

Ce qui permet d'évaluer le débit calorifique du foyer par :

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \cdot \Delta H_c \quad (\text{III.4})$$

avec :

\dot{Q}	[W]	Débit calorifique du foyer
\dot{m}_c	[kg.s ⁻¹]	Débit massique de combustible
ΔH_c	[J.kg ⁻¹]	Chaleur de combustion du combustible

Cette relation donne l'évolution du débit calorifique en fonction du temps à partir du moment où il y a combustion maximale du bois (correspondant à la valeur maximum du débit calorifique). On retient les données suivantes pour son application :

$\Delta H_c = 12 \cdot 10^6$	[J.kg ⁻¹]	Chaleur de combustion correspondant aux résineux (bois constitutif des bûchers)
$r = 2,2 \cdot 10^{-6} \cdot D^{-6}$	[m.s ⁻¹]	Vitesse de régression de la surface des baguettes de bois constitutives du bûcher

Les paramètres h , l_{bag} et D_{bag} sont les seuls sur lesquels on puisse jouer pour dimensionner le bûcher afin que le débit calorifique maximum (à $t=0$) soit de l'ordre de la puissance de référence de 1,5 MW. Pour ce faire, on utilisera un bûcher de 5 baguettes de 10x10x100 cm par couche, espacées d'une largeur de section ($s_{bag}=D_{bag}=0,1$ m) sur 11 couches.

III.2.4.2 Feux de palettes

Les feux de palettes sont très souvent utilisés lors d'essais en vraie grandeur. Ils présentent un foyer de solide différent du précédent, en ce sens qu'il est plus ouvert : il comporte moins de surfaces cachées qu'un bûcher, est plus ventilé et la répartition du bois en son sein n'est pas régulière (figure III.5). Les palettes utilisées pour ce travail sont des palettes normalisées de 120 cm par 80 cm.

L'évaluation du débit calorifique maximal d'un empilement de palettes se fait via la formule suivante (source : [72]) :

$$\dot{Q}_{pal,max} = S_{sol,pal} \cdot 970 \cdot (1 + 2,14h_p) \cdot (1 - 0,027M) \quad (\text{III.5})$$

avec :

$\dot{Q}_{pal,max}$	[kW]	Débit calorifique maximal de l'empilement de palettes
$S_{sol,pal}$	[m ²]	Surface au sol de l'empilement de palette
h_p	[m]	Hauteur de l'empilement de palettes
M	[-]	Taux d'humidité relatif du bois

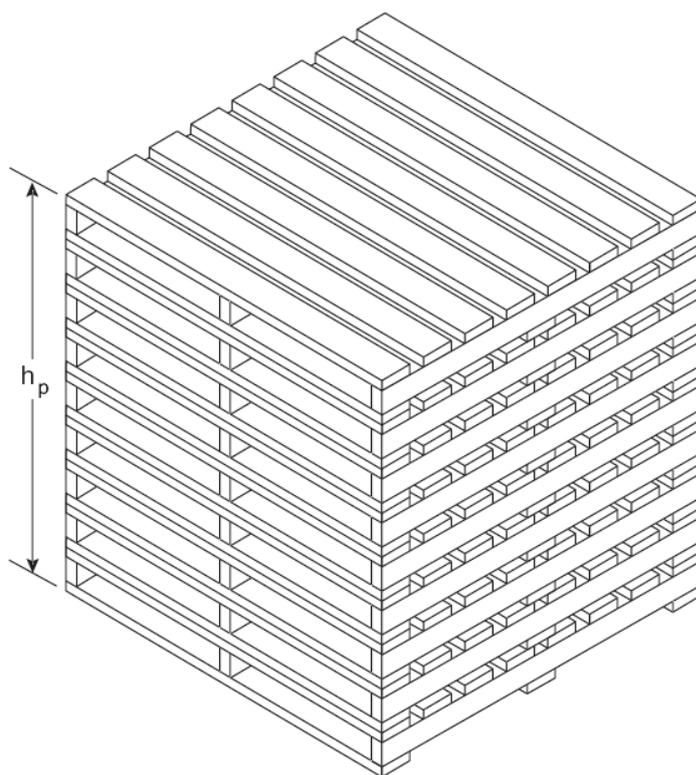


FIG. III.5 – Schéma et dimensions d'un empilement de palettes normalisées

L'évolution du débit calorifique d'un feu d'un empilement de palettes en fonction du temps est présentée sur la figure III.6. La chaleur de combustion du bois est celle utilisée pour les bûchers. Il est à noter que la relation (III.5) est valable pour des empilements élevés et a tendance à surestimer le débit calorifique pour des empilements plus bas (moins de 1 m) (voir figure III.7).

On détermine le nombre de palettes à empiler pour obtenir $\dot{Q} = 1479 \text{ kW}$, les palettes considérées ayant une surface au sol de $0,96 \text{ m}^2$. On considère un bois sec en stockage protégé, soit un bois dont le taux d'humidité est $M = 15 \%$. Pour deux palettes, on obtient ainsi $\dot{Q} = 1479 \text{ kW}$ ce qui correspond à un empilement de 29 cm de haut. Même si les résultats obtenus avec cette relation sont cohérents avec des résultats expérimentaux (figure III.7), la pertinence de l'utilisation d'un foyer aussi peu élevé est discutable car correspondant peu à la géométrie du problème considéré. Un tel foyer n'a que peu de surfaces cachées en regard et ne correspond pas à un scénario de feu au sein d'un véhicule.

L'idée a alors été de mettre en œuvre des palettes à échelle réduite. Le paramètre principal intervenant pour dimensionner le foyer (relation III.5) est la surface au sol de la palette. Afin de la réduire d'un facteur 2, on réduit les dimensions de la palette normalisée d'un facteur $\sqrt{2}$. On obtient des palettes de 85 cm de longueur pour 56,6 cm de largeur avec une épaisseur de 5,5 cm. On constitue alors le foyer avec ces palettes réduites et on obtient dans ces conditions un foyer avec un débit calorifique maximal de 1479 kW pour un empilement de 10 palettes.

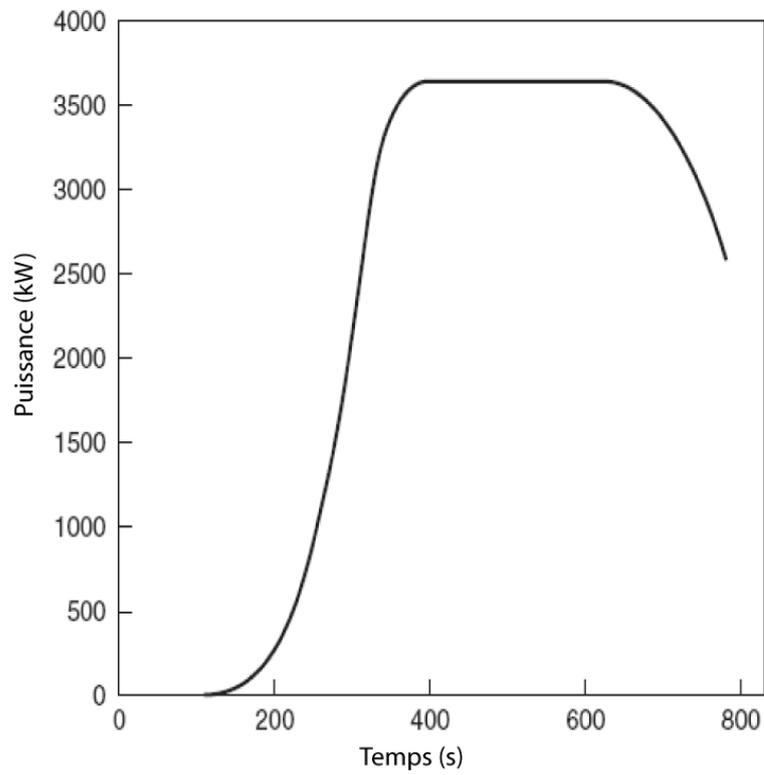


FIG. III.6 – Evolution du débit calorifique pour un empilement de palettes normalisées (source : [72])

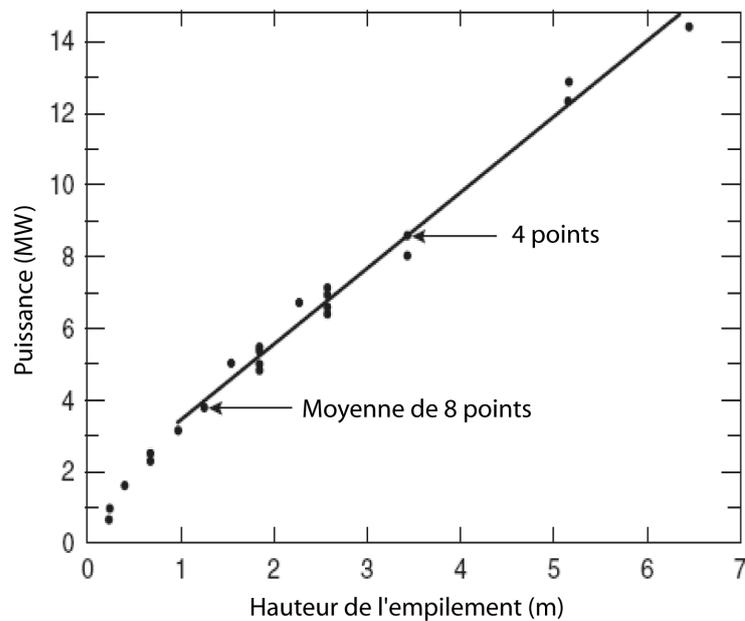


FIG. III.7 – Evolution du débit calorifique d'un empilement de palletes en fonction de sa hauteur (source : [72])

III.3 Métrologie

Le tunnel est instrumenté avec un total de 222 capteurs. Compte tenu de la configuration symétrique par rapport au plan médian vertical longitudinal, le prototype n'a été instrumenté que sur une moitié du tunnel (à l'exception des mesures de composition de gaz). Ceci permet de disposer d'une plus grande densité de capteurs sur la partie instrumentée. Les capteurs sont regroupés en sections, situées de part et d'autre du foyer. La numérotation des sections de mesures se décompose en deux parties :

- L'étiquette renseigne sur le type de mesure effectuée sur cette section :
 - ◇ S : Désignation générique d'une section
 - ◇ T : Température
 - ◇ FM : Fluxmétrie
 - ◇ V : Anémométrie
 - ◇ Compo : Analyse de composition des gaz (CO, CO₂, O₂)
 - ◇ Hr : Hygrométrie
 - ◇ OPA : Opacimétrie
- La valeur numérique renseigne la position de la section de mesure par rapport à la section 0 (correspondant à la position du foyer dans le tunnel, situé à 17,5 m en aval de l'entrée)
 - ◇ Valeur numérique négative : Section située à X mètres en amont du foyer
 - ◇ Valeur numérique positive : Section située à X mètres en aval du foyer

Par exemple, la section T+4 est une section de mesure de température située quatre mètres en aval du foyer, et l'appellation générique de S+7 signifie que l'on décrit un phénomène se déroulant 7 mètres en aval du foyer.

Le récapitulatif des emplacements des différentes sections de mesure est visible en figure III.8, et la répartition des capteurs en figure III.9.

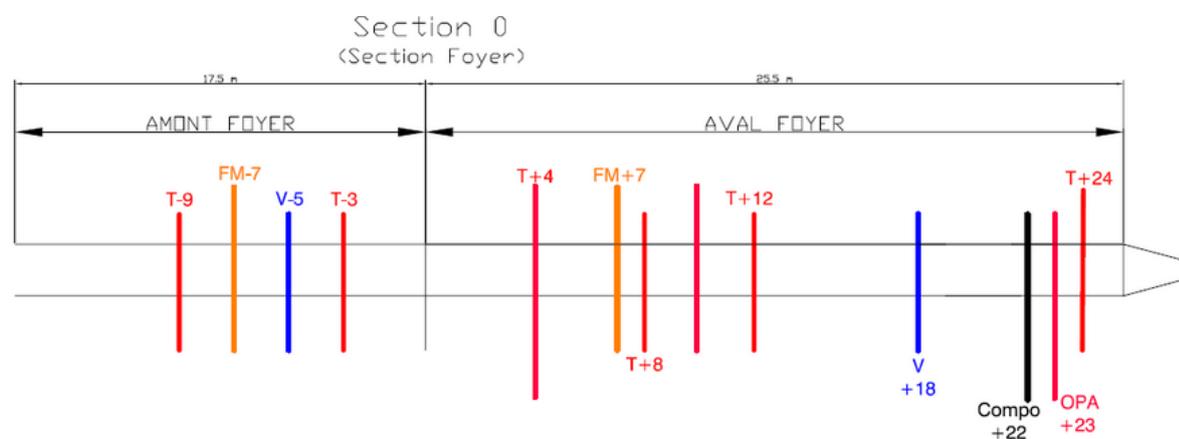


FIG. III.8 – Schéma d'implantation des sections de mesure dans le tunnel

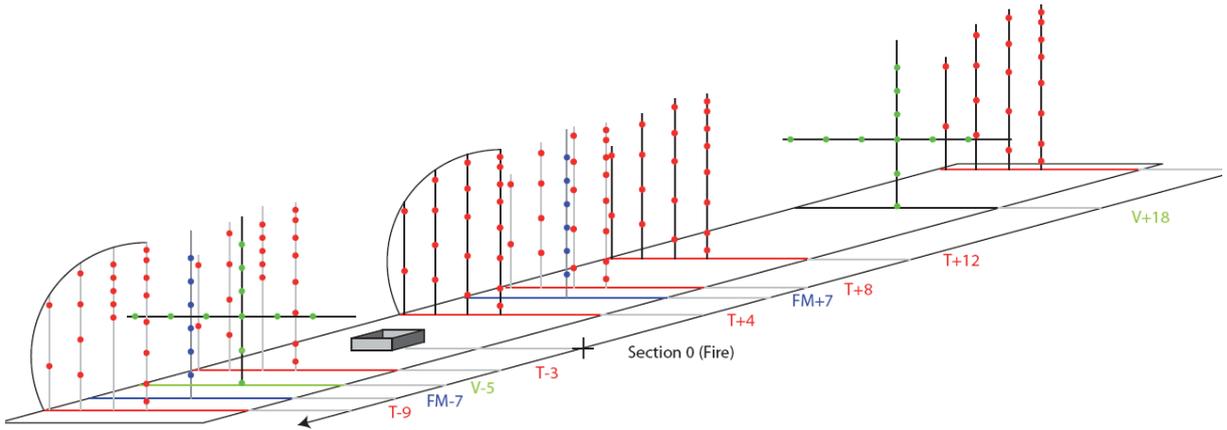


FIG. III.9 – Répartition des capteurs dans le tunnel

III.3.1 Mesures de température

Un total de six sections de mesure de température de l'écoulement est instrumenté. Deux sections en amont du foyer et quatre en aval. Les capteurs utilisés pour la mesure de température sont des thermocouples de type K de diamètre 2 mm, gainés Inconel 600. Un câble de compensation assure le raccordement à la centrale d'acquisition.

L'objectif des mesures de température est double. Le profil de température d'une section permet de déterminer la position et surtout l'épaisseur des fumées, que ce soit en aval ou au niveau de la couche de retour amont (lorsque la vitesse d'écoulement est inférieure à la vitesse critique). Elles permettent par ailleurs de quantifier, lors des essais avec brumisation, l'impact du brouillard d'eau sur la température à différentes distances du foyer. Le but est de déterminer les secteurs de tenabilité thermique et les courbes d'isotherme autour du foyer, ceci afin de délimiter les zones du tunnel accessibles aux usagers et aux services d'intervention.

De plus, la connaissance des températures au niveau de la voûte, au niveau du sol et tout le long de la hauteur, permet de caractériser la stratification des fumées dans l'ouvrage en utilisant deux critères de stratification proposés par Newman [73] :

$$S = \frac{T_v - T_s}{T_{moy} - T_0} \quad (\text{III.6})$$

et

$$D = \frac{T_v - T_s}{T_v - T_0} \quad (\text{III.7})$$

avec :

T_v	[K]	Température au niveau de la voûte
T_s	[K]	Température au sol
T_{moy}	[K]	Température moyenne déduite par intégration du profil vertical de température
T_0	[K]	Température en entrée de la structure

L'évolution de ces critères permet d'avoir une estimation des épaisseurs relatives des couches chaudes et froides. Cette série de mesures permet aussi de suivre l'évolution de la stratification des fumées lorsque le système d'aspersion est activé.

Selon que la section de mesure se trouve en amont ou en aval, la configuration est différente (figure III.10 et III.11).

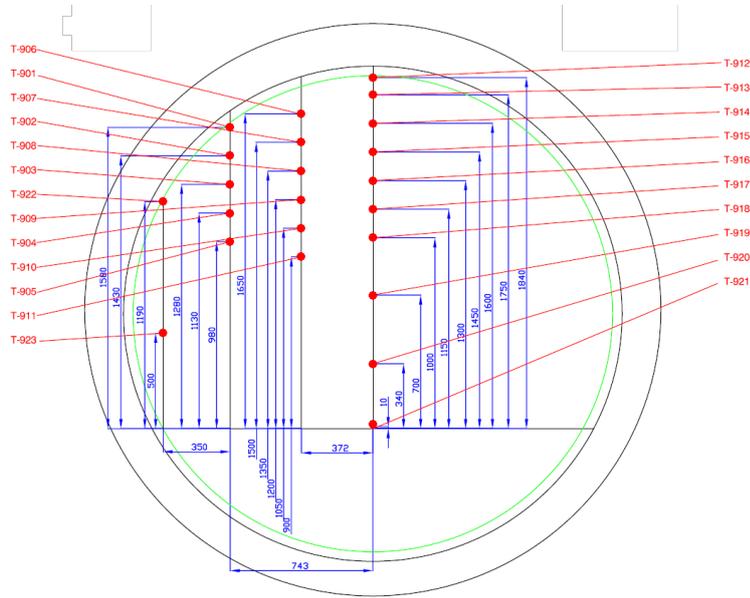


FIG. III.10 – Schéma d'instrumentation des sections amont de thermocouples (ici la section T-9)

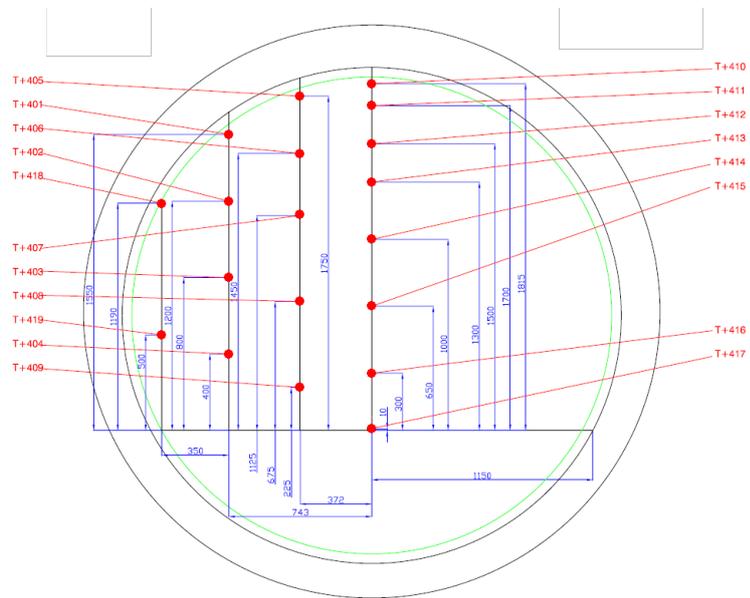


FIG. III.11 – Schéma d'instrumentation des sections aval de thermocouples (ici la section T+4)

Les sections amont ont été équipées de façon à avoir une bonne description de la moitié supérieure du tunnel où se développe une éventuelle couche de retour (voir figure III.10).

Les sections aval présentent une instrumentation plus régulière tout le long du plan vertical (voir figure III.11). Les thermocouples sont fixés sur un câble tendu entre le sol et le plafond du tunnel, comme illustré sur la figure III.12.



FIG. III.12 – Vue de la fixation des thermocouples

En plus de ces six sections, deux groupes de cinq thermocouples sont placés en section S+4 et S+15, afin de mesurer la température de surface de la paroi du tunnel. L'implantation de ces capteurs est illustrée sur la figure III.13.

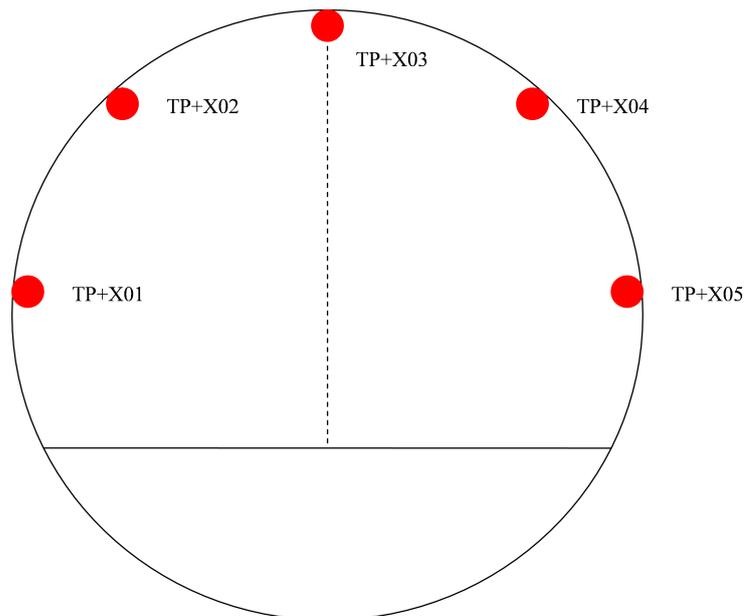


FIG. III.13 – Schéma d'instrumentation des sections de thermocouples de paroi

III.3.2 Mesures de flux rayonnés

Deux sections de mesure, situées à 7 mètres de part et d'autre du foyer, sont équipées de six radiomètres chacune, répartis uniformément le long d'un support vertical central à la section (plan en figure III.14) .

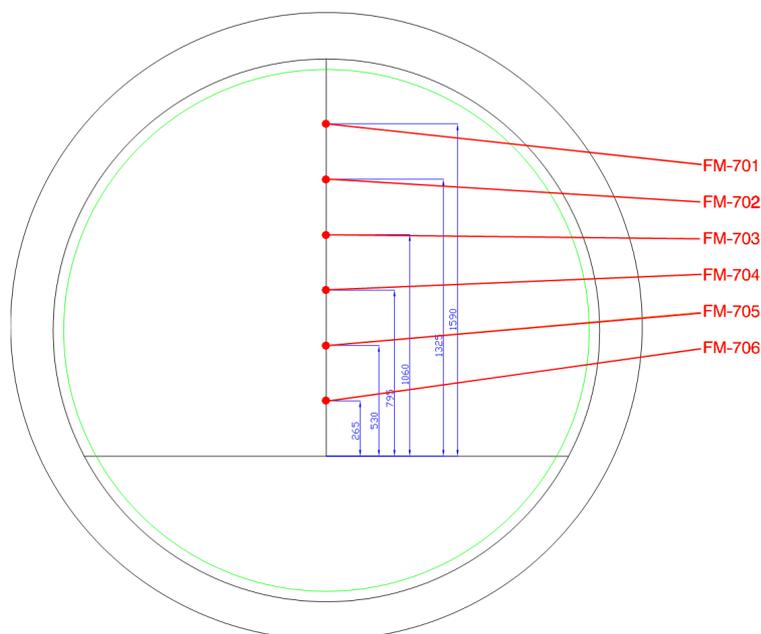


FIG. III.14 – Schéma d'instrumentation des sections de radiomètres (ici la section FM-7)

Ces mesures s'effectuent avec des radiomètres de marque Medtherm. Ces capteurs, visibles sur la figure III.15, ont un angle de vue de 150° , la mesure portant sur des longueurs d'onde allant de $0,3$ à $11 \mu\text{m}$. Une fenêtre CaCl est en place, permettant de s'affranchir de la composante convective du flux de chaleur. Leur plage de mesure s'étend de 0 à $20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.



FIG. III.15 – Vue d'un radiomètre installé

Ces mesures de flux permettent, d'une part de déterminer des zones de tenabilité pour les personnes qui pourraient se trouver confrontées à un tel feu, que ce soit avec ou

sans présence du brouillard d'eau, et, d'autre part, d'estimer l'agression en direction de la structure. Les capteurs sont fixés sur un support tendu entre le sol et le plafond du tunnel, et sont refroidis par une circulation d'eau et calfeutrés à la laine de roche afin de les protéger de la chaleur.

III.3.3 Mesures de vitesse

Deux sections dans la galerie sont équipées de mesures de vitesse, une en amont en V-5, une en aval à V+18. Les points de mesure sont répartis sur un support en croix (visible sur les figures III.16 et III.17) afin d'avoir le profil vertical de vitesse ainsi que pour pouvoir estimer la vitesse débitante dans le tunnel.



FIG. III.16 – Vue de la section de vitesse V-5

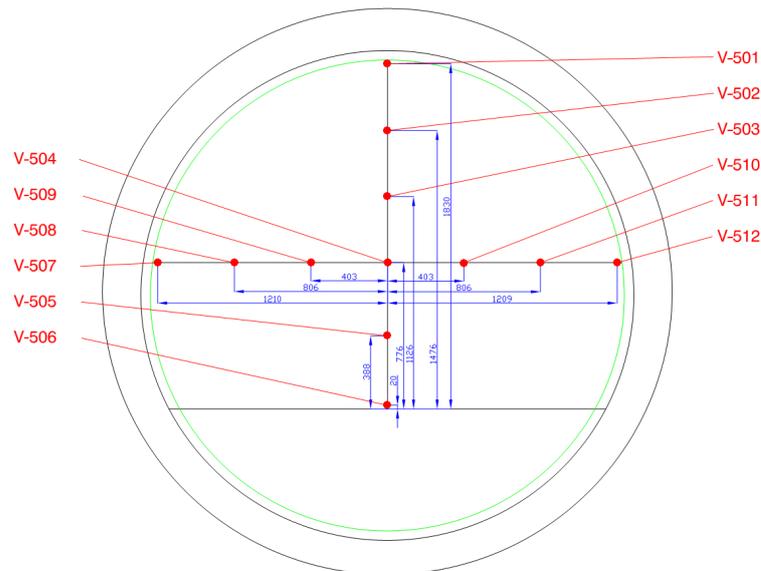


FIG. III.17 – Schéma d'instrumentation des sections de mesure de vitesse (ici la section V-5)

La mesure de la vitesse de ventilation s'effectue au moyen de sondes de Recknagel reliées à des micromanomètres, de marque Furness ou Kimo. Ces mesures de vitesse sont couplées à des thermocouples afin d'évaluer la masse volumique de l'air, en direct au point de mesure.

III.3.4 Mesure de perte de masse du foyer

Sous le foyer, en section 0, est placée une balance, qui permet de suivre l'évolution de la masse de combustible au cours de l'essai. Cette balance a une gamme de mesure allant de 0 à 300 kg, avec une précision de 2 g. La mesure permet d'évaluer le débit calorifique du foyer au cours de l'essai, selon le principe présenté au chapitre 1 (équation (I.2)).

III.3.5 Mesures de concentrations de gaz

Un dispositif de collecte d'échantillons gazeux est situé juste avant le convergent, à l'extrémité du tunnel, en section S+22. L'analyse des concentrations de ces gaz permet d'évaluer, par une autre méthode que la mesure de perte de masse, le débit calorifique. On mesure les concentrations moyennes de CO, CO₂ et O₂ en aval du foyer, moyennes faites à partir de neuf points de prise d'échantillons (notés 2201a à i sur la figure III.18) dans la section S+22. Ces neuf échantillons sont ensuite mélangés, refroidis et acheminés vers une baie d'analyse de gaz de marque Servomex.

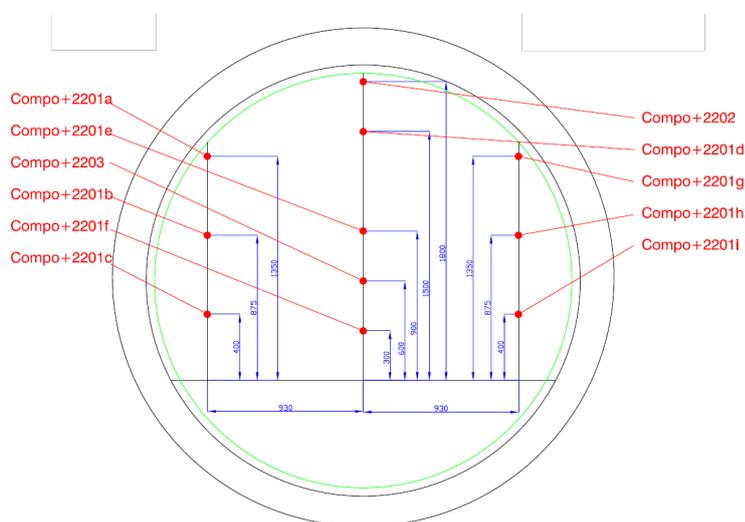


FIG. III.18 – Schéma d'instrumentation de la section de mesure de concentrations de gaz

Deux autres points de prise d'échantillons ont été ajoutés : notés Compo+2202 et Compo+2203, respectivement situés sous la voûte (à 1 cm de celle-ci) et à 60 cm du sol. Ces lignes d'échantillonnage sont reliées chacune à un analyseur de monoxyde de carbone et à un analyseur de dioxyde de carbone, afin de connaître la composition des gaz en zone chaude près du plafond (2202) et à hauteur d'homme (2203).

III.3.6 Mesures d'opacité

Deux transmissiomètres sont positionnés en section S+23, implantés à 50 cm au-dessus du sol et 50 cm au-dessous de la voûte. Ces appareils sont des transmissiomètres à lumière blanche : un émetteur est placé d'un côté du tunnel, et un récepteur de l'autre. Ces appareils travaillent dans le spectre visible (400 - 800 nm). L'absorption mesurée est donc due aux phases condensées, donc aux particules de suies présentes dans les fumées et aux gouttelettes d'eau en suspension sous aspersion. Elle est déterminée en pourcentage de lumière reçue par rapport à la valeur mesurée en l'absence de fumée (avant allumage du foyer).

III.3.7 Dispositif d'acquisition

L'ensemble des capteurs est relié à deux centrales d'acquisition Keithley, une 2750 de 200 voies et une 2701 de 40 voies. La centrale 2750 a une période de balayage de 20 secondes (imposée par les 24 manomètres qui nécessitent un grand échantillonnage pour avoir une mesure fidèle), la centrale 2701 a une période d'acquisition de 4 secondes.

III.3.8 Système d'aspersion par brouillard d'eau

Le système de brouillard d'eau a été installé par la Société RODIO pour le compte de la Société FOGTEC. Les caractéristiques de l'installation (tant en termes de positionnement, de nombre et de performances des buses) ont été définies par FOGTEC au vu des scénarios envisagés sur la base de leur expérience.

Le dispositif consiste en une rampe de support fixée sous la voûte du tunnel alimentant en eau les buses d'aspersion ainsi que d'une pompe de pression. La rampe dispose de points de fixation tous les 50 cm et court tout le long du tunnel. Les orifices non occupés par une buse sont obstrués avec des bouchons. La pompe de pression alimentant la rampe est située à l'extérieur (figure III.19) et a été réglée à la pression de travail des buses, soit 90 bars. Les buses sont placées de telle façon qu'aucune buse n'a été disposée à la verticale du foyer. Le dispositif comprend 3 buses en amont et 11 buses en aval. Ces buses (figure III.20) sont constituées d'une tête supportant 5 injecteurs identiques : 1 central situé dans l'axe de la buse et 4 latéraux disposés en couronne. La somme des ces 5 injecteurs donne un jet de brouillard d'eau en cône plein. Le facteur K de ces buses est donné par le fabricant $K = 0,58 \text{ L.min}^{-1}.\text{bar}^{-\frac{1}{2}}$. Ce facteur permet, à partir de la pression de travail des buses, d'obtenir leur débit d'injection d'eau selon la relation :

$$D_{eau} = K \times \sqrt{P} \quad (\text{III.8})$$

avec	D_{eau}	[L.min ⁻¹]	Débit d'injection d'une buse
	K	[L.min ⁻¹ .Pa ^{-1/2}]	Facteur K
	$p_{circuit}$	[bar]	Pression du circuit d'eau



FIG. III.19 – Vue de la pompe de pression utilisée



FIG. III.20 – Vue d'une des buses d'aspersion en action

La caractérisation d'une buse d'aspersion a été réalisée par le CETU (Centre d'Etude des Tunnels), en collaboration avec le Laboratoire de Mécanique des Fluides et Acoustique (LMFA) de l'Ecole Centrale de Lyon. Le protocole de la caractérisation est détaillé dans la référence [74]. La caractérisation a été réalisée sur un seul injecteur par anémométrie laser en phase Doppler (*PDA* : Phase Doppler Anemometry), technique d'interférométrie fréquemment utilisée pour ce type d'étude.

Le dispositif consiste en une cabine fermée sur ses quatre côtés, dans laquelle est placée la buse et son dispositif d'alimentation. Le cône de brouillard d'eau est coupé par deux faisceaux laser corrélés, les rayons formant un angle fixe. A l'intersection de ces rayons se crée un volume d'interférence optique (figure III.21). On observe ensuite depuis deux points différents le défilement des franges d'interférence. Lorsque les gouttelettes du brouillard passent dans ce volume, elles modifient ce défilement de façon différente pour les deux points d'observation. Cette différence permet de déduire le diamètre de la gouttelette. Il suffit ensuite de compter le nombre de gouttelettes de chaque catégorie défilant dans le volume de mesure.

La figure III.22 présente la distribution de taille en nombre relevée sur l'axe de l'injecteur central, à différentes distances de la buse. Le petit pic secondaire aux alentours de $10\ \mu\text{m}$ à $50\ \text{cm}$ est dû à la remise en suspension de gouttelettes qui rebondissent sur la paroi du dispositif ou par entraînement du brouillard lui-même. Concernant la buse dans sa totalité, la figure III.23 présente les distributions de taille en nombre à $30\ \text{cm}$ de la buse, selon différents angles α par rapport à la verticale compris entre 0 et 30° . La figure III.24 donne le même paramètre pour des angles α compris entre 35 et 50° . On est donc en présence d'un brouillard principalement composé de gouttelettes très fines (entre 5 et $25\ \mu\text{m}$), le cône de demi-angle au sommet 30° a une population de gouttelettes d'un diamètre concentré autour de $10\ \mu\text{m}$. Sur l'extérieur du cône, les diamètres sont répartis jusqu'à $30\ \mu\text{m}$.

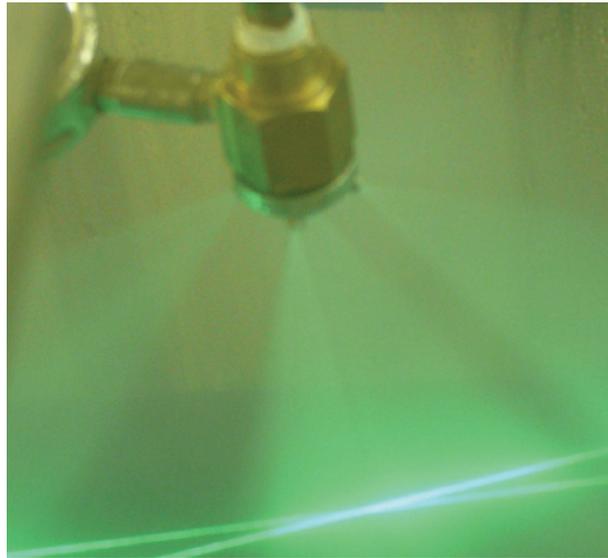


FIG. III.21 – Vue de la zone d’interférence au cours de la caractérisation d’une des buses (source : [73])

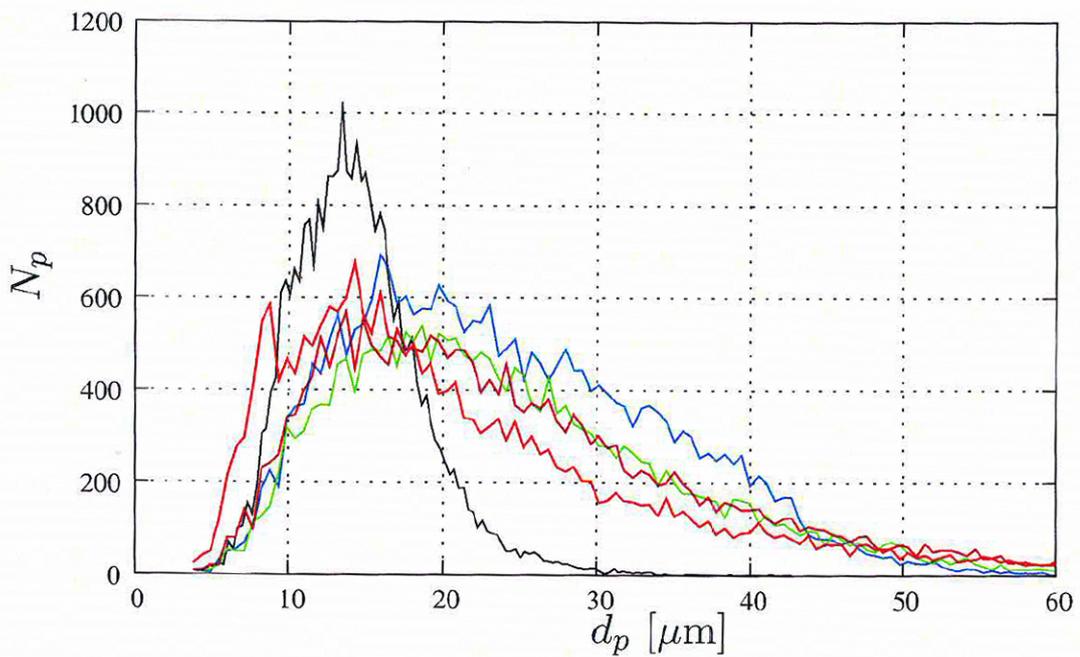


FIG. III.22 – Distribution de taille en nombre de gouttelettes par classe N_p , mesurée pour l’injecteur central à différentes distances de la buse : (—) 4 cm, (—) 10 cm, (—) 20 cm, (—) 30 cm et (—) 50 cm. (source : [73])

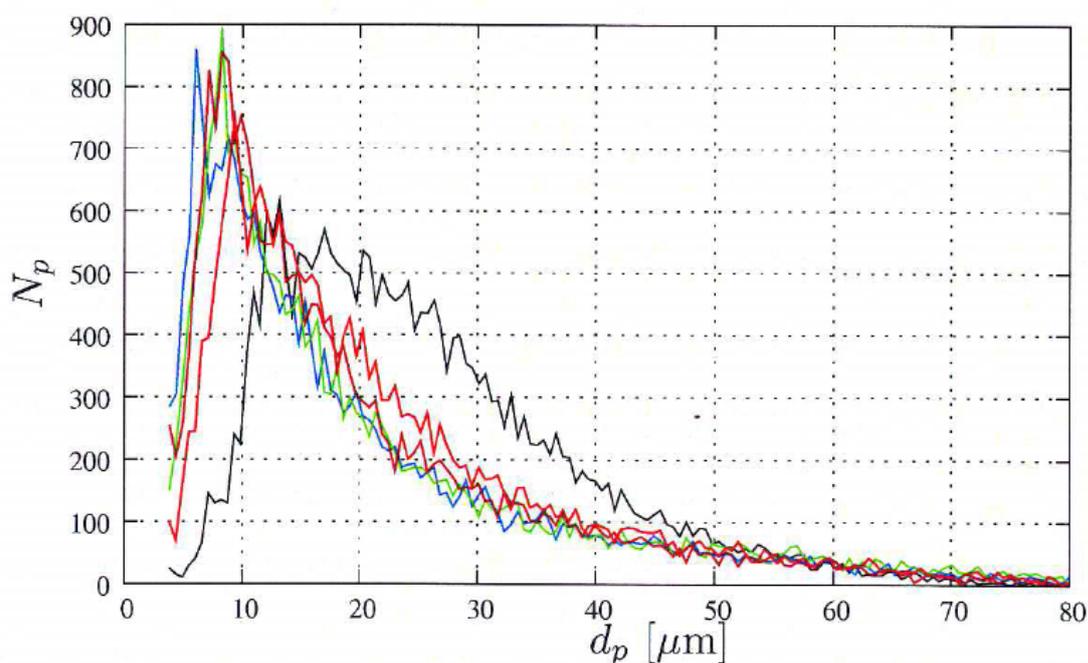


FIG. III.23 – Distribution de taille en nombre de gouttelettes par classe N_p , mesurée pour l’injecteur central à différentes positions sur un cercle de rayon 30cm : (—) $\alpha = 0$, (—) $\alpha = 15$, (—) $\alpha = 20$, (—) $\alpha = 25$ et (—) $\alpha = 30$. (source : [73])

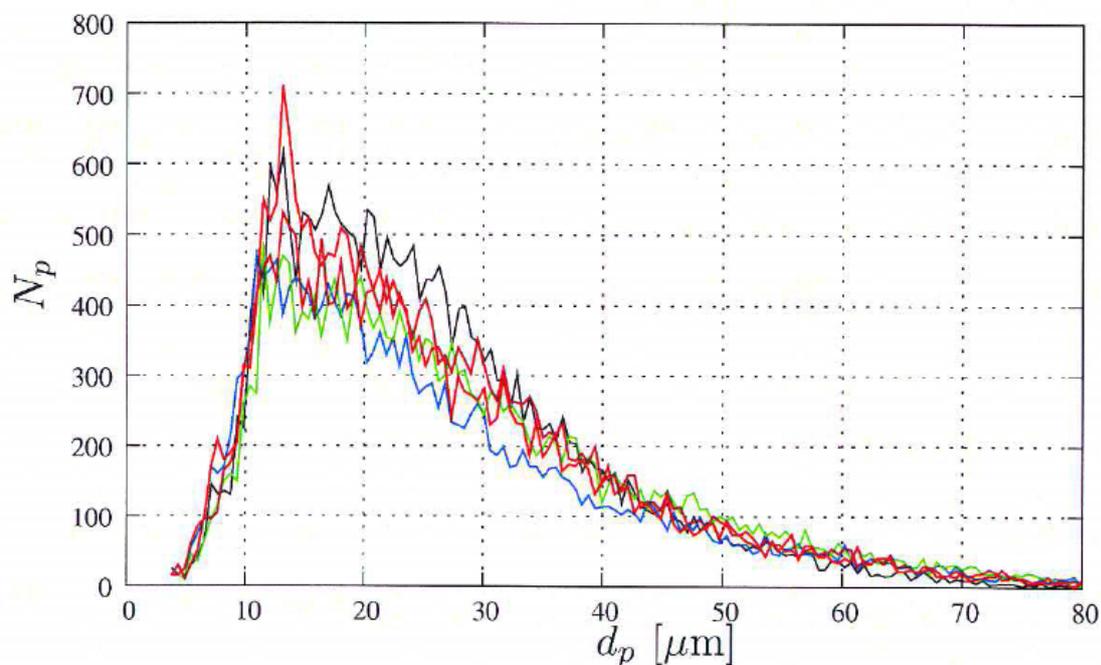


FIG. III.24 – Distribution de taille en nombre de gouttes par classe N_p , mesurée pour l’injecteur central à différentes positions sur un cercle de rayon 30cm : (—) $\alpha = 0$, (—) $\alpha = 35$, (—) $\alpha = 40$, (—) $\alpha = 45$ et (—) $\alpha = 50$. (source : [73])

III.4 Liste des essais

Le tableau III.1 résume l'ensemble des essais réalisés. On y distingue les essais de *référence*, sans aspersion, qui servent de référence pour juger de l'effet du brouillard d'eau, mais aussi pour la caractérisation de la stratification des fumées, et les essais dits de *performance* qui sont les essais avec aspersion.

Essais de Référence				
Essai	Combustible	Puissance (kW)	Vitesse d'écoulement $m.s^{-1}$	Couverture
ETun 01	Heptane	1500	0,95	sans
ETun 02	Heptane	1500	2,60	sans
ETun 03	Bûcher	1500	1,60	sans
ETun 04	Bûcher	1500	2,60	sans
ETun 05	Palettes	1500	1,50	sans
ETun 06	Palettes	1500	2,20	sans
ETun 07	Heptane couvert	1500	1,50	avec
ETun 08	Heptane couvert	1500	2,20	avec
Essais de Performance				
Essai	Combustible	Puissance (kW)	Vitesse d'écoulement $m.s^{-1}$	Couverture
ETun 09	Heptane	1500	1,40	sans
ETun 10	Heptane	1500	1,45	sans
ETun 11	Heptane	1500	2,30	sans
ETun 12	Heptane	1500	2,40	sans
ETun 16	Heptane couvert	1500	1,60	avec
ETun 16 bis	Heptane couvert	1500	1,75	avec
ETun 17	Heptane couvert	1500	2,50	avec
ETun 18	Heptane couvert	1500	2,55	avec
ETun 19	Bûcher	1500	1,11	sans
ETun 20	Bûcher	1500	1,24	sans
ETun 21	Bûcher	1500	2,22	sans
ETun 22	Bûcher	1500	2,09	sans
ETun 23	Palettes	1500	1,21	sans
ETun 24	Palettes	1500	1,24	sans
ETun 25	Palettes	1500	2,22	sans
ETun 26	Palettes	1500	2,19	sans
ETun 27	Heptane	1500	1,90	sans
ETun 28	Heptane	1500	2,20	sans

TAB. III.1 – Récapitulatif des essais de référence et de performance

Deuxième partie

Résultats expérimentaux

Chapitre IV

Résultats expérimentaux - Essais sans aspersion

Sommaire

IV.1 Méthodes d'évaluation de la puissance du foyer	93
IV.1.1 Evaluation par mesure du débit massique de combustible	93
IV.1.2 Evaluation par mesure de la consommation d'oxygène	93
IV.2 Essais de référence en tunnel	95
IV.2.1 Particularités aérauliques liées à la configuration	95
IV.2.1.1 Vitesse critique	95
IV.2.1.2 Modification du débit d'entrée d'air par la présence de l'incendie	97
IV.2.2 Foyers heptane	99
IV.2.2.1 Essais de référence en milieu ouvert	99
IV.2.2.2 Essais en milieu tunnel ETun	101
IV.2.2.3 Puissance du foyer	101
IV.2.2.4 Températures et stratification des fumées	107
IV.2.2.5 Flux rayonnés	122
IV.2.2.6 Opacimétrie	127
IV.2.3 Foyers bûcher	129
IV.2.3.1 Puissance du Foyer	130
IV.2.3.2 Températures et stratification des fumées	132
IV.2.3.3 Flux rayonnés	138
IV.2.3.4 Opacimétrie	140
IV.2.4 Foyers palettes	142
IV.2.4.1 Puissance du foyer	142
IV.2.4.2 Températures et stratification des fumées	143
IV.2.4.3 Flux rayonnés	149
IV.2.4.4 Opacimétrie	152
IV.2.5 Synthèse des essais de référence en tunnel	154

Résultats expérimentaux - Essais sans aspersion

IV.1 Méthodes d'évaluation de la puissance du foyer

IV.1.1 Evaluation par mesure du débit massique de combustible

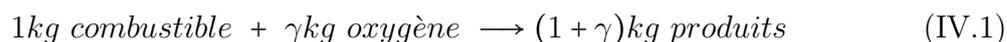
Comme nous l'avons mentionné en début de ce travail, la puissance d'un feu est liée à la quantité de chaleur libérée par la réaction de combustion, dépendant principalement du débit massique de combustible. La perte de masse du foyer est aisée à mesurer, permettant de remonter à la puissance par la relation (I.2).

$$\dot{Q} = \dot{m}_c'' \cdot S_c \cdot C_r \cdot \Delta H_c$$

Dans notre cas, la configuration du tunnel et les débits d'air présents font que le foyer ne doit pas être sous-ventilé. Cependant, même dans cette configuration, il reste possible qu'une fraction du combustible ne soit pas brûlée ($C_r < 1$). La mesure de perte de masse ne donnant en réalité que la quantité de combustible *vaporisée* conduira alors à une puissance supérieure à la puissance réelle du foyer. On considèrera donc que cette mesure donne une valeur "enveloppe" de la puissance.

IV.1.2 Evaluation par mesure de la consommation d'oxygène

Cette méthode d'évaluation de la puissance d'un foyer s'appuie sur les travaux de Thornton [75], publiés en 1917, qui ont montré, à partir d'essais en bombe calorimétrique, que la chaleur de réaction de tout combustible (parmi les 121 étudiés) est proportionnelle au nombre de moles d'oxygène nécessaires à la combustion complète dudit combustible. On peut transposer ceci en raisonnant en masse selon :



On peut alors considérer la chaleur de combustion massique d'un combustible ramenée à un kg d'O₂. Ainsi, en mesurant la quantité d'oxygène ayant participé à la réaction chimique, on peut déterminer la quantité de combustible ayant réagi, et donc le débit calorifique émis par le foyer. Dans une configuration tunnel, l'air entrant passe dans sa totalité au voisinage du feu. Il suffit donc, pour déterminer la quantité d'oxygène consommée par le foyer, de connaître le débit massique d'oxygène en amont et en aval de celui-ci.

$$\dot{Q} = h_{c,O_2} \cdot (\dot{m}_{O_2}^{in} - \dot{m}_{O_2}^{ex}) \quad (\text{IV.2})$$

avec :	\dot{Q}	[W]	Débit calorifique du foyer
	h_{c,O_2}	[J.kg ⁻¹]	Chaleur de combustion massique ramenée à 1 kg d'O ₂
	$\dot{m}_{O_2}^{in}$	[kg.s ⁻¹]	Débit massique d'oxygène en amont du feu
	$\dot{m}_{O_2}^{ex}$	[kg.s ⁻¹]	Débit massique d'oxygène en aval du feu

La zone où a lieu la combustion est assimilée à un volume de contrôle dans lequel entre un débit massique de gaz combustibles \dot{m}_{gc} et un débit massique d'oxygène $\dot{m}_{O_2}^{in}$ (voir figure IV.1). On collecte, par tirage naturel ou par ventilation forcée, le mélange obtenu après combustion (contenant de l'oxygène, de l'azote et des gaz de combustion), donnant un débit massique \dot{m}^{ex} d'effluents.

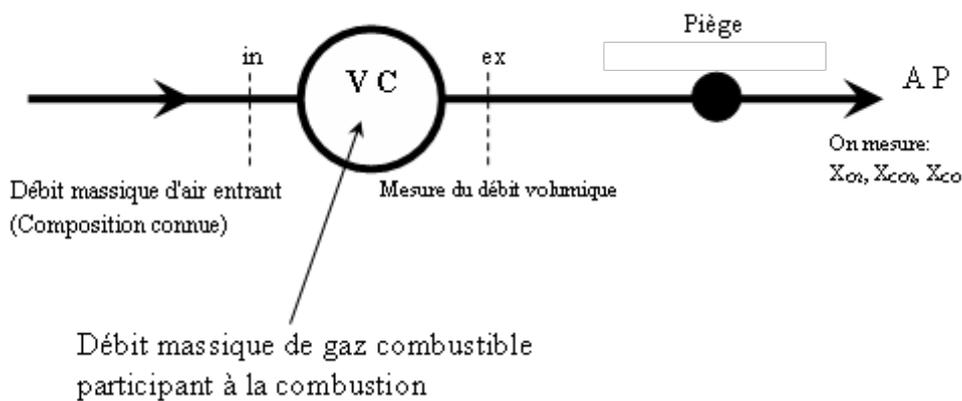


FIG. IV.1 – Schéma de principe de la détermination du débit calorifique par consommation d'oxygène (source : [76])

L'expression pratique du débit calorifique est donnée dans de nombreux ouvrages de référence (par exemple [76]). La relation exploitée par la suite est rappelée ici :

$$\dot{Q} = h_{c,O_2} \cdot \rho_{O_2} \cdot \dot{V}^{ex} \cdot \frac{X_{O_2}^{in} - \left(\frac{X_{O_2}^{AP} X_{N_2}^{in}}{X_{N_2}^{AP}} \right)}{1 + (\alpha - 1) \left(1 - \frac{X_{O_2}^{AP} X_{N_2}^{in}}{X_{O_2}^{in} X_{N_2}^{AP}} \right)} \quad (IV.3)$$

avec :	\dot{Q}	[W]	Débit calorifique du foyer
	h_{c,O_2}	[J.kg ⁻¹]	Chaleur de combustion massique ramenée à 1 kg d'O ₂
	ρ_{O_2}	[kg.m ⁻³]	Masse volumique d'O ₂ dans les conditions d'entrée
	\dot{V}^{ex}	[m ³ .s ⁻¹]	Débit volumique d'effluents
	$X_{N_2}^{AP}, X_{O_2}^{AP}, X_{CO_2}^{AP}$	[-]	Fractions volumiques des gaz analysés
	$X_{N_2}^{in}, X_{O_2}^{in}, X_{CO_2}^{in}$	[-]	Fractions volumiques des gaz entrants
	α	[-]	Coefficient quantifiant la production de H ₂ O, de CO et de CO ₂ en fonction de la fraction volumique d'O ₂ entrante

Afin que cette méthode soit appliquée correctement, il est nécessaire que l'analyse porte sur la totalité de l'écoulement d'effluents. On détermine le débit volumique d'effluents \dot{V}^{ex} (usuellement en mesurant la température moyenne de l'écoulement T^{ex} et la vitesse moyenne de cet écoulement v^{ex}), ainsi que les concentrations en dioxygène O_2 et en dioxyde de carbone CO_2 (après avoir éliminé l'eau et les gaz acides du mélange).

Cette méthode se présente comme particulièrement appropriée dans le cas de foyers à combustible solide, susceptibles d'offrir des surfaces cachées donc potentiellement sous-oxygénées.

IV.2 Essais de référence en tunnel

IV.2.1 Particularités aérauliques liées à la configuration

IV.2.1.1 Vitesse critique

On appelle vitesse critique u_c la vitesse de l'air (en moyenne sur une section amont du foyer) à partir de laquelle toutes les fumées sont repoussées en aval de la source. De nombreux travaux ont été menés pour estimer cette vitesse critique. La relation IV.4 proposée par Thomas [77] a été longtemps utilisée :

$$\frac{u_c H^{\frac{1}{3}}}{B^{\frac{1}{3}}} = K_T \cdot \left(\frac{1}{R_a} \cdot \frac{T_0}{T_{fumées}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (IV.4)$$

avec :	u_c	[m.s ⁻²]	Vitesse critique
	H	[m]	Hauteur du tunnel
	B	[m ⁴ .s ⁻³]	Flottabilité
	K_T	[-]	Facteur de proportionnalité
	R_a	[-]	Rapport d'aspect $R_a = \frac{S}{H^2}$
	T_0	[K]	Température ambiante
	$T_{fumées}$	[K]	Température de la couche de fumées

L'auteur préconise de prendre $K = 1$. Toutefois, cette relation est difficile à appliquer, la détermination de K étant liée au choix de $T_{fumées}$. Il est nécessaire d'avoir des résultats expérimentaux pour déterminer ces valeurs de K et $T_{fumées}$.

Danziger et Kennedy [78] ont plus récemment proposé une autre formulation. Celle-ci, reposant sur un bilan d'enthalpie dans la zone du foyer, est plus facile à mettre en œuvre et ne nécessite pas de calibrage expérimental :

$$\frac{u_c H^{\frac{1}{3}}}{B^{\frac{1}{3}}} = 0,61 \cdot K_p \cdot \left(\frac{1}{R_a} \cdot \frac{T_0}{T_{max}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (IV.5)$$

avec :	K_p	[-]	Coefficient correcteur dépendant de la pente du tunnel ($K_p=1$ pour une pente nulle)
--------	-------	-----	---

Afin d'appliquer cette relation, il est nécessaire de connaître la température T_{max} . Pour ce faire, on peut écrire l'équation de conservation de la masse en régime permanent :

$$\rho u = \rho_0 u_0 \quad (IV.6)$$

ρ_0 et u_0 étant respectivement la masse volumique et la vitesse de l'air avant son échauffement dans l'incendie, ρ et u concernant le mélange une fois échauffé par le foyer. De plus, en intégrant l'équation d'enthalpie de part et d'autre du foyer, on obtient :

$$T_0 \cdot u_0 \left| \frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right| = \frac{\dot{Q}}{C_p \rho_0 S} \quad (IV.7)$$

On peut alors exprimer la température moyenne dans la section aval (hors zone de flamme) T_{max} :

$$T_{max} = T_0 \cdot \left(\frac{B}{g S u_0} + 1 \right) \quad (IV.8)$$

D'après la référence [78], la vitesse critique u_c est alors solution de l'équation :

$$u_c = 0,61 K_p \frac{B^{\frac{1}{3}}}{H^{\frac{1}{3}}} \cdot \left[R_a \left(\frac{B}{g S u_c} + 1 \right) \right]^{-\frac{1}{3}} \quad (IV.9)$$

Application à la galerie d'essai Les données requises par la relation (IV.9) de l'installation expérimentale, pour un foyer de 1500 kW, sont :

g	=	9,81 $m.s^{-2}$
K_p	=	1
H	=	1,9 m
S	=	4 m^2
R_a	=	1,11
\dot{Q}	=	1500 kW
ρ_0	=	1,29 $kg.m^{-3}$
$C_p(air)$	=	1000 $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$
T_0	=	280 K

On peut alors déterminer la flottabilité B :

$$B = \frac{g \cdot \dot{Q}}{\rho_0 \cdot C_p \cdot T_0} = 40,6 \text{ m}^4.s^{-3} \quad (IV.10)$$

En raisonnant par itération, on détermine la vitesse critique dans la galerie d'essai : $u_c = 1,34 \text{ m.s}^{-1}$. La figure IV.2 illustre la convergence rapide du calcul.

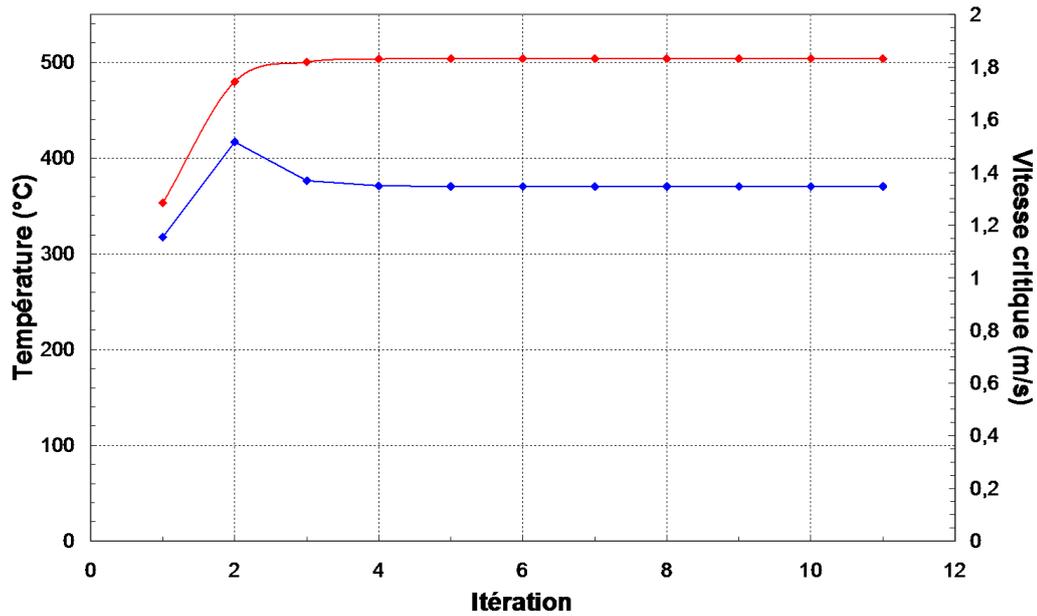
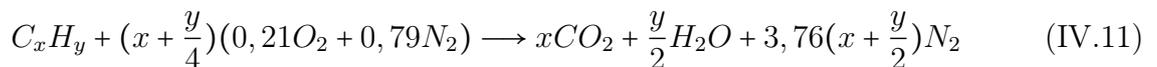


FIG. IV.2 – Détermination de la vitesse critique dans la galerie : (—) : Température moyenne en zone aval T_{max} , (—) : Vitesse critique

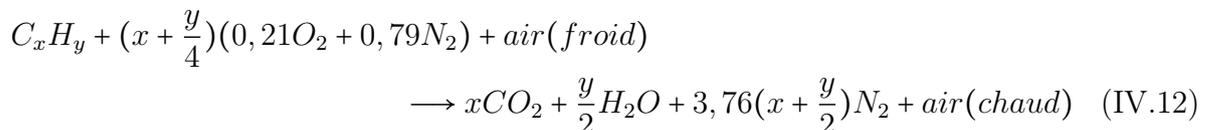
On peut vérifier par similitude cette vitesse critique, par rapport à un tunnel en grandeur réelle, selon les relations présentées au chapitre II. Par similitude, cette vitesse critique en grandeur réelle devient $u_{c,similitude} = 2,39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pour un tunnel en similitude de dimension avec le prototype, le calcul précédent nous donne après convergence : $u_{c,réelle} = 2,44 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, pour une puissance de foyer $\dot{Q} = 30 \text{ MW}$ et une hauteur de tunnel $H = 6,30 \text{ m}$. Nous pouvons constater que l'accord est très satisfaisant.

IV.2.1.2 Modification du débit d'entrée d'air par la présence de l'incendie

On considère ici la réaction chimique complète d'un combustible hydrocarbonné au niveau du foyer :



Pour une chaleur de combustion du combustible considéré, notée ΔH_c , la puissance générée par un incendie est exprimée par la relation I.2. Une fraction $1 - f$ de cette puissance est perdue sous forme de rayonnement. On note alors $f \cdot \dot{Q}$ la puissance restante, appelée *puissance convectée*. Elle permet d'élever de ΔT la température des gaz produits par la réaction (CO_2 et H_2O), de l'azote N_2 contenu dans l'air, ainsi que du débit d'air non utilisé par la réaction et entraîné par le foyer. En assimilant l'air à un mélange de 21% d'oxygène et de 79% d'azote, on écrit la réaction de combustion pour une mole :



Soit, pour un débit massique de combustible de \dot{m}_c et un débit massique d'air entraîné \dot{m}_a :

$$\begin{aligned} & \dot{m}_c C_{xH_y} + \frac{\dot{m}_c M_{O_2}}{M_{C_xH_y}} \cdot 0,21 \left(x + \frac{y}{4}\right) O_2 + \frac{\dot{m}_c M_{N_2}}{M_{C_xH_y}} \cdot 0,79 \left(x + \frac{y}{4}\right) N_2 + \dot{m}_a (\text{air froid}) \\ & \rightarrow \frac{\dot{m}_c M_{CO_2}}{M_{C_xH_y}} \cdot x CO_2 + \frac{\dot{m}_c M_{H_2O}}{M_{C_xH_y}} \cdot \frac{y}{2} H_2O + \frac{\dot{m}_c M_{N_2}}{M_{C_xH_y}} \cdot 0,79 \left(x + \frac{y}{4}\right) N_2 + \dot{m}_a (\text{air chaud}) \end{aligned} \quad (IV.13)$$

On détermine ensuite l'élévation de températures des gaz par :

$$f \cdot \dot{Q} = \left[\left(\dot{m}_c \frac{M_{CO_2}}{M_{C_xH_y}} \cdot x \right) \cdot C_p(CO_2) + \dot{m}_c \left(\frac{M_{H_2O}}{M_{C_xH_y}} \cdot \frac{y}{2} \right) \cdot C_p(H_2O) + \left(\dot{m}_c \frac{M_{N_2}}{M_{C_xH_y}} \cdot 0,79 \left(x + \frac{y}{4}\right) \right) \cdot C_p(N_2) + C_p(\text{air}) \cdot \dot{m}_a \right] \cdot \Delta T \quad (IV.14)$$

On notera désormais :

$$K_{O_2} = \left(\frac{M_{O_2}}{M_{C_xH_y}} \times 0,21 \left(x + \frac{y}{4}\right) \right) \quad (IV.15)$$

$$K_{CO_2} = \left(\frac{M_{CO_2}}{M_{C_xH_y}} \times x \right) \quad (IV.16)$$

$$K_{H_2O} = \left(\frac{M_{H_2O}}{M_{C_xH_y}} \times \frac{y}{2} \right) \quad (IV.17)$$

$$K_{N_2} = \left(\frac{M_{N_2}}{M_{C_xH_y}} \times 0,79 \left(x + \frac{y}{4}\right) \right) \quad (IV.18)$$

$$(IV.19)$$

Les capacités calorifiques massiques des gaz sont prises ici, comme il est généralement admis, à une température intermédiaire moyenne de 1000 K :

	CO ₂	H ₂ O	N ₂	Air
C _p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1230	2290	1170	1200

Ceci nous donne :

$$\Delta T = \frac{f \dot{m}_c \Delta H_c}{[K_{CO_2} C_p(CO_2) + K_{H_2O} C_p(H_2O) + K_{N_2} C_p(N_2)] + 1200 \dot{m}_a} \quad (IV.20)$$

et permet d'écrire le débit d'air entraîné par le foyer sous la forme :

$$\dot{m}_a = \frac{1}{1200 \cdot \Delta T} \times [f \cdot \dot{m}_c \cdot \Delta H_c - [K_{CO_2} C_p(CO_2) + K_{H_2O} C_p(H_2O) + K_{N_2} C_p(N_2)] \cdot \Delta T] \quad (IV.21)$$

V_{std} étant le volume molaire d'un gaz parfait, le débit volumique d'air consommé par l'incendie est donc :

$$\dot{V}_c = V_{std} \cdot \left[\frac{K_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{K_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{\dot{m}_a}{M_{O_2} \cdot 0,21 + M_{N_2} \cdot 0,79} \right] \quad (\text{IV.22})$$

Le débit de gaz produits par l'incendie est ainsi :

$$\dot{V}_{gaz,foyer} = \left(\frac{293 + \Delta T}{293} \right) \cdot V_{std} \cdot \left[\left(\frac{K_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{K_{H_2O}}{M_{H_2O}} + \frac{K_{N_2}}{M_{N_2}} \right) \dot{m}_c + \frac{\dot{m}_a}{0,21 \cdot M_{O_2} + 0,79 \cdot M_{N_2}} \right] \quad (\text{IV.23})$$

L'accroissement de débit de gaz dans le tunnel est donc :

$$\Delta q = \dot{V}_{gaz,foyer} - \dot{V}_c \quad (\text{IV.24})$$

Application à la galerie d'essai En appliquant ce raisonnement à la galerie d'essai (en utilisant l'heptane C_7H_{16} comme combustible), nous obtenons :

- Débit d'air entraîné par le foyer : $\dot{m}_a = 2,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Débit d'air consommé par le foyer : $q_c = 1,76 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Débit de gaz produits par le foyer : $q_p = 4,11 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Accroissement de débit de gaz dans le tunnel : $\Delta q = 2,24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Pour rappel, c'est un ventilateur d'extraction qui est utilisé, fonctionnant à débit volumique constant. Le débit volumique étant conservé dans l'ouvrage, l'augmentation de débit créée par le foyer va donc entraîner une diminution du débit d'air entrant.

IV.2.2 Foyers heptane

IV.2.2.1 Essais de référence en milieu ouvert

Dans le cadre d'une étude effectuée précédemment au sein du laboratoire, des essais de feu d'heptane sous hotte ont été menés afin d'acquérir des données sur un feu d'heptane non soumis à l'influence d'un confinement. Cinq cuves ont été testées, d'un diamètre de 10, 15, 23, 30 et 40 cm. De plus, des essais complémentaires sous hotte ont été effectués au CSTB sur un bac d'un diamètre de 55 cm, afin d'étendre les résultats précédents mais aussi de valider la chaîne métrologique des mesures de perte de masse et de consommation d'oxygène. Les résultats tirés de ces essais sont présentés dans le tableau IV.1.

Essai	Diamètre (cm)	Débit massique surfaccique d'heptane $\text{g.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$	Débit massique surfaccique d'heptane tiré de la relation (III.1) $\text{g.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$
LCD_ 01	10	9,4	10,5
LCD_ 02	15	13,5	15,4
LCD_ 03	23	19,8	22,6
LCD_ 04	30	28,6	28,4
LCD_ 05	40	34,2	36,0
CSTB_ 01	55	47,5	45,8
CSTB_ 02	55	57,2	45,8
CSTB_ 03	55	36,2	45,8

TAB. IV.1 – Récapitulatif des débits massiques surfacciques d'heptane relevés lors des essais préliminaires

La figure IV.3 compare ces résultats avec l'évolution selon la relation (III.1) du débit massique surfaccique en fonction du diamètre :

On peut observer une bonne adéquation entre les valeurs données par les essais et par la relation. Les écarts obtenus lors des essais menés au CSTB s'expliquent par le fait qu'il était impossible dans l'installation d'avoir une flamme parfaitement non perturbée par des courants convectifs non contrôlables. Quoi qu'il en soit, la moyenne des trois essais se situe bien au voisinage de la courbe donnée par cette relation. Ces essais sur cuve ont permis de valider le principe de dimensionnement du foyer.

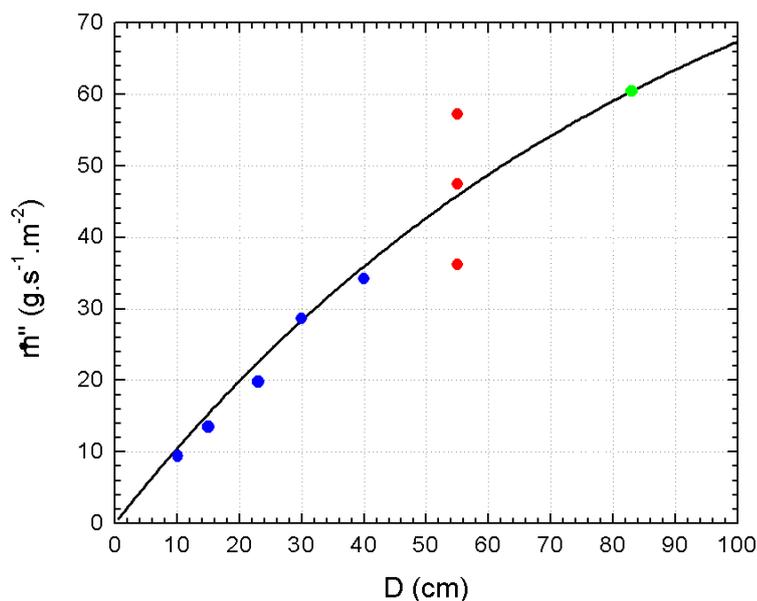


FIG. IV.3 – Comparaison des résultats des essais de référence hors tunnel avec l'évolution selon la relation (III.1) du débit massique surfaccique en fonction du diamètre de la nappe
 - (—) : Relation (III.1), (●) : Essais CSTB, (●) : Essais LCD, (●) : Dimensionnement ETun

IV.2.2.2 Essais en milieu tunnel ETun

Dans ce paragraphe est analysé l'ensemble des résultats obtenus lors des essais ETun01 et ETun02 d'une part, et ETun07 et ETun08 d'autre part. Pour rappel, ces essais servent de base de comparaison pour estimer les effets du brouillard d'eau dans le tunnel. Pour chaque type de foyer deux essais sont réalisés : un avec une vitesse de ventilation en-deçà de la vitesse critique et un avec une vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique.

Essai	Combustible	Puissance (kW)	Vitesse d'écoulement (m.s ⁻¹)	Couverture
ETun 01	Heptane	1500	0,95	sans
ETun 02	Heptane	1500	2,60	sans
ETun 07	Heptane	1500	1,50	avec
ETun 08	Heptane	1500	2,20	avec

TAB. IV.2 – Récapitulatif des essais ETun heptane de référence

IV.2.2.3 Puissance du foyer

Signalons tout d'abord que la puissance calculée à partir de la mesure de consommation d'oxygène n'est pas exploitée pour l'essai ETun01 car, lors de celui-ci, la vitesse de ventilation était de 0,95 m.s⁻¹, ce qui est inférieur à la vitesse critique. La couche de retour a alors atteint l'entrée du tunnel, rendant ainsi la mesure de concentration en oxygène inadaptée à la détermination de la puissance du foyer.

L'évolution de la puissance du foyer au cours du temps lors des essais ETun01 et ETun02, est illustrée sur la figure IV.4. On peut constater que cette évolution révèle le comportement classique d'un feu de nappe : une montée rapide en puissance et un régime établi (en 120 secondes environ). Dans le cas de l'essai ETun02, ce palier de puissance de 1500 kW (donné par la mesure de perte de masse) correspond à la puissance de référence choisie. La puissance du foyer lors de l'essai ETun01 atteint un niveau plus élevé : 2000 kW. La faible vitesse de ventilation dans le tunnel lors de cet essai fait que l'effet de confinement est plus marqué que dans le cas de l'essai ETun02. Cet effet de confinement dû au tunnel se traduit par un léger accroissement de la puissance lorsqu'elle a atteint sa valeur de dimensionnement. Ceci est dû à l'échauffement progressif des parois du tunnel au cours de l'essai, parois qui vont émettre un flux radiatif supplémentaire vers la surface du combustible, déplaçant l'équilibre énergétique de surface dans le sens d'une augmentation du débit massique de vapeurs combustibles. Dans le cas de l'essai ETun02, cet échauffement des parois est plus lent et moins important (du fait de la vitesse de ventilation plus élevée), ce qui explique que l'augmentation de puissance en régime établi soit plus faible. Cet échauffement est visible sur la figure IV.5 qui représente l'évolution de la température de surface de la paroi, en section S+15. De par l'éloignement de cette section, les niveaux de température sont faibles mais l'écart entre les deux essais illustre bien les différences d'effet de confinement.

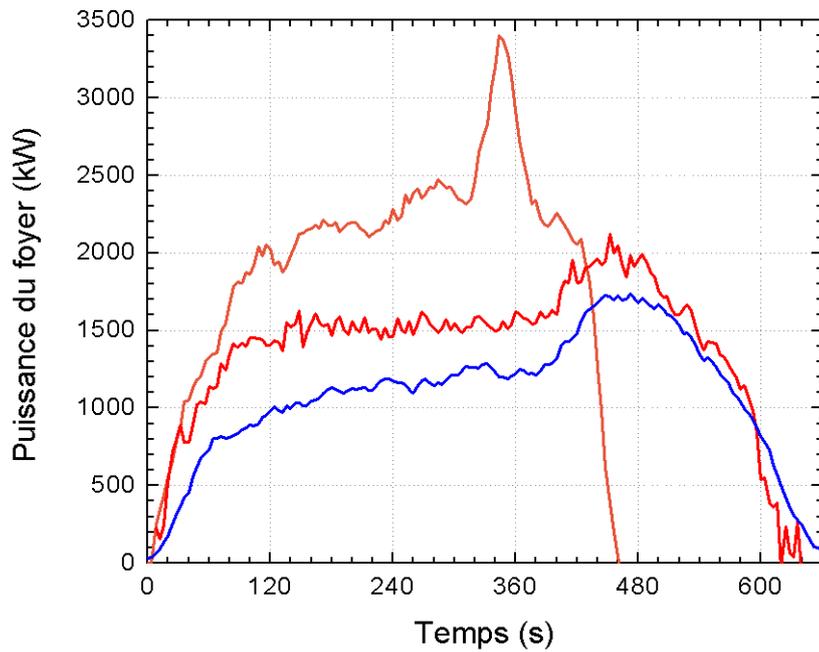


FIG. IV.4 – Essais ETun 01 et ETun 02 - Evolution temporelle de la puissance du foyer - (—) : Etun01 - Puissance par la mesure de perte de masse, (—) : Etun02 - Puissance par la mesure de perte de masse, (—) : ETun02 - Puissance par la mesure de consommation d'oxygène

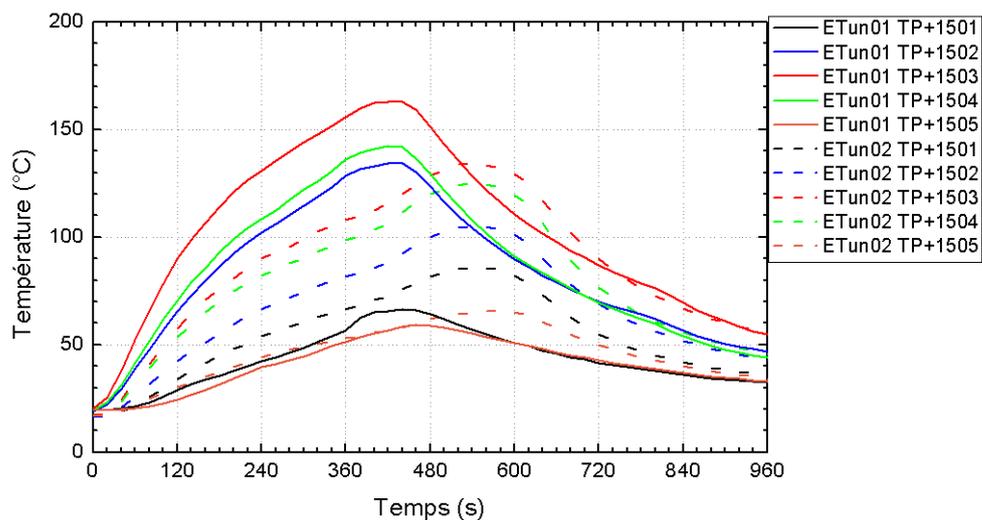


FIG. IV.5 – Essais ETun 01 et ETun 02 - Evolution temporelle des niveaux des températures de surface de la paroi du tunnel en section S+15

Il convient de remarquer ici la différence observée entre la détermination de la puis-

sance à partir de la mesure de perte de masse et celle réalisée à partir de la mesure de concentration d'oxygène. Cette différence est due à un dysfonctionnement de la ligne d'acheminement de l'échantillon gazeux vers l'analyseur de gaz. Les essais n'ayant pu être répétés, l'analyse des résultats sur la puissance des foyers pour tous les essais avec foyer heptane (soit les essais ETun01, ETun02, ETun07 et ETun08) ne s'est donc faite que via la mesure de perte de masse.

On observe, en fin d'essai un pic de puissance, avant l'extinction du foyer, d'une amplitude d'environ 40% de la valeur du palier. Ce pic provient d'une ébullition en volume du combustible. Lors d'un feu de nappe, la vaporisation du combustible est entretenue principalement par le flux de chaleur émis par la flamme vers la surface de la nappe. Au sein du combustible liquide s'établit un gradient de température entre une température proche de la température d'ébullition du combustible à sa surface et la température du combustible et de l'eau au-dessous, comme illustré en figure IV.6 (a). Cependant, le bac (métallique dans notre cas) va s'échauffer et transmettre alors un flux de chaleur supplémentaire à la phase liquide. Le combustible est alors préchauffé, et peut atteindre une température voisine de sa température d'ébullition, en profondeur. Il se produit alors une vaporisation en volume : le combustible ne se vaporise plus seulement à la surface de la nappe (figure IV.6,(b)), ce qui augmente le débit de vapeurs combustibles du foyer. Lors des essais ETun01 et 02, les conditions de début d'essai sont similaires (même température extérieure notamment) et la masse d'eau ainsi que celle d'heptane dans le bac sont identiques. Dans les deux cas, le pic de puissance apparaît lorsqu'il reste entre 7 et 8 kg d'heptane dans le bac (ce qui équivaut à une couche de 2 cm d'heptane), et son amplitude est équivalente.

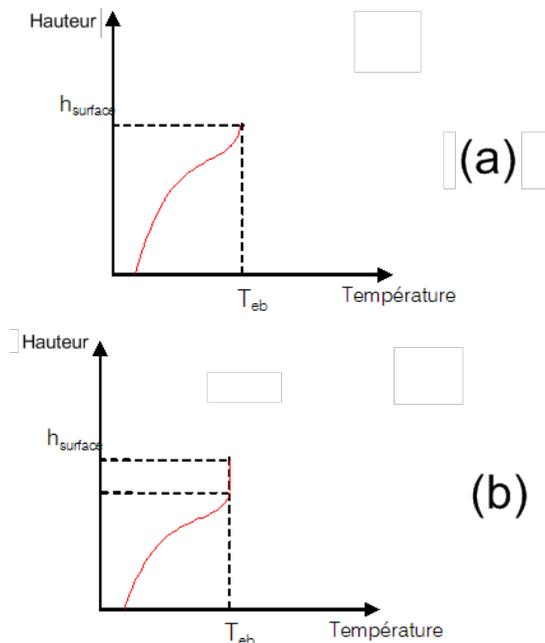


FIG. IV.6 – Phénomène d'ébullition en volume - Allure des gradients de température au sein de la phase liquide

Enfin, on constate une influence de la vitesse de ventilation sur le débit calorifique du foyer (figure IV.7). Les résultats obtenus ici avec les essais ETun01 et ETun02 peuvent être

confrontés à des essais réalisés lors d'une étude précédente dans cette même galerie. Cette étude antérieure avait été conduite sur des foyers heptane d'une puissance de référence de 750 kW, en configuration ouverte ou confinée dans une maquette de train, et avait pour but de quantifier l'effet de la vitesse de ventilation sur la puissance d'un foyer prenant naissance au sein d'une motrice. Ces essais sont dénommés essais Train, pour les distinguer des essais ETun réalisés pour la campagne du présent travail.

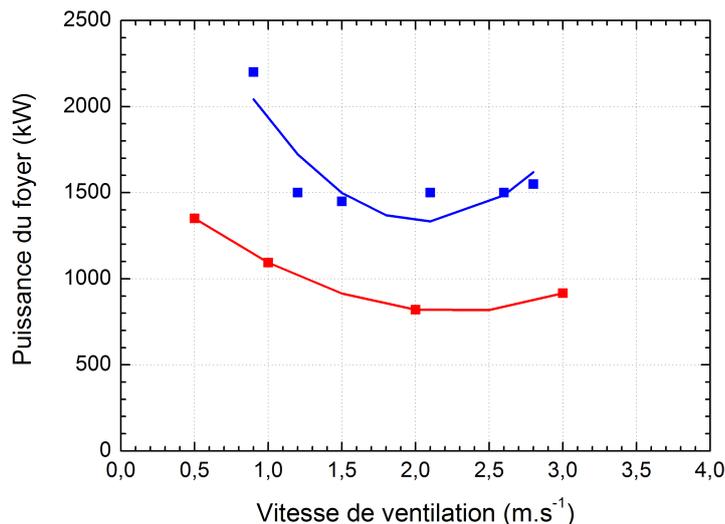


FIG. IV.7 – Influence de la vitesse de ventilation sur la puissance des foyers heptane découverts - (—) : Essais Train, (—) : Essais ETun

On observe que l'ensemble des foyers heptane sans couverture a le même comportement (figure IV.7), quelle que soit la puissance de référence (750 kW pour les essais Train, 1500 kW pour les essais ETun). A basse vitesse de ventilation, la puissance est plus élevée, de l'ordre de 50% supérieure à la puissance de référence du foyer, dans les deux configurations. Dans le cas des essais ETun, la puissance de référence est ensuite atteinte, à partir d'une vitesse de ventilation de 1,2 m.s⁻¹ et reste ensuite à ce niveau jusqu'à 2,5 m.s⁻¹, avant d'augmenter légèrement pour une vitesse de ventilation supérieure. Dans le cas des essais Train, la puissance va progressivement baisser pour avoisiner la puissance de référence, autour de 2 m.s⁻¹ avant, ici encore, d'augmenter pour une vitesse de ventilation de 3 m.s⁻¹. Lors de ces essais Train, le bac d'heptane était placé sur un dispositif le surélevant de 70 cm. Les flammes impactaient alors la voûte du tunnel, provoquant l'échauffement plus rapide de celle-ci par rapport à un foyer situé plus bas. Il en résultait un flux radiatif en retour vers le combustible important, réduisant l'influence de la ventilation sur la puissance du foyer. Cette augmentation de puissance à basse vitesse de ventilation provient de l'effet de confinement sur le foyer. Comme ceci a déjà été mentionné, l'échauffement des parois est plus important à basse vitesse de ventilation, car la flamme est moins inclinée, donc plus proche de la voûte. L'échauffement des parois est alors plus rapide. Celles-ci vont, en s'échauffant, émettre un flux de chaleur radiatif, dont une partie est dirigée vers la surface du combustible, et ainsi déplacer l'équilibre énergétique dans le sens d'une augmentation

de la vitesse d'émission de vapeurs combustibles.

Mais l'évolution de la puissance en fonction de la vitesse de ventilation vient en réalité essentiellement de la variation de la surface projetée de la flamme sur la nappe de combustible. La figure IV.8 schématise ce phénomène. A basse vitesse de ventilation (à gauche sur la figure IV.8), la flamme est peu inclinée et émet un certain flux radiatif, en direction du combustible. Ce flux dépend du volume de la flamme qui est en regard de la nappe. A vitesse de ventilation plus élevée (à droite sur la figure IV.8), la flamme s'incline. Une partie de celle-ci n'est donc plus au-dessus de la nappe, et le flux de chaleur émis de la flamme vers la surface du combustible est plus réduit, déplaçant l'équilibre énergétique de surface vers un abaissement de la puissance du foyer. De plus, cette inclinaison de la flamme l'éloigne de la voûte et ralentit son échauffement. Ainsi le flux de chaleur émis par la voûte vers le foyer est plus faible, déplaçant là aussi l'équilibre énergétique de surface dans le sens de l'abaissement de la vitesse d'émission de vapeurs combustibles.

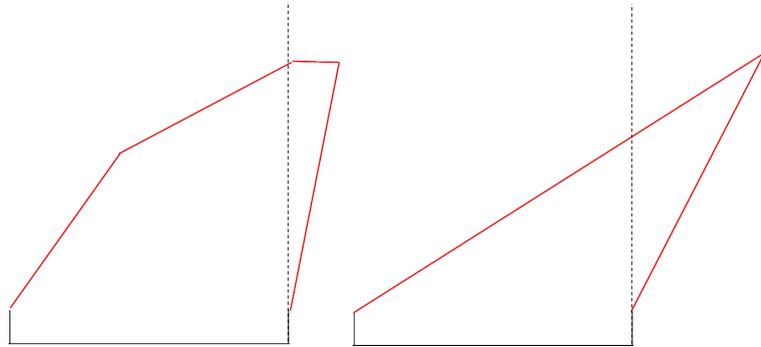


FIG. IV.8 – Variation de la projection du volume de flamme sur la nappe de combustible, cas d'un essai sans couverture

Dans le cas des essais ETun 07 et ETun 08, comportant des foyer heptane couverts, plusieurs points sont à remarquer. Tout d'abord, l'évolution de la puissance du foyer en fonction du temps (figure IV.9) est similaire à celle observée pour les essais ETun01 et ETun02, mais le niveau du palier est plus élevé (environ 30% par rapport aux essais sans couverture, augmentation due à la plaque horizontale proche de la surface du foyer (1 m de la surface du combustible en début d'essai)). Le flux de chaleur que la couverture renvoie au combustible est plus important que celui renvoyé par la voûte, déplaçant l'équilibre énergétique de surface vers une augmentation de la puissance du foyer.

Lors de l'essai ETun07, la vitesse de ventilation a été augmentée afin d'éviter qu'une partie des fumées ne s'échappe par l'entrée du tunnel. De plus, la masse d'heptane dans le bac en début d'essai est supérieure (21,5 kg au lieu de 20 kg pour l'essai ETun01). Malgré ces différences, le rapport $\frac{\text{Masse d'heptane consommée}}{\text{Durée de l'essai}}$ est égal dans les deux cas. A basse vitesse de ventilation, la couverture n'influe que peu sur le comportement du foyer, déjà soumis à l'effet de confinement du tunnel (fait déjà commenté pour l'essai ETun01).

Concernant l'essai ETun08 (avec une vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique), le comportement est différent de celui de l'essai découvert avec les mêmes conditions (ETun02). En effet, pour une vitesse de ventilation et une masse de combustible égales, l'essai avec couverture a une durée de 25 % inférieure. Les niveaux de puissance atteints lors des essais ETun01, ETun07 et ETun08 sont similaires. La couverture du foyer

lors des essais ETun07 et ETun08 créé un effet de confinement similaire à celui de la voûte et des parois du tunnel, la plaque étant suffisamment proche de la surface du combustible.

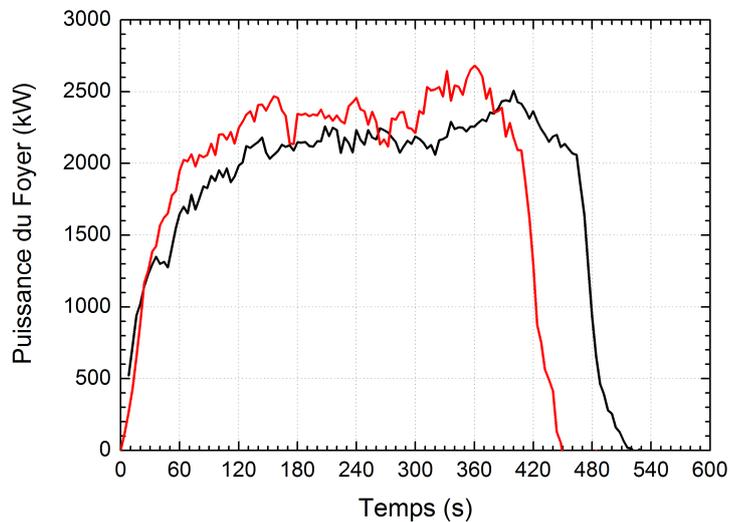


FIG. IV.9 – Essais ETun07 et ETun08 - Evolution de la puissance du foyer - (—) ETun07 et (—) ETun08

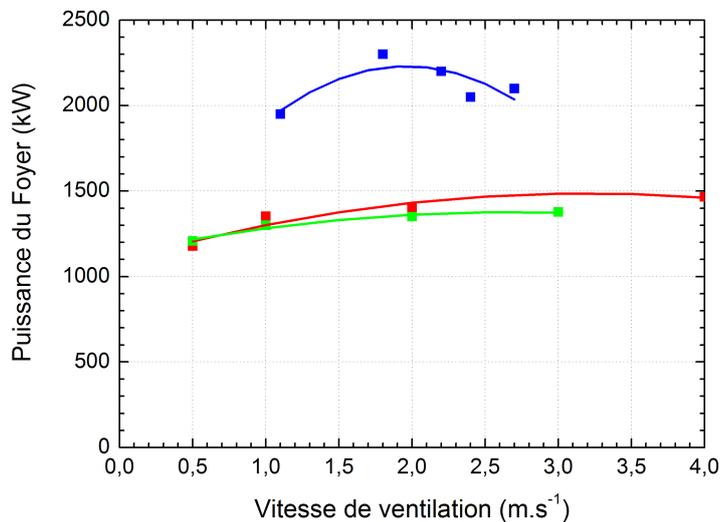


FIG. IV.10 – Influence de la vitesse de ventilation sur la puissance des foyers heptane couverts - (—) et (—) : Essais Train, (—) : Essais ETun

Sur la figure IV.9, l'augmentation de puissance en fin d'essai est là aussi discernable, mais a une amplitude bien plus faible que lors des essais sans couverture. Cependant,

dans le cas des essais réalisés avec couverture, le niveau de puissance en régime établi du foyer est supérieur à celui des foyers heptane sans couverture. L'élévation de puissance due à l'ébullition en volume du combustible représente donc lors des essais ETun07 et ETun08 environ 15% du niveau de puissance du foyer en régime établi, contre 40% pour les essais sans couverture. On peut en déduire que le phénomène d'ébullition en volume du combustible n'est pas proportionnel à la puissance nominale du foyer considéré.

On peut constater également que l'évolution de la puissance du foyer en fonction de la vitesse de ventilation (figure IV.10) est différente de celle observée lors des essais sans couverture. Là encore, les résultats de la campagne Train sont intéressants à confronter à ceux du présent travail.

A basse vitesse de ventilation, on constate que la puissance est supérieure à la puissance de référence : 1200 kW au lieu de 750 kW dans le cas des essais Train, et environ 2000 kW au lieu des 1500 kW dans le cas des essais ETun. Lorsque la vitesse de ventilation augmente, on constate une légère augmentation de la puissance du foyer, mais celle-ci se stabilise rapidement, autour de 1400 kW pour les essais Train et autour de 2300 kW dans le cas des essais ETun. L'allure générale de cette évolution de la puissance en fonction de la vitesse de ventilation est donc similaire dans les deux cas. La flamme impacte toujours la couverture (ou les parois de la maquette de train dans le cas des essais Train), quelle que soit la vitesse de ventilation, ce qui fait que le flux de chaleur rayonné par la couverture reste similaire dans les deux cas (basse et haute vitesse de ventilation). La part de la baisse de puissance due, dans le cas des essais avec bac découvert, à la diminution de la projection du volume de flamme sur la nappe de combustible, est ici moindre. En effet le caractère protégé du foyer limite l'influence de la ventilation sur l'inclinaison de la flamme.

Cependant, on peut observer une évolution différente entre les essais Train et les essais ETun à vitesse de ventilation plus élevée. Lors des essais Train couverts, la puissance du foyer reste constante à partir d'une vitesse de ventilation de 1 m.s^{-1} . Dans le cas des essais ETun couverts, la puissance recommence à diminuer à partir d'une vitesse de ventilation de 2 m.s^{-1} . Ceci est dû au confinement différent des deux types de foyers : dans le cas des essais Train, le foyer est entièrement contenu dans la maquette, tandis que lors des essais ETun, le bac est simplement placé sous une plaque. Cette configuration plus ouverte fait que le confinement est dû aux parois latérales du tunnel et à la plaque. Une vitesse de ventilation élevée limite l'échauffement des parois de l'ouvrage et donc le flux de chaleur radiatif global renvoyé à la surface du combustible est plus faible.

IV.2.2.4 Températures et stratification des fumées

Nous avons déjà mentionné dans le premier chapitre combien il est important de connaître les mouvements des fumées lors d'un incendie dans un tunnel. On parle de *stratification* des fumées pour qualifier leur structuration. Plusieurs paramètres peuvent être retenus pour localiser les fumées : température, concentration des espèces ou vitesse de l'écoulement. Généralement, on retient une caractérisation thermique des fumées, la concentration en produits de réaction étant liée à la température.

Rappelons que, dans le cas d'un incendie en tunnel ventilé longitudinalement, le problème consiste à trouver un compromis entre la préservation de la stratification (afin de conserver une couche dégagée de fumées dans la partie basse du tunnel) et l'évacuation des fumées vers l'aval afin de dégager l'accès aux services d'intervention et de refroidir suffisamment la zone en amont du foyer pour la rendre tenable pour les usagers.

Lors des essais découverts, l'évolution des températures est semblable à l'évolution de la puissance du foyer. Ceci est notamment visible au niveau des sections aval proches (illustré pour l'essai ETun01 en figure IV.11 et pour l'essai ETun02 sur la figure IV.12). Par exemple, sur les résultats de l'essai ETun01, on retrouve les phases de croissance du foyer (de 0s à 120s), puis le régime pseudo-établi (de 120s à 320s), le pic de puissance (de 320s jusqu'à l'extinction du foyer). Toujours concernant l'essai ETun01, l'effet de confinement déjà évoqué pour la puissance se retrouve ici. Les niveaux de température sont plus élevés que ceux relevés lors de l'essai ETun02 (de l'ordre de 60% supérieur au niveau du pic de puissance) à 4 mètres en aval du foyer. Cependant, si l'on observe les sections situées plus en aval du foyer, on peut constater que les écarts de niveaux de température décroissent pour devenir minimales (moins de 20 °C d'écart) au niveau de la section T+24, comme on peut le constater en figures IV.13 à IV.18.

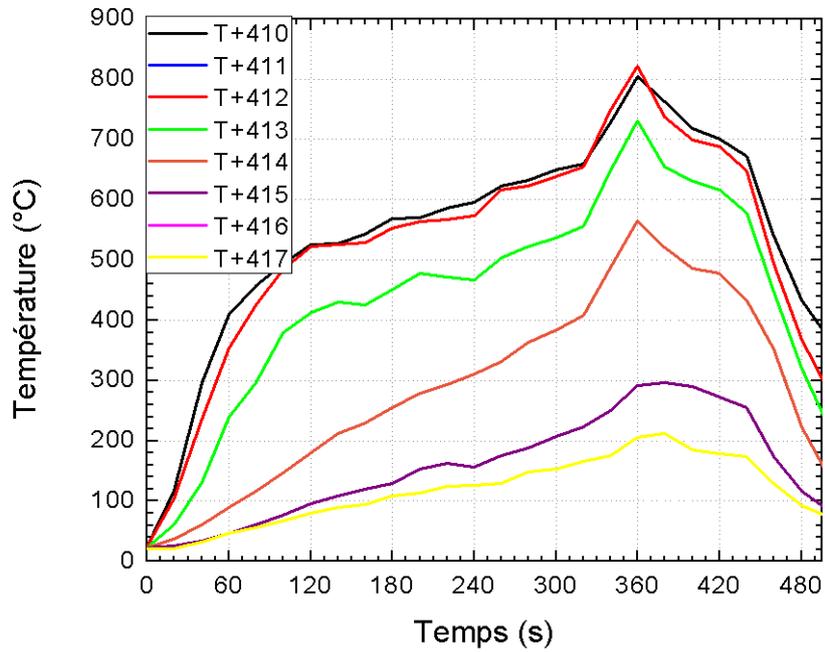


FIG. IV.11 – Essai ETun01 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4

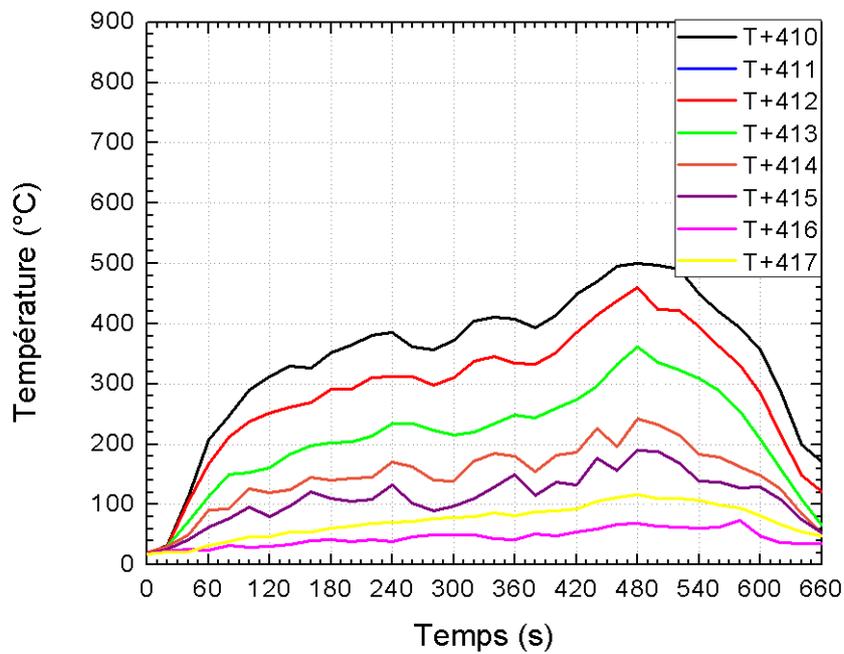


FIG. IV.12 – Essai ETun02 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4

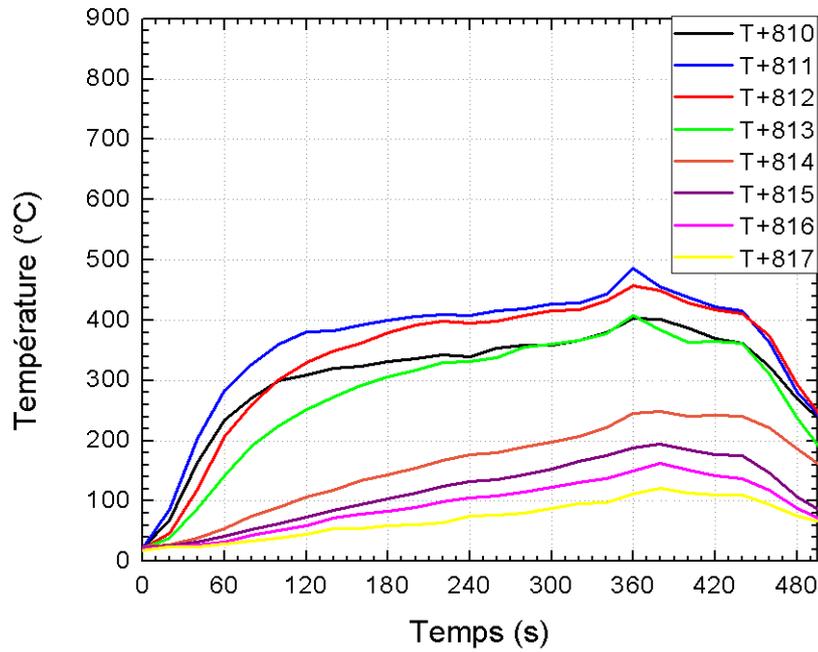


FIG. IV.13 – Essai ETun01 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+8

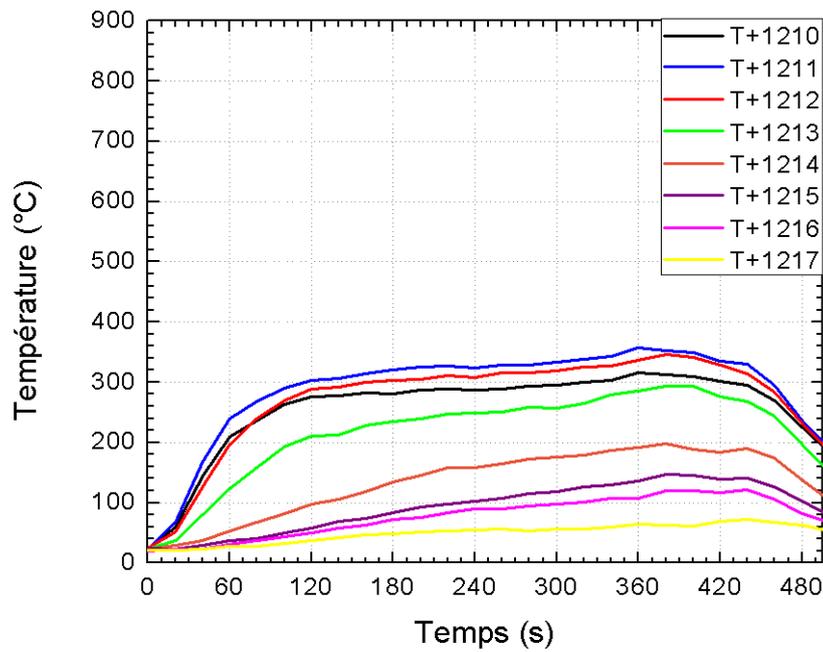


FIG. IV.15 – Essai ETun01 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12

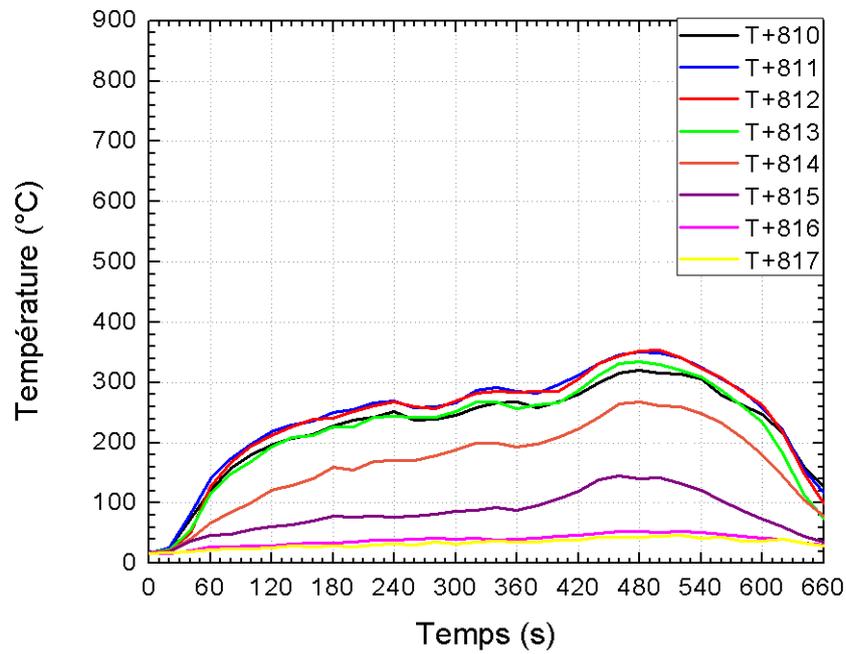


FIG. IV.14 – Essai ETun02 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+8

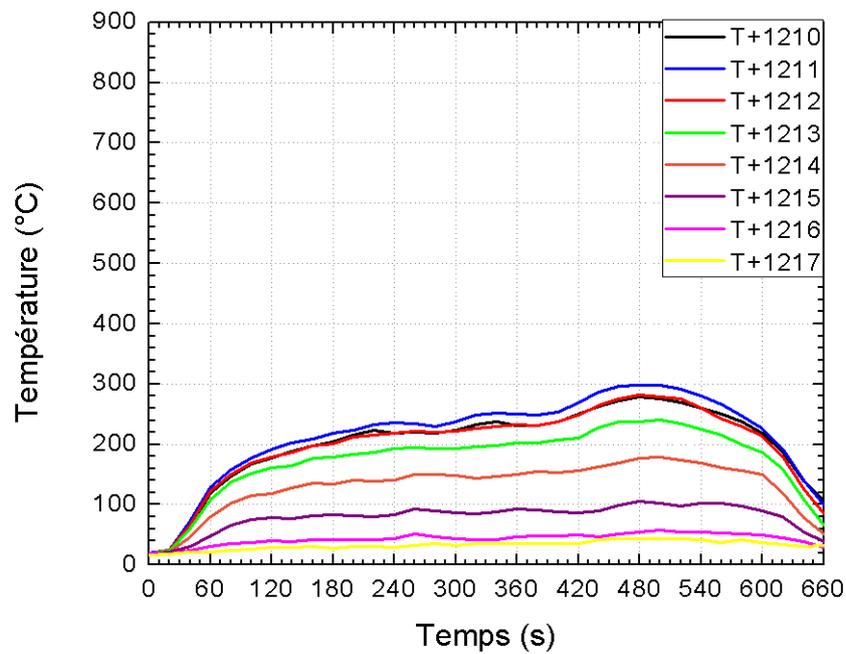


FIG. IV.16 – Essai ETun02 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12

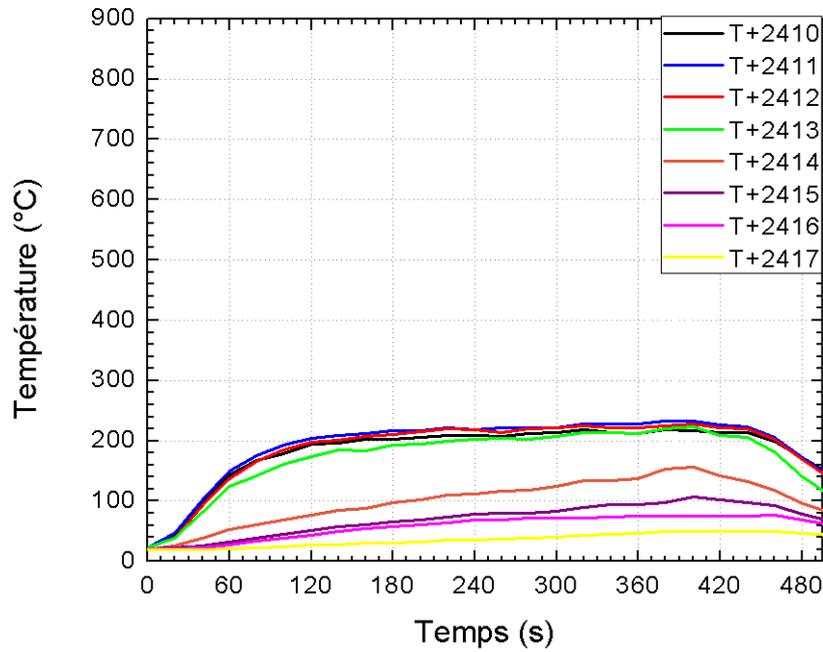


FIG. IV.17 – Essai ETun01 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+24

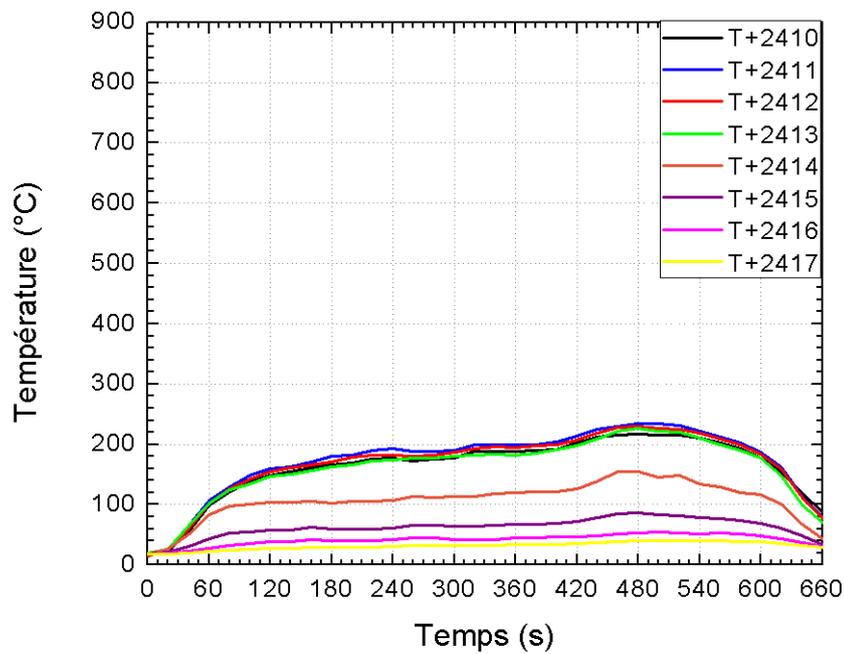


FIG. IV.18 – Essai ETun02 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+24

A partir des données de température, on peut délimiter des zones de tenabilité thermique au sein du tunnel. On distingue alors les régions du tunnel tenables pour les services de secours et pour les usagers (d'après les valeurs précédemment citées dans le tableau I.1). On identifie clairement l'existence de la couche de retour lors de l'essai ETun01 (figure IV.19). On constate que, dans ces conditions de ventilation (vitesse inférieure à la vitesse critique), l'approche est possible par l'amont, du fait du caractère stratifié des fumées. Si la couche de retour est chaude, elle est suffisamment haute pour permettre aux services de secours d'opérer (0,8 m lors de l'essai, ce qui correspond en vraie grandeur à une hauteur sous fumées de l'ordre de 2,6 m).

En traçant la répartition des températures par sections pour l'essai ETun01 (figure IV.21), on constate la présence de strates de température en amont, ainsi qu'en aval, à l'exception de la section T+4, située juste en aval du foyer. Cette répartition sur T+4 met en évidence le prolongement du panache de la flamme. On observe cependant que les zones chaudes (d'une température supérieure à 300°C) sont concentrées dans la moitié supérieure du tunnel. De plus, les thermocouples placés près des parois du tunnel indiquent des températures plus basses (de l'ordre de 150°C). L'air circulant dans cette partie latérale du tunnel est l'air provenant de l'amont, simplement chauffé par le rayonnement de la couche de retour ainsi que par la flamme. Plus en aval, la température est à nouveau répartie en strates. Mais la totalité du tunnel est impraticable pour une personne non protégée (température supérieure à 50°C). Ceci illustre la difficulté, dans le cas d'un tunnel bidirectionnel, de maintenir celui-ci dégagé de fumées de part et d'autre du foyer dans sa partie inférieure et de maintenir une zone de température supportable le temps de l'évacuation des usagers.

Dans le cas où la vitesse de ventilation est supérieure à la vitesse critique (figure IV.20), la totalité du secteur amont du foyer est praticable. Les niveaux de température sont proches de la température extérieure et il n'y a bien entendu pas de couche de retour de fumées développée. En ce qui concerne la situation à l'aval, on peut voir sur la figure IV.22 que la distribution de température est là aussi organisée en strates. Mais si le niveau de ces températures est plus faible que dans le cas de l'essai ETun01, les gradients de température sont aussi plus faibles. Il est toutefois très important de faire remarquer que, si les niveaux de température sont globalement inférieurs dans la totalité du tunnel, le problème du rabattage des fumées rend cette option inacceptable s'il reste des usagers dans la partie aval de l'ouvrage.

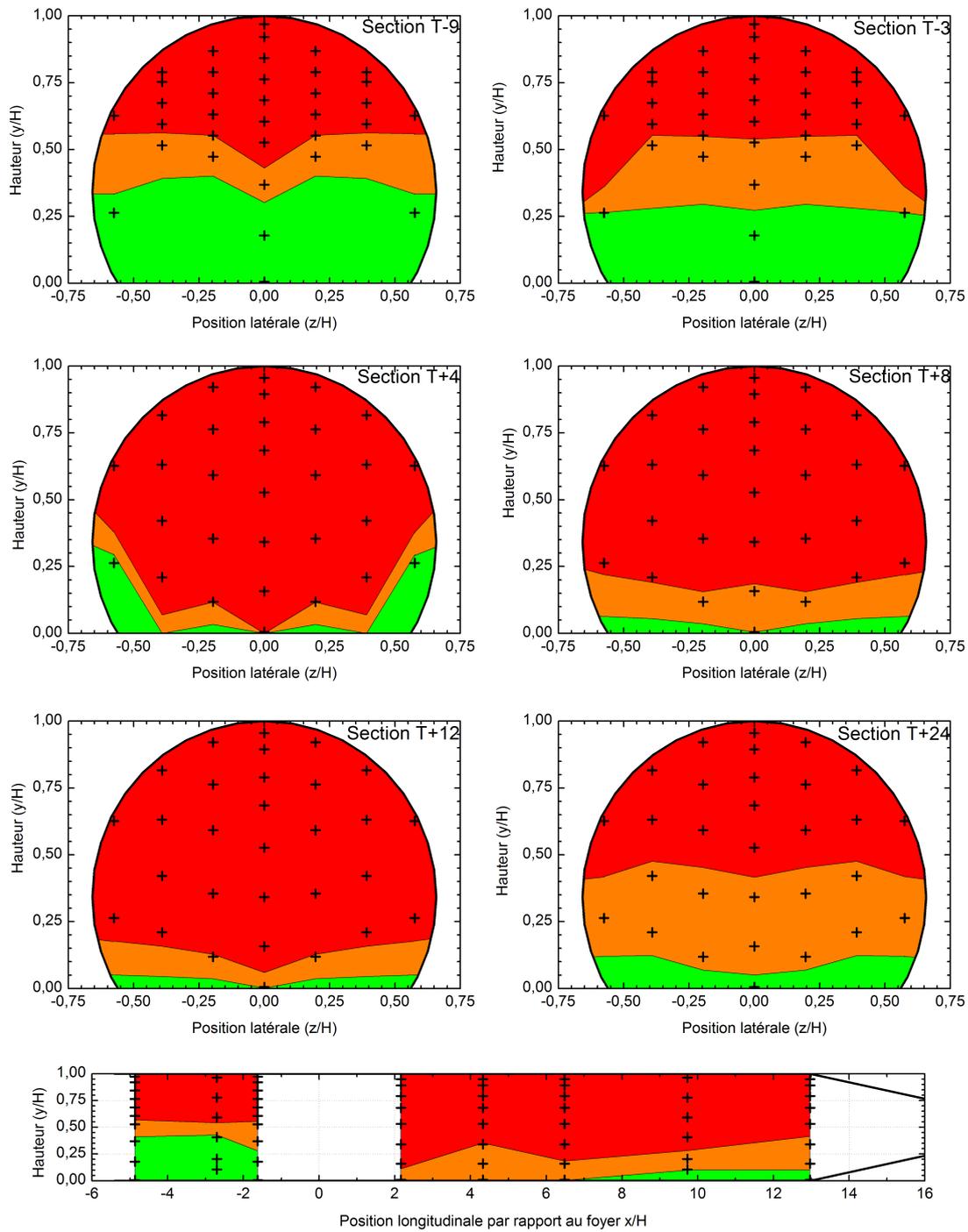


FIG. IV.19 – Essai ETun01 - Zones de tenabilité thermique - $t=300s$ - (■) : $T \leq 50^{\circ}C$, (■) : $50 \leq T \leq 100^{\circ}C$, (■) : $T \geq 100^{\circ}C$

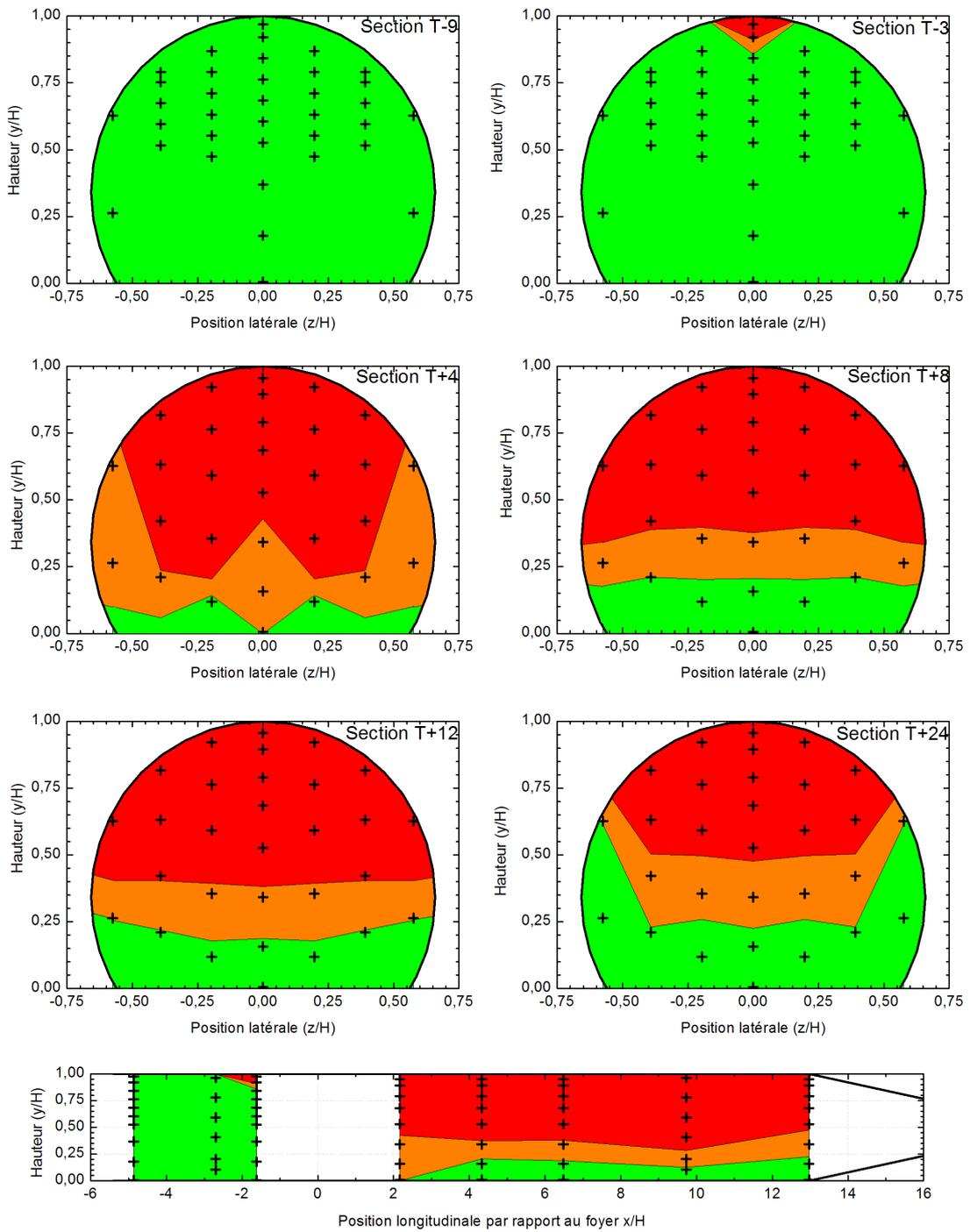


FIG. IV.20 – Essai ETun02 - Zones de tenabilité thermique - $t=300\text{s}$ - (■) : $T \leq 50^\circ\text{C}$, (■) : $50 \leq T \leq 100^\circ\text{C}$, (■) : $T \geq 100^\circ\text{C}$

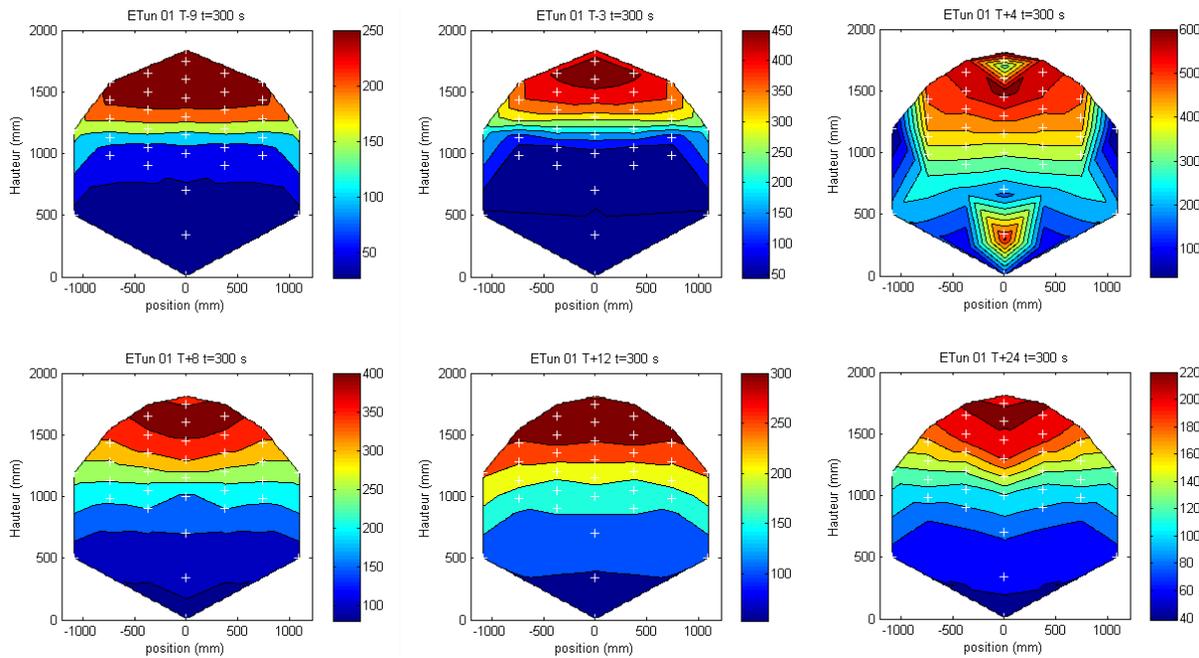


FIG. IV.21 – Essai ETun01 - Répartition de la température par section - $t=300s$

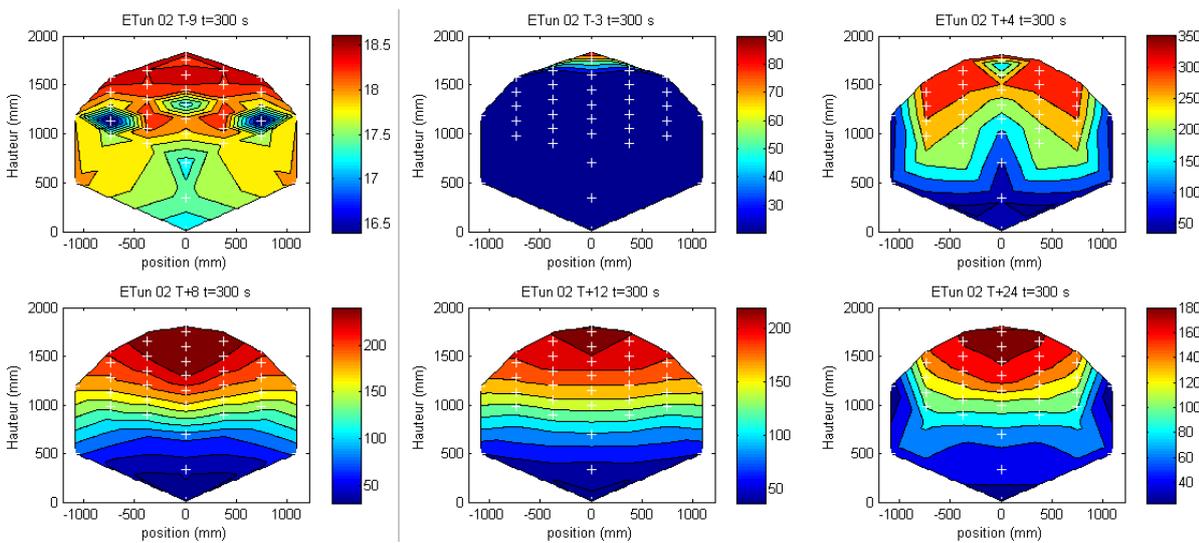


FIG. IV.22 – Essai ETun02 - Répartition de la température par section - $t=300s$

Si les essais couverts ETun07 et ETun08 ont un débit calorifique plus élevé que les essais ETun01 et ETun02, le champ de température dans le tunnel n'est que peu différent. On retrouve, à une vitesse inférieure à la vitesse critique (essai ETun07, figure IV.24), une couche chaude sous voûte disposée en strates avec des niveaux similaires à ceux relevés au cours de l'essai ETun01. Puisque la vitesse de ventilation est plus forte que dans le cas sans couverture, la zone chaude en retour lors de l'essai ETun07 est plus mince et atteint des niveaux moins élevés que lors de l'essai ETun01. En ce qui concerne l'essai ETun08, contrairement au cas sans couverture, les niveaux de température restent similaires à ceux de l'essai ETun07 (figure IV.25). L'épaisseur de la zone chaude est cependant là aussi plus

importante que dans le cas où la vitesse de ventilation est inférieure à la vitesse critique. La figure IV.23 montre la disposition des zones de tenabilité dans le cas des essais couverts (exemple de l'essai ETun07).

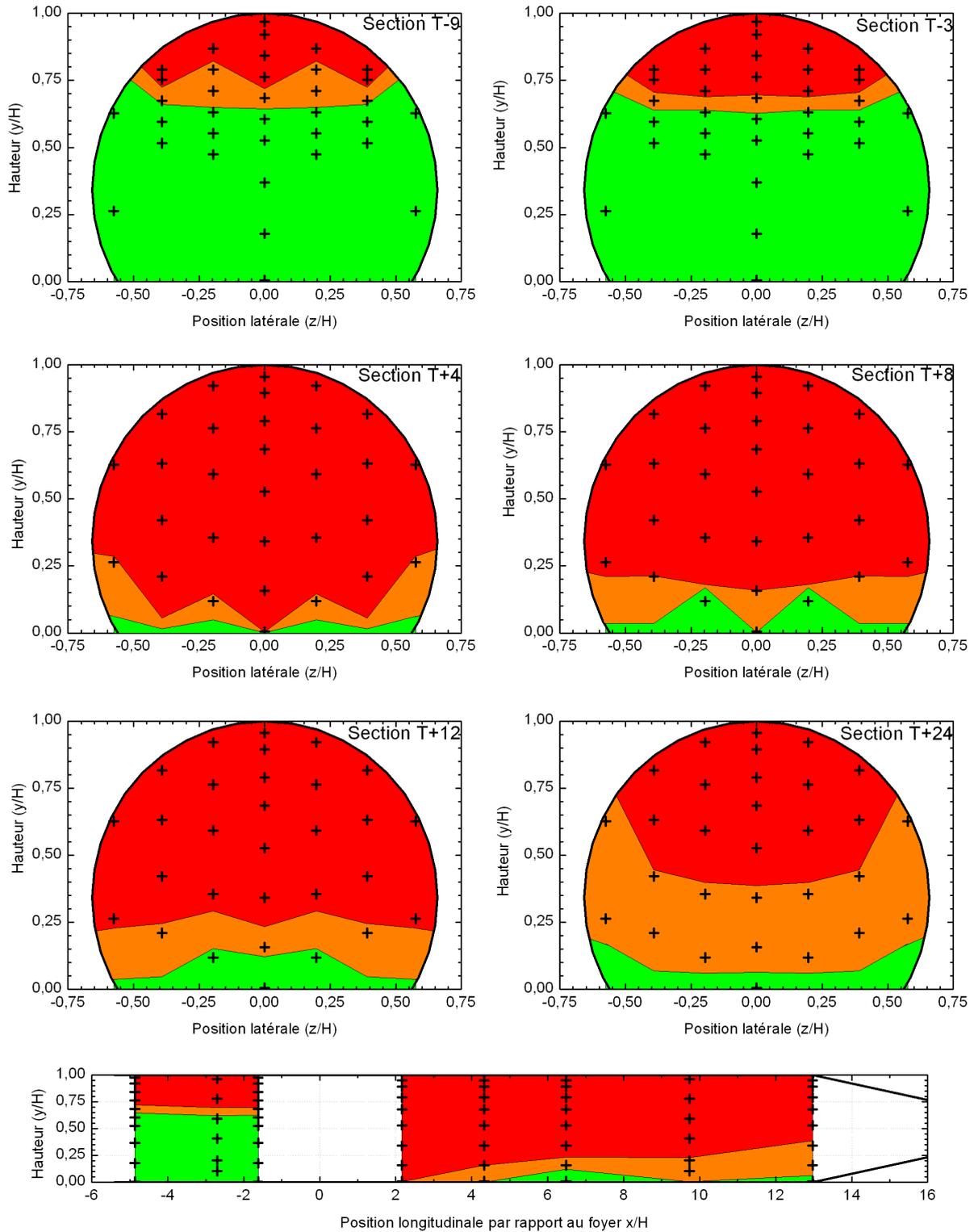


FIG. IV.23 – Essai ETun07 - Zones de tenabilité thermique - $t=300s$ - (■) : $T \leq 50^{\circ}C$, (■) : $50 \leq T \leq 100^{\circ}C$, (■) : $T \geq 100^{\circ}C$

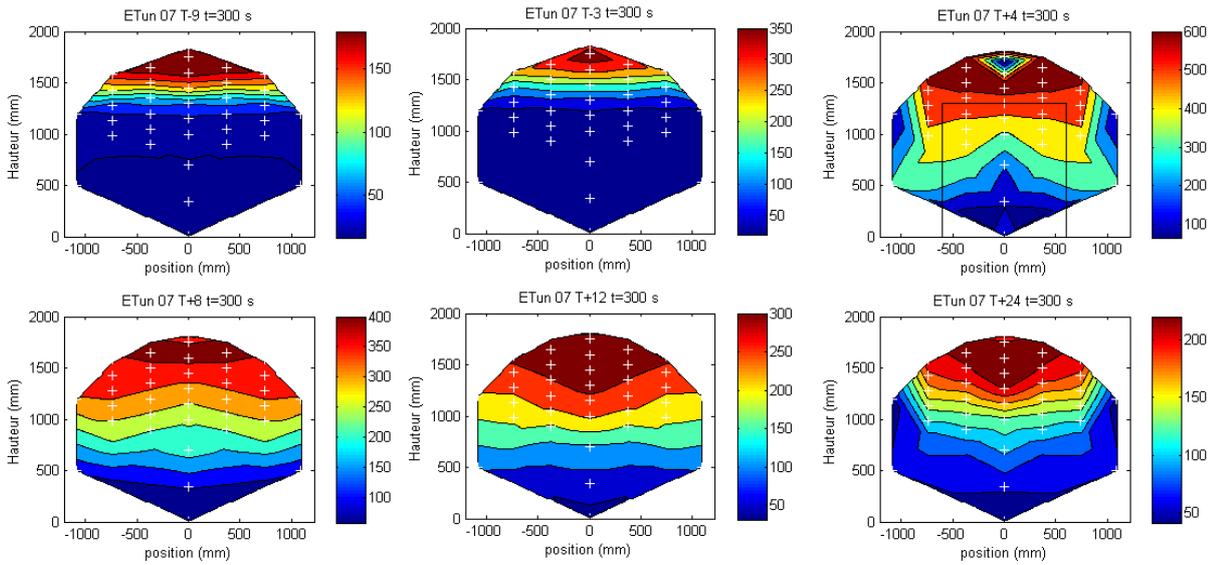


FIG. IV.24 – Essai ETun07 - Répartition de la température par section - $t=300s$

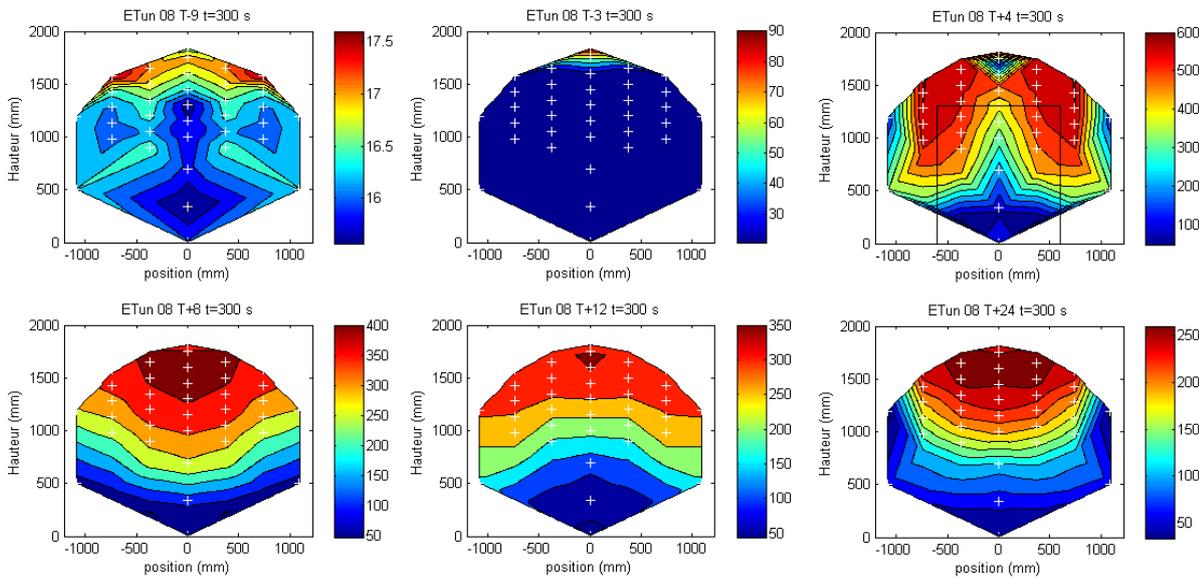


FIG. IV.25 – Essai ETun08 - Répartition de la température par section - $t=300s$

Une autre façon de visualiser rapidement la stratification et de localiser la hauteur de la couche de fumées est de tracer les profils verticaux de température. Les figures présentées en IV.26 montrent les profils de température obtenus lors de l'essai ETun01, donc avec une vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique, à 120s (fin de mise en régime du foyer) et à 320s (juste avant le pic de puissance). La couche de retour, constituée de fumées chaudes, peut y être discernée.

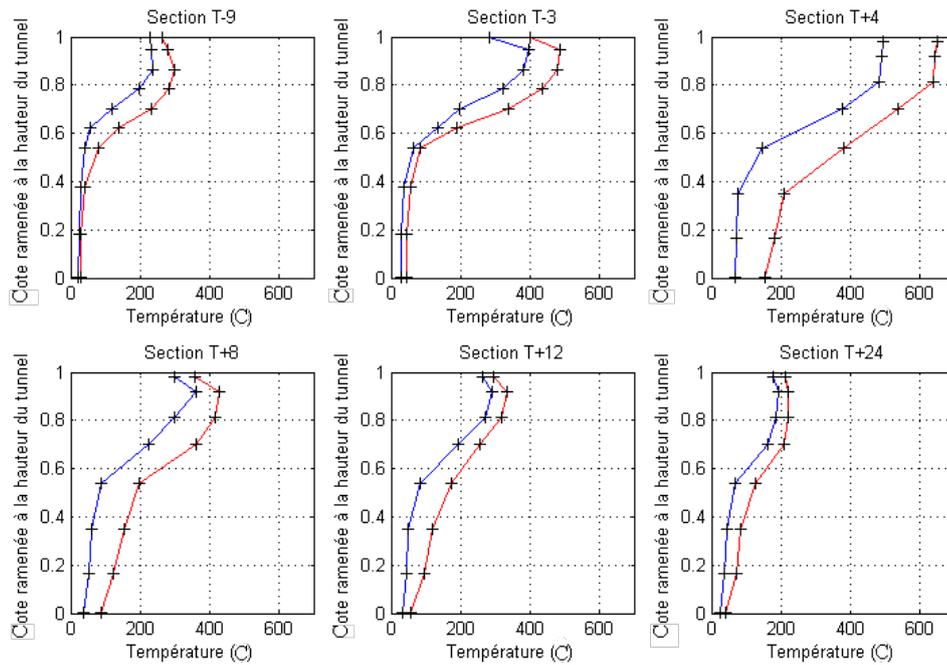


FIG. IV.26 – Essai ETun01 - Profils verticaux de température, normés selon la hauteur du tunnel à 120s (—) et 320s (—)

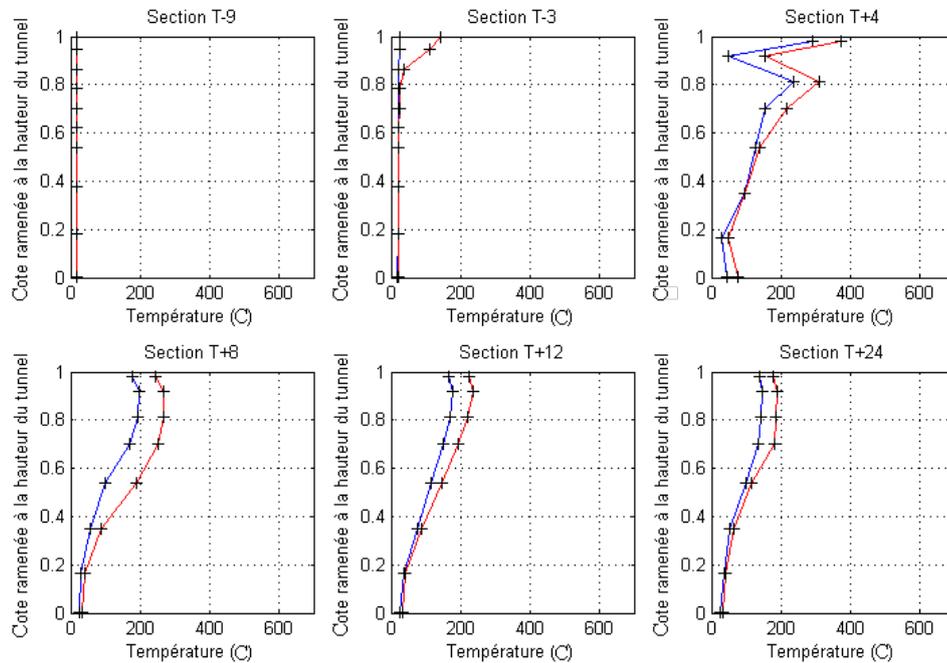


FIG. IV.27 – Essai ETun02 - Profils verticaux de température, normés selon la hauteur du tunnel, à 120s (—) et 320s (—)

La figure IV.27 illustre les profils de température verticaux lors de l'essai ETun02, avec une vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique. On peut attribuer l'élévation de

température en T-3 à l'échauffement de la voûte. De plus, l'aspect similaire des profils au niveau des sections aval à partir de T+8 indique une stratification régulière le long de la partie aval du tunnel.

Par ailleurs, il existe, comme nous l'avons mentionné au chapitre précédent, des critères thermiques permettant d'analyser la stratification des fumées (relations (III.6) et (III.7)). Ils sont rappelés ci-dessous :

$$S = \frac{T_v - T_s}{T_{moy} - T_0}$$

$$D = \frac{T_v - T_s}{T_v - T_0}$$

avec : T_v [K] Température au faitage de la voûte
 T_s [K] Température au sol
 T_{moy} [K] Température moyenne déduite par intégration du profil vertical de température
 T_0 [K] Température en entrée de la structure

Ces deux critères représentent le "degré" de stratification au sein de l'écoulement. Ils ne caractérisent pas le niveau de température atteint, mais uniquement sa répartition le long du profil vertical. Ils donnent juste une indication sur les épaisseurs relatives des couches chaude et froide. Le critère S compare le gradient vertical de température à l'écart entre la température moyenne du profil et celle d'entrée. Plus la couche chaude est épaisse, plus T_{moy} tend vers T_c et plus S tend vers D. Lorsque le critère S est supérieur à 1, il traduit la présence d'une couche chaude par rapport à l'échauffement global du tunnel. Newman [73] a mis en évidence une valeur caractéristique du critère S : $S = 1,7$ qui est une valeur charnière. Lorsque le critère S est inférieur à 1,7, la différence de niveau de température entre la couche chaude et le niveau ambiant dans l'ouvrage n'est pas significative. Cette gamme de valeurs est liée à des écoulements présentant de grands nombres de Froude. On a une interaction importante entre la ventilation et les forces de gravité, caractérisant un écoulement instable et non stratifié. A contrario, lorsque S est supérieur à 1,7, l'écoulement est considéré comme stable et stratifié. Le critère met en évidence la présence d'une couche froide par une différence entre la température au plafond et la température au sol plus élevée que l'élévation globale de température dans l'ouvrage. Dans ce cas, si l'on ne tient pas compte de l'échauffement du sol par rayonnement, le critère D tend vers 1.

Si on trace l'évolution du critère S pour les essais ETun01 et ETun02 (figure IV.28), on peut observer que le critère S est au-dessous de la valeur critique pendant la majeure partie de l'essai. Cependant, le contrôle visuel des fumées lors de celui-ci permet de voir qu'il y a stratification, avec une couche de fumées bien séparée de la couche d'air frais. La cause de ce comportement du critère S est que, lors de l'essai ETun01, la vitesse de ventilation était de $1,1 \text{ m.s}^{-1}$, nettement inférieure à la vitesse critique. Il se produit alors un échauffement global du tunnel important et la couche de fumées est elle aussi plus épaisse (bien visible sur les résultats de température). Le terme T_{moy} augmente au fur et à mesure que la couche de fumées s'épaissit. Le terme T_0 reste constant, entraînant une augmentation du dénominateur du critère S. Le gradient thermique varie peu (augmentation de T_c et T_f

conjointe lors de l'échauffement du tunnel), ce qui fait que le numérateur de S ne varie lui aussi que peu (figure IV.29). Par la suite, les essais avec vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique ont été menés avec une vitesse de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$.

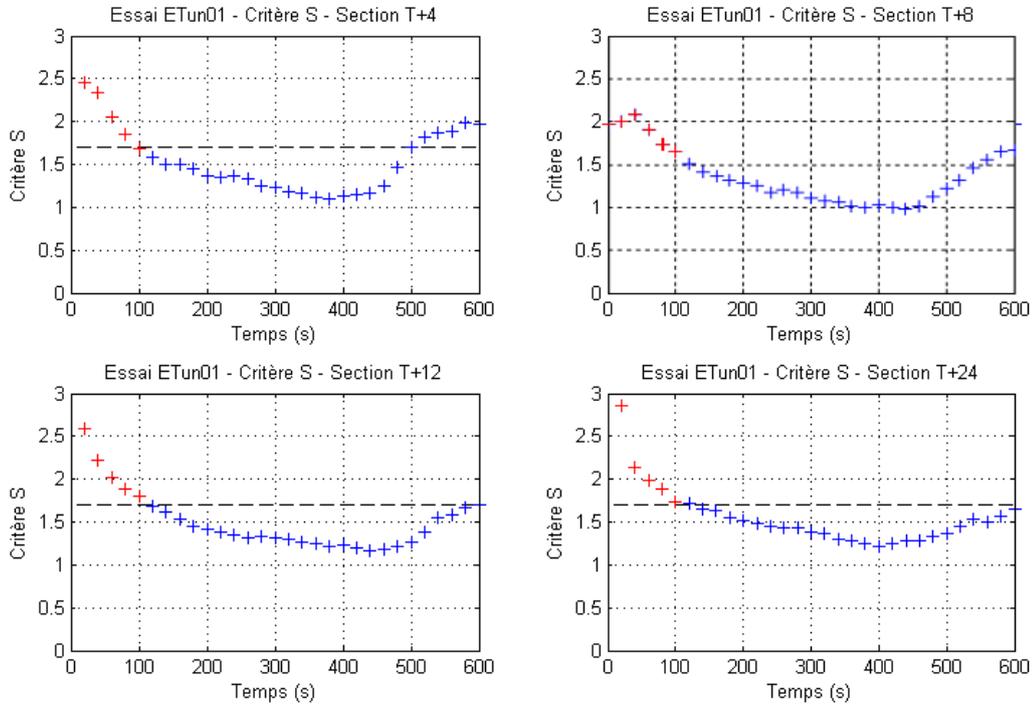


FIG. IV.28 – Essai ETun01 - Evolution temporelle du critère de stratification S

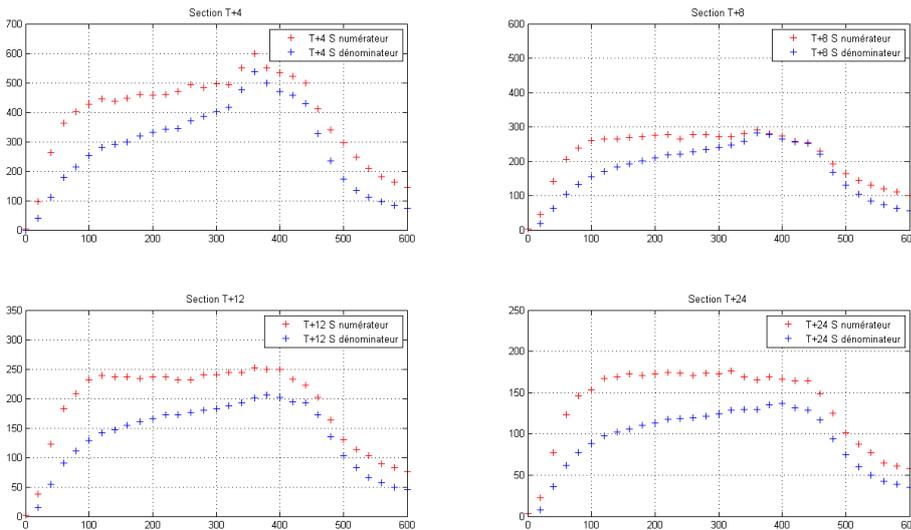


FIG. IV.29 – Essai ETun01 - Comparaison des parts respectives du numérateur et du dénominateur du critère de stratification S

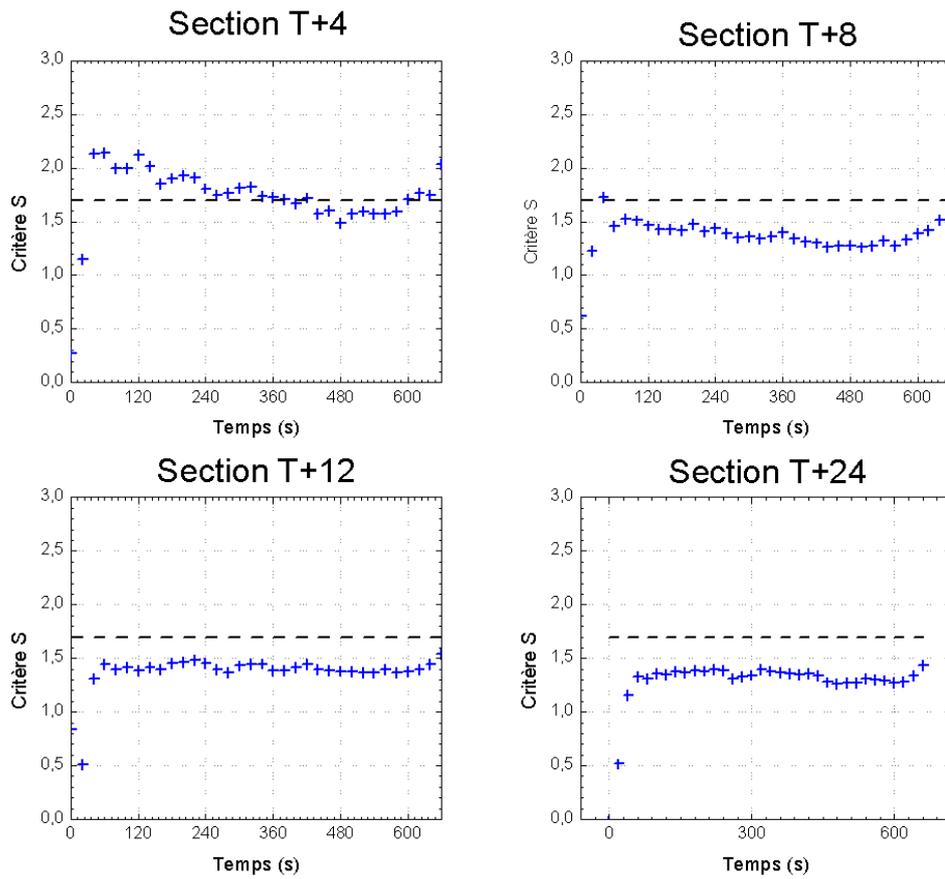


FIG. IV.30 – Essai ETun02 - Evolution temporelle du critère de stratification S

En ce qui concerne l'essai ETun02 (figure IV.30), on observe qu'il y a stratification à proximité du foyer en T+4, ainsi qu'en T+8 jusqu'à 420 secondes, et qu'ensuite s'établit un régime de quasi-stratification. Concernant les sections T+12 et T+24, on peut voir qu'il n'y a plus de stratification : la fumée occupe l'ensemble de la section du tunnel.

IV.2.2.5 Flux rayonnés

De même que pour les mesures de température, l'allure des flux rayonnés relevés suit celle de la puissance du foyer. On peut remarquer qu'en toute logique, le flux rayonné vers l'amont est bien plus faible que celui rayonné vers l'aval (figure IV.31, IV.32, IV.33 et IV.34), bien que les capteurs soient dans les deux cas à 7 m du foyer. Les valeurs données par les différents radiomètres sont proches les unes des autres, ce qui est représentatif de profils relativement plats.

Si l'on observe les résultats en aval de l'essai ETun01, on peut remarquer qu'au moment de l'augmentation de puissance due à l'ébullition en volume, vers 320 secondes, les trois capteurs situés entre 50 et 110 cm de hauteur présentent une brusque augmentation.

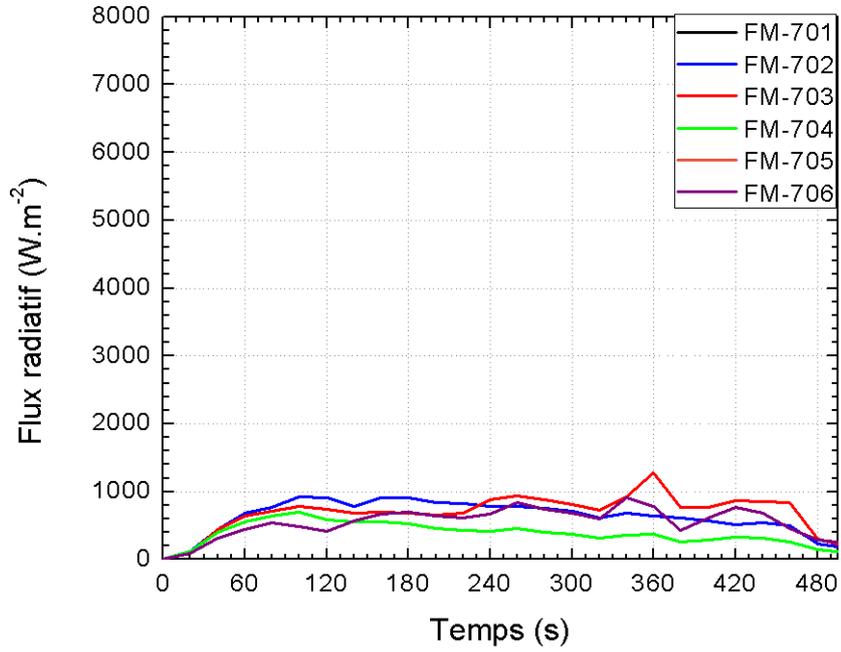


FIG. IV.31 – Essai ETun01 - Evolution temporelle des flux rayonnés en section FM-7

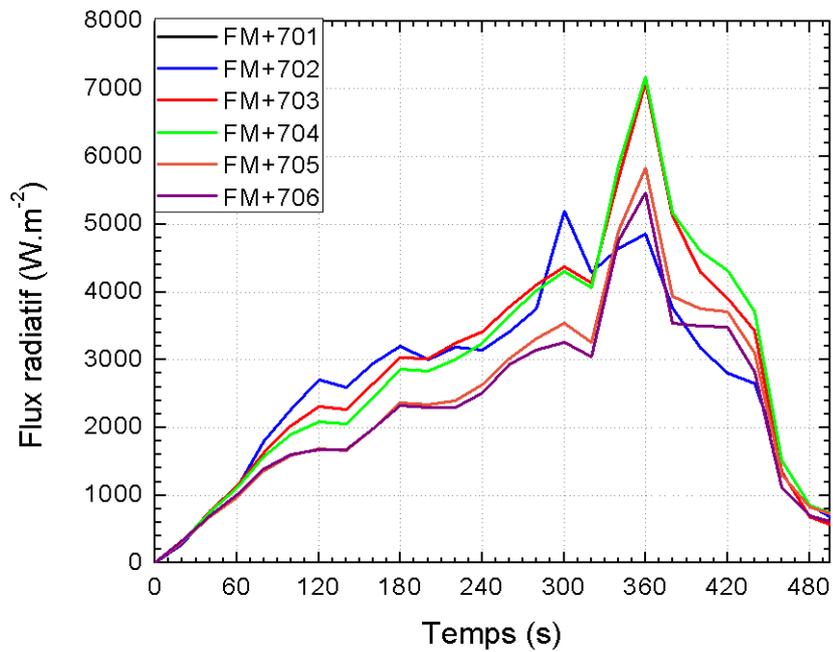


FIG. IV.32 – Essai ETun01 - Evolution temporelle des flux rayonnés en section FM+7

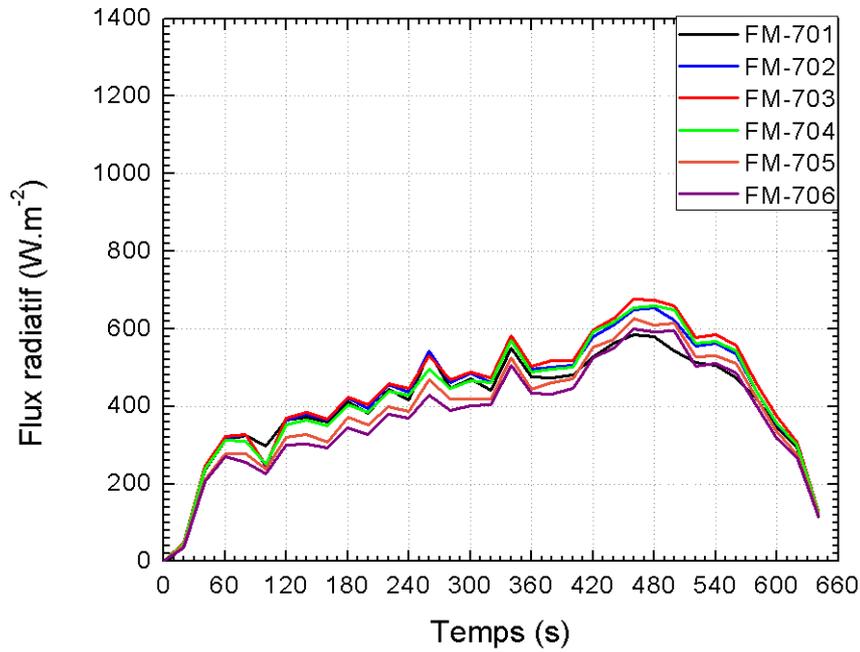


FIG. IV.33 – Essai ETun02 - Evolution temporelle des flux rayonnés en section FM-7

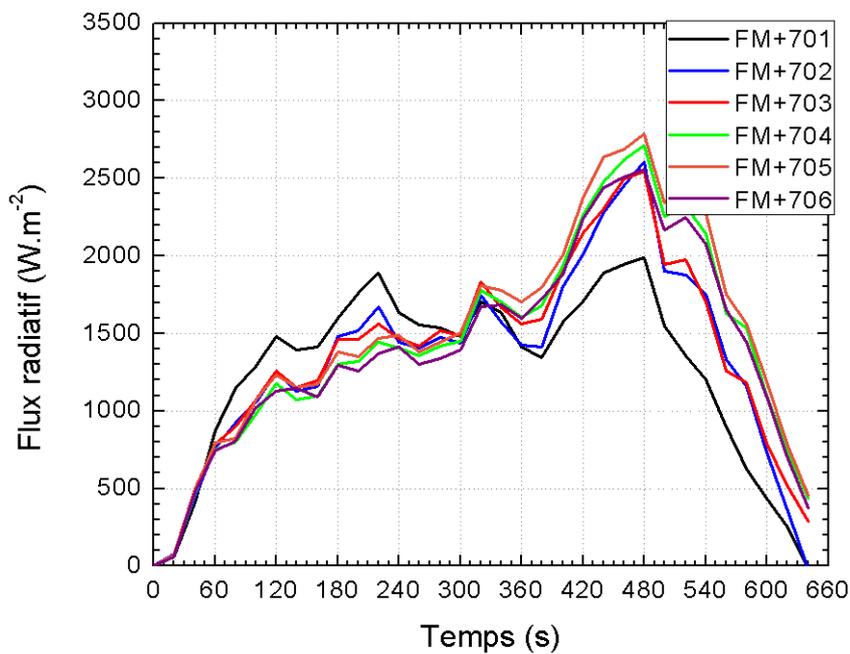


FIG. IV.34 – Essai ETun02 - Evolution temporelle des flux rayonnés en section FM+7

En ce qui concerne les essais ETun07 et ETun08 (foyer couvert), si l'évolution des flux

amont est similaire à celle des essais ETun01 et ETun02 respectivement, la situation en aval est différente. L'évolution temporelle de ces flux mesurés est présentée sur les figures IV.35 et IV.36. Lors de l'essai ETun07, les comportements sont similaires lors de la phase de montée en puissance du foyer (durant les 240 premières secondes), hormis pour le capteur FM+701 qui atteint son maximum en 120 secondes. Les niveaux atteints lors de l'essai ETun07 sont, en ce point, supérieurs d'environ 15 % à ceux relevés lors de l'essai non couvert. On observe ensuite un comportement différent des flux selon la position du capteur sur la section. Le signal du capteur FM+701 diminue par la suite régulièrement jusqu'à la fin de l'essai. Les signaux des capteurs FM+702, 703 et 704 stagnent de $t=240$ secondes jusqu'à la fin de l'essai, tandis que les signaux des deux capteurs FM+705 et FM+706, situés en bas du profil, respectivement à 50cm et 25 cm du sol, donnent des résultats en augmentation régulière tout au long du régime établi du foyer. Le pic de puissance final est, là aussi, visible sur les capteurs FM+703, FM+704 et FM+705, dans les mêmes proportions que pour la puissance du foyer (15%).

Lors de l'essai ETun08 (figures IV.37 et IV.38), on remarque un comportement similaire et les mêmes niveaux de flux que lors de l'essai ETun07 pour les différents capteurs, à l'exception des trois capteurs situés en haut du profil (FM+701, FM+702 et FM+703 à 160, 130 et 110 cm respectivement du sol). Leurs niveaux diminuent au cours du temps après un maximum atteint vers 150 secondes. Les mesures des capteurs FM+705 et FM+706, quant à eux, augmentent régulièrement jusqu'à l'extinction du foyer.

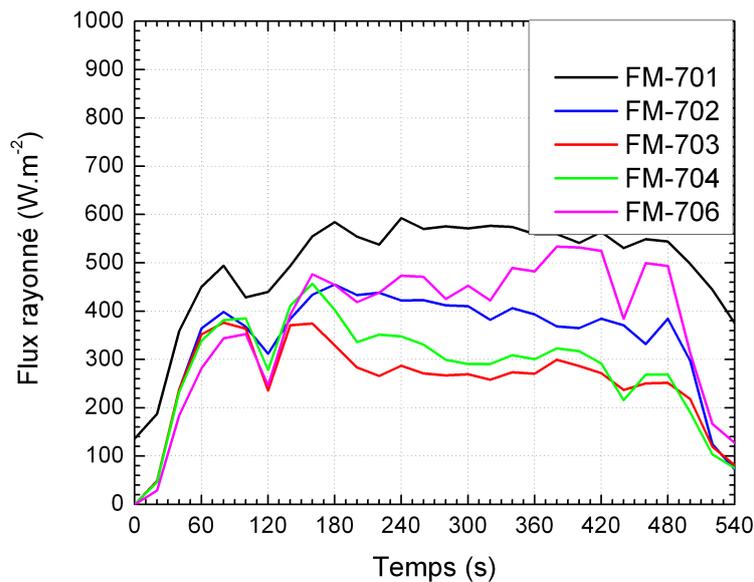


FIG. IV.35 – Essai ETun07 - Evolution temporelle des flux rayonnés en section FM-7

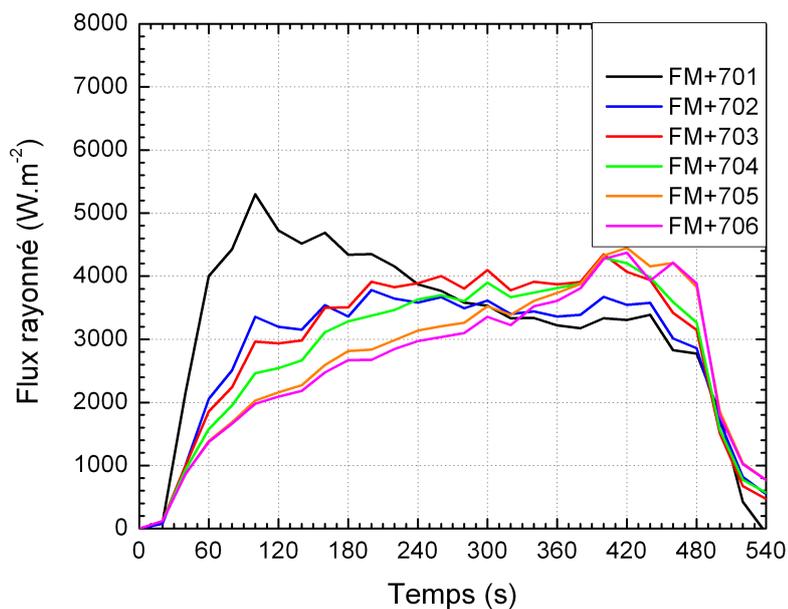


FIG. IV.36 – Essai ETun07 - Evolution temporelle des flux rayonnés en section FM+7

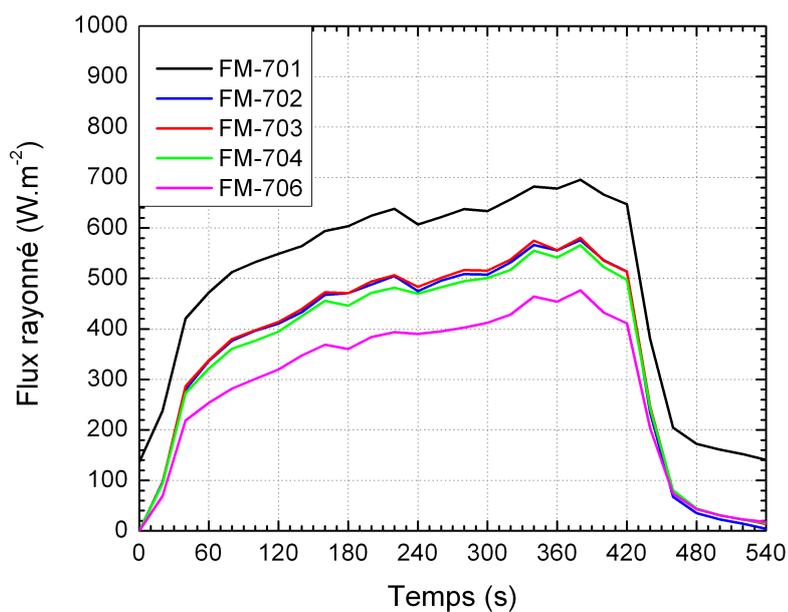


FIG. IV.37 – Essai ETun08 - Evolution temporelle des flux rayonnés en section FM-7

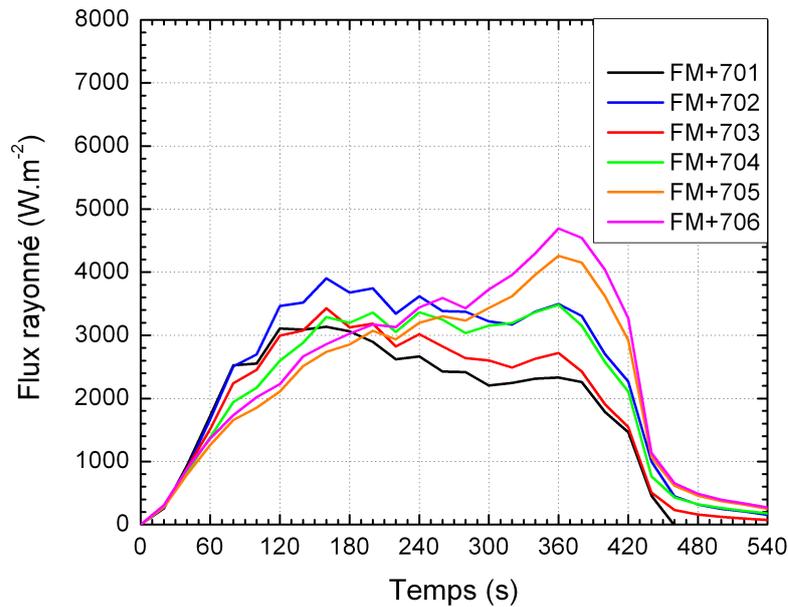


FIG. IV.38 – Essai ETun08 -Evolution temporelle des flux rayonnés en section FM+7

IV.2.2.6 Opacimétrie

Les deux transmissiomètres à lumière blanche situés en aval du tunnel (section S+23) permettent d'apprécier l'évolution de l'opacité des fumées. Pour ce faire, on définit dans ce travail la visibilité comme étant le rapport : $Vis = \frac{I}{I_0}$, en %, I étant l'intensité lumineuse mesurée par le récepteur et I_0 étant l'intensité lumineuse mesurée avant allumage.

Lors de l'essai ETun01 (figure IV.39), on voit clairement l'envahissement d'une grande partie du tunnel par des fumées denses (le signal lumineux est totalement atténué dès 240s dans la partie haute de l'ouvrage, tandis que la perte de visibilité est de 30% à hauteur d'homme). Ceci corrobore bien les résultats obtenus par l'étude de la stratification thermique. L'augmentation de l'atténuation à $t=360s$ est le reflet de l'augmentation de la puissance du feu en fin d'essai.

Dans le cas de l'essai ETun02 (figure IV.40), on peut voir que la couche de fumée envahit toute la hauteur du tunnel et est uniforme. Ces fumées sont de plus moins denses (au sens optique) que lors de l'essai ETun01 : la perte de visibilité lors du palier de puissance du foyer est de l'ordre de 30 % sur toute la hauteur de l'ouvrage. Cette évolution est cohérente avec celle observée sur les températures : l'augmentation de la vitesse d'écoulement dans le tunnel tend à abaisser et à uniformiser tant les niveaux de concentration en particules de suies que les niveaux de température.

En ce qui concerne les essais couverts, la visibilité lors de l'essai ETun07 (figure IV.41) évolue de façon similaire à celle de l'essai découvert correspondant (ETun01). Cependant, pour une vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique (essai ETun08, visible sur la figure IV.42), on peut observer que, si la visibilité à hauteur d'homme (courbe rouge) est similaire en terme de niveau et d'évolution, à celle de l'essai découvert correspondant ETun02, la visibilité en partie haute du tunnel (courbe noire) est inférieure. Les fumées

sont ici stratifiées en extrême aval.

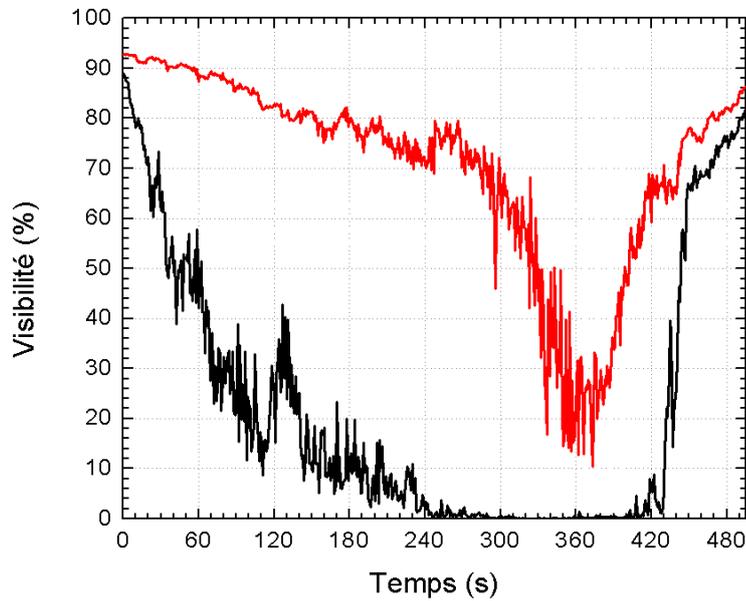


FIG. IV.39 – Essai Etun01 - Evolution de la densité optique des fumées en section S+23, à 50 cm du sol (—) et à 50cm du plafond (—)

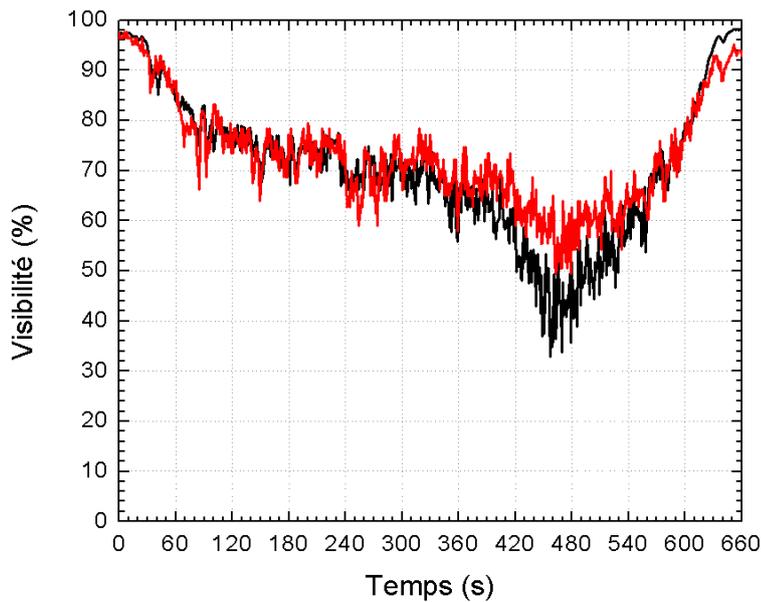


FIG. IV.40 – Essai ETun02 - Evolution de la visibilité en section S+23, à hauteur d'homme 50 cm dans le tunnel (—) et à 50cm du plafond (—)

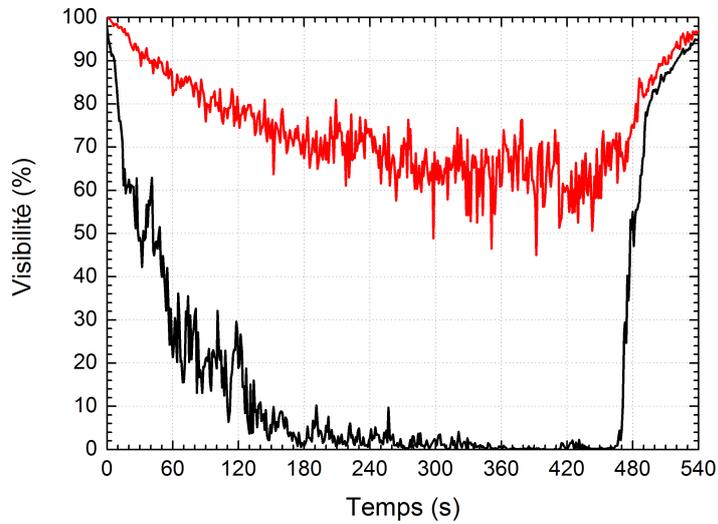


FIG. IV.41 – Essai ETun07 - Evolution de la visibilité en section S+23, à hauteur d'homme 50 cm dans le tunnel (—) et à 50cm du plafond (—)

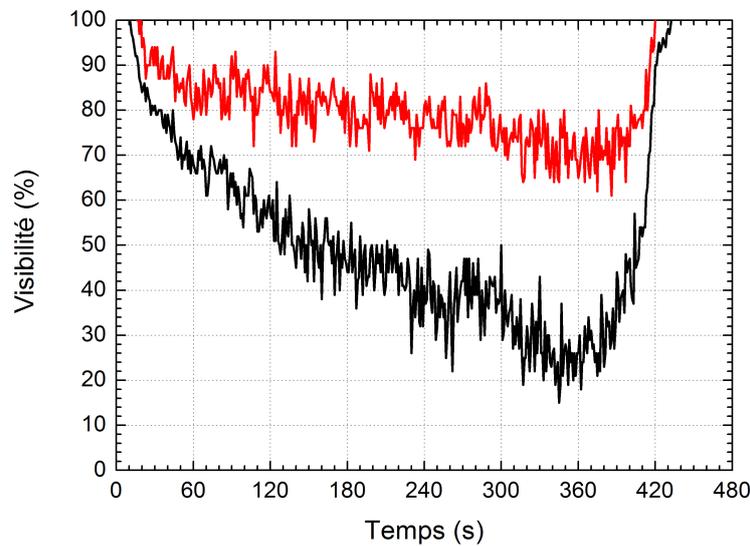


FIG. IV.42 – Essai ETun08 - Evolution de la visibilité en section S+23, à hauteur d'homme 50 cm dans le tunnel (—) et à 50cm du plafond (—)

IV.2.3 Foyers bûcher

Contrairement aux feux de nappe, dans le cas de foyers solides, tels que les bûchers ou les empilements de palettes, l'arrêt d'émission de vapeurs combustibles n'est pas brutal. Dans le cas de foyers à combustible solide, après avoir atteint son plein développement

(correspondant à une surface en combustion maximale), la puissance diminue progressivement. Le régime de combustion vive laisse peu à peu la place à un régime de combustion lente ("smouldering" mais surtout "incandescence"). Lors des essais conduits avec de tels foyers, il est décidé de la fin de l'essai lors du début de l'effondrement de l'empilement de combustible. Les résultats présentés ci-après ne correspondent qu'à la phase de combustion avant effondrement. Le feu est alors éteint par les opérateurs. Ces essais sont récapitulés dans le tableau IV.3.

Essai	Combustible	Puissance (kW)	Vitesse d'écoulement (m.s ⁻¹)
ETun 03	Bûcher bois	1500	1,60
ETun 04	Bûcher bois	1500	2,60

TAB. IV.3 – Récapitulatif des essais ETun bûcher de référence

IV.2.3.1 Puissance du Foyer

Dans ce paragraphe, les résultats de puissance présentés sont ceux issus de la mesure de consommation d'oxygène. En effet, même avant que l'empilement de bois ne s'effondre massivement, il est apparu que des morceaux s'en détachaient au cours de l'essai, faussant ainsi la mesure de perte de masse. Ce constat a conduit à reconsidérer la mesure d'oxygène en tant que moyen d'évaluation de la puissance du foyer, le dysfonctionnement de la ligne d'acheminement de l'échantillonnage vers l'analyseur, évoqué au paragraphe IV.2.2.3, ayant pu être détecté et solutionné.

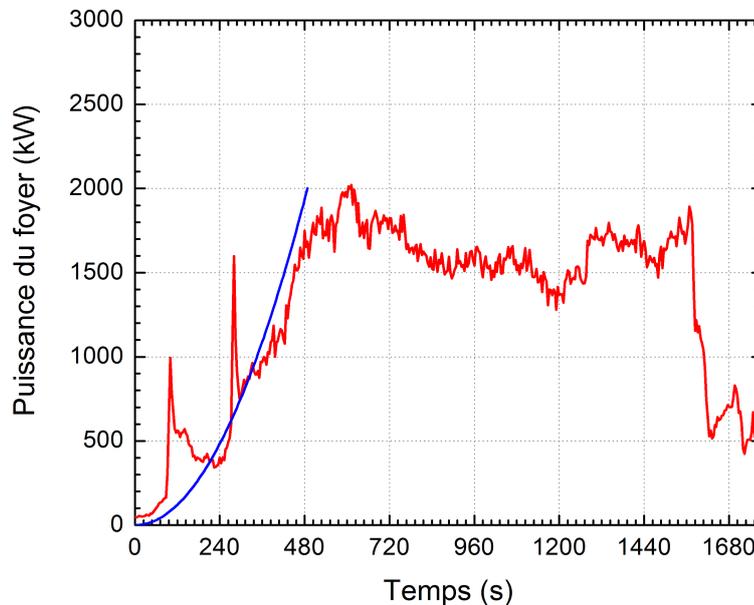


FIG. IV.43 – Essai ETun 03 - Evolution temporelle de la puissance du foyer : (—) : Puissance estimée par la mesure de consommation d'oxygène, (—) : Allure de montée parabolique de la puissance

Lors des essais ETun03 et ETun04, on observe un comportement de l'évolution de la puissance dans le temps totalement différent de celui des essais avec foyer heptane. Lors de l'essai ETun03, pour une vitesse de ventilation au-dessous de la vitesse critique, le bûcher monte en puissance après une période d'incubation d'environ 360s, jusqu'à un maximum de 2000 kW à 840s, avant de décroître avec une allure classique de feu de solide (figure IV.43). Dans le cas de l'essai ETun04, où la vitesse est supérieure à la vitesse critique, la montée est plus rapide (dès 240 secondes) et se stabilise 240 secondes plus tard, avant de décroître (figure IV.44). On remarque que pour les foyers bûchers, une vitesse de ventilation plus élevée entraîne l'augmentation de sa puissance. La puissance du bûcher de l'essai ETun04 atteint 2500 kW en fin de phase de croissance, contre seulement 2000 pour l'essai ETun03. Cette évolution de la puissance en fonction de la vitesse de ventilation est l'inverse de celle observée pour les feux d'heptane. Dans le cas de ces derniers, il n'y a pas d'obstacle entre les vapeurs combustibles et l'oxygène, tandis que dans le cas des bûchers, une partie de ces vapeurs combustibles est émise au cœur de l'empilement. A vitesse de ventilation élevée, l'oxygène de l'air ambiant y pénètre mieux et favorise la combustion de ces vapeurs. Ceci confirme les travaux de Harmathy [79] qui a montré que la vitesse de combustion des matériaux carbonisants augmente avec l'accroissement du débit de l'air jusqu'à un point maximum. Ce résultat a ensuite été confirmé avec des foyers de moindre puissance lors d'une étude précédente au CSTB.

Par ailleurs, les fluctuations visibles au début de chaque courbe sont dues à l'allumage piloté du foyer par de l'heptane et ne relèvent pas de la puissance intrinsèque du bûcher.

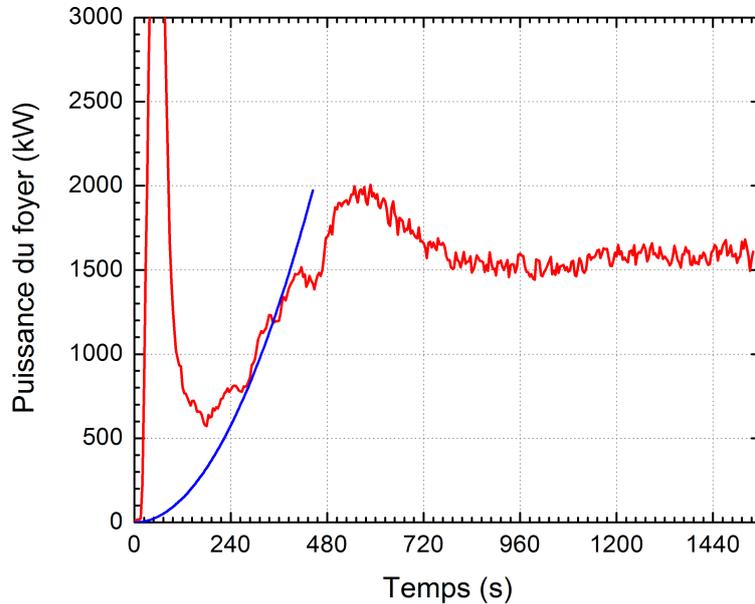


FIG. IV.44 – Essai ETun 04 - Evolution temporelle de la puissance du foyer : (—) : Puissance estimée par la mesure de consommation d'oxygène, (—) : Allure de montée parabolique de la puissance

Ces variations dues à l'allumage mises à part, après la période d'incubation, la puissance des foyers de bûchers suit bien une évolution temporelle de la forme $\dot{Q} = A \cdot t^2$

(voir paragraphe I.1.1.3, relation I.2) jusqu'à ce que le débit calorifique maximum soit atteint. Dans le cas de l'essai ETun03, $A = 0,0084 \text{ kW.s}^{-2}$, dans le cas de l'essai ETun04, $A = 0,01 \text{ kW.s}^{-2}$, ce qui reflète bien une intensité de ventilation supérieure.

IV.2.3.2 Températures et stratification des fumées

La montée en température durant les 100 premières secondes de l'essai est due à la combustion de l'heptane servant à l'allumage du foyer. De façon similaire à ce qui est observé sur les résultats des essais heptane de référence non couverts, si les niveaux de température sont plus élevés pour une vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique que pour une vitesse de ventilation supérieure, ces différences de température s'atténuent à partir de la section T+12 (figures IV.45 à IV.48). Concernant l'essai ETun03, la différence très nette de niveau de température entre les capteurs situés en haut du profil (T+410, T+411 et T+412) par rapport à ceux qui sont situés plus bas, ainsi que la répartition des niveaux de température en T+8, montrent que la couche de fumées est très bien stratifiée. Les niveaux de température obtenus en haut du tunnel (capteurs 10 à 12 sur les sections aval) sont similaires à ceux obtenus avec les feux de nappe d'heptane pour une vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique. Cependant, ces niveaux sont supérieurs d'environ 15% dans le cas d'un foyer bûcher avec vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique.

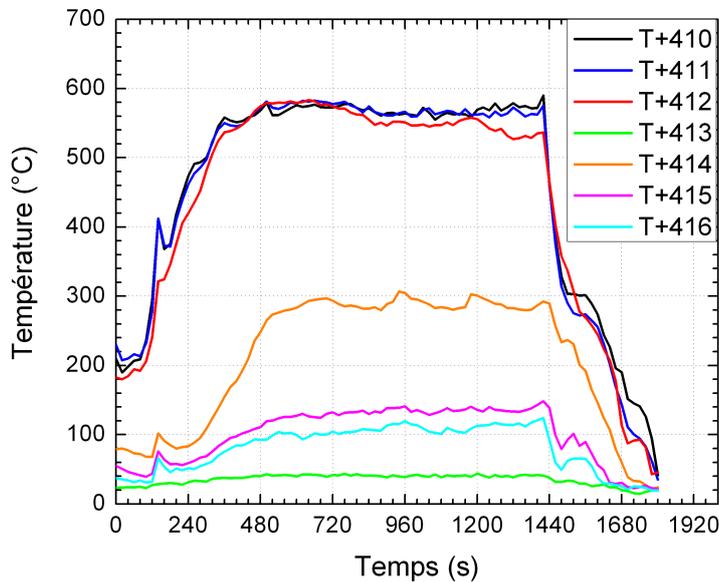


FIG. IV.45 – Essai ETun 03 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4

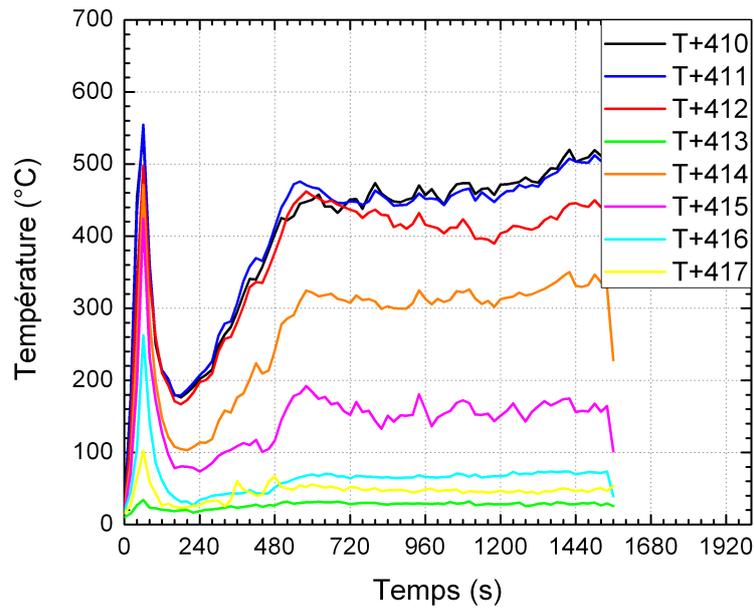


FIG. IV.46 – Essai ETun 04 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4

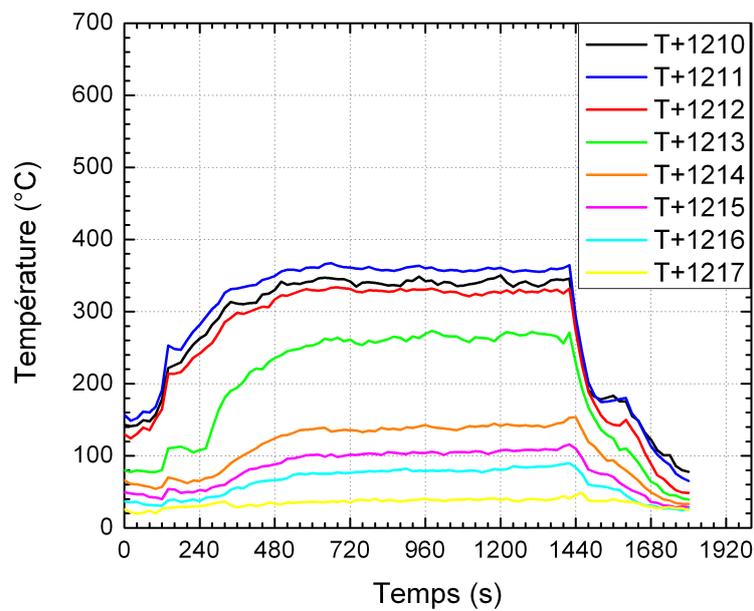


FIG. IV.47 – Essai ETun 03 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12

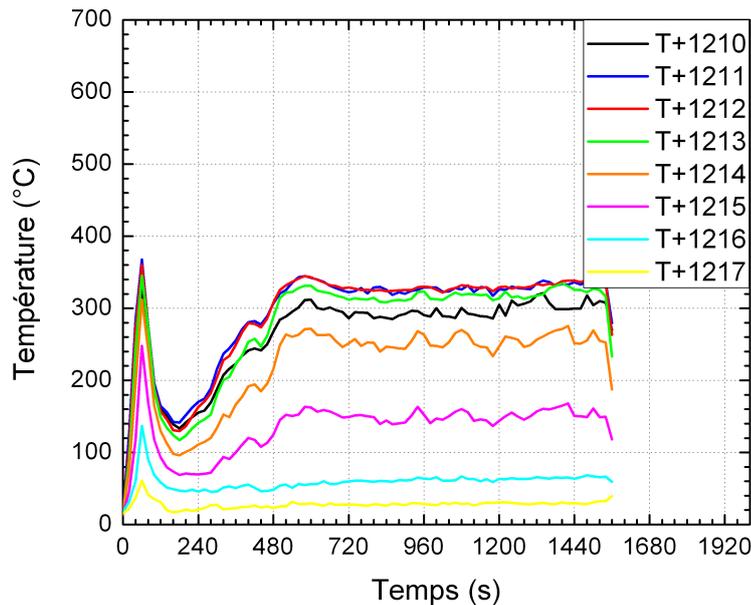


FIG. IV.48 – Essai ETun 04 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12

De plus, par rapport aux feux de nappe, on remarque que les niveaux de température sont plus homogènes dans le tunnel, ce qui est particulièrement visible pour les capteurs 10 à 14 sur la figure IV.48. Le gradient de température au sein de la couche chaude de fumées est ici beaucoup plus faible que dans le cas des essais heptane. Ceci est à attribuer à la différence de configuration des surfaces en combustion (gaz chauds générés sur une grande partie de la hauteur du tunnel dans le cas des foyers bûchers).

Le tracé des zones de tenabilité pour l'essai ETun03, lors duquel la vitesse de ventilation est inférieure à la vitesse critique, permet de mettre en évidence la zone chaude sous la voûte du tunnel, que ce soit en amont ou en aval du foyer (figure IV.49).

Il subsiste une zone de basses températures (moins de 50°C) dans le tiers inférieur du tunnel, et ce après T+4 (où la zone fraîche est plus mince de par la proximité du foyer). En aval, cette couche "froide" est plus haute que dans le cas de l'essai ETun01 (essai heptane dans les mêmes conditions) : 0,75 m de hauteur libre sous fumées dans le cas de l'essai ETun03 contre 0,1 m lors de l'essai ETun01 au niveau de la section T+12. Ramenées à la vraie grandeur, ces hauteurs deviennent 2,5 m pour l'essai bûcher et 0,3 m pour l'essai heptane. Il est à remarquer que la vitesse de ventilation lors de l'essai bûcher est plus élevée (pour éviter la sortie de fumées par l'entrée du tunnel observée lors de l'essai ETun01). La vitesse de ventilation plus faible dans le cas de l'essai ETun01 augmente grandement l'effet de confinement de l'ouvrage, ce qui conduit à une température générale plus élevée, abaissant ainsi la hauteur de tenabilité.

En ce qui concerne l'essai ETun04, la température en aval est plus importante que lors de l'essai ETun02 (essai heptane dans les mêmes conditions). La zone du tunnel présentant une température supérieure à 100°C est plus étendue. Cependant, à partir de T+8, la zone d'air frais subsiste et est de même épaisseur que lors de l'essai ETun02 (0,6 m), ce qui

indique un gradient de température plus élevé (figure IV.50).

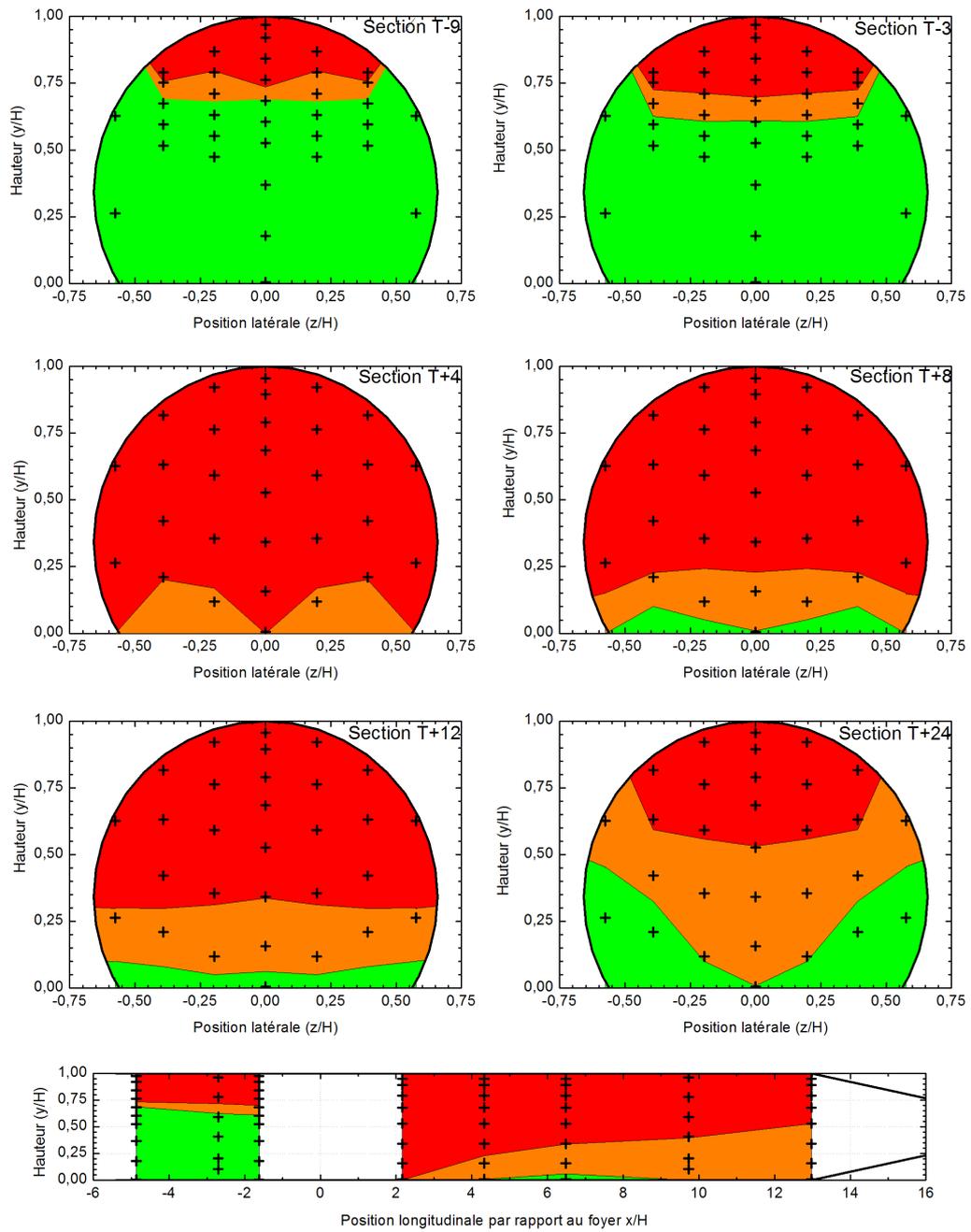


FIG. IV.49 – Essai ETun03 - Zones de tenabilité thermique - $t=600\text{s}$ - (■) : $T \leq 50^\circ\text{C}$, (■) : $50 \leq T \leq 100^\circ\text{C}$, (■) : $T \geq 100^\circ\text{C}$

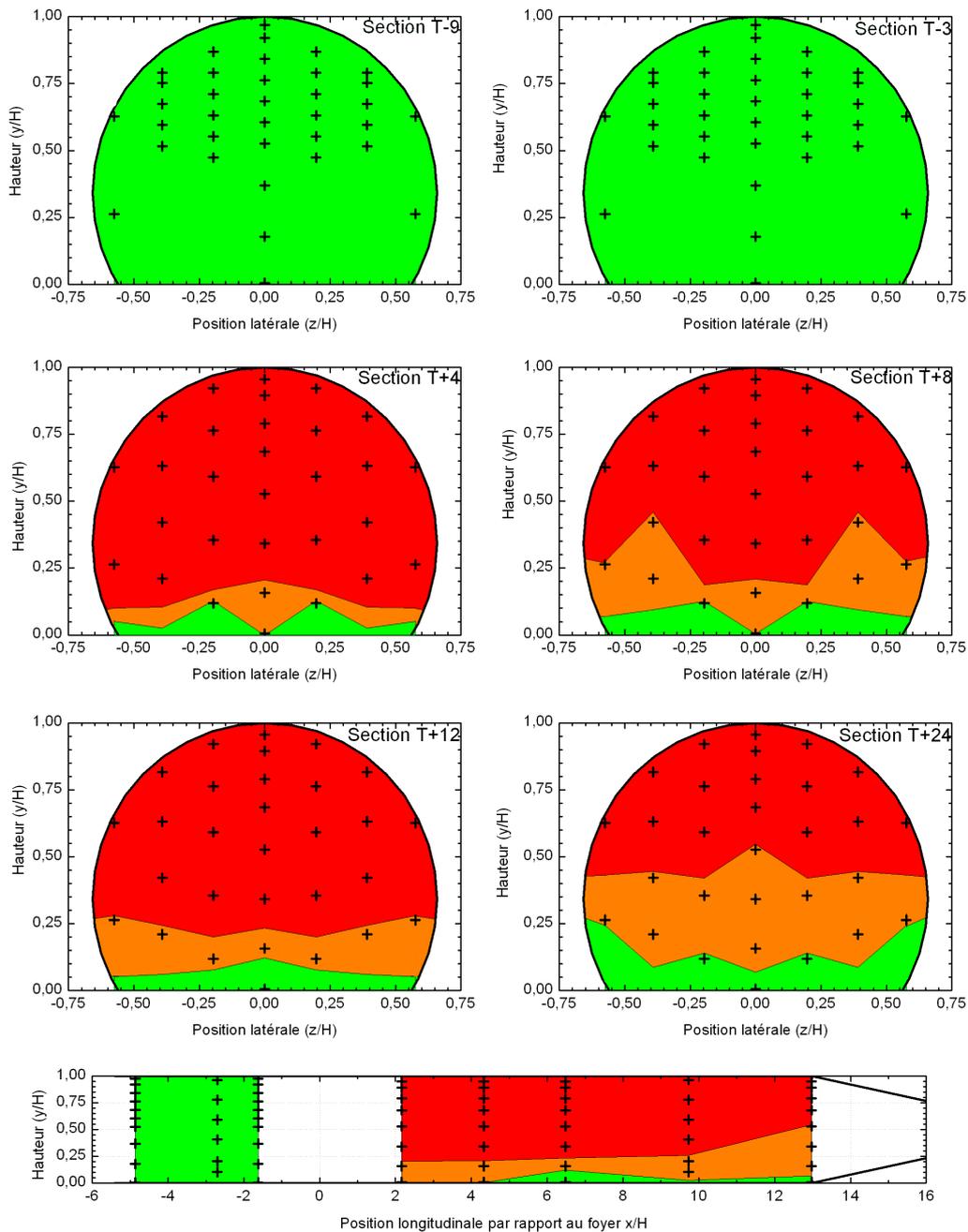


FIG. IV.50 – Essai ETun04 - Zones de tenabilité thermique - $t=600\text{s}$ - (■) : $T \leq 50^\circ\text{C}$, (■) : $50 \leq T \leq 100^\circ\text{C}$, (■) : $T \geq 100^\circ\text{C}$

Si l'on observe l'évolution du critère de stratification pour les essais bûcher, on constate que, dans le cas de l'essai ETun03 (figure IV.51), on a affaire à un écoulement bien stratifié et ce quelle que soit la section de mesure étudiée. Ceci corrobore les résultats de température présentés ci-avant. A partir de 800 secondes d'essai, on peut observer une diminution du critère S au-dessous de la valeur seuil de 1,7. Contrairement à ce qui

a été constaté sur l'essai ETun01 (voir paragraphe 4.2.2.4), il n'y a pas d'échauffement global du tunnel au cours de l'essai. La diminution du critère S est donc bien due à une réorganisation de la stratification des fumées.

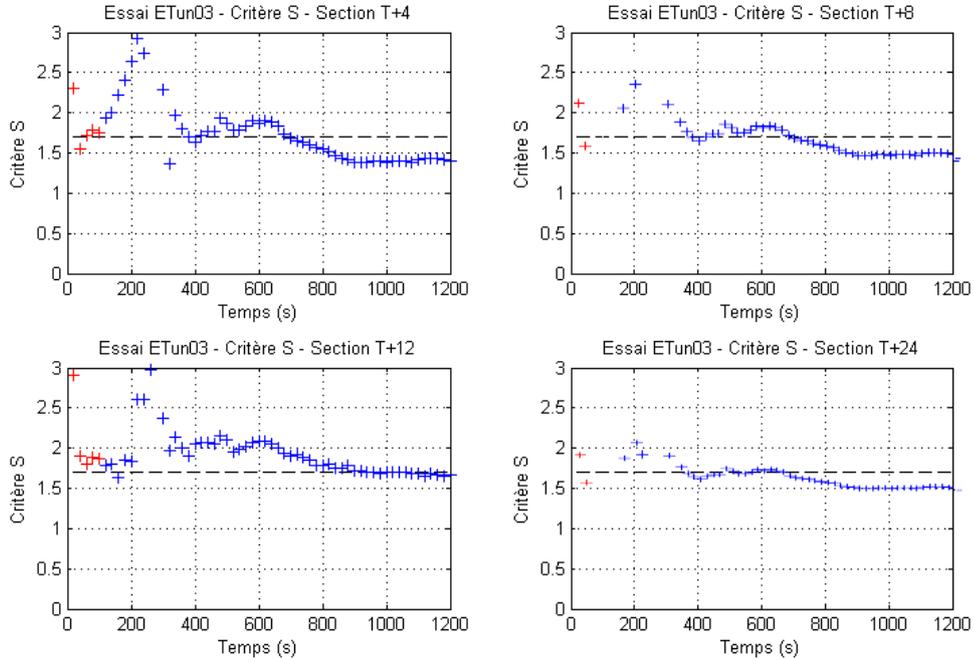


FIG. IV.51 – Essai ETun03 - Evolution temporelle du critère de stratification S

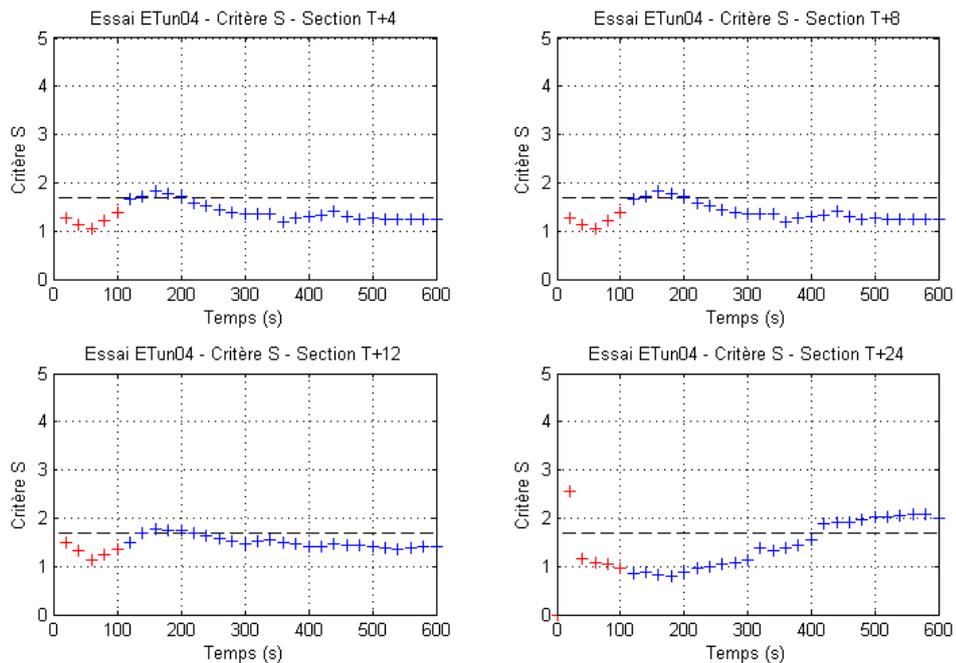


FIG. IV.52 – Essai ETun04 - Evolution temporelle du critère de stratification S

Dans le cas où la vitesse de ventilation est supérieure à la vitesse critique (essai ETun04 visible en figure IV.52), on peut observer que les fumées apparaissent moins stratifiées. En effet, la vitesse de ventilation plus élevée crée alors plus de turbulence.

IV.2.3.3 Flux rayonnés

Lors des essais bûchers, on remarque que si les mesures de flux réalisées en aval suivent, dans leur évolution, la puissance du foyer (figure IV.53 et IV.54 respectivement pour l'essai ETun03 et ETun04), l'évolution du flux rayonné vers l'amont se comporte différemment.

Lors de l'essai ETun03 (figure IV.55), le flux reçu par les radiomètres situés en FM-7 augmente tout au long de l'essai, et atteint un niveau supérieur à celui observé lors de l'essai ETun04 (figure IV.56). Le capteur FM-701 donne un flux trois fois supérieur aux autres capteurs de la section. Si l'on confronte ce résultat avec les mesures de température en amont du foyer, on remarque que ce capteur se situe dans la couche de retour, qui présente une température d'environ 200 °C à ce niveau (150 cm du sol). Cette disparité sur le profil vertical de flux rayonnés est due à la grande hauteur du bûcher (1,1 m) par rapport à celle du tunnel.

Lors de l'essai ETun04, la flamme étant plus couchée et entourant moins l'ensemble du foyer, le flux reçu en amont est plus faible mais surtout constant, comparable avec ce que l'on observe sur l'essai ETun02 (foyer heptane). Les flux aval reçus lors des essais ETun03 et ETun04 sont globalement plus importants que lors des essais ETun01 et ETun02 respectivement. Ceci, comme les disparités de profils précédemment évoquées, est dû à la surface apparente du foyer, plus haut, et donc à une surface en combustion et une flamme plus grande, dans le cas d'un feu de bûcher (l'empilement fait ici 1,10 m de hauteur et est pleinement enflammé en régime établi), comme illustré en figure IV.57.

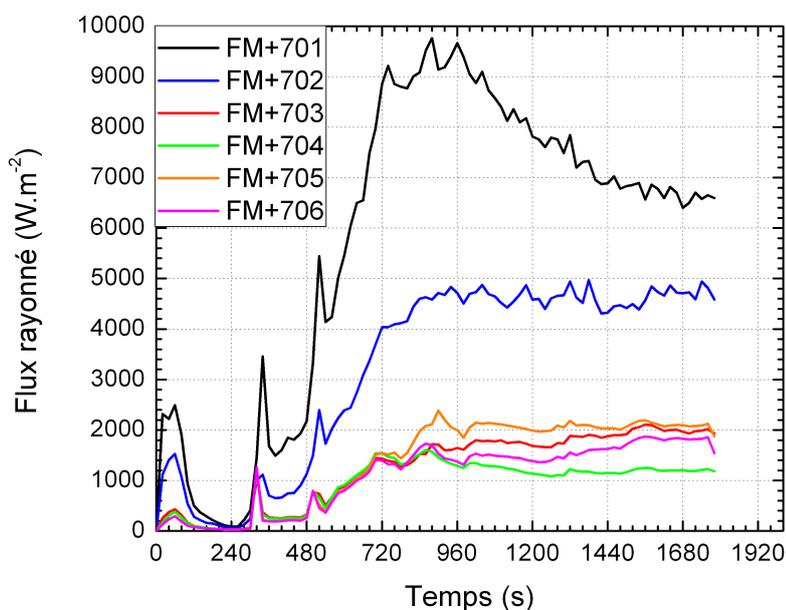


FIG. IV.53 – Essai ETun 03 - Evolution temporelle des niveaux de flux rayonnés vers l'aval à 7 m du foyer

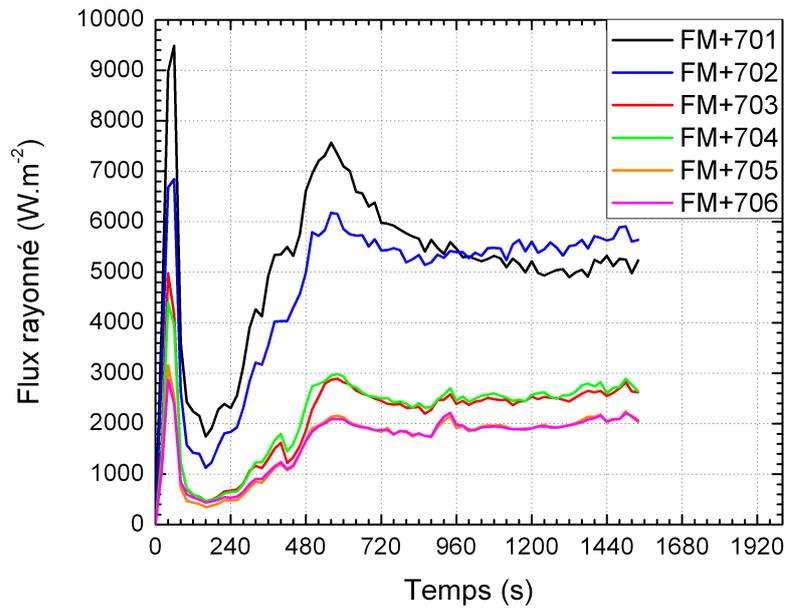


FIG. IV.54 – Essai ETun 04 - Evolution temporelle des niveaux de flux rayonnés vers l'aval à 7 m du foyer

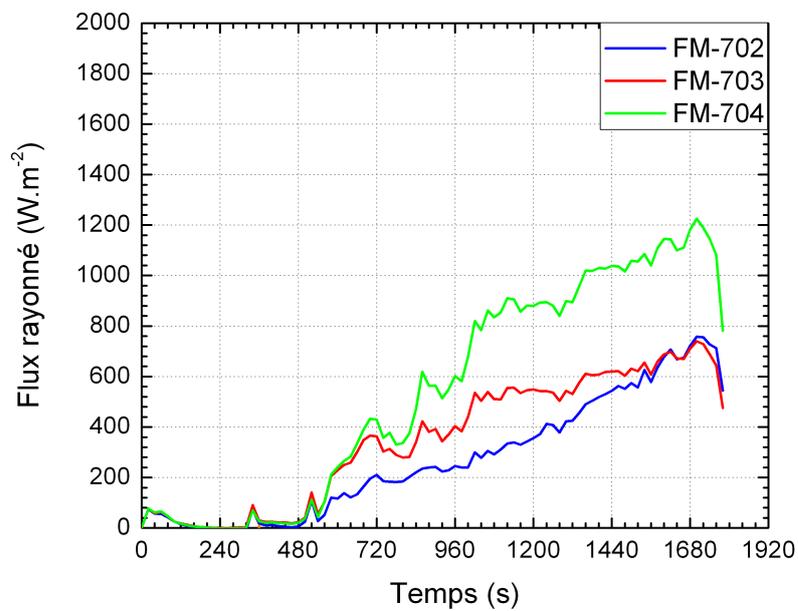


FIG. IV.55 – Essai ETun 03 - Evolution temporelle des niveaux de flux rayonnés vers l'amont à 7 m du foyer

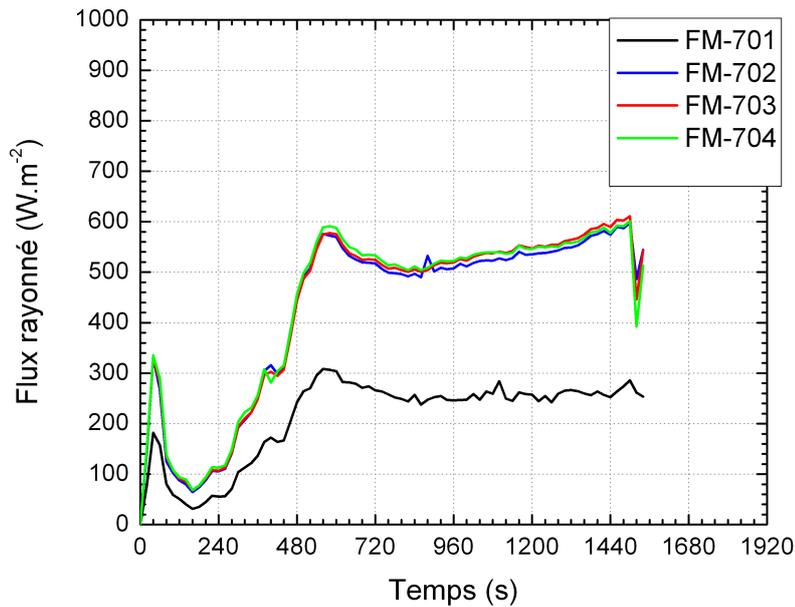


FIG. IV.56 – Essai ETun 04 - Evolution temporelle des niveaux de flux rayonnés vers l'amont à 7 m du foyer

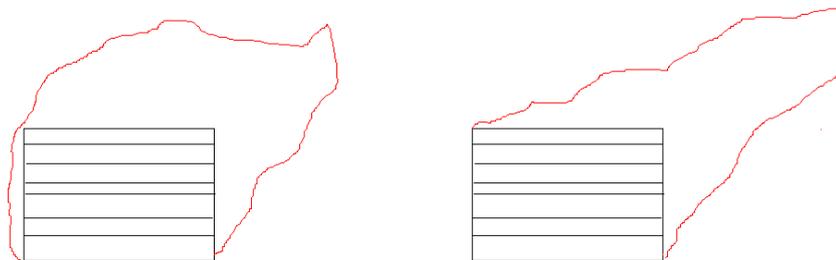


FIG. IV.57 – Variation de l'aspect de la flamme pour un feu de bûcher. Evolution de la géométrie globale de la flamme en fonction de la vitesse de ventilation

IV.2.3.4 Opacimétrie

Dans le cas des foyers bûchers, il y a peu de perte de visibilité. Sur la figure IV.58 concernant l'essai ETun03, on peut constater des chutes de visibilité correspondant à la combustion de l'heptane utilisé lors de l'allumage (ajouté en plusieurs fois au cours de cet essai). Mais, lors de la phase de combustion du bûcher en tant que tel, la visibilité ne baisse que de 15 % (à $t=840s$), et ce pendant le pseudopalier de la phase de décroissance de la puissance.

Lorsque la vitesse de ventilation est supérieure à la vitesse critique (essai ETun04, figure IV.59), on peut constater que la seule chute significative de visibilité est synchrone

de la phase d'allumage, où il n'y a principalement que de l'heptane en combustion. Ensuite, après que l'heptane soit brûlé, il n'y a pas ou très peu de perte de visibilité.

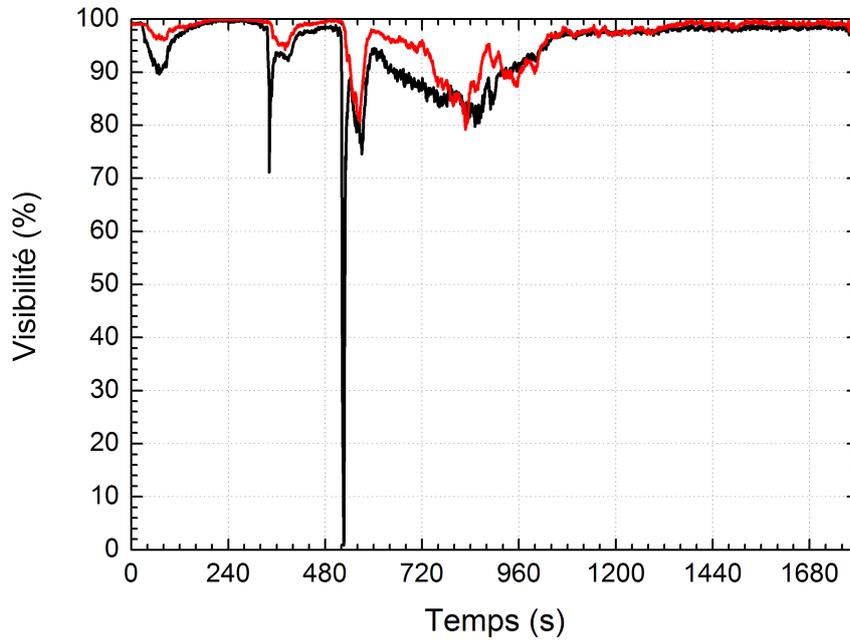


FIG. IV.58 – Essai Etun03 - Evolution de la visibilité en section S+23, à 50 cm du sol (—) et à 50cm du plafond (—)

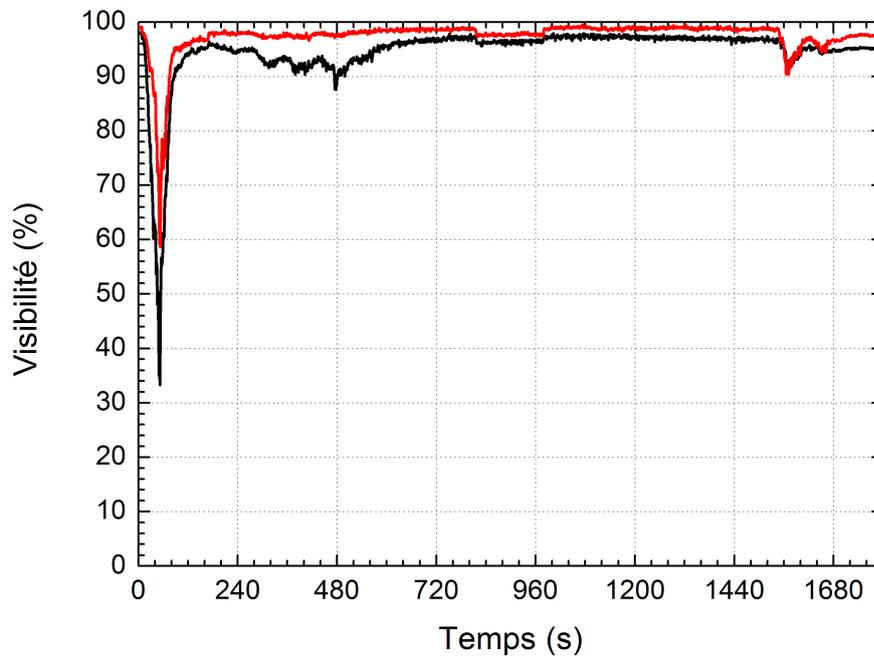


FIG. IV.59 – Essai Etun04 - Evolution de la visibilité en section S+23, à 50 cm du sol (—) et à 50cm du plafond (—)

Si la combustion du bois génère des fumées moins opaques que celles émanant de feux

d'hydrocarbures, on peut cependant s'interroger sur une perte de visibilité aussi faible que celle constatée ici. Ce résultat sera discuté au paragraphe IV.2.5.

IV.2.4 Foyers palettes

Les foyers à base d'empilements de palettes se comportent comme les foyers de bûchers bois : il y a effondrement avant extinction du foyer. Il a été là aussi décidé de la fin de l'essai lors du début de l'effondrement de l'empilement de palettes, le feu étant alors éteint par les opérateurs. Les essais sont récapitulés dans le tableau IV.4.

Essai	Combustible	Puissance (kW)	Vitesse d'écoulement (m.s ⁻¹)
ETun 05	Empilement de Palettes	1500	1,50
ETun 06	Empilement de Palettes	1500	2,20

TAB. IV.4 – Récapitulatif des essais ETun de référence d'empilement de palettes

IV.2.4.1 Puissance du foyer

Lors des essais ETun05 et ETun06, on retrouve des allures de puissances cohérentes avec celles d'un feu de palettes classique (voir figure III.6) : une montée assez rapide en puissance, un pseudo-palier, puis une décroissance jusqu'à un régime de combustion lente. Lors de la phase de décroissance (à partir de 660 secondes pour l'essai ETun05, visible sur la figure IV.60), la surface de l'empilement en flamme est réduite et se maintient jusqu'à ce qu'une partie de l'empilement s'effondre, marquant la fin de l'essai (intervention des opérateurs). L'amplitude du pic de puissance est similaire à celle obtenue lors de l'essai bûcher ETun03 (un peu moins de 2000 kW).

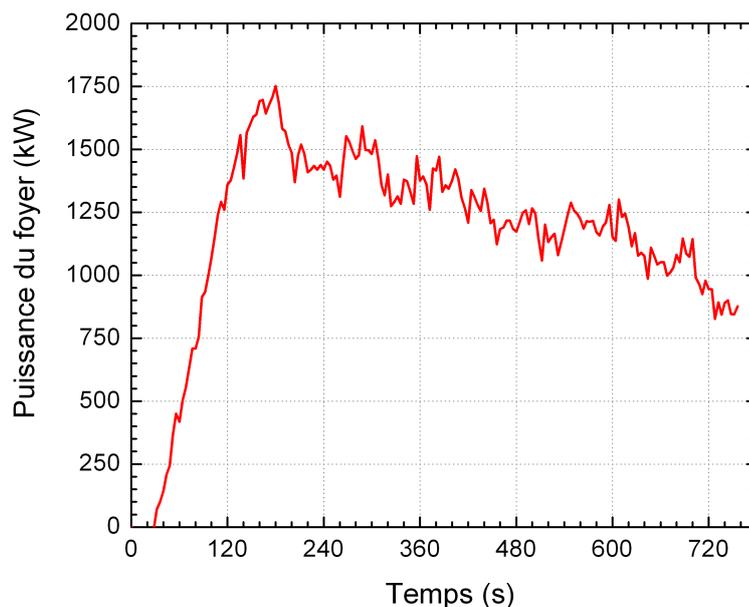


FIG. IV.60 – Essai ETun 05 - Evolution temporelle de la puissance du foyer

Lorsque la vitesse de ventilation est supérieure à la vitesse critique (essai ETun06, figure IV.61), on observe la même allure et les mêmes niveaux de puissance atteints que lors de l'essai ETun05, si ce n'est que la montée en puissance est plus lente (180s au lieu de 140s). De plus, on peut remarquer que le début de l'effondrement d'une partie du foyer intervient environ une minute plus tôt lors de l'essai ETun06 (689s au lieu de 756s). On peut donc considérer que, dans les deux cas, le régime atteint par le foyer est similaire et que la vitesse de ventilation n'influe que peu sur le foyer en lui-même.

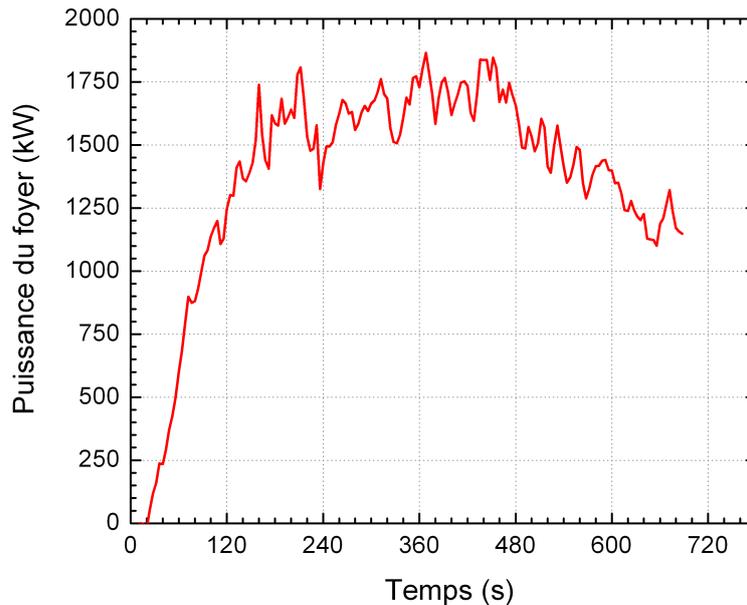


FIG. IV.61 – Essai ETun 06 - Evolution temporelle de la puissance du foyer

On remarque ici que, si les niveaux de puissance sont similaires à ceux des foyers bûchers, on n'observe pas d'augmentation. Ceci tient au caractère plus "ouvert" des foyers palettes. Un bûcher est un empilement dense, au sens où la part de volume vide est faible par rapport à la part de volume de bois, tandis qu'un empilement de palettes a une part de volume vide plus grande. Il est alors aisé de comprendre que les foyers palettes sont déjà, à vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique, suffisamment ventilés.

IV.2.4.2 Températures et stratification des fumées

Lors des deux essais ETun05 et ETun06, les niveaux de température suivent l'évolution de la puissance du foyer. On distingue une nette stratification thermique à l'aval, où il s'établit une couche bien plus chaude que le reste de l'écoulement, englobant les capteurs 10 à 12 (soit une épaisseur d'environ 40 cm). Les niveaux atteints dans cette couche sont supérieurs de 30 % près du foyer (section T+4, figure IV.62) mais rejoignent ensuite les niveaux des essais bûchers plus en aval (figure IV.63). On retrouve cette couche très chaude déjà visible sur l'essai ETun03 (figure IV.45). De la même façon que dans le cas des foyers bûchers, la flamme n'occupe que le haut du tunnel, l'empilement des palettes en lui-même faisant 1,10 mètres de hauteur.

Concernant l'essai ETun06 (vitesse supérieure à la vitesse critique), on peut remarquer la même stratification des fumées (avec la même épaisseur) que lors de l'essai palettes dont la vitesse inférieure à la vitesse critique, que ce soit au voisinage du foyer (figure IV.64) ou plus en aval (figure IV.65).

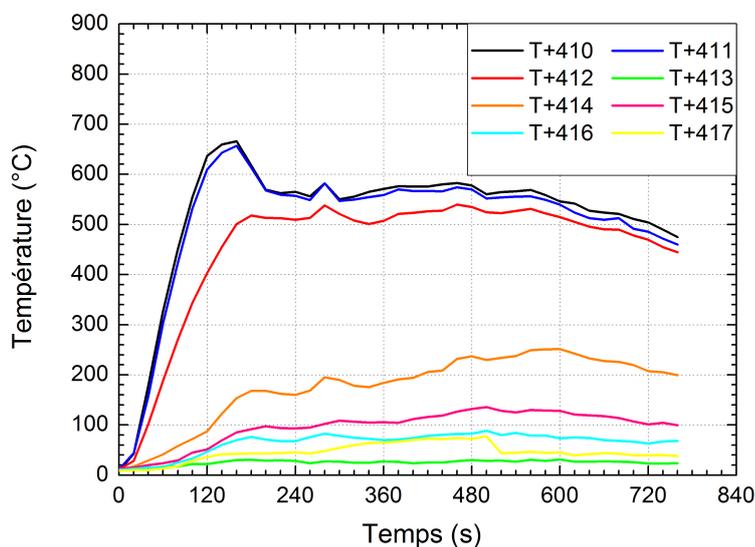


FIG. IV.62 – Essai ETun05 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4

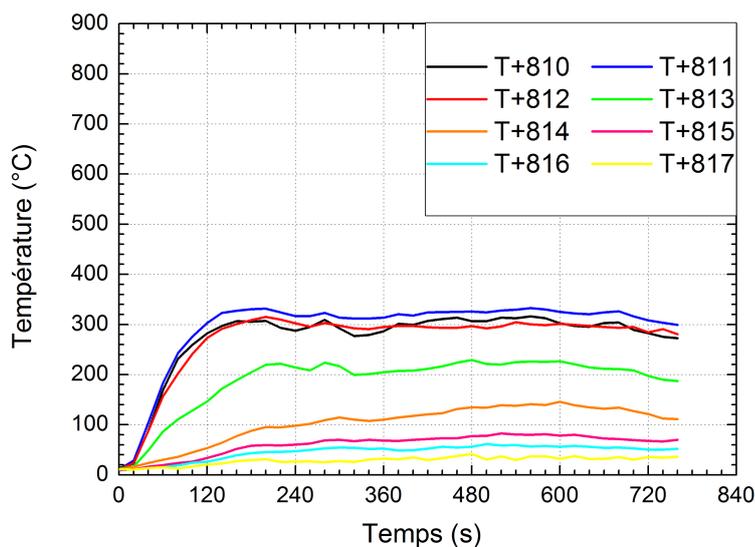


FIG. IV.63 – Essai ETun05 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12

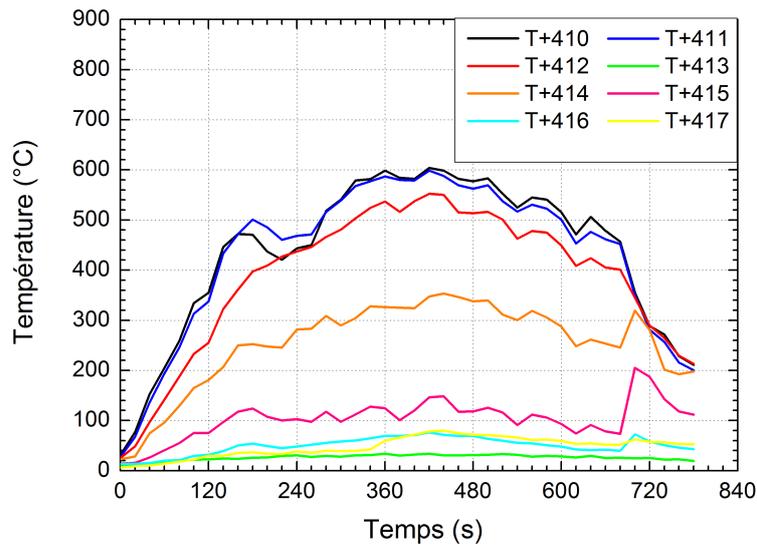


FIG. IV.64 – Essai ETun06 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4

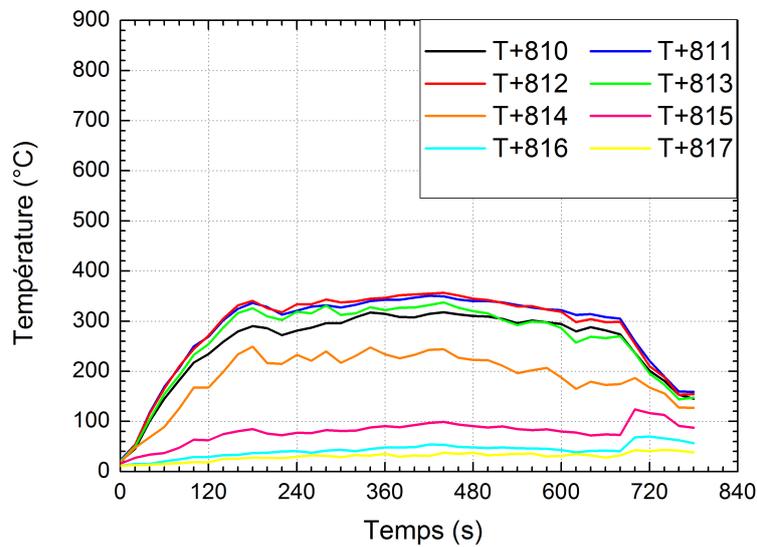


FIG. IV.65 – Essai ETun06 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12

Les niveaux de température atteints sont similaires entre les deux essais. La vitesse de ventilation n'a donc que peu d'influence, même auprès du foyer, sur les températures aval avec un foyer à combustible bois plus ouvert (voir III.2.4.2) comme ceux-ci, et ce que ce soit pour ses niveaux ou son évolution.

La stratification des fumées lors des essais avec palette est similaire à celle obtenue avec les foyers bûchers. Dans le cas de l'essai ETun05 (conduit avec une vitesse de ventilation

inférieure à la vitesse critique), on peut discerner une stratification nette tout au long de l'essai (figure IV.66).

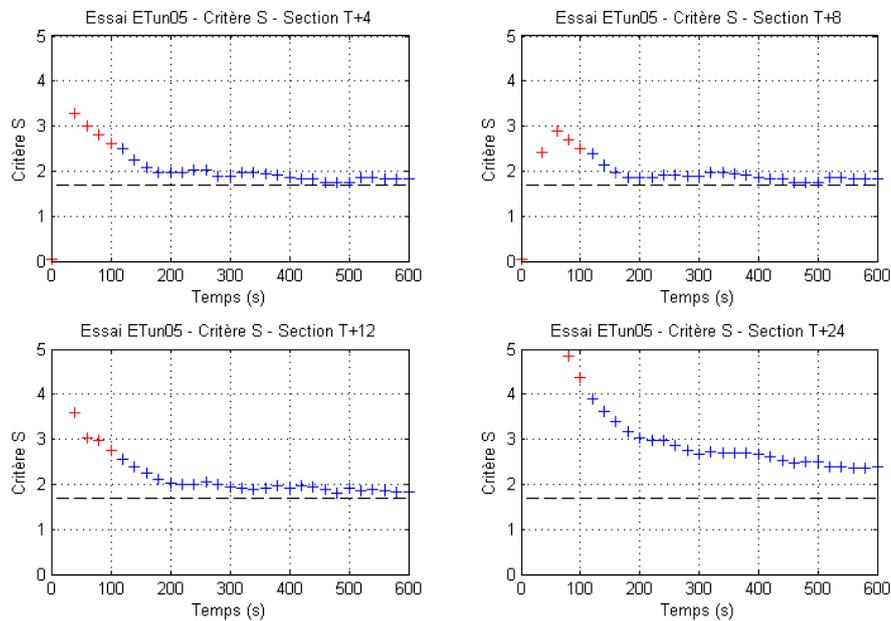


FIG. IV.66 – Essai ETun05 - Evolution temporelle du critère de stratification S

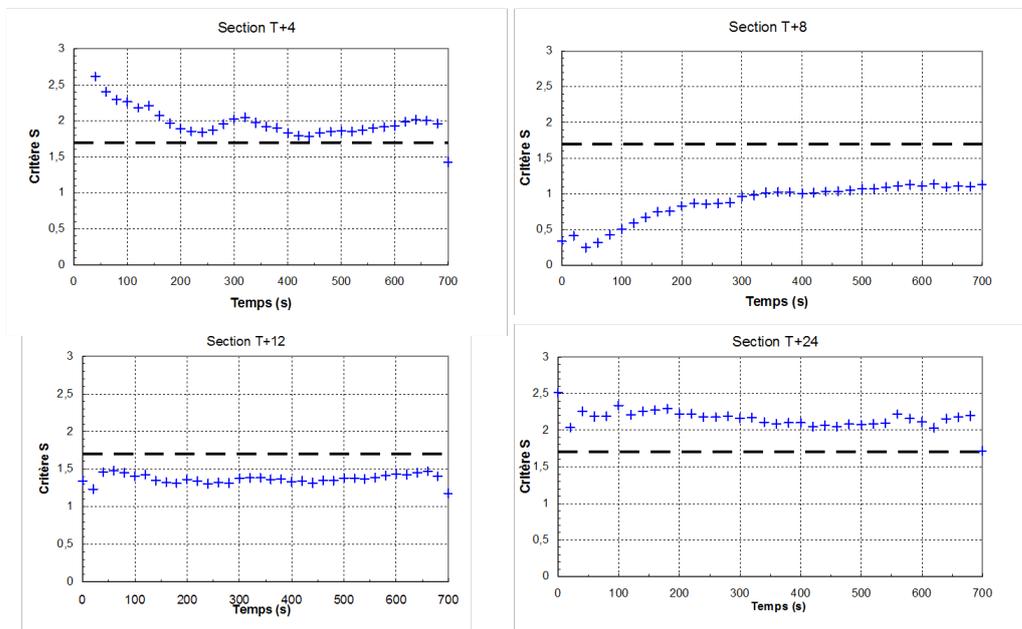


FIG. IV.67 – Essai ETun06 - Evolution temporelle du critère de stratification S

Dans le cas de l'essai ETun06, conduit avec une vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique, si des niveaux de température sont discernables, le critère S (figure IV.67) montre que la stratification n'est pas nettement marquée. Près du foyer (section T+4),

la flamme est inclinée et accrochée sur la hauteur de l'empilement, ce qui sépare bien une zone chaude sous voûte et une zone qui reste plus fraîche en bas de la section, donnant un critère S élevé. De même, en extrémité aval du tunnel, l'écoulement est moins perturbé qu'au voisinage du foyer et se stratifie. Cependant, aux sections T+8 et T+12, l'écoulement est clairement perturbé et la stratification n'est pas établie. On observe sur les figures IV.68 et IV.69 que les zones de tenabilité sont similaires à celles relevées dans le cas des bûchers, avec une tendance à une couche chaude légèrement plus haute.

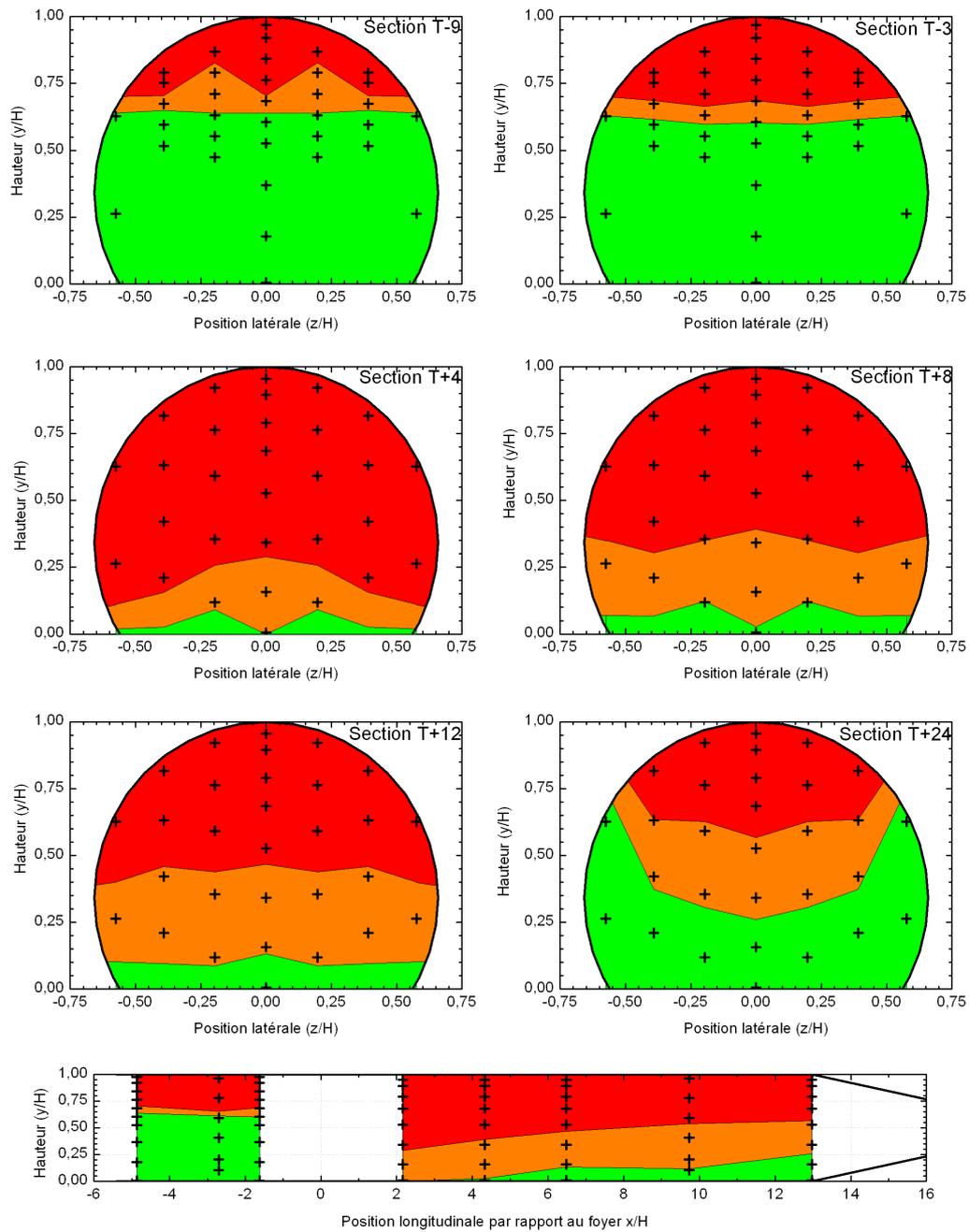


FIG. IV.68 – Essai ETun05 - Zones de tenabilité thermique - $t=300s$ - (■) : $T \leq 50^{\circ}C$, (■) : $50 \leq T \leq 100^{\circ}C$, (■) : $T \geq 100^{\circ}C$

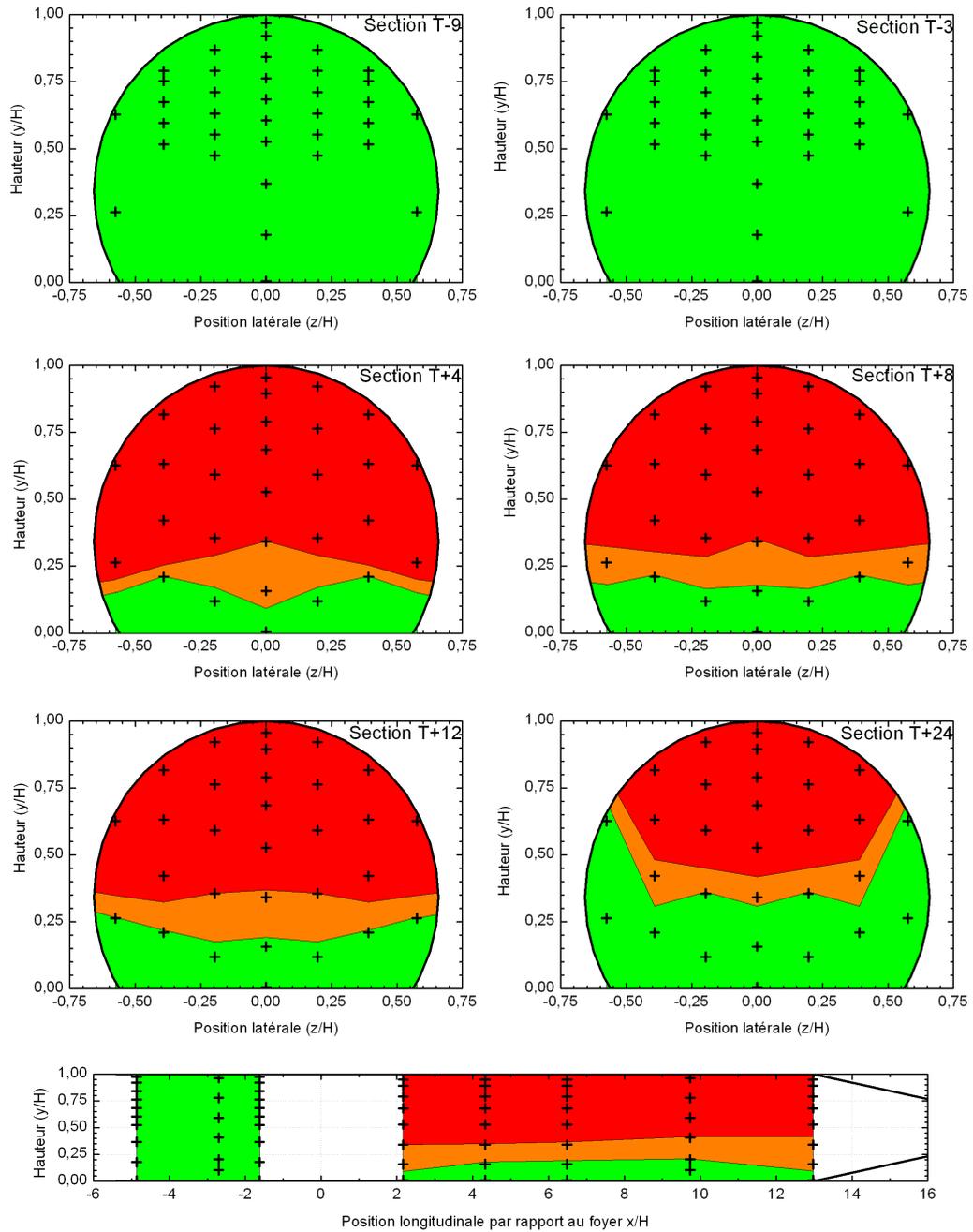


FIG. IV.69 – Essai ETun06 - Zones de tenabilité thermique - $t=300s$ - (■) : $T \leq 50^{\circ}C$, (■) : $50 \leq T \leq 100^{\circ}C$, (■) : $T \geq 100^{\circ}C$

IV.2.4.3 Flux rayonnés

Les niveaux de flux rayonnés lors de l'essai ETun05 (figure IV.70) sont similaires à ceux obtenus pour les feux de bûcher (essai ETun03). Là encore, ces flux reçus en aval suivent, dans leur évolution, celle de la puissance du foyer. On observe aussi une disparité sur le

profil : le capteur FM+701 (situé près du plafond) a un niveau très élevé par rapport aux autres, et dès une hauteur inférieure à 1,1 m, les flux retombent à un niveau de $2\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

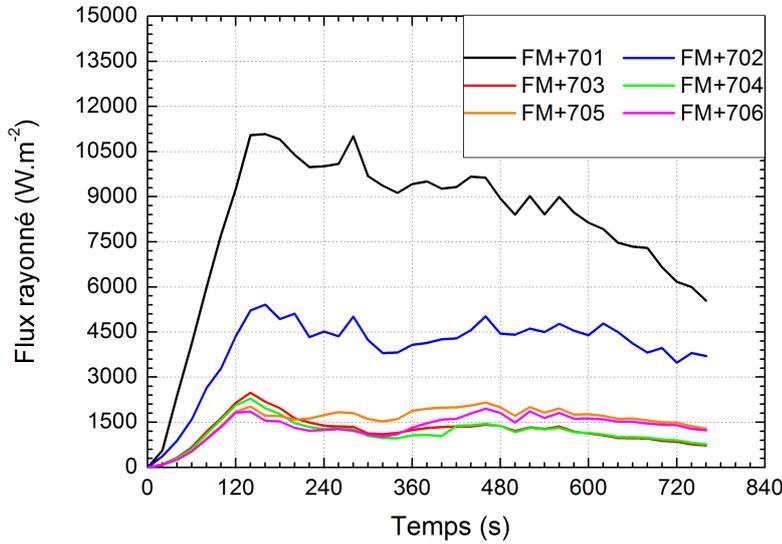


FIG. IV.70 – Essai ETun05 - Evolution temporelle des flux rayonnés vers l'aval

En ce qui concerne les flux rayonnés vers l'amont (figure IV.71), le comportement est différent. Après la mise en régime du foyer, un palier s'établit (à $3,2\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pour le capteur FM-701 et autour de $0,5\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pour l'ensemble des autres capteurs du profil).

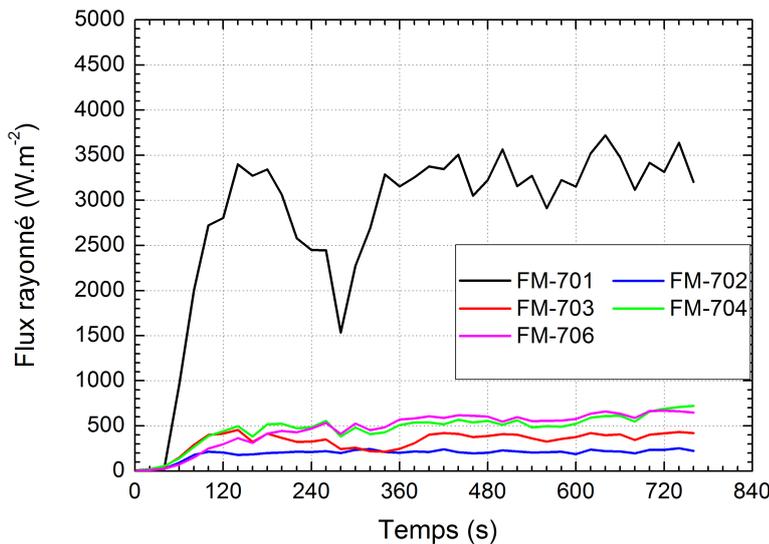


FIG. IV.71 – Essai ETun05 - Evolution temporelle des flux rayonnés vers l'amont

Dans le cas où la vitesse de ventilation est supérieure à la vitesse critique, l'évolution temporelle des flux rayonnés en aval suit celle de la puissance du foyer (figure IV.72),

avec des niveaux comparables à l'essai ETun05. En ce qui concerne les flux rayonnés vers l'amont (figure IV.73), on a des niveaux similaires à ceux de l'essai ETun05, mais sans que la mesure du capteur FM-701 soit plus élevée que les autres. La vitesse de ventilation supérieure couche la flamme et la rabat vers l'aval, diminuant le flux émis en partie haute du tunnel vers l'amont.

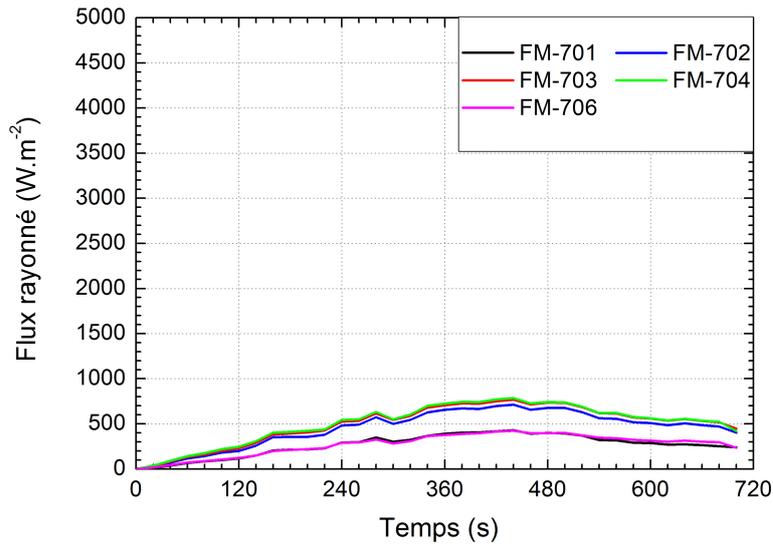


FIG. IV.72 – Essai ETun06 - Evolution temporelle des flux rayonnés vers l'amont

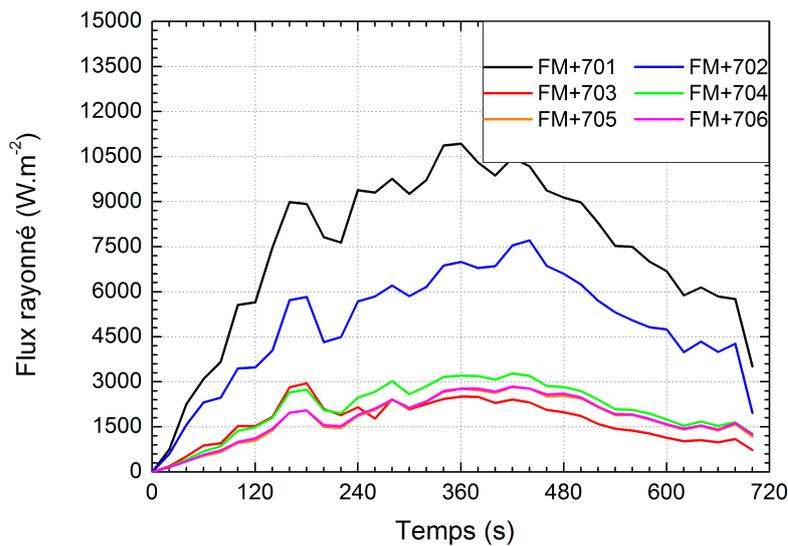


FIG. IV.73 – Essai ETun06 - Evolution temporelle des flux rayonnés vers l'aval

IV.2.4.4 Opacimétrie

On peut globalement remarquer que, bien que l'empilement de palettes soit aussi haut que le bûcher bois, il provoque une baisse de visibilité plus importante. Lors de l'essai ETun05 (figure IV.74), la couche de fumée est épaisse, car visible sur les deux opacimètres. Elle est de plus, de façon logique, plus dense en partie haute du tunnel qu'à hauteur d'homme. On atteint une baisse de visibilité sous voûte d'environ 60 % en moyenne lors de la partie de palier de la puissance du foyer qui tend à s'homogénéiser lorsque la phase de décroissance s'amorce (660s). En partie basse, la visibilité ne chute que de 20 % une fois le feu développé, ce qui confirme les résultats du paragraphe IV.2.4.2 : les fumées sont stratifiées, même si leur épaisseur est importante.

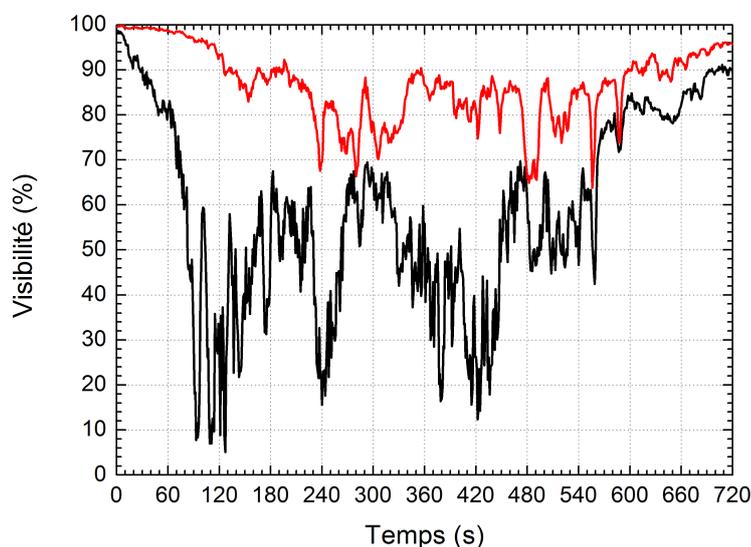


FIG. IV.74 – Essai Etun05 - Evolution de la visibilité en section S+23 : (—) : à 50 cm du sol et (—) : à 50cm du plafond

En ce qui concerne l'essai ETun06, conduit avec une vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique, les résultats sont inattendus (figure IV.75). En effet, si la visibilité chute de façon similaire à l'essai ETun05 (c'est-à-dire suit l'allure de l'évolution temporelle de la puissance du foyer) et atteint 40 % lorsque le foyer est pleinement développé, elle ne diminue que peu à hauteur d'homme (moins de 10 %). L'augmentation de la vitesse de l'écoulement dans l'ouvrage ne conduit pas à un mélange des couches de fumée et d'air comme lors des essais heptane (essai ETun02, figure IV.40). Ceci corrobore les résultats de température présentés au paragraphe IV.2.4.2, qui montrent une re-stratification des fumées en aval du foyer.

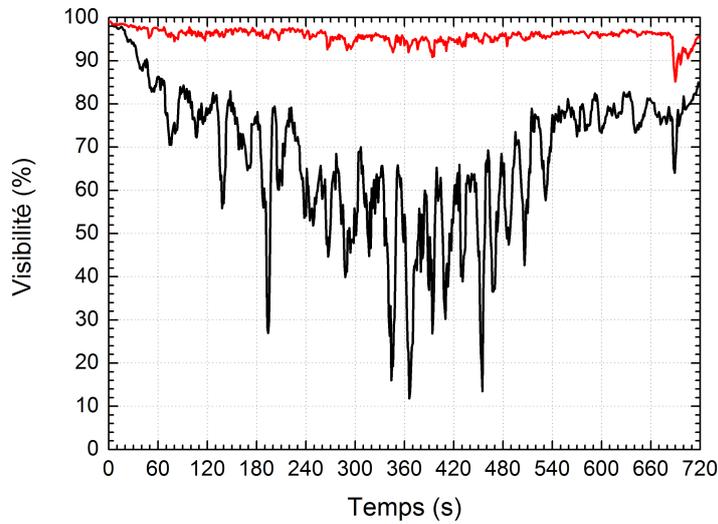


FIG. IV.75 – Essai Etun06 - Evolution de la visibilité en section S+23 : (—) : à 50 cm du sol et (—) : à 50cm du plafond

Les deux résultats qui peuvent intriguer :

- Baisse de la visibilité plus importante pour les palettes que pour les bûchers en dépit d'un combustible bois identique,
 - Restratification, dans le cas des palettes, en aval loin du foyer lorsqu'on augmente la vitesse de ventilation au-delà de la vitesse critique,
- sont discutés dans le paragraphe de synthèse suivant (IV.2.5)

IV.2.5 Synthèse des essais de référence en tunnel

Les essais réalisés sans aspersion et appelés essais de référence ont été mis en œuvre avec comme objectif principal l'acquisition de données pour permettre ensuite (chapitre V), par comparaison, de quantifier l'efficacité et le bien fondé de l'usage de brouillard d'eau dans la lutte contre les feux se développant en tunnels ventilés longitudinalement.

La maîtrise du paramètre fondamental, le débit calorifique ou puissance du foyer, reste toujours un défi pour toute étude expérimentale de feu de liquide ou de solide. Les deux méthodologies de base, suivi de la perte de masse ou de la concentration en oxygène, ont été utilisées. La première qui est en fait le reflet de la consommation de combustible mais pas nécessairement de l'oxydation des gaz générés, qui peut être plus ou moins complète en fonction du niveau de ventilation, a été préférentiellement exploitée pour les feux de liquide : la perte de masse est en effet aisée à suivre par pesée et, dans la configuration considérée, les foyers ne sont pas (ou très peu) sous-ventilés. La seconde traduisant, elle, bien cette oxydation, a été adoptée pour les feux de solide (et ce en dépit de quelques problèmes technologiques inhérents à la méthode), du fait d'un risque de sous-ventilation ne pouvant plus être négligé de par la présence de surfaces combustibles plus ou moins cachées. Quoi qu'il en soit, les mesures réalisées à partir de l'une ou l'autre des méthodes ont pu montrer un accord très satisfaisant lorsqu'elles ont été mises en œuvre conjointement lors des essais menés avec les feux de nappe. Par ailleurs, il est à noter que le risque de sous-ventilation pour les feux de combustible solide tend naturellement à s'estomper lorsque la vitesse de ventilation croît.

Le choix fait de travailler avec différents types de foyer s'est montré riche d'enseignements. Les feux de nappe qui présentent de plus l'avantage d'être très bien caractérisables d'un point de vue combustion, sont plutôt représentatifs de feux dus à un épandage de carburant au niveau du sol. Les feux de bûchers et d'empilements de palettes, en revanche, sont plus représentatifs de chargements de combustibles de type braisant, avec encombrement notable de la section de l'ouvrage, mais offrant une accessibilité de l'air différenciée pour les surfaces cachées. Les feux de nappe "couverts" enfin sont sensés être représentatifs d'une configuration offrant une "protection" vis-à-vis de l'aspersion : pavillon pour une voiture ou couverture de chargement pour un camion.

L'importance de l'effet de confinement lors du développement d'un feu en tunnel a bien été mise en évidence. Cet effet s'est fait sentir pour les différents types de foyers, mais a surtout pu être bien appréhendé pour les feux de nappe (visible en figure IV.76). En effet, pour ceux-ci, après une très rapide croissance, la puissance ne se stabilise pas comme cela pourrait être observé en milieu ouvert, mais continue à croître du fait de l'échauffement progressif de la voûte et de l'effet de rayonnement en retour vers la surface combustible, ne conduisant pas à un palier, mais à un pseudopalier. On voit là toute l'importance du rôle joué par les échanges thermiques avec les parois, de plus instationnaires, dans le développement d'un feu en tunnel et les conséquences qui en découlent pour une étude menée en réduction d'échelle. La réflexion faite sur la question dans le chapitre II, dédié au respect des similitudes, prend ici toute sa valeur.

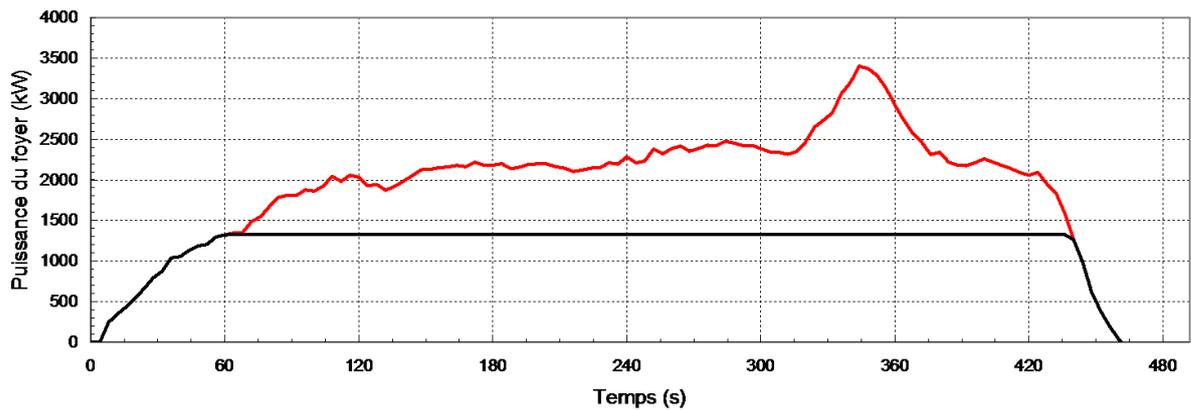


FIG. IV.76 – ETun01 - Allure de l'effet de confinement sur la puissance du foyer dans le cas d'un feu de nappe

Ces essais de référence ont par ailleurs permis de juger de l'influence de la vitesse de ventilation longitudinale sur l'évolution de la vitesse de combustion et de quantifier cette influence (figure IV.77).

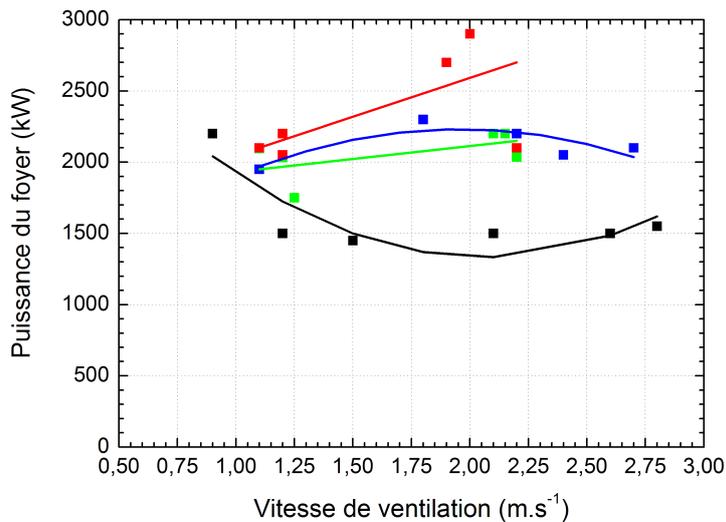


FIG. IV.77 – Influence de la vitesse de ventilation sur la puissance du foyer : (—) : Heptane découverts, (—) : Heptane couverts, (—) : Bûchers, (—) : Empilement de palettes

Pour les feux de nappe, deux effets opposés ont pu être observés selon que la nappe était "non couverte", "couverte" ou même confinée en maquette train. Si le foyer est non couvert, l'accroissement de la vitesse de ventilation dans une plage située autour de la vitesse critique ($0,5$ à 3 m.s^{-1} dans le prototype, de $0,9$ à $5,3 \text{ m.s}^{-1}$ pour la vraie grandeur) se traduit plutôt par une diminution de la vitesse de combustion (et donc de la puissance du foyer). Ceci est à attribuer essentiellement à une plus forte inclinaison de la flamme et à un bilan énergétique de surface résultant (incluant l'échauffement moindre de la voûte) ayant tendance à diminuer la vitesse de combustion. Concrètement, la diminution

de la vitesse de ventilation augmente l'effet de confinement dû aux parois et augmente la puissance du foyer au-delà de la puissance de dimensionnement (courbe noire sur la figure IV.77).

Si le foyer est couvert (courbe bleue sur la figure IV.77) ou moins accessible par confinement de proximité (maquette train, courbes vertes sur la figure IV.77), l'effet est inverse et à attribuer cette fois à l'accessibilité de l'air vers le foyer. La ventilation n'a pratiquement plus d'influence sur la géométrie de la flamme du fait des protections, mais alimente mieux le foyer en oxygène.

Pour les feux de bûchers et de palettes (respectivement les courbes rouges et oranges sur la figure IV.77), une augmentation de la vitesse de ventilation entraîne tout naturellement un accroissement de puissance (surfaces cachées mieux ventilées comme évoqué précédemment).

Mais ces essais de référence constituent surtout une base de données et une source d'informations substantielles relatives aux mouvements et à la stratification des fumées. Ils viennent compléter et enrichir une réflexion engagée depuis quelques années sur l'apport de la ventilation pour la sécurité lors d'un incendie en tunnel et sur l'optimisation de cet apport. A cet égard, un programme de recherche du Réseau Génie Civil Urbain (RGCU), piloté et coordonné par la société SCETAUROUTE et regroupant le Laboratoire IUSTI de l'université de Marseille, le Laboratoire de Combustion et de Détonique (LCD) de l'ENSMA à Poitiers, le Laboratoire de Mécanique et d'Energétique de l'université de Valenciennes, ainsi que la société AGEFLUID, développé entre 2002 et 2006, a déjà apporté une contribution conséquente à la démarche. Le détail des résultats peut être consulté dans un rapport de synthèse [80]. L'objectif majeur de ce programme était, à partir d'études tant expérimentales sur des maquettes chaudes et froides que de modélisations numériques, de montrer qu'une bonne maîtrise du mouvement des fumées et de la stabilité de leur stratification, à travers l'appréhension des effets favorables ou défavorables (interaction foyers-parois, turbulence, effets thermiques et mécaniques), pouvait permettre d'assurer des conditions favorables à l'évacuation des usagers.

Quels sont les enseignements sur le sujet à tirer du présent travail ? Les figures IV.78, IV.79, IV.80 et IV.81 regroupent et résument les résultats obtenus pour les deux vitesses de ventilation appliquées, avec les différents types de foyers et leur agencement particulier.

Pour des vitesses de ventilation inférieures à la vitesse critique Si l'on considère le côté amont du foyer, c'est-à-dire le côté couche de retour, les tests réalisés confirment la stratification bien marquée des fumées et ce quel que soit le type de foyer. Il y a toujours au minimum une demi-hauteur de tunnel praticable, avec des niveaux de température inférieurs à 50°C et une visibilité non altérée.

Les études qui ont pu être menées sur ce phénomène de couche de retour, sont très nombreuses et les conditions de sa formation et de son développement ont été à ce jour bien analysées.

Les restrictions de tenabilité en amont concernent seulement les flux de chaleur rayonnée par le foyer. Les flux que nous avons pu mesurer ne sont pas, nous l'avons vu au chapitre II, directement transposables en similitude. Le problème ne peut donc être considéré qu'à partir des conditions vraie grandeur.

On notera cependant qu'une vitesse de ventilation trop basse tend à ne plus assurer une structuration "couche de retour type". Les conditions amont peuvent alors être altérées

par des fumées trop refroidies et plus mélangées à l'écoulement principal. On se rapproche d'un écoulement de fumées qui tend à devenir symétrique par rapport au foyer.

Si l'on considère le côté aval du foyer. Pour ce qui est des foyers heptane, on peut constater que la présence d'une couverture n'a pas (ou très peu) d'influence sur la localisation des isothermes 50 et 100°C. Il est possible de considérer qu'une zone de tenabilité thermique existe entre 8 et 18 mètres du foyer, avec un maximum de hauteur situé à mi-hauteur du tunnel lorsque l'on est à environ 12 mètres du foyer.

Pour ce qui est des foyers de bûcher et d'empilement de palettes, on note très peu de différence dans la structure et la stratification des fumées. La zone de tenabilité (<50°C) est plus basse que précédemment (un tiers environ de la hauteur du tunnel) mais s'étend plus largement (de 8 à 24 mètres environ).

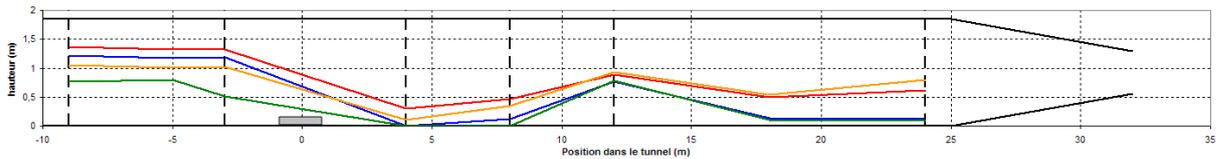


FIG. IV.78 – Essais ETun01 et ETun07 - Limite basse des zones de tenabilité : (—) : ETun01 - 50°C, (—) : ETun07 - 50°C, (—) : ETun01 - 100°C, (—) : ETun07 - 100°C

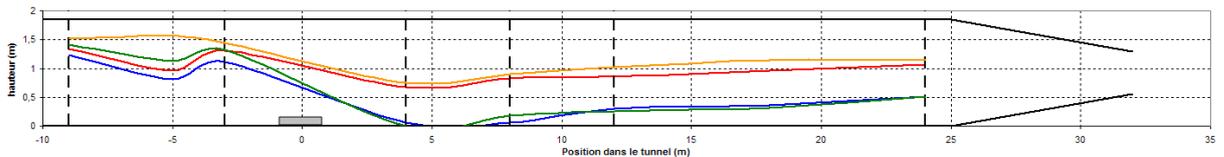


FIG. IV.79 – Essais ETun03 et ETun05 - Limite basse des zones de tenabilité : (—) : ETun03 - 50°C, (—) : ETun05 - 50°C, (—) : ETun03 - 100°C, (—) : ETun05 - 100°C

Pour des vitesses de ventilation supérieures à la vitesse critique Le côté amont du foyer devient totalement dégagé et la seule restriction de tenabilité à considérer est à attribuer, comme nous l'avons vu plus haut, aux flux de chaleur rayonnée par le feu. Côté aval, pour les foyers heptane découverts ou couverts, on peut constater que même si les profils de température verticaux ont tendance à montrer une certaine homogénéisation (stratification moins nettement prononcée), surtout dans la zone aval, il subsiste toujours aux alentours de 12 mètres du foyer une zone de tenabilité thermique de hauteur sensiblement similaire à celle observée à vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique (pratiquement mi-hauteur du tunnel).

Pour les foyers de bûcher et d'empilement de palettes, l'accroissement de la vitesse de ventilation a eu tendance à abaisser les isothermes 50 et 100°C vers le sol et à réduire la zone de tenabilité.

Il convient d'évoquer enfin l'effet induit par la ventilation sur la vitesse de combustion et donc la production de fumées. Comme mentionné précédemment, l'augmentation de la vitesse de ventilation va avoir pour effet d'augmenter la puissance des foyers de bûcher et d'heptane couverts, de diminuer celle des foyers heptane découverts et n'a que peu d'effet sur un foyer d'empilement de palettes. Nous ne sommes pas à puissance de foyer constante, ce qui complexifie l'analyse des effets résultants.

Mais, d'une façon générale, on peut remarquer que le fait d'accroître la vitesse de ventilation a logiquement un effet "déstratifiant". Toutefois, cet effet n'apparaît que peu prononcé lorsque l'on reste dans une gamme de variation limitée, comme celle explorée ici (1 à 2 m.s⁻¹ sur le prototype, soit 1.8 et 2,6 m.s⁻¹ en vraie grandeur).

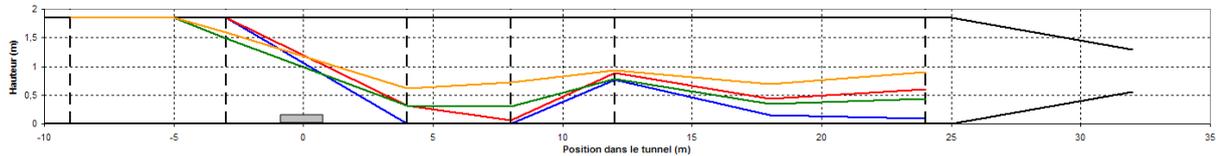


FIG. IV.80 – Essais ETun02 et ETun08 - Limite basse des zones de tenabilité : (—) : ETun02 - 50°C, (—) : ETun08 - 50°C, (—) : ETun02 - 100°C, (—) : ETun08 - 100°C

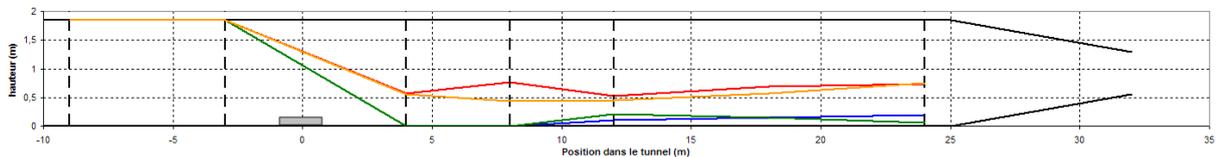


FIG. IV.81 – Essais ETun04 et ETun06 - Limite basse des zones de tenabilité : (—) : ETun04 - 50°C, (—) : ETun06 - 50°C, (—) : ETun04 - 100°C, (—) : ETun06 - 100°C

La question est souvent posée : est-il possible et souhaitable, en tunnel ventilé longitudinalement, d'"exploiter" la maîtrise de la ventilation pour assurer, en aval du foyer, des conditions acceptables pour l'évacuation des usagers ? L'analyse des résultats de ce travail montre que même pour un feu de puissance limitée (30 MW en vraie grandeur), les zones de tenabilité thermique restent assez réduites. Et encore, les aspects chute de visibilité et toxicité n'ont pas été explorés. Un niveau de température de 50°C peut se trouver à un niveau de concentration en toxiques non tolérable. Par ailleurs, le pilotage des vitesses de ventilation, même s'il a fait ces dernières années des progrès considérables, reste toujours délicat, surtout à bas niveau (il faut en outre "amortir" les effets de pistonement ou mécaniques résiduels). Certains opérationnels ou gestionnaires d'ouvrages préconisent des vitesses de ventilation élevées (de l'ordre de 6 m.s⁻¹ ou plus en vraie grandeur). Il est clair que dans une telle approche, le côté aval serait complètement condamné.

Au cours de ces essais, quelques mesures d'opacimétrie ont été réalisées. Elle ne doivent avoir qu'une valeur indicative, compte tenu du mode opératoire : atténuation moyennée sur un parcours optique traversant tout le tunnel et lieu de mesure unique (en extrême aval du tunnel). Elles ne font en fait que corroborer les mesures de température et l'analyse de la stratification des fumées qui en découle. Toutefois, l'un des résultats interpelle : l'atténuation du rayonnement lumineux par les fumées générées par les bûchers apparaît comme très faible si on la compare à celle provoquée par les fumées dégagées par les foyers d'empilement de palettes (les deux combustibles sont du bois de même nature). Dans un premiers temps, nous avons pensé que la cause ne pouvait être qu'un dysfonctionnement expérimental. Pourtant, l'atténuation due aux fumées générées par la combustion de l'heptane, servant à l'allumage du bûcher, était elle bien marquée. De plus, pour les cinq essais suivants, avec application de brouillard d'eau, c'est également un niveau d'atténuation

très faible qui a pu être mesuré, au cours de la phase initiale avant aspersion. La différence d'opacité entre ces deux écoulements de fumées pourrait alors tout simplement être attribuée à un degré d'humidité très différent des combustibles. Le bois du foyer bûchers, beaucoup plus sec que le bois des palettes, dégagerait beaucoup moins de vapeur d'eau donc générerait beaucoup moins de condensats très diffusants dans le domaine visible.

Chapitre V

Résultats expérimentaux - Essais avec aspersion

Sommaire

V.1	Reflexion sur la validité des mesures de température sous brouillard d'eau	163
V.1.1	Résultats	164
V.1.2	Conclusion	167
V.2	Essais avec aspersion - Foyers heptane	167
V.2.1	Essais avec foyers heptane non couverts	168
V.2.1.1	Puissance du foyer	168
V.2.1.2	Evaluation de la quantité utile d'eau injectée dans le tunnel	177
V.2.1.3	Températures	181
V.2.1.4	Flux rayonnés	184
V.2.2	Essais avec foyers heptane couverts	186
V.2.2.1	Puissance du foyer	186
V.2.2.2	Flux rayonnés	187
V.2.3	Cas d'une activation sectorielle du brouillard d'eau	188
V.2.3.1	Influence sur la puissance du foyer	189
V.2.3.2	Influence sur les températures dans le tunnel et les flux rayonnés	191
V.3	Essais avec aspersion - Foyers bûchers	194
V.3.1	Puissance du foyer	194
V.3.2	Evaluation de la quantité d'eau utile injectée dans le tunnel	198
V.3.3	Températures et stratification des fumées	201
V.3.4	Flux rayonnés	208
V.4	Essais avec brouillard d'eau - Foyers palettes	210
V.4.1	Puissance du foyer	210
V.4.2	Evaluation de la quantité d'eau utile injectée dans le tunnel	212
V.4.3	Températures	214
V.4.4	Flux rayonnés	218

V.5 Retour en vraie grandeur	220
V.6 Comparaison avec les résultats du projet SOLIT	221
V.6.1 Détermination et validation du facteur d'échelle.	221
V.6.2 Correspondance des points de mesure	222
V.6.3 Dispositif de brouillard d'eau	224
V.6.4 Résultats de puissance	224
V.6.5 Résultats de température	225
V.6.6 Conclusion	228
V.7 Synthèse des essais avec aspersion en tunnel	228

Résultats expérimentaux - Essais avec aspersion

V.1 Reflexion sur la validité des mesures de température sous brouillard d'eau

Avant la mise en œuvre de la campagne d'essais avec brumisation, la question de la fiabilité des mesures de température par thermocouples lors des phases avec aspersion s'est posée. En effet, une partie des buses est fixée au-dessus de sections équipées de capteurs, qui se retrouvent ainsi dans leur cône d'aspersion. Il convient alors de s'assurer de la pertinence de la mesure de température, la baisse de température que l'on relève pendant l'aspersion pouvant être due au refroidissement du milieu par l'injection de gouttelettes d'eau (vaporisation) mais aussi à l'impact direct d'eau sur le corps des capteurs. Afin de les protéger de cet impact, la solution envisagée a été de positionner un capot de protection autour du thermocouple. Sa forme a été choisie pour minimiser autant que faire se peut l'écoulement autour du thermocouple (figure V.1).

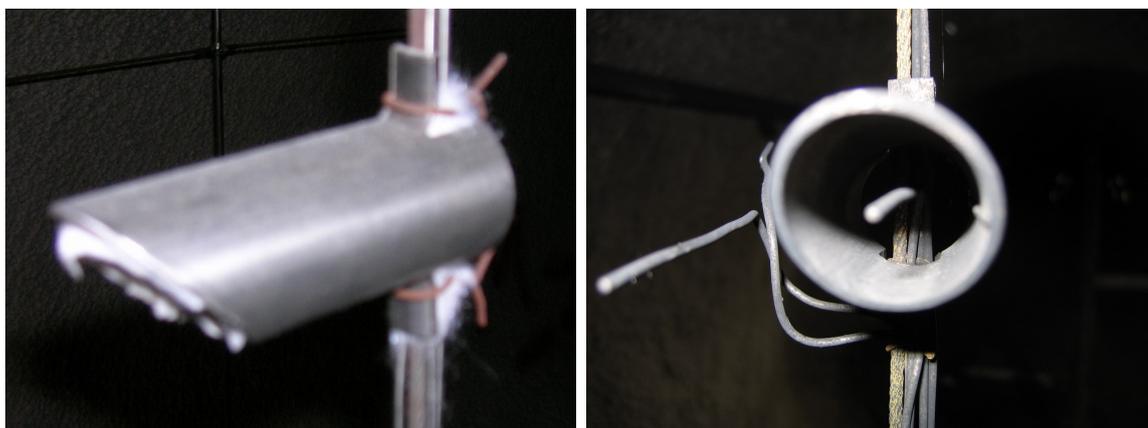


FIG. V.1 – Vues d'un capot de protection de thermocouple

On mesure donc la température en des points du tunnel avec un thermocouple protégé (auquel on fera ensuite référence en tant que thermocouple avec capot de protection) et un thermocouple nu. A l'occasion de cette adaptation de l'instrumentation, un troisième thermocouple a été ajouté aux points de mesure concernés, afin de vérifier que le rayonnement, en tant que transport d'énergie, est négligeable devant la convection. Ce troisième thermocouple a été installé sur la même position que les deux autres capteurs mais tourné

vers l'aval. Cette instrumentation a été mise en place sur les deux premières sections aval T+4 et T+8. Le montage a été réalisé sur les quatre thermocouples situés à mi-hauteur des supports, de T+X12 à T+X15 inclus, soit à des hauteurs par rapport au sol allant de 0,65 à 1,5 m. Ce choix de positionnement a été dicté par le fait que les capteurs numéro 10 et 11 sont trop hauts pour être dans le cône d'aspersion des buses concernées, et que les capteurs numéro 16 et 17 sont trop bas.

Pour ces essais spécifiques, notés T²C, les buses d'aspersion ont été installées entre les sections S+1,5 et S+4, ainsi qu'entre les sections S+5,5 et S+8, en groupes de 5 buses espacées de 50 cm. Le but de cette installation particulière était d'avoir un brouillard dense au niveau des points de mesures pour rendre maximum l'effet potentiel de dépôt d'eau. De plus, aucune buse n'a été disposée au-dessus du foyer, afin d'éviter que les signaux de température relevés ne puissent correspondre à une diminution de la puissance du foyer et donc de ne tenir compte que de l'influence du capot de protection sur les mesures.

Une série de six essais a été conduite, deux essais sans aspersion, et quatre essais avec aspersion. La liste de ces essais préliminaires est récapitulée dans le tableau V.1.

Essai	Puissance [kW]	Consigne de Ventilation [m. s ⁻¹]	Délai avant Aspersion [s]	Aspersion ?
T ² C 1	1500	2,20	-	non
T ² C 2	1500	2,20	180	oui
T ² C 3	1500	2,20	180	oui
T ² C 4	1500	2,20	-	non
T ² C 5	1500	2,20	300	oui
T ² C 6	1500	2,20	300	oui

TAB. V.1 – Liste des essais T²C

Après réalisation des essais T²C 1 à T²C 3, il est apparu que le foyer n'était pas en régime établi au déclenchement de l'aspersion à t=180s. La durée de la phase sèche a donc été portée à 300s, délai retenu par la suite pour les essais de performance de la campagne ETun. Par ailleurs, l'essai T²C 6 donnant des résultats tout à fait similaires à ceux de l'essai T²C 5, ces résultats ne sont pas présentés dans ce paragraphe. La vitesse de ventilation de 2,2 m.s⁻¹ a été retenue lors de cette série d'essais T²C afin, là aussi, de rendre maximum le risque de dépôt de gouttelettes entraînées par l'écoulement à cette vitesse plus élevée (puisque les thermocouples équipés sont situés en aval du foyer).

V.1.1 Résultats

Tout d'abord, on peut déjà relever quelques écarts de température lors des essais sans aspersion. Il existe une différence entre les températures relevées par les capteurs avec capot de protection TC et les capteurs sans capot de protection TN.

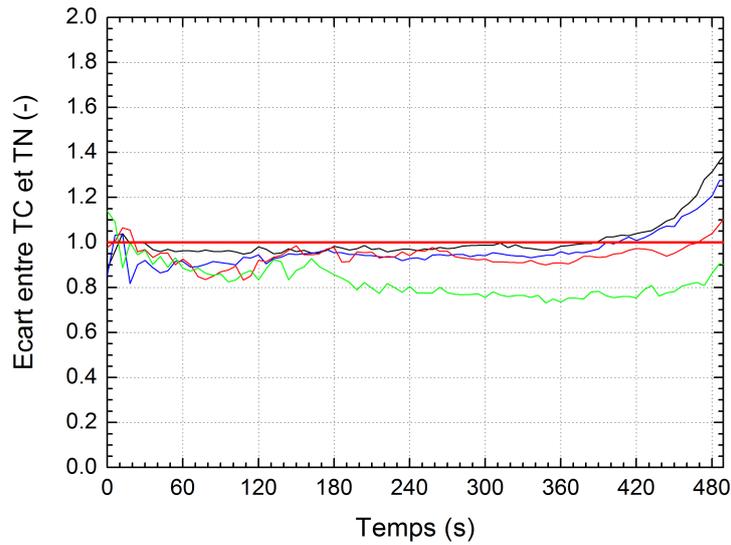


FIG. V.2 – Essai T²C 4 - Evolution temporelle de l'écart de température entre les thermocouples avec capots de protection (TC) et sans capots de protection (TN) en section T+4 - (—) : T+412, (—) : T+413, (—) : T+414, (—) : T+415

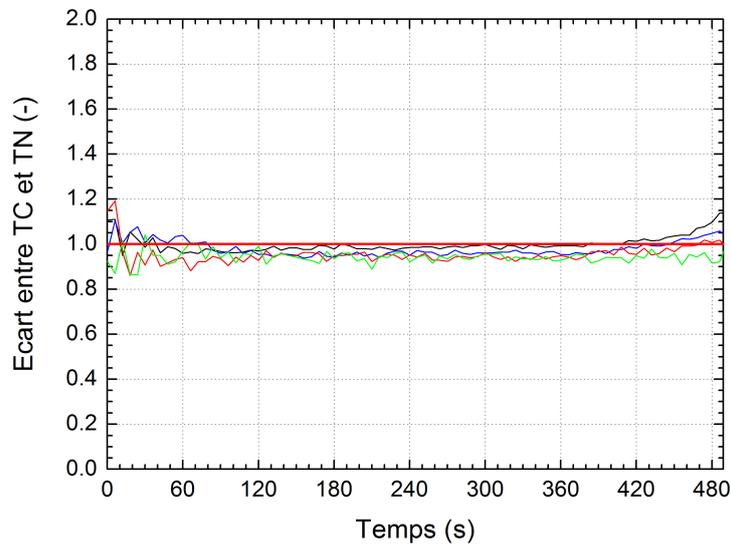


FIG. V.3 – Essai T²C 4 - Evolution temporelle de l'écart de température entre les thermocouples avec capots de protection (TC) et sans capots de protection (TN) en section T+8 - (—) : T+812, (—) : T+813, (—) : T+814, (—) : T+815

Au voisinage du foyer (figure V.2), on observe un écart de moins de 10% pour les capteurs proches de la voûte, et un écart allant jusqu'à 20% pour le capteur 415, situé à un tiers de la hauteur du tunnel. Cependant, les résultats obtenus en section T+8

(figure V.3) indiquent que cet écart n'existe pratiquement plus, et que l'ensemble des points instrumentés présente moins de 10% d'écart entre le capteur protégé et le capteur nu.

Sur les résultats des essais T²C avec aspersion (figure V.4), on remarque au niveau de la section T+4 que les résultats en phase sèche (entre t=0 et t=300s) confirment les relevés des essais sans aspersion. En phase humide (à partir de t=300s), la température du thermocouple avec capot décroît beaucoup plus lentement, avec un écart allant jusqu'à 50% pour le capteur 412, le plus haut des capteurs instrumentés. Le capot semble donc bien protéger le capteur de l'impact de gouttelettes issues des buses de brouillard d'eau placées au-dessus de la section de mesure. La baisse de température mesurée semble bien être celle occasionnée par les gouttelettes d'eau qui s'échauffent et se vaporisent dans l'écoulement d'air et non celle due à l'impact et au dépôt de gouttelettes sur le capteur. Cependant, au fil des essais, les écarts entre thermocouples protégés et nus se sont révélés inconstants (variant de 10 à 30% par rapport à la mesure du capteur avec capot de protection).

De plus, si l'on regarde les résultats obtenus en section T+8 (figure V.5), on remarque que la différence entre les deux capteurs est minime (moins de 1%), que ce soit pendant la phase de feu libre ou l'aspersion. Ces résultats se sont révélés reproductibles durant les deux essais avec aspersion (T²C 5 et T²C 6). Lors de l'essai sans aspersion, l'écart entre les deux signaux est au maximum de 10%, durant la phase de baisse de puissance du foyer. Le pic d'écart visible sur la figure V.5 est dû à la perturbation du milieu par l'introduction du brouillard d'eau.

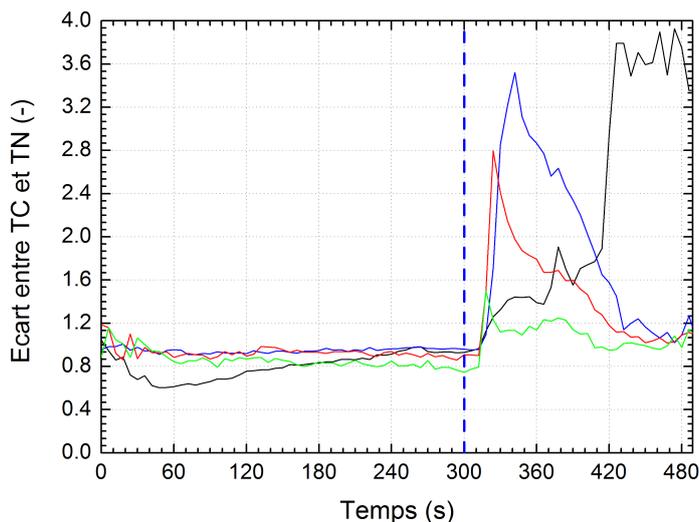


FIG. V.4 – Essai T²C 5 - Evolution temporelle de l'écart de température entre les thermocouples avec capots de protection (TC) et sans capots de protection (TN) en section T+4 - (—) : T+412, (—) : T+413, (—) : T+414, (—) : T+415

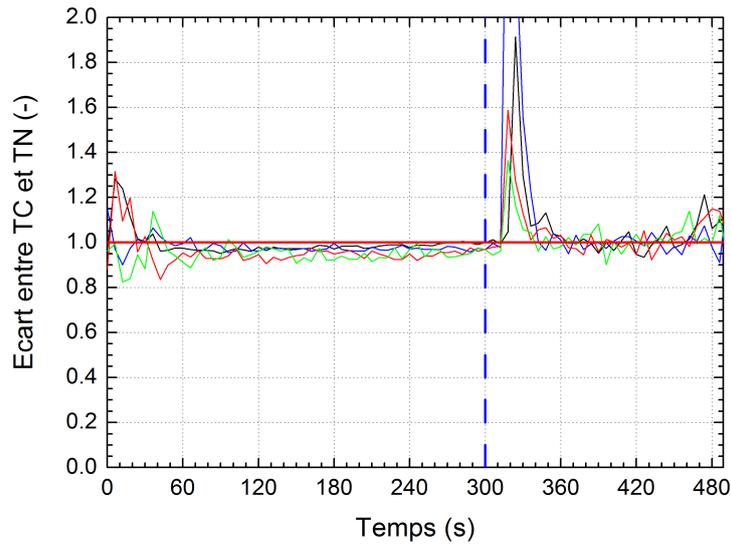


FIG. V.5 – Essai T²C 5 - Evolution temporelle de l'écart de température entre les thermocouples avec capots de protection (TC) et sans capots de protection (TN) en section T+8 - (—) : T+812, (—) : T+813, (—) : T+814, (—) : T+815

V.1.2 Conclusion

Après examen de ces résultats, les capots de protection ont tous été retirés, car les seuls capteurs pour lesquels une différence notable entre la présence ou l'absence de capot a pu être notée sont situés sur la section T+4, proche du foyer, et donc dans une zone du tunnel où se développe encore le panache de la flamme. Cette zone de panache présente une forte turbulence, que l'acquisition relativement lente des données ne permet pas d'analyser. Enfin, à partir de la section T+8 les écarts entre les capteurs avec et sans capot de protection peuvent être considérés comme négligeables.

V.2 Essais avec aspersion - Foyers heptane

Lors de ces essais, le système d'aspersion est déclenché manuellement après 300 secondes. Ce délai permet au foyer d'atteindre son régime établi et donc de représenter l'activation d'un système de brouillard d'eau sur un foyer pleinement développé.

La zone équipée de buses d'aspersion s'étend de la section S-4 à la section S+17, les buses étant espacées de 1,5m (figure V.6). Cette rampe complète d'aspersion comporte donc 14 buses.

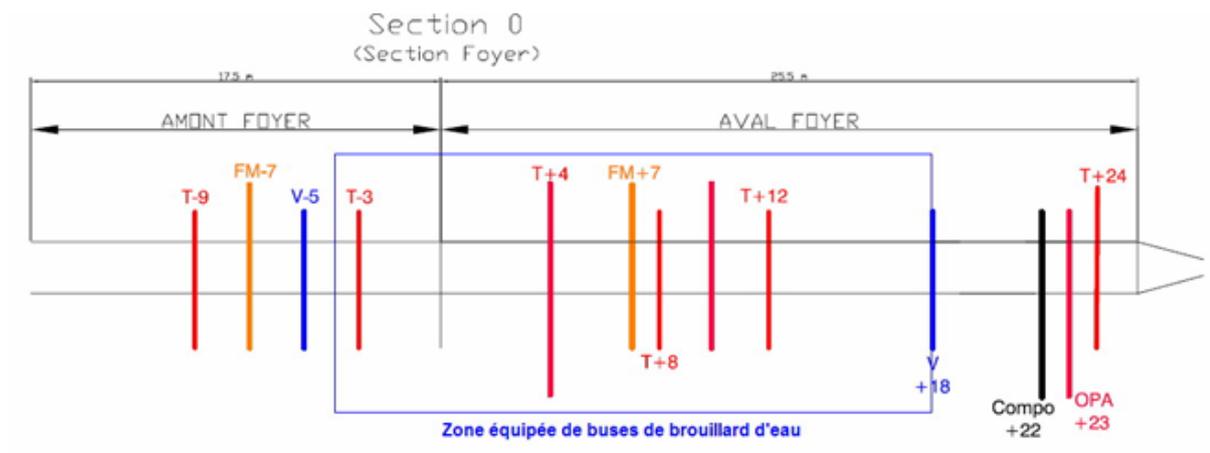


FIG. V.6 – Représentation de la zone du tunnel équipée de buses d’aspersion

V.2.1 Essais avec foyers heptane non couverts

La première configuration d’essais avec foyer heptane ne comporte qu’un feu de nappe, sans couverture du foyer. L’ensemble de ces essais est récapitulé dans le tableau V.2.

Essai	Combustible	Puissance [kW]	Vitesse d’écoulement [m.s ⁻¹]	Couverture
ETun 09	Heptane	1500	1,40	sans
ETun 10	Heptane	1500	1,45	sans
ETun 11	Heptane	1500	2,30	sans
ETun 12	Heptane	1500	2,40	sans

TAB. V.2 – Récapitulatif des essais avec brouillard d’eau - Foyers heptane non couverts

V.2.1.1 Puissance du foyer

Lors du premier essai réalisé avec aspersion (essai ETun11), les buses ont été disposées tous les mètres. Elles étaient alors au nombre de 20. Lors de ce premier essai, une des buses se trouvait située directement au-dessus du bac d’heptane. Peu après le déclenchement de l’aspersion, le foyer a été éteint (figure V.7). Après l’arrêt du système de brouillard d’eau, le foyer a été ré-allumé pour consommer l’heptane restant dans le bac, par mesure de sécurité.

Par la suite, il a été décidé d’écarter les buses et de les disposer afin qu’aucune d’entre elles ne soit directement placée à l’aplomb du foyer. Cette nouvelle configuration a été retenue afin d’éviter ce risque d’extinction trop rapide. Les résultats de l’essai ETun11 ne sont donc pas analysés dans la suite de ce travail.

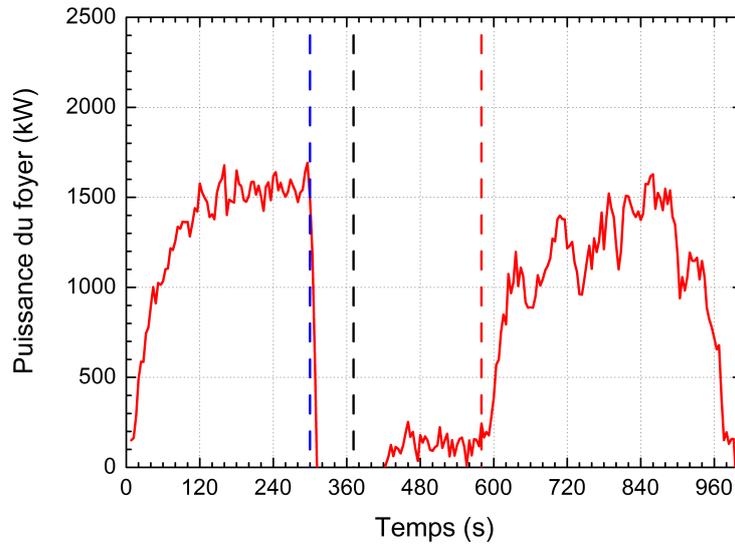


FIG. V.7 – Essai ETun11 - Evolution temporelle de la puissance du foyer par mesure de perte de masse - Extinction par l'aspersion à $t=371$ s, ré-allumage du foyer à $t=580$ s, extinction par manque de combustible à $t=1006$ s

Concernant les trois autres essais conduits avec un foyer heptane non couvert (ETun09, ETun10 et ETun12), on peut remarquer que, dès le déclenchement de l'aspersion (à $t=300$ s), il y a une chute brutale de la puissance du foyer (figure V.8 pour l'essai ETun09, avec une vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique et figure V.9 pour l'essai ETun12, avec une vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique). Concernant l'essai ETun09 (figure V.8), on relève une vitesse de combustion négative. La même constatation peut être faite pour l'essai ETun10, non représenté, car en tout point similaire à l'essai ETun09. Ce résultat est inexploitable en l'état pour commenter la modification de la puissance du foyer. L'explication de cette augmentation de la masse du foyer est qu'une partie du brouillard d'eau non vaporisée se dépose dans le bac de combustible. Ce phénomène se produit aussi lors de l'essai ETun12, mais de façon moins prononcée (la masse du foyer n'augmente pas), mais le signal est tout de même très perturbé et malaisé à exploiter. Lorsque la vitesse de ventilation est faible, les gouttelettes (injectées verticalement) sont peu perturbées par l'écoulement et ont une trajectoire au niveau de la zone de flamme présentant un faible angle par rapport à la normale. Lorsque la vitesse de ventilation est supérieure à la vitesse critique, le cône d'aspersion est plus cisailé par l'écoulement. Afin de pouvoir analyser de façon pertinente l'impact du brouillard d'eau sur la puissance du foyer, il convient de corriger les résultats de la masse d'eau parasite se déposant dans le bac au cours de l'essai.

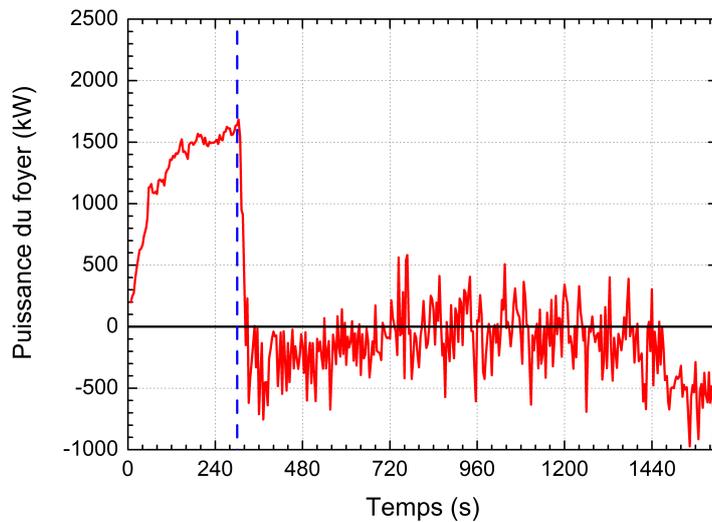


FIG. V.8 – Essai ETun09 - Evolution temporelle de la puissance du foyer par mesure de perte de masse

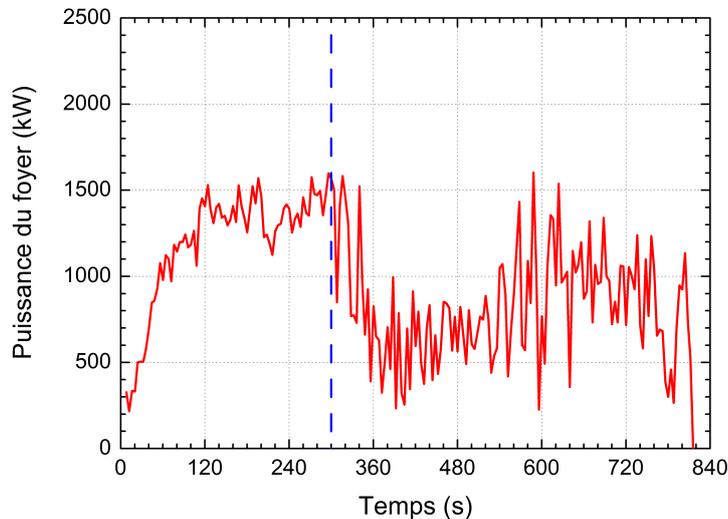


FIG. V.9 – Essai ETun12 - Evolution temporelle de la puissance du foyer par mesure de perte de masse

Pour ce faire, on peut procéder de plusieurs manières. On peut tout d'abord déterminer une valeur moyenne de la vitesse de perte de masse lors de la phase d'aspersion (et donc de la puissance). Il est alors nécessaire de connaître la durée de la phase d'aspersion Δt_{asp} , et la masse d'heptane encore présente dans le bac au déclenchement du brouillard d'eau $m_{C_7H_{16},asp,0}$. Cette masse est directement obtenue à partir de la mesure. On peut ainsi

évaluer une vitesse de perte de masse moyenne de l'heptane pendant la phase humide de l'essai, et en déduire une puissance moyenne P_{moy} selon la relation V.1.

$$P_{moy} = \Delta H_c \cdot \left(\frac{m_{C_7H_{16},asp,0}}{\Delta t_{asp}} \right) \quad (V.1)$$

On détermine de cette manière les valeurs présentées tableau V.3 pour les essais ETun09, ETun10 et ETun12. Les évolutions temporelles de puissance ainsi calculées pour les essais ETun09 et ETun10 sont présentées en figure V.10, où figure également l'évolution temporelle de la puissance de l'essai de référence correspondant : ETun01. La figure V.11 illustre cette même évolution pour l'essai ETun12 avec son essai de référence ETun02.

Essai	Vitesse de perte de masse moyenne [g.s ⁻¹]	Puissance correspondante moyenne [kW]
ETun09	9,7	436
ETun10	10,5	471
ETun12	24,2	1087

TAB. V.3 – Vitesses de perte de masse et puissances moyennes pour les essais ETun09, ETun10 et ETun12 sous aspersion

Puisqu'il n'y a jamais eu extinction du foyer par le brouillard d'eau dans les essais retenus, la totalité de la masse initiale d'heptane a été consommée. On peut alors vérifier la cohérence de cette puissance moyenne calculée par rapport à celle de l'essai de référence correspondant. En intégrant la puissance P_{moy} sur la durée de l'essai, il est possible de calculer l'énergie totale libérée par le foyer et de la comparer avec celle de l'essai ETun01 pour les essais ETun09 et ETun10, et avec celle de l'essai ETun02 pour l'essai ETun12. Ces valeurs sont récapitulées dans le tableau V.4. Cette première évaluation de la puissance du foyer lors de la phase d'aspersion peut être considérée comme satisfaisante en première approche, les écarts par rapport à la puissance de l'essai de référence n'excédant pas 9,4 %.

Essai	Energie libérée au cours de l'essai [MJ]	Ecart avec l'essai de référence [%]
ETun01	893,7	-
ETun09 P_{moy}	953,9	6,7 %
ETun10 P_{moy}	889,8	0,4 %
ETun02	883,7	-
ETun12 P_{moy}	971,7	9,4 %

TAB. V.4 – Energie libérée au cours des essais à foyer heptane découvert (puissance P_{moy}) et comparaison avec l'essai de référence correspondant

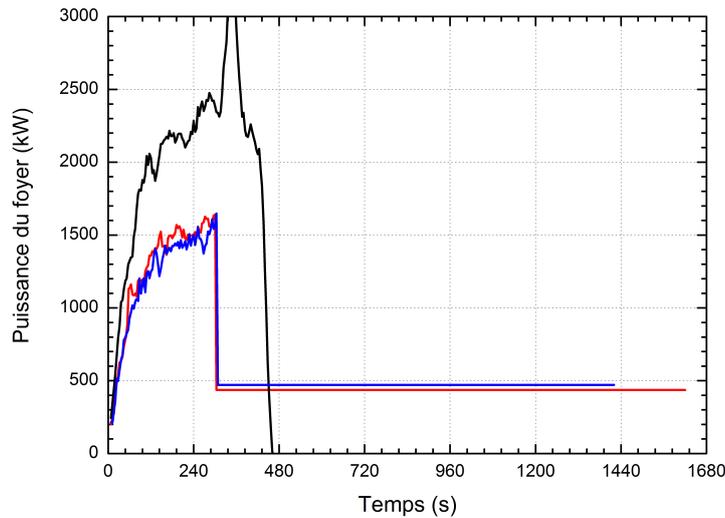


FIG. V.10 – Essai ETun09 et ETun10 - Evolution temporelle de la puissance du foyer par mesure de perte de masse - Essais ETun09 (—) et ETun10 (—) - Comparaison avec l’essai ETun01 (—)

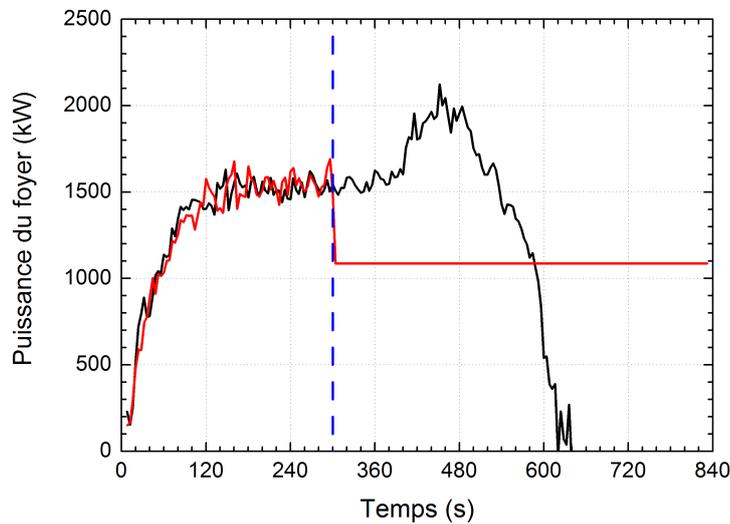


FIG. V.11 – Essai ETun12 - Evolution temporelle de la puissance du foyer par mesure de perte de masse - (—) Essai ETun12 - Comparaison avec l’essai ETun02 (—)

On peut alors, pour chaque essai, comparer la valeur de puissance moyenne sous aspersion P_{moy} à celle mesurée sur le palier de puissance en fin de phase sèche. On remarque une baisse très sensible. Cette baisse de puissance concorde avec l’allongement de la durée de l’essai par rapport aux essais de référence ETun01 pour les essais ETun09 et ETun10, et

ETun02 pour l'essai ETun12, l'énergie totale libérée par le foyer étant comparable. Dans le cas des essais ETun09 et ETun10, tous deux conduits avec une vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique, la puissance est réduite à environ 450 kW, selon la relation V.1, ce qui représente une baisse de l'ordre de 70 %. A vitesse supérieure à la vitesse critique (essai ETun12), la baisse de puissance est bien moindre : 410 kW, soit 28 %. Cette différence de baisse de puissance montre une attaque moins forte du brouillard sur le foyer, pour les raisons déjà exposées précédemment : la vitesse de ventilation plus forte perturbe la pénétration des gouttelettes dans le foyer en déformant le cône d'aspersion.

Cette valeur de puissance moyenne P_{moy} , si elle permet d'estimer globalement la baisse de puissance du foyer, ne permet pas d'observer le comportement du feu sous aspersion, qui est pourtant une information intéressante.

Nous avons mentionné préalablement que la mesure de perte de masse du foyer était perturbée par l'eau qui se déposait dans le bac. Une seconde approche consiste à estimer cette quantité. En effet, la pesée nous donne la masse totale du foyer (bac, eau et combustible). On en tire le débit massique total \dot{m}_{total} . Ce terme \dot{m}_{total} , lors d'un essai sans aspersion, représente bien le débit massique de combustible $\dot{m}_{combustible}$ et suffit à estimer la puissance du foyer :

$$\dot{m}_{total} = \dot{m}_{combustible} \quad (V.2)$$

Lors d'un essai avec brouillard d'eau, l'eau se déposant ajoute un terme \dot{m}_{eau} . On a alors :

$$\dot{m}_{total} = \dot{m}_{combustible} + \dot{m}_{eau} \quad (V.3)$$

Si on fait l'hypothèse que le débit massique de combustible $\dot{m}_{combustible}$ est constant, on peut déterminer l'évolution au cours du temps, lors de la phase d'aspersion, de la masse d'eau récupérée dans le bac (figure V.12).

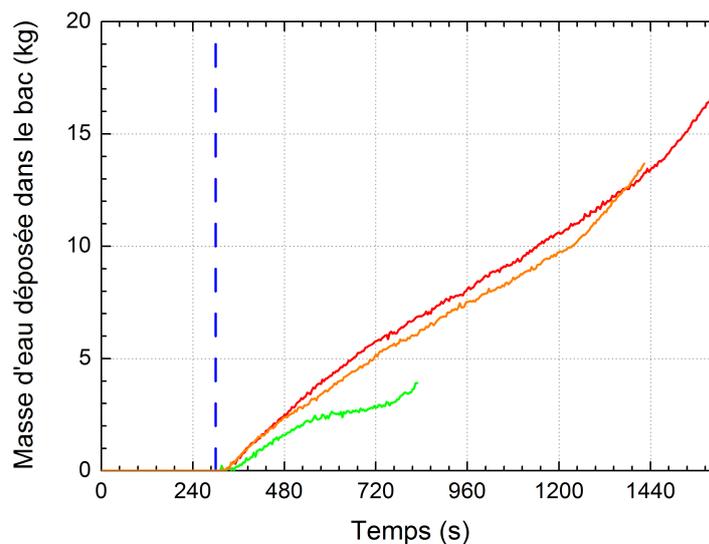


FIG. V.12 – Essais ETun09, ETun10 et ETun12 - Evolution temporelle de la masse l'eau ajoutée par l'aspersion dans le bac - (—) ETun09, (—) ETun10 et (—) ETun12

On peut décomposer ce débit massique d'eau récupérée dans le bac \dot{m}_{eau} en une valeur moyenne $\overline{\dot{m}_{eau}}$ et une fluctuation \dot{m}'_{eau} , et faire de même avec le débit massique de combustible $\dot{m}_{combustible}$ soit :

$$\dot{m}_{eau} = \overline{\dot{m}_{eau}} + \dot{m}'_{eau} \quad (V.4)$$

$$\dot{m}_{combustible} = \overline{\dot{m}_{combustible}} + \dot{m}'_{combustible} \quad (V.5)$$

Selon la relation V.3, on peut partir du principe que le débit massique d'heptane et celui d'eau varient de manière inverse, soit :

$$\dot{m}'_{total} = \dot{m}'_{combustible} + \dot{m}'_{eau} \quad (V.6)$$

Si l'on suppose que le débit massique \dot{m}_{total} est constant, alors $\dot{m}'_{total} = 0$ et :

$$\dot{m}'_{combustible} = -\dot{m}'_{eau} \quad (V.7)$$

On peut donc appliquer à la puissance P_{moy} calculée précédemment les fluctuations opposées du débit massique d'eau, obtenant une puissance P_{fluct} afin de refléter les variations de puissance du foyer sous phase d'aspersion. Les figures V.13, V.14 et V.15 illustrent les deux démarches d'évaluation de la puissance P_{moy} et P_{fluct} , respectivement pour les essais ETun09, ETun10 et ETun12

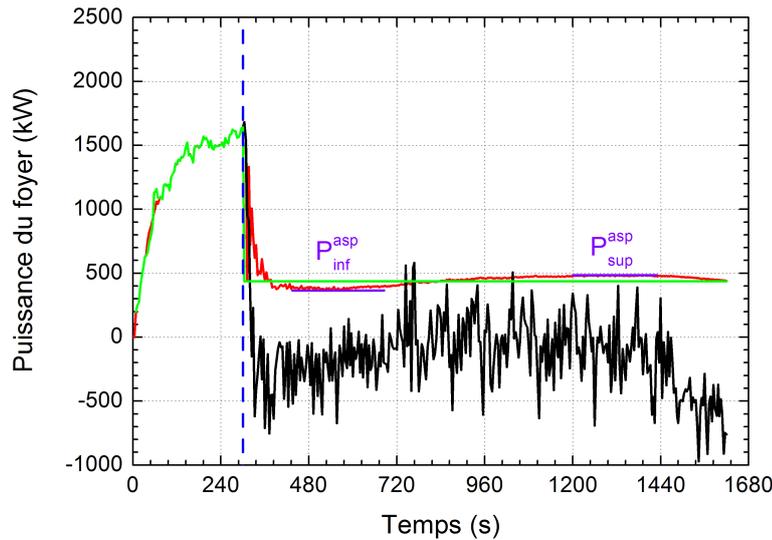


FIG. V.13 – Essai ETun09 ($v = 1,40 \text{ m.s}^{-1}$) - Evolution temporelle de la puissance du foyer - (—) Mesure directe, (—) P_{moy} et (—) : P_{fluct}

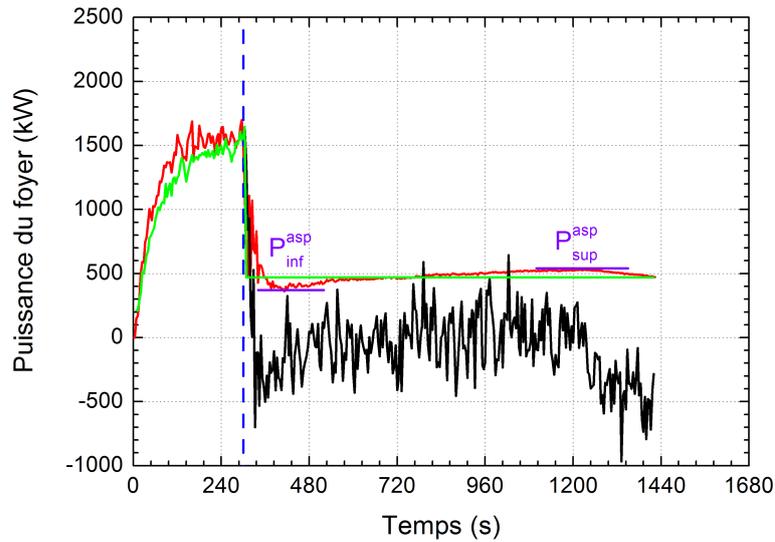


FIG. V.14 – Essai ETun10 ($v = 1,45 \text{ m.s}^{-1}$) - Evolution temporelle de la puissance du foyer - (—) Mesure directe, (—) P_{moy} et (—) : P_{fluct}

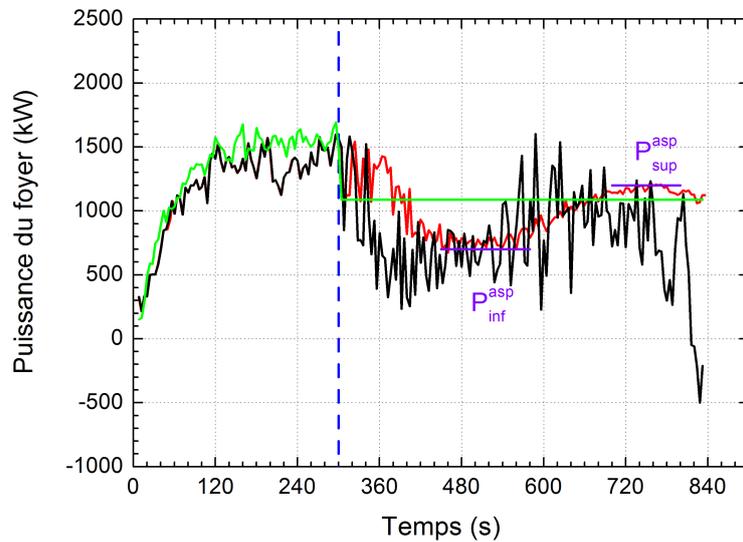


FIG. V.15 – Essai ETun12 ($v = 2,40 \text{ m.s}^{-1}$) - Evolution temporelle de la puissance du foyer - (—) Mesure directe, (—) P_{moy} et (—) : P_{fluct}

On peut alors observer que pour une vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique (essais ETun09 et Etun10, figures V.13 et V.14), la puissance du foyer sous aspersion ne varie que peu par rapport à la valeur moyenne P_{moy} . On discerne cependant déjà le comportement que l'on va observer de manière plus marquée lors de l'essai Etun12 (figure V.15), c'est-à-dire, tout d'abord une baisse de puissance à un niveau P_{inf}^{asp} (à un peu plus

de 700 kW dans le cas de l'essai ETun12), puis l'établissement d'un nouveau régime à une puissance plus élevée P_{sup}^{asp} (1200 kW dans le cas de l'essai ETun12), mais inférieure à la puissance développée par le feu en phase sèche. Les résultats tirés de ces évolutions de puissance sont synthétisés dans le tableau V.5.

Essai	Niveau de puissance avant aspersion (t=296s)	Niveau de puissance	Niveau de puissance
	[kW]	P_{inf}^{asp} [kW]	P_{sup}^{asp} [kW]
ETun09	1560	365	485
ETun10	1550	360	530
ETun12	1510	710	1200

TAB. V.5 – Niveaux de puissance lors des essais ETun09, ETun10 et ETun12 : niveau avant déclenchement de l'aspersion, P_{inf}^{asp} niveau minimum pendant l'aspersion, P_{sup}^{asp} niveau maximum pendant l'aspersion.

De même que pour la puissance P_{moy} (tableau V.4), on peut vérifier la pertinence de cette démarche en intégrant l'évolution de la puissance P_{fluct} sur la totalité de l'essai et en la comparant à celle de l'essai de référence correspondant (ETun01 pour les essais ETun09 et ETun10, ETun02 pour l'essai ETun12). On obtient ainsi l'énergie totale dégagée par le foyer au cours de l'essai. Les résultats sont présentés dans le tableau V.6.

Vitesse inférieure à la vitesse critique	
Puissance considérée	Ecart avec l'essai de référence (ETun01)
ETun09 Mesure directe	65 %
ETun09, P_{moy}	6,7 %
ETun09, P_{fluct}	9 %
ETun10 Mesure directe	68 %
ETun10, P_{moy}	3 %
ETun10, P_{fluct}	5 %
Vitesse supérieure à la vitesse critique	
Puissance considérée	Ecart avec l'essai de référence (ETun02)
ETun11 Mesure directe	non pris en compte
ETun11, P_{moy}	non pris en compte
ETun11, P_{fluct}	non pris en compte
ETun12 Mesure directe	12 %
ETun12, P_{moy}	9 %
ETun12, P_{fluct}	3 %

TAB. V.6 – Ecart entre l'énergie libérée au cours de l'essai par le foyer, par rapport à l'essai de référence, selon les différentes méthodes de déterminations de la puissance

On peut constater que, pour les essais menés avec une vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique, sans correction de la mesure de puissance (Puissance par Mesure

directe), la comparaison entre essai de référence et essai de performance n'a pas de sens, du fait des fortes perturbations relevées sur le signal. L'erreur commise pour obtenir la puissance corrigée P_{fluct} est de 10 % au maximum ce qui, au vu de la précision initiale de la mesure, peut être considéré comme satisfaisant. C'est cette puissance P_{fluct} qui est donc retenue pour analyser plus avant les essais de performance à foyer heptane.

V.2.1.2 Evaluation de la quantité utile d'eau injectée dans le tunnel

Le paragraphe précédent a permis d'évaluer l'impact du brouillard d'eau sur la puissance du foyer. Cependant, il est pertinent de s'intéresser à la quantité d'eau de l'aspersion véritablement utile, dite *active*, en terme d'intervention sur l'incendie. En effet, un des arguments mis en avant pour promouvoir l'utilisation du brouillard d'eau (mentionné au chapitre I) est précisément qu'un tel système nécessite moins d'eau qu'un dispositif d'aspersion par sprinkler. Il convient donc d'évaluer cette part *active* de l'aspersion dans la campagne d'essais ETun.

A cette fin, on peut raisonner par conservation du débit volumique dans le tunnel. En effet, comme mentionné au chapitre I, page 26, une même masse d'eau en se vaporisant occupe un volume bien supérieur à celui qu'elle occupait sous forme liquide. La vaporisation d'une partie du brouillard introduit donc un terme source de débit volumique dans le tunnel \dot{V}_{vap} . Le ventilateur d'extraction situé en extrême aval, assurant l'écoulement longitudinal dans le prototype, travaille à débit *volumique* constant et assure un débit volumique constant d'extraction $\dot{V}_{extract}$ en bout de tunnel. Le foyer, comme signalé au chapitre IV, paragraphe IV.2.1.2, génère un volume de gaz $\dot{V}_{gaz,foye}$. La consigne de débit étant donnée par le ventilateur, c'est le débit entrant d'air frais \dot{V}_{frais} qui s'adapte à la situation aéraulique globale. Par conservation du débit volumique dans le tunnel (illustrée sur la figure V.16), on peut écrire :

$$\dot{V}_{frais} + \dot{V}_{gaz,foye} + \dot{V}_{vap} = \dot{V}_{extract} \quad (V.8)$$

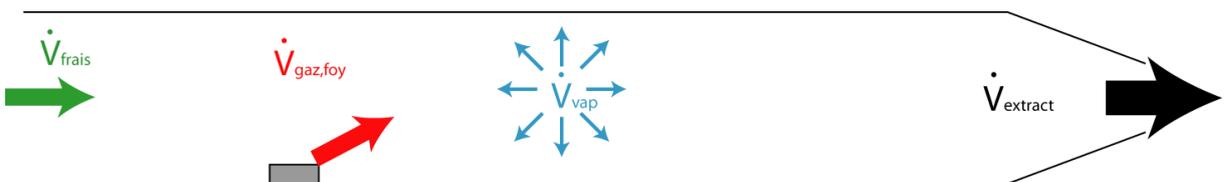


FIG. V.16 – Bilan des débits volumiques dans le tunnel

- (—) : \dot{V}_{frais} , débit volumique d'air entrant
- (—) : $\dot{V}_{gaz,foye}$, débit de gaz de combustion générés par le foyer
- (—) : \dot{V}_{vap} , débit volumique généré par la vaporisation des gouttelettes d'eau du brouillard
- (—) : $\dot{V}_{extract}$, débit volumique extrait par le ventilateur

La consigne de débit est donnée par le ventilateur, donc le terme $\dot{V}_{extract}$ est connu. A partir des mesures de vitesse amont, on peut déterminer le terme \dot{V}_{frais} . La mesure de puissance permet de calculer le débit de gaz générés par le foyer ($\dot{V}_{gaz,foye}$). On peut alors calculer le débit ajouté par la vaporisation de l'eau du brouillard, et ensuite obtenir une valeur de la quantité d'eau vaporisée. La baisse de puissance du foyer ΔP_{foye} observée

entre la phase avec aspersion et la phase sèche est alors partagée entre une partie ΔP_{vap} absorbée par l'eau qui s'est vaporisée et une autre partie ΔP_{chauff} qui est absorbée par les gouttelettes qui se sont seulement échauffées. On peut donc écrire :

$$\dot{V}_{vap} = \dot{V}_{extract} - \dot{V}_{frais} - \dot{V}_{gaz,foiy} \quad (V.9)$$

$$\Delta P_{foiy} = \Delta P_{vap} + \Delta P_{chauff} \quad (V.10)$$

Le débit massique d'eau liquide qui s'est vaporisée pour créer cet accroissement de débit $\dot{m}_{eau,vap}$ se déduit donc selon la relation V.11. Le facteur $r_{vap/liq}$ représente le rapport de volume entre 1 kg d'eau à l'état vapeur et 1 kg d'eau à l'état liquide :

$$\dot{m}_{eau,vap} = \frac{\dot{V}_{vap}}{r_{vap/liq}} \cdot \rho_{H_2O} \quad (V.11)$$

A partir de ce débit massique d'eau vaporisée $\dot{m}_{eau,vap}$, on peut calculer, via la chaleur latente de vaporisation de l'eau $L_v^{H_2O}$, la puissance ΔP_{vap} . La valeur de ΔP_{chauff} est déduite de la relation V.10. Il reste ensuite à déterminer le débit massique d'eau s'échauffant sans se vaporiser \dot{m}_{chauff} .

Pour se vaporiser, les gouttelettes doivent d'abord s'échauffer de la température d'injection $T_{inj} = 10^\circ\text{C}$ (température de l'eau du réseau d'alimentation), jusqu'à la température de vaporisation de l'eau (100°C). Ainsi, le terme ΔP_{chauff} comprend la chute de puissance $\Delta P_{chauff,vap}$ représentant la puissance absorbée par l'échauffement des gouttelettes qui vont se vaporiser, ainsi que $\Delta P_{chauff,-vap}$ représentant celle absorbée par l'échauffement des gouttelettes qui ne vont pas se vaporiser. Ce débit massique \dot{m}_{chauff} représente les gouttelettes qui se sont échauffées de T_{inj} à la température moyenne de l'écoulement sous aspersion T_{asp} ($T_{asp} \approx 30^\circ\text{C}$). On peut alors écrire :

$$\Delta P_{chauff} = \Delta P_{chauff,vap} + \Delta P_{chauff,-vap} \quad (V.12)$$

$$\Delta P_{chauff,vap} = \dot{m}_{eau,vap} \cdot C_p \cdot (100 - T_{inj}) \quad (V.13)$$

$$\Delta P_{chauff,-vap} = \dot{m}_{chauff} \cdot C_p \cdot (T_{asp} - T_{inj}) \quad (V.14)$$

On peut ensuite déterminer l'efficacité du brouillard d'eau η^{BE} comme le rapport du débit massique total de l'eau utile sur le débit massique d'eau injecté dans le tunnel \dot{m}_{inj} :

$$\eta^{BE} = \frac{\dot{m}_{eau,vap} + \dot{m}_{chauff}}{\dot{m}_{inj}} \quad (V.15)$$

Lorsque la vitesse de ventilation est inférieure à la vitesse critique, comme illustré sur la figure V.17 pour l'essai ETun09, on peut bien constater que la part de puissance absorbée par vaporisation des gouttelettes du brouillard est plus importante que celle due à leur simple échauffement, dans une proportion au moins double.

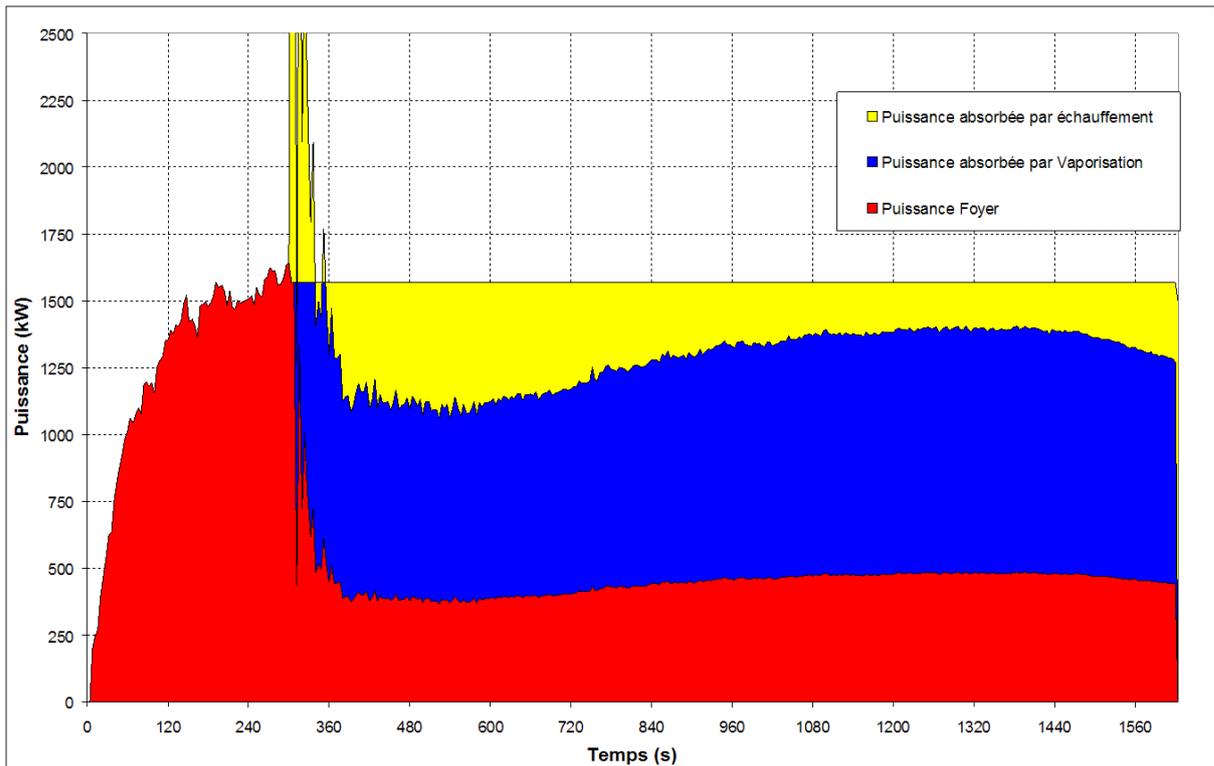


FIG. V.17 – Essai ETun09 - Illustration des différents termes de baisse de puissance dus à l'échauffement de l'eau et à sa vaporisation

On peut alors déterminer le débit massique d'eau utile (participant à la fois à l'échauffement des gouttelettes et à leur vaporisation) par rapport à celui de l'eau injectée (figure V.18). Pour les essais ETun09 et ETun10, l'efficacité ainsi calculée est comprise entre 25 et 33 %, ce qui indique qu'une bonne partie du brouillard injecté n'a pas d'intervention directe sur le foyer : sur la totalité des 14 buses d'aspersion disposées dans le tunnel, une partie est éloignée du foyer. Si le brouillard qu'elles injectent refroidit le milieu, toutes n'ont pas une action directe sur le foyer : 30 % de la masse totale d'eau injectée représente en effet la masse d'eau injectée par 4 buses. Ce constat met en évidence toute l'importance du choix du secteur de buses à activer. Ce problème sera évoqué au paragraphe V.2.3.

En ce qui concerne l'essai ETun12 (avec une vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique), on a déjà vu en partie V.2.1.1 que la baisse de puissance est moindre au déclenchement de l'aspersion. La figure V.19 illustre l'efficacité du brouillard d'eau lors de cet essai. Cette efficacité est, de façon logique, moindre que dans le cas des essais ETun09 et ETun10 (de 10 à 20 % environ). En revanche, elle présente des perturbations très importantes. Celles-ci sont à attribuer à des dépôts d'eau parasites dans les capteurs de vitesse, dépôts d'autant plus importants que la vitesse de ventilation est élevée.

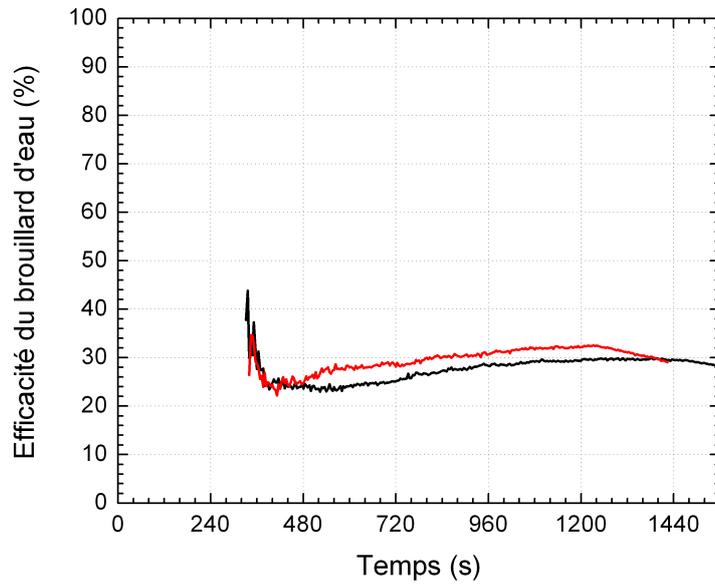


FIG. V.18 – Essai ETun09 et ETun10 - Efficacité η^{BE} du brouillard d'eau - (—) : Essai ETun09, (—) : Essai ETun10

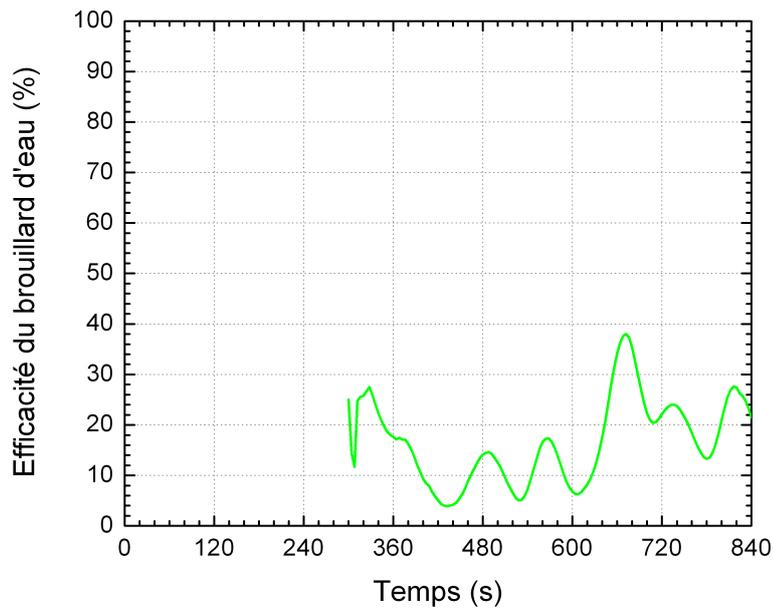


FIG. V.19 – Essai ETun12 - Efficacité η^{BE} du brouillard d'eau

V.2.1.3 Températures

Dès le déclenchement du brouillard d'eau, et ce quel que soit l'essai considéré, la température chute dans le tunnel et s'établit dans tout l'ouvrage autour de 40 °C (figure V.20 pour l'essai ETun09 pris comme exemple, en section T+4). L'injection d'eau froide perturbe l'écoulement et surtout refroidit la couche de fumées chaudes en la mélangeant avec la couche plus froide en-dessous (figure V.21).

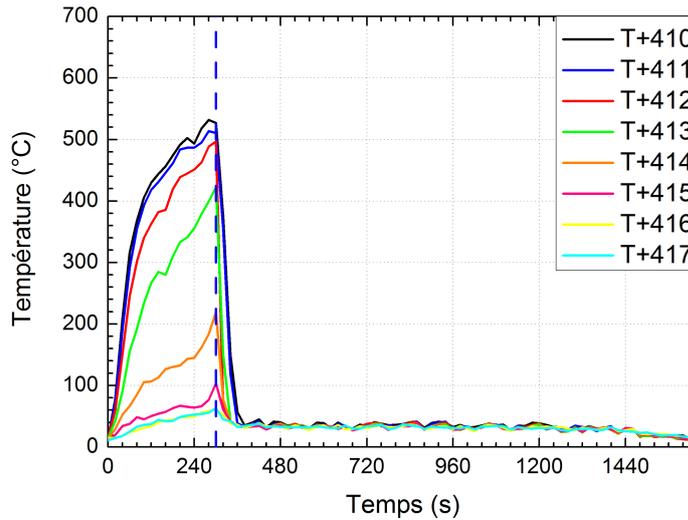


FIG. V.20 – Essai ETun09 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4



FIG. V.21 – Visualisation du foyer depuis l'entrée, sans brouillard d'eau (à gauche) et avec brouillard d'eau (à droite)

L'aspersion entraîne une déstratification des fumées et une homogénéisation de la température dans l'ouvrage, effets mis en évidence sur la figure V.24, à partir de l'évolution du critère de stratification S. Ce résultat, présenté ici pour l'essai ETun09, se retrouve sur l'intégralité des essais avec déclenchement de la rampe complète d'aspersion (essais ETun10 à 12), dans des proportions similaires. En conséquence, l'intégralité du tunnel

est, sous aspersion, thermiquement tenable (figures V.22 avant aspersion et V.23 sous aspersion).

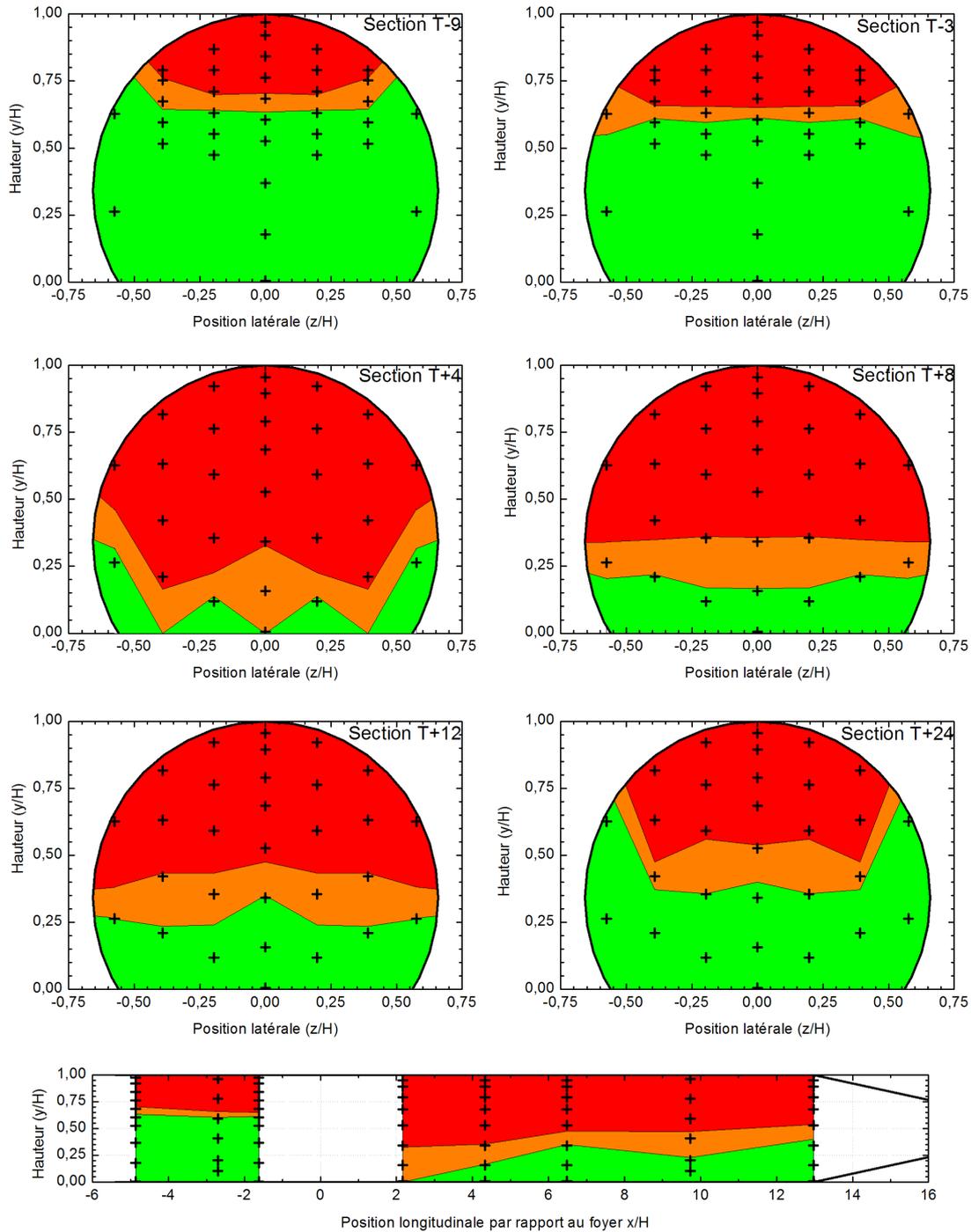


FIG. V.22 – Essai ETun09 - Zones de tenabilité thermique - $t=240s$ - (■) : $T \leq 50^{\circ}C$, (■) : $50 \leq T \leq 100^{\circ}C$, (■) : $T \geq 100^{\circ}C$

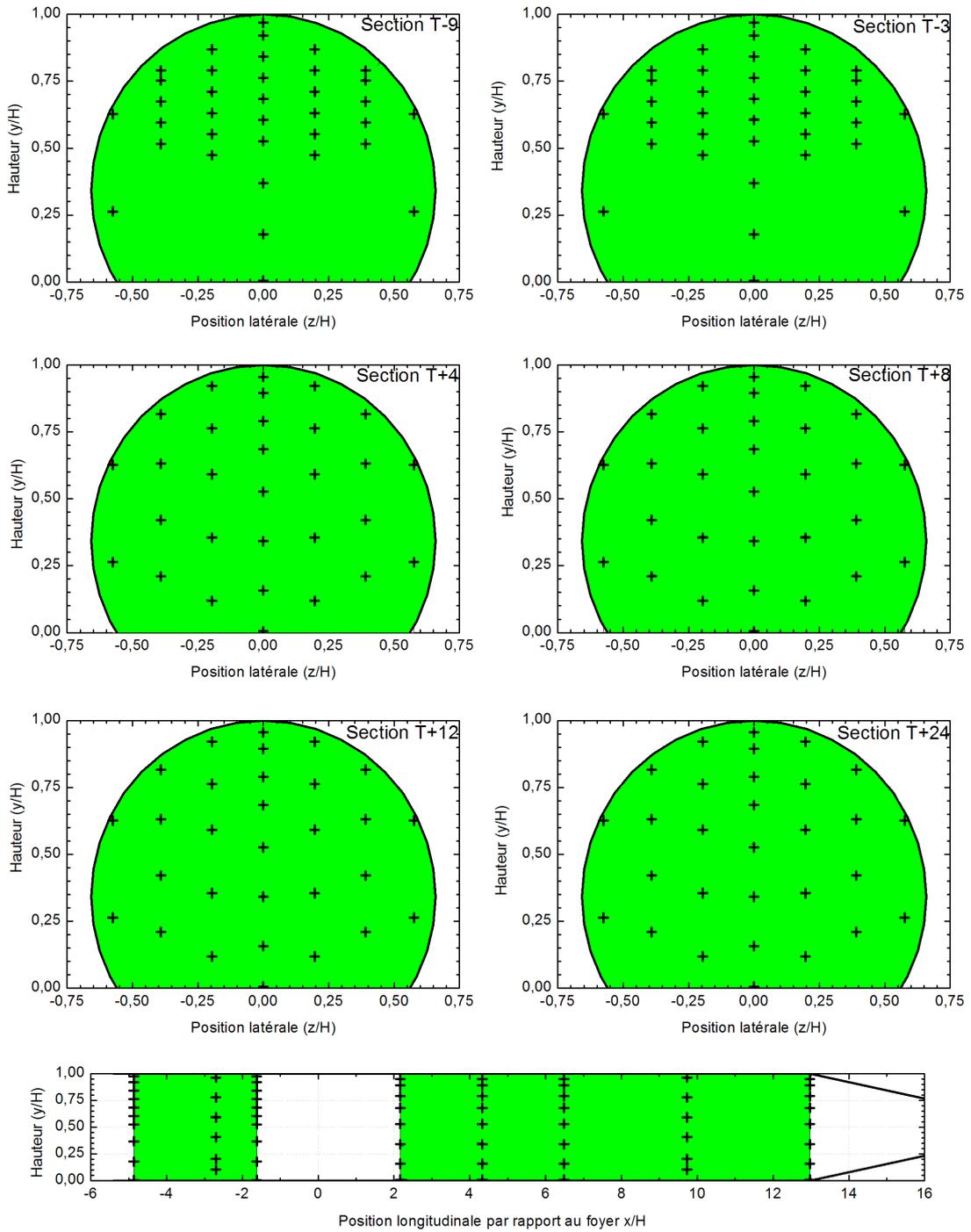


FIG. V.23 – Essai ETun09 - Zones de tenabilité thermique - $t=600s$ - (■) : $T \leq 50^{\circ}C$, (□) : $50 \leq T \leq 100^{\circ}C$, (■) : $T \geq 100^{\circ}C$

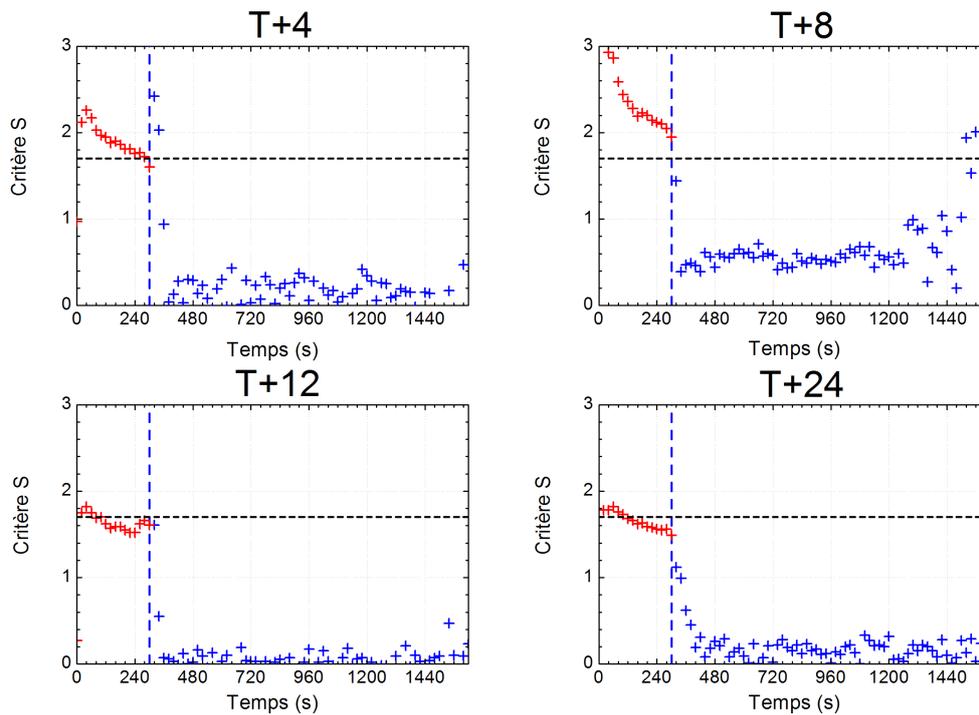


FIG. V.24 – Essai ETun09 - Evolution temporelle du critère de stratification S

V.2.1.4 Flux rayonnés

Toujours en prenant l'essai ETun09 comme exemple, on peut constater une forte atténuation des flux rayonnés de part et d'autre du foyer (figure V.25 pour les radiomètres amont).

Du fait de leur position, les radiomètres amont ne sont pas dans la zone avec aspersion, contrairement à ceux situés en aval. La température en aval sous aspersion est suffisamment basse pour que des gouttelettes soient présentes dans l'écoulement. De plus, la section de radiomètres aval est relativement éloignée du foyer, ce qui fait que des gouttelettes se déposent sur ses capteurs, faussant leur mesure de façon non quantifiable. Ainsi, seuls les radiomètres amont permettent de quantifier véritablement l'effet conjugué de la baisse de puissance du foyer et de l'effet rideau d'eau.

De la même façon que pour les températures, ces résultats se retrouvent sur l'intégralité des essais réalisés avec la rampe complète d'aspersion (Essais Etun10 à 12), dans des proportions là aussi similaires. Les valeurs sont résumées dans le tableau V.7. Si l'on considère que la fraction de puissance du foyer émise par rayonnement est la même avec ou sans aspersion, la baisse de flux radiatif émis vers l'amont doit, si elle ne relève que de la baisse de puissance du foyer, être proche de celle de la puissance ($\Delta \dot{q}''_P$). On remarque néanmoins une différence (tableau V.8).

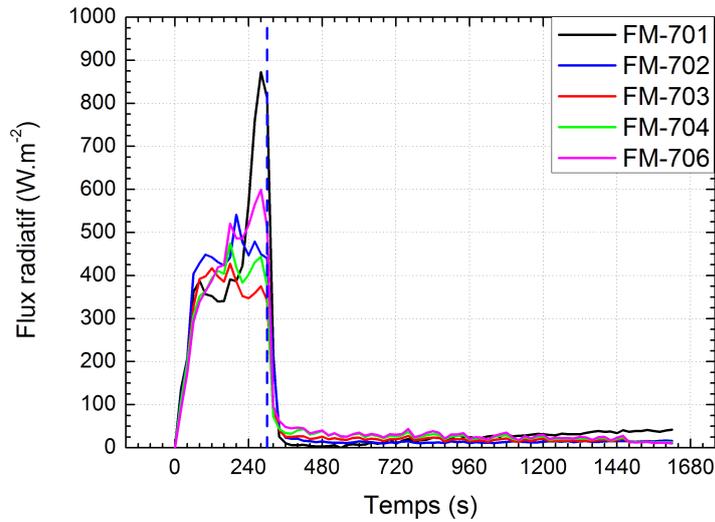


FIG. V.25 – ETun09 - Evolution temporelle des flux radiatifs reçus en amont (section FM-7)

Si la chute des flux rayonnés était attribuable uniquement à celle de la puissance, on devrait observer un niveau de flux $\Delta\dot{q}''_{Puissance}$, aux valeurs mentionnées dans le tableau V.8. La différence observée peut être attribuable à l'atténuation de flux $\Delta\dot{q}''_{RE}$ par le brouillard d'eau généré par les buses placées en amont du foyer.

	ETun09	ETun10	ETun12
Puissance avant aspersion (kW)	1560	1550	1510
Puissance sous aspersion : P_{moy} (kW)	365	360	710
Chute de puissance	76 %	77 %	53 %
Flux radiatif moyen avant aspersion (W.m ⁻²)	514	375	280
Flux radiatif moyen mesuré sous aspersion (W.m ⁻²)	26	22	38
Chute de flux radiatif $\Delta\dot{q}''_{mes}$	(95 %)	(94 %)	(87 %)

TAB. V.7 – Foyers heptane découverts - Atténuation des flux rayonnés mesurés vers l'amont par l'aspersion

	ETun09	ETun10	ETun12
Flux radiatif moyen mesuré sous aspersion (W.m ⁻²)	26	22	38
$\Delta\dot{q}''_{Puissance}$ (W.m ⁻²)	105	86	132
$\Delta\dot{q}''_{RE}$ (W.m ⁻²)	80 (76 %)	64 (75 %)	94 (72 %)

TAB. V.8 – Foyers heptane découverts - Baisse des flux rayonnés lors de l'aspersion

On peut alors constater que l'effet de rideau d'eau est sensiblement le même (environ 75 % d'atténuation), quelle que soit la vitesse de ventilation appliquée.

V.2.2 Essais avec foyers heptane couverts

En sus des essais heptane "classiques", une série d'essais dits "avec couverture du foyer" a été réalisée. Cette configuration permet de simuler l'attaque d'un brouillard d'eau sur un feu situé, par exemple, à l'intérieur d'un véhicule. La liste des essais couverts de référence est synthétisée dans le tableau V.9.

Essai	Combustible	Puissance [kW]	Vitesse d'écoulement [m.s ⁻¹]	Couverture ?
ETun 16	Heptane	1500	1,60	avec
ETun 16 bis	Heptane	1500	1,75	avec
ETun 17	Heptane	1500	2,50	avec
ETun 18	Heptane	1500	2,55	avec

TAB. V.9 – Foyers heptane couverts - Récapitulatif des essais avec brouillard d'eau

Les essais ETun16 et ETun16 bis ont bien été effectués, mais à cause d'une rupture de la rampe d'alimentation du brouillard d'eau dans les deux cas, lors du déclenchement de l'aspersion, la phase humide n'a pas été exploitable.

V.2.2.1 Puissance du foyer

Sur les résultats des essais heptane menés à vitesse supérieure à la vitesse critique avec une couverture du foyer, on peut relever que le brouillard d'eau n'a que peu d'effet sur le foyer lui-même. Cette influence réduite est illustrée sur la figure V.26 qui compare les évolutions des puissances obtenues lors des essais ETun17 et ETun18, à celle relevée lors de l'essai de référence correspondant ETun08.

La couverture placée au-dessus du foyer empêche le brouillard d'eau issu des buses situées au voisinage de la section 0 de pénétrer directement à contre-courant dans la flamme. Ceci confirme les résultats présentés dans les références [39] et [41], stipulant que la pénétration optimale des gouttelettes au sein de la flamme est obtenue en injectant le brouillard d'eau directement à contre-courant. Dans notre cas, à cause de la couverture, les gouttelettes ne peuvent pénétrer dans la flamme. Le brouillard d'eau est quasiment inefficace.

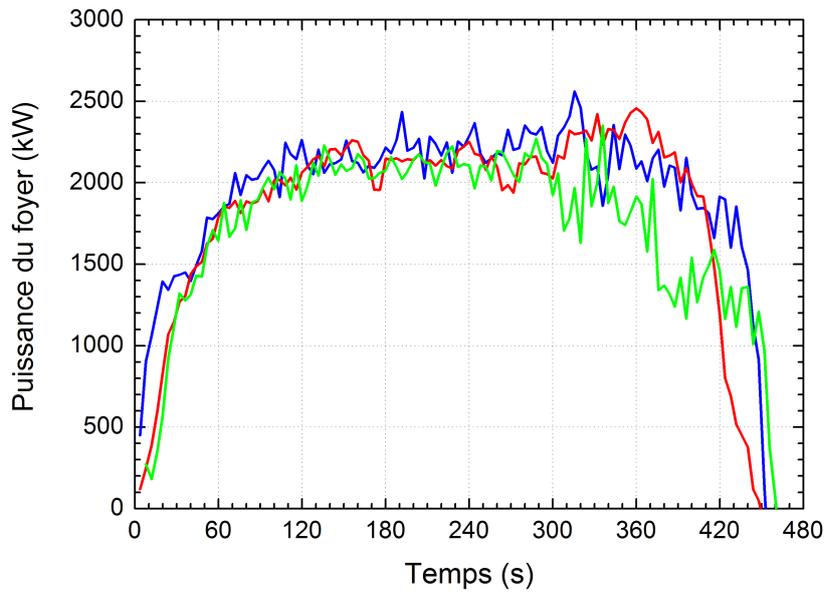


FIG. V.26 – Essais ETun17 et ETun18 - Evolution temporelle de la puissance d'un foyer heptane couvert, la vitesse de ventilation étant supérieure à la vitesse critique - (—) Essai ETun08, sans aspersion, (—) Essai ETun17, avec aspersion, (—) Essai ETun18, avec aspersion

V.2.2.2 Flux rayonnés

Pour les essais couverts, on observe (figure V.27) des flux rayonnés vers l'amont semblables, tant en terme d'évolution que de niveau, à ceux relevés lors de l'essai découvert ETun12.

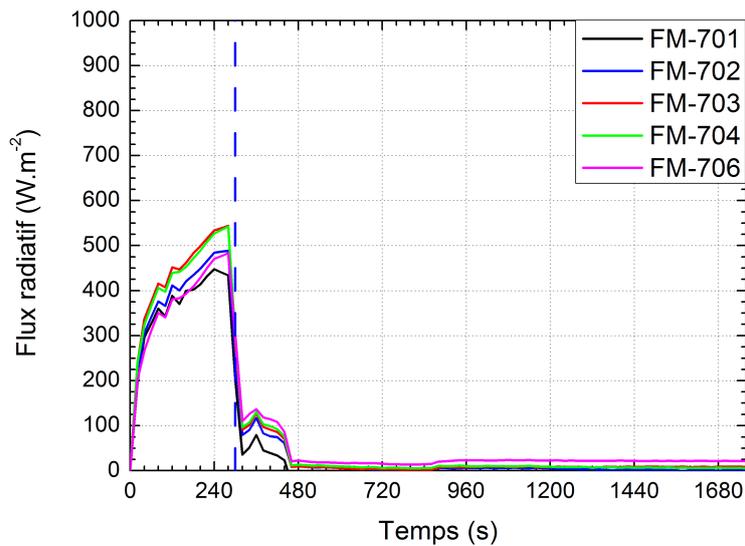


FIG. V.27 – ETun17 - Evolution temporelle des flux radiatifs reçus en amont (section FM-7)

Puisque l'aspersion n'affecte que peu le foyer, la diminution des flux reçus par les capteurs est ici directement imputable à l'effet de rideau d'eau. A cet effet, on procède au même raisonnement que celui présenté au paragraphe V.2.1.4. Les résultats sont présentés dans le tableau V.10.

	ETun17	ETun18
Puissance avant aspersion (kW)	2100	2100
Puissance sous aspersion : P_{moy} (kW)	2100	2100
Chute de puissance	0 %	0 %
Flux radiatif moyen avant aspersion ($W.m^{-2}$)	463	443
Flux radiatif moyen mesuré sous aspersion ($W.m^{-2}$)	71	110
Ecart de flux radiatif $\Delta\dot{q}''_{mes} = \Delta\dot{q}''_{RE}$ ($W.m^{-2}$)	392 (85 %)	333 (75 %)

TAB. V.10 – Foyers heptane couverts - Atténuation des flux rayonnés mesurés vers l'amont par l'aspersion

En termes d'atténuation du rayonnement vers l'amont par le brouillard d'eau, ces résultats apparaissent cohérents avec ceux obtenus au paragraphe V.2.1.4.

V.2.3 Cas d'une activation sectorielle du brouillard d'eau

En parallèle à l'étude menée avec activation de toute la rampe de brumisation, deux essais (ETun27 et ETun28) sont réalisés en n'activant que les buses situées au voisinage du foyer. Lors de ces deux essais, la puissance nominale du foyer est toujours de 1500 kW, le foyer n'a pas de couverture et la vitesse de ventilation est prise supérieure à la vitesse critique. Lors de l'essai ETun27, deux secteurs de 3 buses sont disposés respectivement juste en amont (sections S-0,75, S-2,25 et S-3,75) et juste en aval (sections S+0,75, S+2,25 et S+3,75) du foyer (figure V.28). L'essai ETun28, quant à lui, ne dispose que d'un secteur de 3 buses, disposé juste en amont du foyer (sections S-0,75, S-2,25 et S-3,75), nommé "Secteur Amont" sur la figure V.28. Les buses de brouillard d'eau utilisées sont identiques à celles utilisées précédemment.

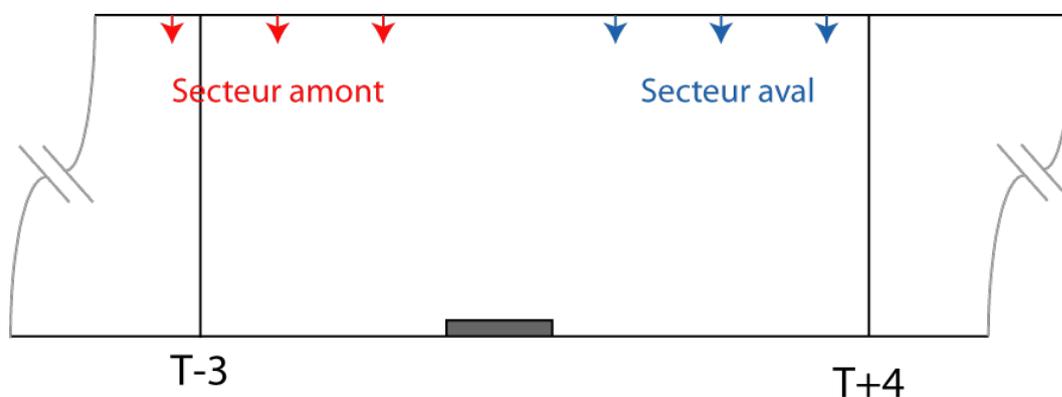


FIG. V.28 – Essai ETun27 et ETun28 - Emplacement des secteurs d'aspersion

V.2.3.1 Influence sur la puissance du foyer

Dans le cas de l'essai ETun28 (où seul le secteur amont est activé), on peut constater sur la figure V.29 que le brouillard d'eau a un effet sur le foyer similaire au cas où l'intégralité de la rampe est activée (essai ETun12) : une baisse de puissance est observée au déclenchement de l'aspersion. Cependant, on relève aussi qu'elle n'est que temporaire. Si l'on compare la puissance du foyer avec celle relevée lors de l'essai de référence effectué dans les mêmes conditions (ETun02), on observe que le brouillard d'eau ne fait que retarder le développement du feu, qui se rétablit à sa puissance de référence après un délai de 160 secondes. On peut même observer le pic de puissance d'ébullition en volume de l'heptane en fin d'essai.

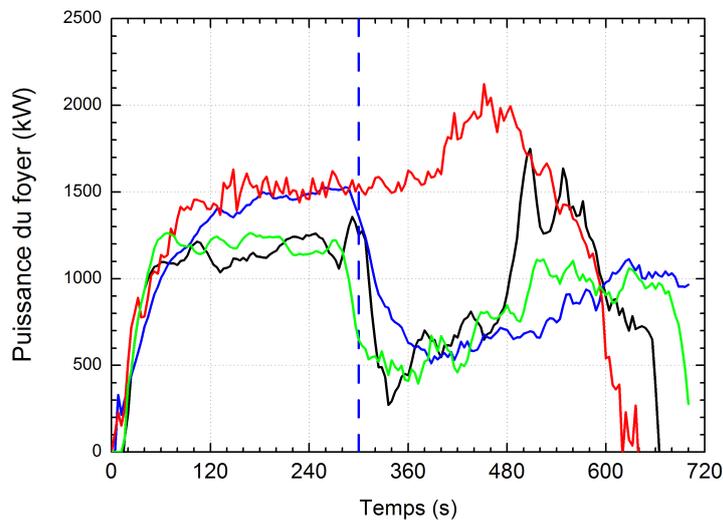


FIG. V.29 – Essais ETun27 et ETun28 - Evolution temporelle de la puissance du foyer - (—) Essais ETun27 et (—) ETun28 . Comparaison avec l'essai de référence sans aspersion ETun02 (—) et avec l'essai lors duquel l'ensemble de la rampe d'aspersion est activé ETun12 (—)

Dans le cas de l'essai ETun27 (activation des deux secteurs amont et aval), on peut observer une baisse de puissance comparable à celle de l'essai ETun28 au déclenchement de l'aspersion. On peut remarquer de plus que cette chute de puissance est similaire à celle observée dans le cas de l'essai ETun12, au cours duquel toute la rampe d'aspersion est activée : $P_1 = 500kW$. Cependant, dans le cas où les deux secteurs sont activés, on peut observer que le foyer remonte en puissance après le déclenchement de l'aspersion (de 360s à 500s), mais qu'il se stabilise à une puissance inférieure à celle de référence (avant déclenchement du brouillard d'eau) : $P_2 = 1000kW$. On retrouve ici le comportement déjà observé lors de l'essai Etun12, si ce n'est que le palier P_2 est atteint plus rapidement lors de l'essai ETun27 (100s de moins que pour ETun12). On peut de plus relever que la quantité d'eau utile lors de l'essai ETun27 est similaire à celle déterminée pour l'essai ETun12. Attendu que la quantité d'eau injectée est bien moindre, l'efficacité du brouillard d'eau est donc bien supérieure, comme illustré en figure V.30. Sur cette figure est aussi

représentée l'efficacité *rapportée* du brouillard lors de l'essai ETun27, qui représente le rapport de la masse d'eau utile lors de l'essai ETun27 sur la quantité d'eau injectée lors de l'essai ETun12 (avec la totalité de la rampe activée). Cette efficacité rapportée permet de constater, toujours sur la figure V.30, que la quantité d'eau *active* est la même dans les deux configurations.

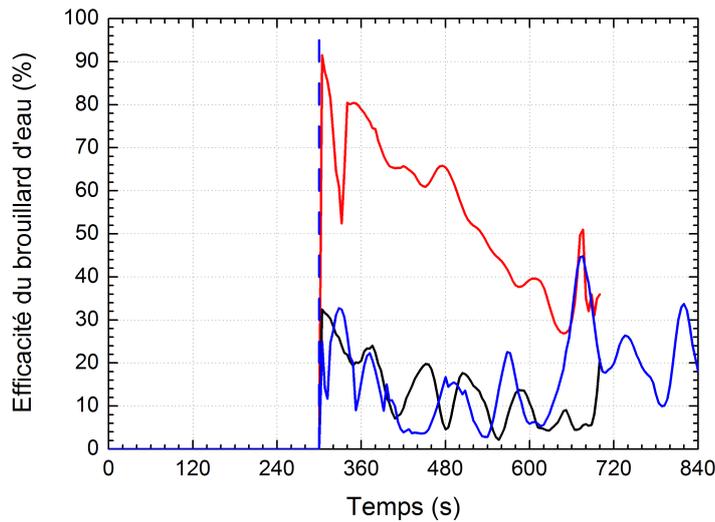


FIG. V.30 – Essai ETun27 - Efficacité η^{BE} du brouillard d'eau : (—) Essai ETun27, (—) Essai ETun12, (—) Efficacité *rapportée* du brouillard d'eau lors de l'essai ETun27

De plus, si l'on compare les quantités d'eau actives sur la totalité des essais ETun12, et ETun27 (tableau V.11), on en conclue que l'économie d'eau est appréciable : environ 60 % pour un effet similaire sur le foyer.

Essai	Quantité d'eau active [kg]	Quantité d'eau injectée [kg]	Durée de l'essai [s]
ETun12	173	760	590
ETun27	60	251	445

TAB. V.11 – Masses d'eau actives lors des essais ETun12 et ETun27

On peut conclure de ces résultats que :

- le secteur amont seul n'a que peu d'influence sur le foyer, ne le perturbant qu'à l'activation du brouillard. L'aspersion n'a ici pour effet que d'ouvrir une courte fenêtre de deux minutes pendant laquelle la puissance baisse.
- la combinaison des secteurs amont et aval permet d'obtenir un résultat similaire en terme de baisse de puissance du foyer à celui obtenu avec l'activation de la totalité de la rampe, avec seulement six buses actives autour du feu. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité d'un déclenchement sectoriel d'un dispositif fixe d'aspersion, sous réserve de pouvoir localiser le foyer dans l'ouvrage.

V.2.3.2 Influence sur les températures dans le tunnel et les flux rayonnés

Si l'on observe les résultats de température, on constate que les niveaux ne sont pas reproduits (exemple de la section T+8 : figure V.31 et V.32) par rapport à l'essai ETun12.

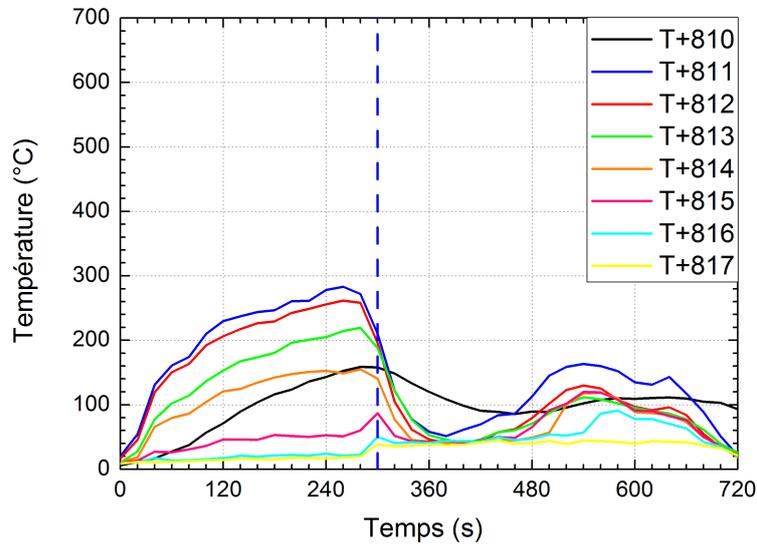


FIG. V.31 – Essai ETun27 - Evolution de la Température de l'écoulement à la section T+8

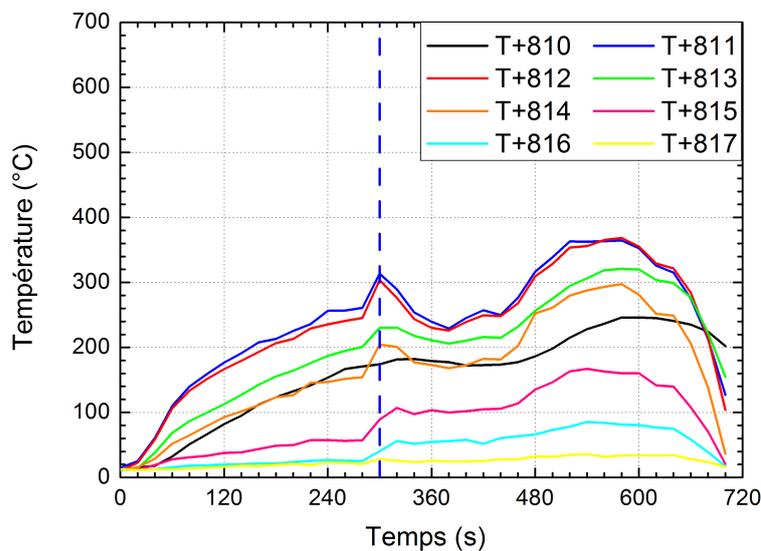


FIG. V.32 – Essai ETun28 - Evolution de la Température de l'écoulement à la section T+8

La température moyenne du tunnel à ce niveau est de plus de 100 °C dans le cas

d'ETun27, et de 350°C dans le cas de l'essai ETun28, ce qui est bien supérieur à la valeur relevée lors de l'essai ETun12 (30°C). Les buses supplémentaires en aval lors de l'essai ETun12 sont bien sûr à l'origine de ce refroidissement de la partie aval du tunnel dans le cas où la rampe de brouillard d'eau est entièrement activée.

En ce qui concerne les flux rayonnés par le foyer, on constate que les niveaux relevés en amont lors des essais ETun27 et ETun28 (figure V.33) sont comparables à ceux obtenus avec la rampe complète activée (essai ETun12). Ceci est logique puisque le dispositif d'aspersion est identique en amont du foyer. L'effet de rideau d'eau semble comparable.

Les radiomètres localisés en aval, même s'ils sont perturbés par le brouillard d'eau qui peut se déposer sur les capteurs, donnent des allures de flux cohérentes. Les résultats obtenus lors de l'essai ETun27 confirment ceux obtenus avec les puissances : les essais ETun27 et ETun12 montrent des flux radiatifs relevés en aval similaires, tandis que l'évolution des flux rayonnés vers l'aval lors de l'essai ETun28 corroborent celle de la puissance du foyer (figure V.34).

En estimant à nouveau la baisse de flux radiatif due à celle de puissance du foyer $\Delta\dot{q}''_{Puissance}$, et en la comparant à celle mesurée $\Delta\dot{q}''_{mes}$, on peut déterminer, là aussi, la part due à l'effet de rideau d'eau $\Delta\dot{q}''_{RE}$. Les valeurs sont résumées dans les tableaux V.12 et V.13.

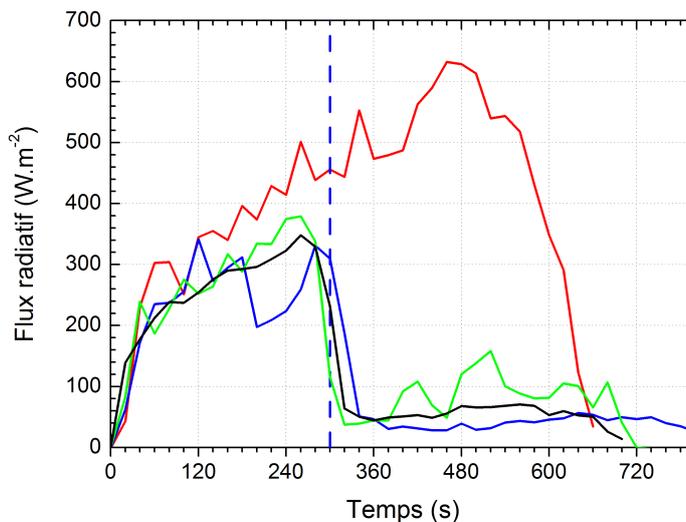


FIG. V.33 – Evolution de la moyenne des radiomètres amont FM-703 (hauteur 1,1m) et FM-704 (hauteur 0,8m) lors des essais ETun02 (—), ETun12 (—), ETun27 (—) et ETun28 (—)

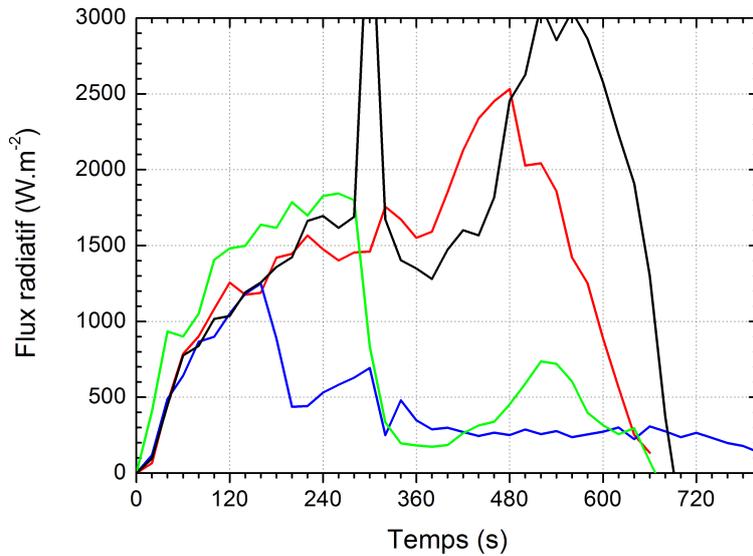


FIG. V.34 – Essais ETun02, ETun12, ETun27 et ETun28 - Evolution de la moyenne des radiomètres aval FM+703 (hauteur 1,1m) et FM+704 (hauteur 0,8m) lors des essais ETun02 (—), ETun12 (—), ETun27 (—) et ETun28 (—)

	ETun27	ETun28
Puissance avant aspersion (kW)	1250	1240
Puissance sous aspersion : P_{moy} (kW)	850	850
Chute de puissance	68 %	69 %
Flux radiatif moyen avant aspersion ($W.m^{-2}$)	362	241
Flux radiatif moyen mesuré sous aspersion ($W.m^{-2}$)	60	54
Ecart de flux radiatif $\Delta\dot{q}''_{mes}$ ($W.m^{-2}$)	302 (84 %)	333 (78 %)

TAB. V.12 – Essais de sectorisation - Atténuation des flux rayonnés mesurés vers l'amont par l'aspersion, au niveau de puissance P_{inf}^{asp}

	ETun27	ETun28
Flux radiatif moyen mesuré sous aspersion ($W.m^{-2}$)	60	54
$\Delta q''_{Puissance}$ ($W.m^{-2}$)	246	163
$\Delta q''_{RE}$ ($W.m^{-2}$)	186 (75 %)	105 (68 %)

TAB. V.13 – Essais de sectorisation - Evaluation de l'effet de rideau d'eau, au niveau de puissance P_{inf}^{asp}

Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus dans le cas des feux d'heptane couverts ou découverts lors desquels la totalité de la rampe d'aspersion est utilisée.

V.3 Essais avec aspersion - Foyers bûchers

Lors de ces essais, le brouillard d'eau n'est activé qu'au bout de 720 s, afin de laisser au foyer bois le temps de bien s'embraser. De plus, la fin de l'essai est décidée par l'opérateur, après une durée d'au moins 1500 s.

Essai	Combustible	Puissance [kW]	Vitesse d'écoulement [m.s ⁻¹]
ETun 19	Bûcher	1500	1,11
ETun 20	Bûcher	1500	1,24
ETun 21	Bûcher	1500	2,22
ETun 22	Bûcher	1500	2,09

TAB. V.14 – Récapitulatif des essais avec brouillard d'eau - Foyers bûcher

Dans le cas de l'essai ETun20, le déclenchement a été retardé à 930s pour des raisons expérimentales.

V.3.1 Puissance du foyer

De l'observation de l'évolution de la puissance du foyer sur les bûchers, on peut déduire que le brouillard d'eau n'a que peu d'influence. La baisse de puissance constatée n'est que de l'ordre de 20 %. La figure V.35 permet de comparer la puissance mesurée par perte de masse obtenue sans aspersion (essai ETun03) à celle obtenue avec aspersion, dans la configuration de vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique.

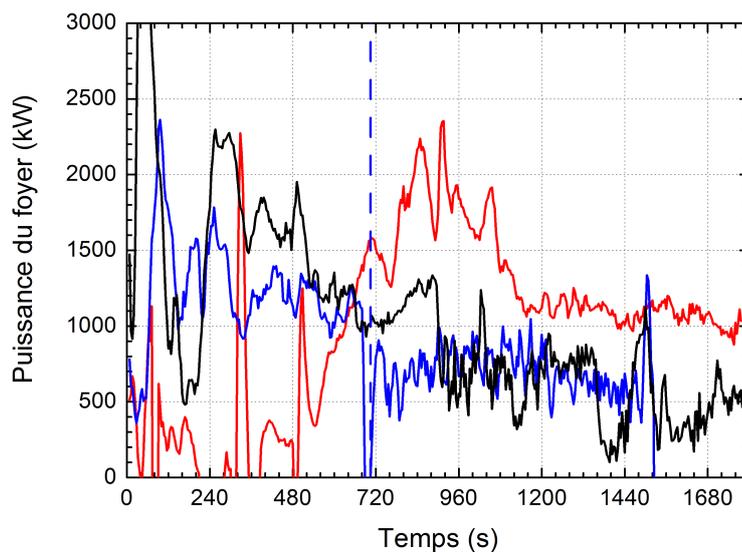


FIG. V.35 – Essais bûchers ETun19 et ETun20 - Evolution temporelle de la puissance par perte de masse - Vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique : (—) Essai de référence ETun03, (—) Essai ETun19, (—) Essai ETun20

La figure V.36 représente, elle aussi, l'évolution de la puissance du foyer lors des essais ETun04 (référence), ETun21 et ETun22, menés avec une vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique.

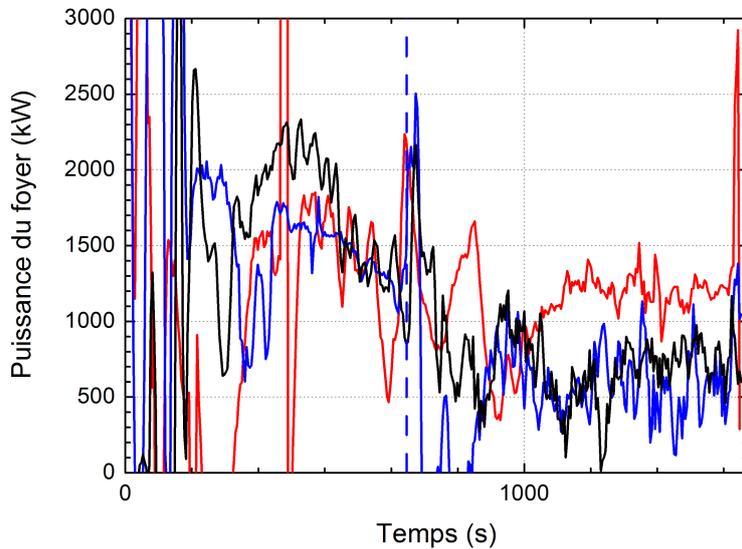


FIG. V.36 – Essais bûchers ETun21 et ETun22 - Evolution temporelle de la puissance par perte de masse - Vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique : (—) Essai de référence ETun04, (—) Essai ETun21, (—) Essai ETun22

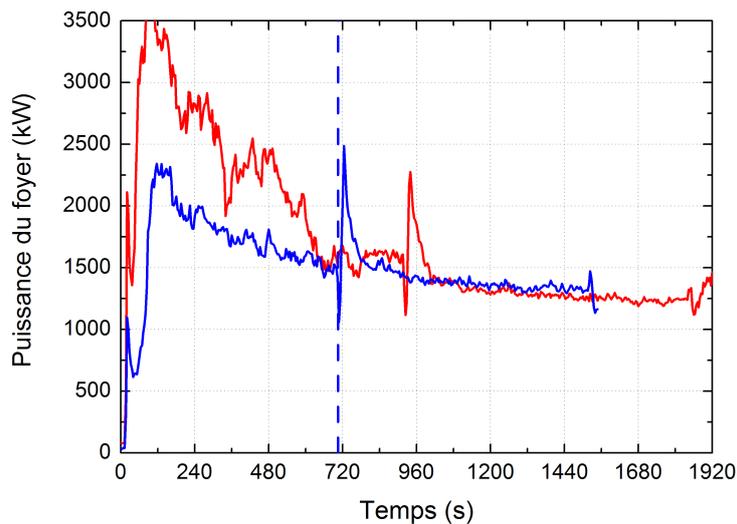


FIG. V.37 – Essais bûchers ETun19 et ETun20 - Evolution temporelle de la puissance par mesure de consommation d'oxygène - Vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique : (—) Essai ETun19, (—) Essai ETun20

On peut d'ores et déjà remarquer la bonne reproductibilité des résultats pendant la phase sèche des essais. Toutefois, la mesure de puissance par consommation d'oxygène permet un meilleur suivi de cette évolution que celle basée sur la pesée du foyer (moins de perturbations sur le signal). Ainsi, la figure V.37 permet de mieux distinguer les niveaux de puissance avant et après déclenchement de l'aspersion, lors des essais ETun19 et ETun20. La figure V.38 illustre également cette évolution de la puissance obtenue par mesure de consommation d'oxygène pour les essais ETun21 et ETun22.

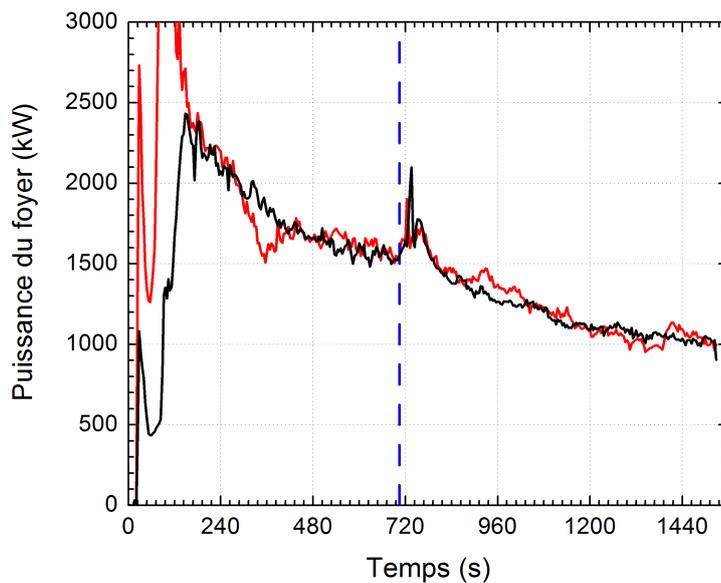


FIG. V.38 – Essais bûchers ETun21 et ETun22 - Evolution temporelle de la puissance par mesure de consommation d'oxygène - Vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique : (—) Essai ETun21, (—) Essai ETun22

On peut alors constater que le brouillard d'eau n'a que peu d'influence sur les foyers bûchers, vraisemblablement à cause d'un diamètre de gouttelettes trop faible. En effet il a déjà été mentionné au chapitre I que, dans le cas de combustibles solides, il est nécessaire de pouvoir mouiller la surface des matériaux. Pour ce faire, les gouttelettes doivent avoir une quantité de mouvement suffisante pour atteindre une surface significative du combustible. Du fait de l'importance de surfaces cachées d'un bûcher, le brouillard d'eau peine à se déposer, les fines gouttelettes se vaporisant avant d'atteindre le bois. Ceci réduit encore la surface attaquable par le brouillard d'eau et explique son influence extrêmement limitée sur le foyer. On ne note, sur la figure V.38, aucune diminution de niveau de puissance au déclenchement de l'aspersion, mais on relève, lors de la phase humide, que la puissance a tendance à baisser plus rapidement. Si on observe l'évolution temporelle des compositions de gaz en aval (mesurées en section S+22), on peut remarquer, au déclenchement de l'aspersion, une chute brutale de la production de CO_2 ainsi qu'une augmentation de la production de CO , indiquant une transition du régime du foyer vers une combustion plus incomplète (figure V.39). On peut émettre l'hypothèse que la vaporisation de l'eau

conduit à un appauvrissement en oxygène au voisinage du feu (effet de dilution), qui provoque ce changement de régime.

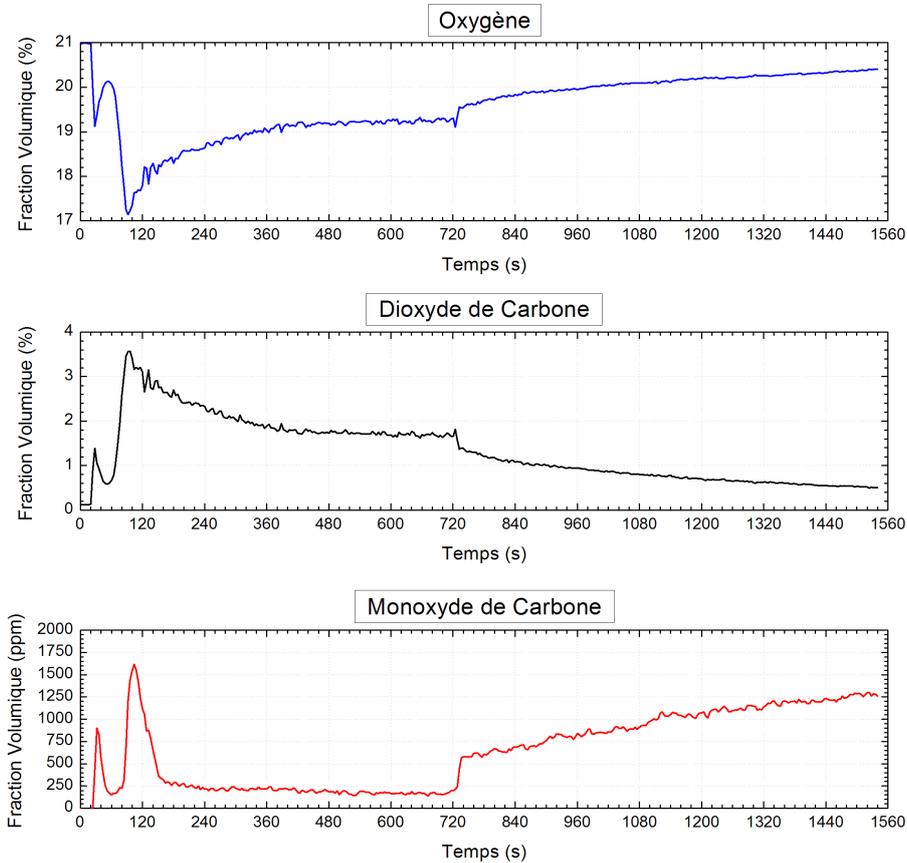


FIG. V.39 – Essai bûcher ETun21 - Evolution temporelle des fractions volumiques d'O₂, CO₂ et CO

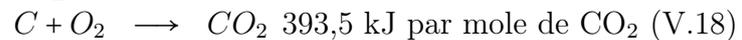
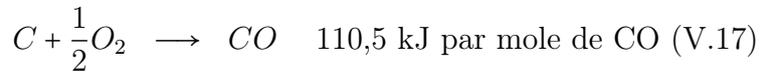
Dans le cas où la vitesse de ventilation est inférieure à la vitesse critique (figure V.37), le brouillard d'eau a encore moins d'effet sur la puissance du foyer. Il n'y a, ni baisse du niveau de puissance au déclenchement de l'aspersion, ni changement dans la décroissance du feu de bûcher, mais simplement une perturbation au déclenchement due au changement de régime aéraulique dans l'ouvrage. Cependant, on peut constater que l'essai ETun20, conduit avec une vitesse de ventilation légèrement supérieure à celle de l'essai ETun19 (1,3 au lieu de 1,2 m.s⁻¹), présente une puissance sous phase sèche supérieure à celle de l'essai ETun19. Cette constatation conforte ce qui a été observé en comparant les essais ETun03 et ETun04 (paragraphe IV.2.3.1, 131). Néanmoins, une fois l'aspersion déclenchée, les niveaux de puissance sont les mêmes, confirmant l'observation précédemment faite : le brouillard d'eau semble plus efficace dans le cas des feux de bûchers lorsque la vitesse de ventilation augmente.

V.3.2 Evaluation de la quantité d'eau utile injectée dans le tunnel

A l'instar des essais heptane, on peut tenter de déterminer l'efficacité du brouillard d'eau lors des essais bûcher (au sens de la relation V.15), toujours en raisonnant sur le bilan de débits volumiques dans le tunnel (rappelé ci-dessous) :

$$\dot{V}_{\text{frais}} + \dot{V}_{\text{gaz,foyer}} + \dot{V}_{\text{vap}} = \dot{V}_{\text{extract}} \quad (\text{V.16})$$

La différence majeure entre les essais heptane et les essais bûchers tient au fait que le débit de gaz générés par le foyer $\dot{V}_{\text{gaz,foyer}}$ est plus difficile à calculer, la chimie mise en jeu lors de la combustion du bois étant bien plus complexe. On peut cependant simplifier l'ensemble du schéma réactionnel par les équations de formation de CO et CO₂, dont les enthalpies de réaction sont données par :



Si l'on détermine la puissance du foyer en fonction de ces deux réactions et des résultats d'analyse de gaz effectués en aval, pour l'essai ETun21 par exemple, on obtient la puissance du foyer illustrée en figure V.40. Lors de la phase sèche, on a une bonne adéquation entre les deux méthodes. Pendant l'aspersion, on remarque que le rapport $\Delta(O_2, CO_2) = \frac{C_{O_2} - C_{O_2,asp}}{C_{CO_2,asp} - C_{CO_2}}$ entre la diminution de concentration en CO₂ et l'augmentation de la teneur en O₂ ne cesse de croître jusqu'à la fin de l'essai (figure V.41).

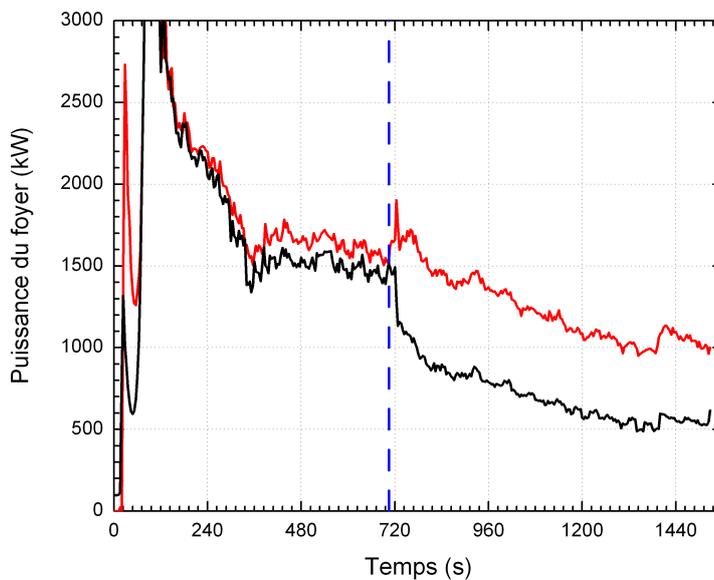


FIG. V.40 – Essai bûcher ETun21 - Evolution temporelle de la puissance du foyer par consommation d'O₂ (—) et par production de CO₂ (—)

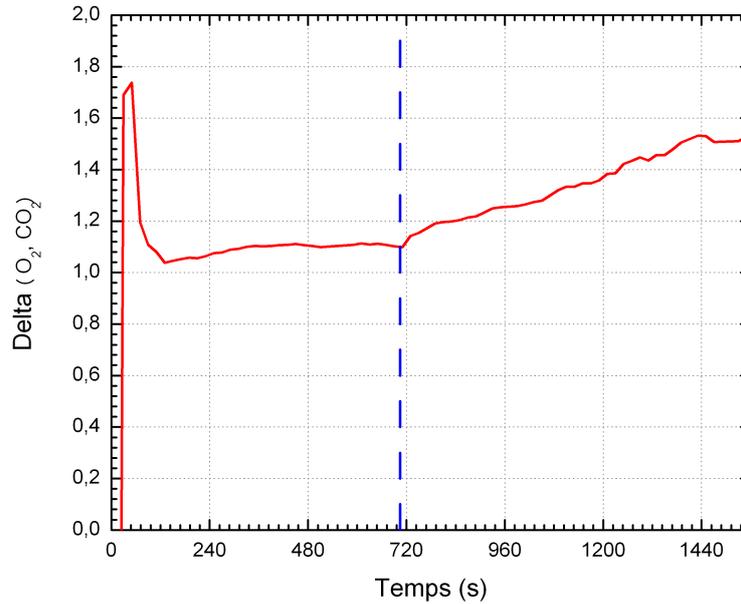


FIG. V.41 – Essai bûcher ETun21 - Evolution temporelle de l'écart $\Delta(O_2, CO_2)$ entre les concentrations de O_2 et de CO_2

Lors de la phase sèche de l'essai, ce terme $\Delta(O_2, CO_2)$ est égal à 1, le régime de combustion du foyer étant non perturbé. Lors de la phase d'aspersion, l'augmentation progressive de cet écart est synchronisée à celle de la concentration en CO , et nous ramène au changement de régime de combustion du foyer sous aspersion évoqué précédemment.

Cet écart $\Delta(O_2, CO_2)$ nous permet de déterminer le volume de gaz générés par le foyer lors de la phase humide de l'essai, à partir de celui de la phase sèche. En effet, sans brouillard d'eau, le bilan de débit volumique devient :

$$\dot{V}_{frais} + \dot{V}_{gaz,foyer} = \dot{V}_{extract} \quad (V.19)$$

La donnée de la différence des mesures de vitesses entre l'aval (section V+18) et l'amont (section V-5) suffit donc pour calculer le terme $\dot{V}_{gaz,foyer}$. Lors de l'aspersion, l'écart $\Delta(O_2, CO_2)$ reflétant le changement de régime de combustion du foyer, on peut déterminer le terme $\dot{V}_{gaz,foyer}$ en fonction de celui en phase sèche :

$$\dot{V}_{gaz,foyer}^{aspersion} = \dot{V}_{gaz,foyer}^{sec} \cdot \Delta(O_2, CO_2) \quad (V.20)$$

On évalue, ensuite de la même manière qu'au paragraphe V.2.1.2, le débit de vapeur généré par la vaporisation du brouillard d'eau *actif*. L'évolution temporelle des termes $\dot{V}_{gaz,foyer}$ et \dot{V}_{vap} est illustrée sur la figure V.42 pour l'essai ETun21.

On peut raisonner de même pour les autres essais bûcher (essais ETun19, 20, 21 et 22). On peut alors déterminer l'efficacité du brouillard d'eau, au sens de la relation V.15, illustrée en figure V.44 pour les essais ETun21 et ETun22 et V.43 pour les essais ETun19 et ETun20 (réalisés avec une vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique). Il est à noter que l'aspersion n'est déclenchée, pour l'essai 20, qu'au bout de 940 secondes (visible au décalage temporel de la courbe rouge sur la figure V.43).

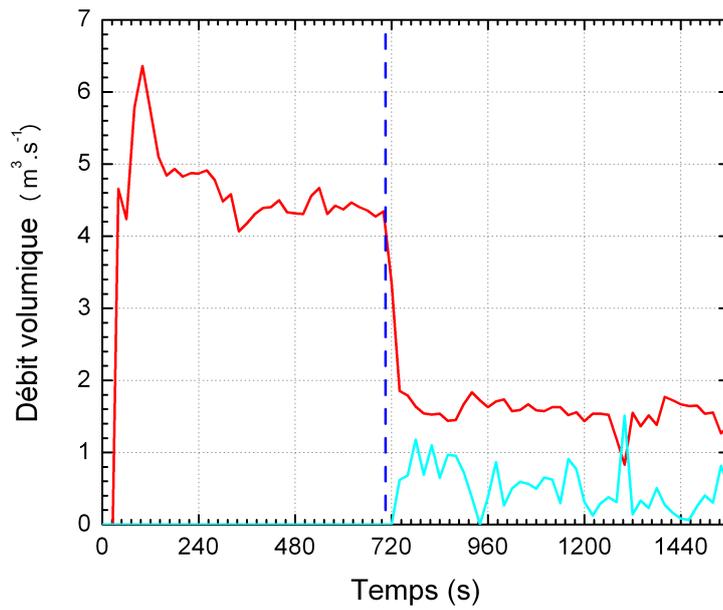


FIG. V.42 – Essai bûcher ETun21 - Evolution temporelle des débits volumiques $\dot{V}_{gaz,foy}$ (—) et \dot{V}_{vap} (—)

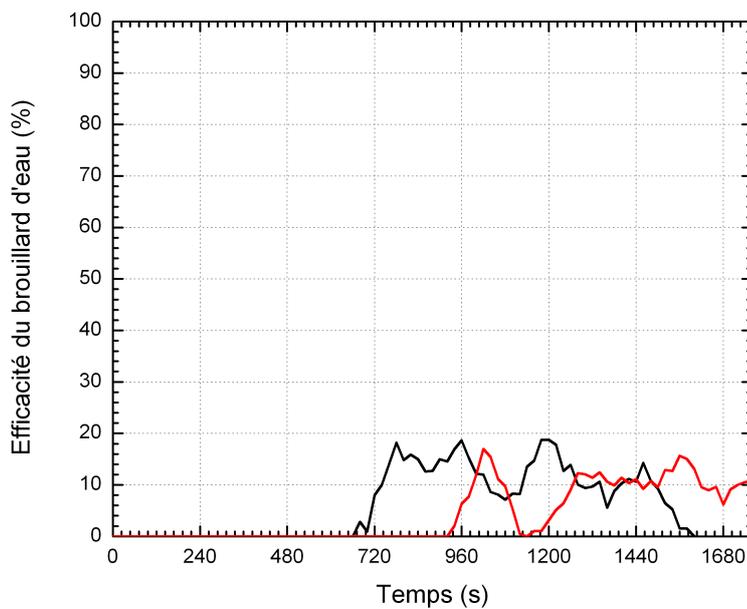


FIG. V.43 – Essai bûcher ETun19 et ETun20 - Evolution temporelle de l'efficacité η du brouillard d'eau - (—) : Essai ETun19, (—) : Essai ETun20

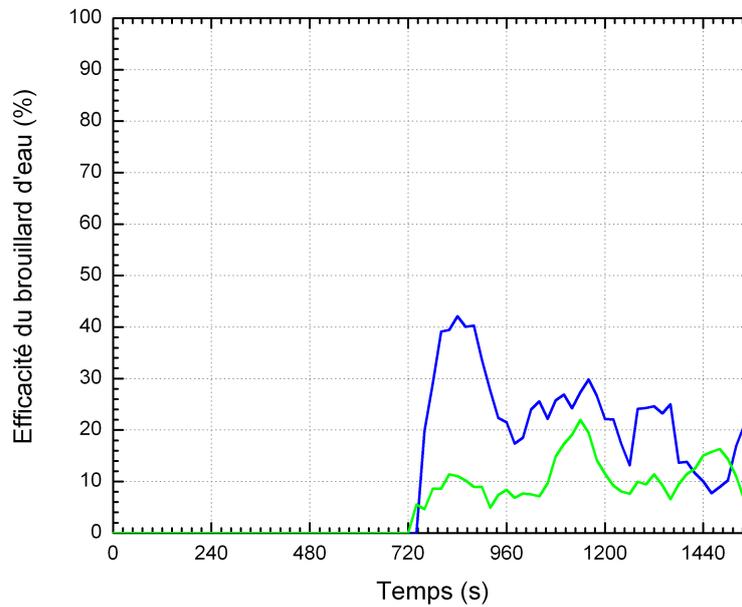


FIG. V.44 – Essai bûcher ETun21 et ETun22 - Evolution temporelle de l'efficacité η du brouillard d'eau - (—) : Essai ETun21, (—) : Essai ETun22

On observe une efficacité similaire dans les deux scénarios de ventilation : l'efficacité est autour de 10 %, ce qui est moindre que dans le cas des essais heptane découverts, pour lesquels elle était de 25 à 30 %, pour une vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique, et de 15 à 20 %, pour une vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique. Les principaux paramètres et résultats d'intérêts concernant cette efficacité sont résumés dans le tableau V.15.

	ETun19	ETun20	ETun21	ETun22
Vitesse de ventilation (m.s ⁻¹)	1,11	1,24	2.22	2.09
Déclenchement de l'aspersion (s)	700	915	705	705
Durée de l'aspersion (s)	840	1088	847	851
Eau injectée dans le tunnel (kg)	1079	1397	1088	1093
Eau <i>utile</i> (kg)	121	137	242	116
Efficacité moyenne	11,2 %	9,8 %	22 %	10,5 %

TAB. V.15 – Foyers bûchers - Principaux résultats des essais avec aspersion

V.3.3 Températures et stratification des fumées

Pour les essais ETun19 et ETun20, tous les deux conduits avec une vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique, l'évolution temporelle des températures à l'aval du foyer suit, lors de la phase sèche, celle de l'essai de référence ETun03. On retrouve des niveaux comparables (se stabilisant autour de 600°C), ainsi que l'écart entre les capteurs 10, 11 et 12 par rapport aux autres, indiquant des profils verticaux de température similaires. Ceci est illustré pour l'essai ETun19 en figures V.45, V.46, V.47 et V.48.

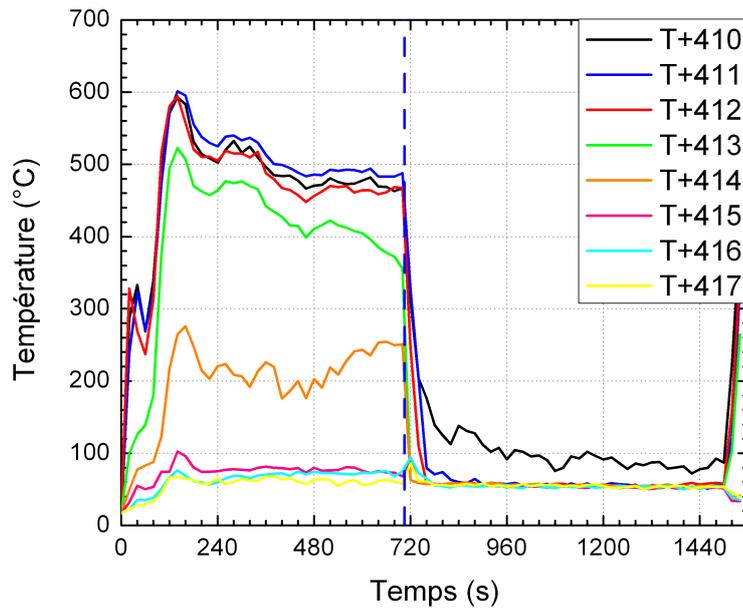


FIG. V.45 – Essai ETun19 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4

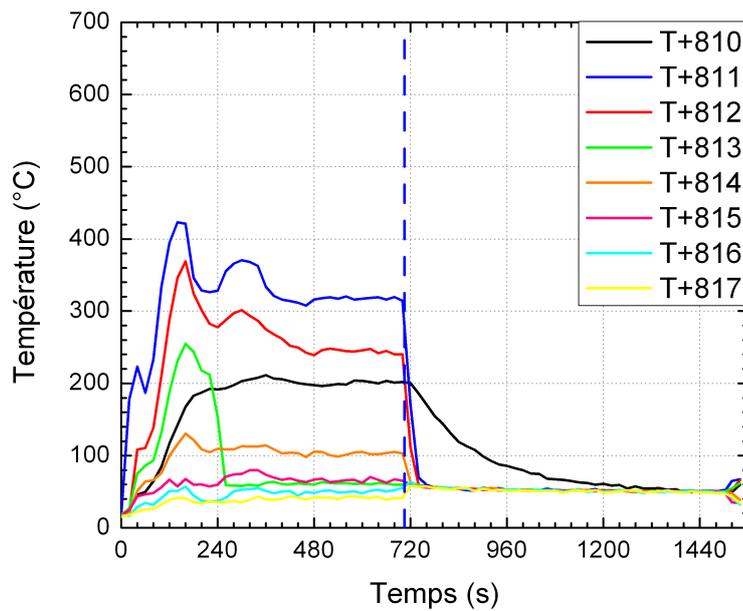


FIG. V.46 – Essai ETun19 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+8

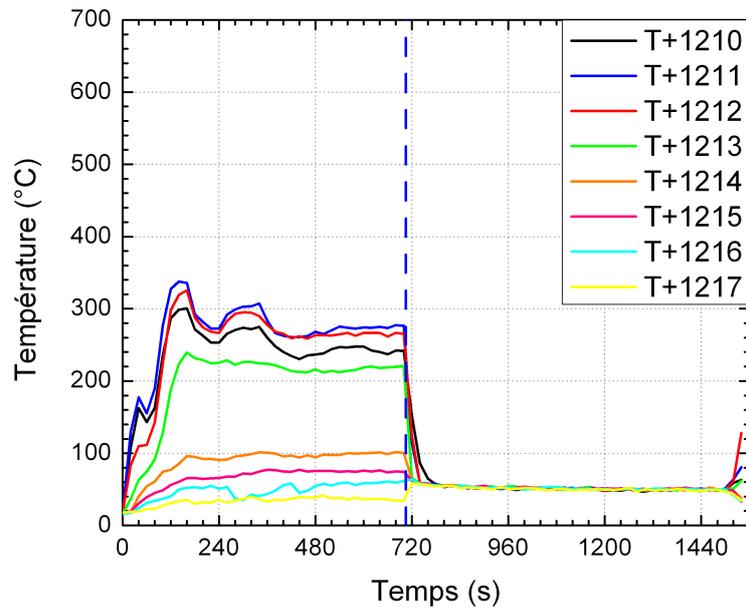


FIG. V.47 – Essai ETun19 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12

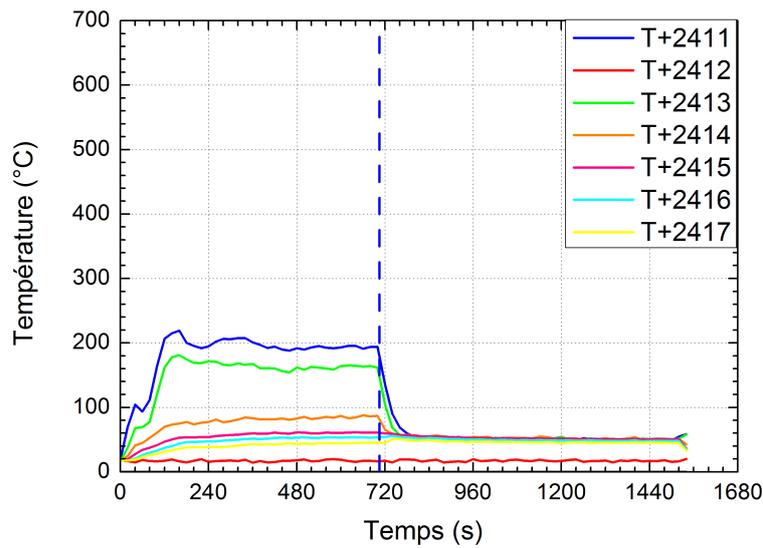


FIG. V.48 – Essai ETun19 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+24

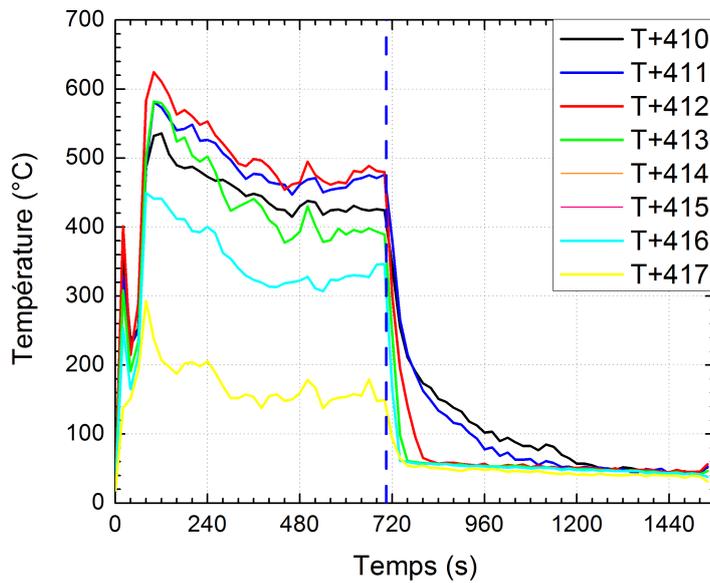


FIG. V.49 – Essai ETun21 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4

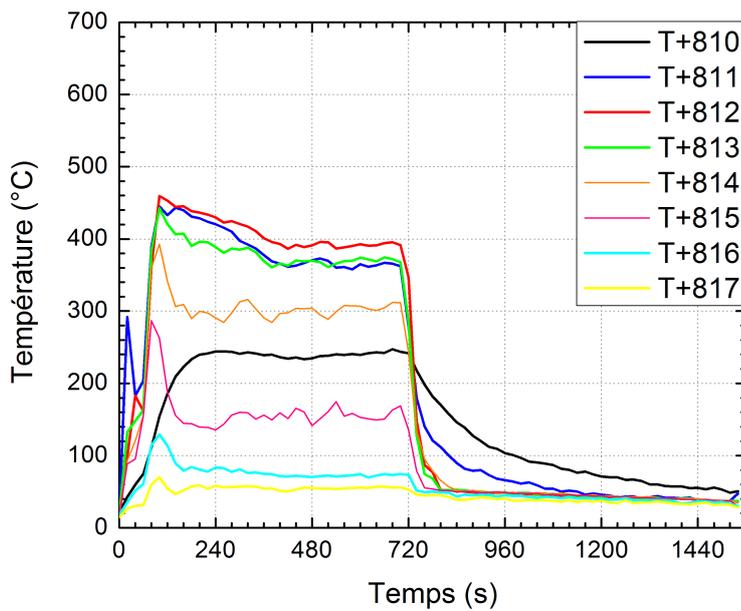


FIG. V.50 – Essai ETun21 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+8

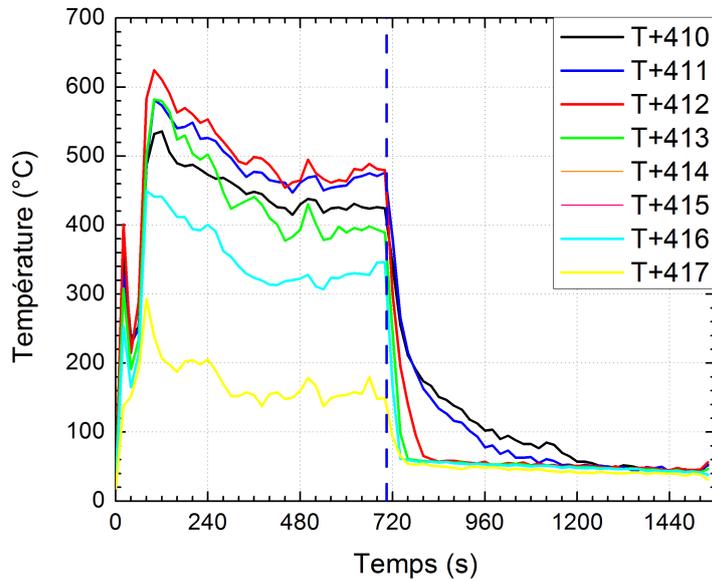


FIG. V.51 – Essai ETun21 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12

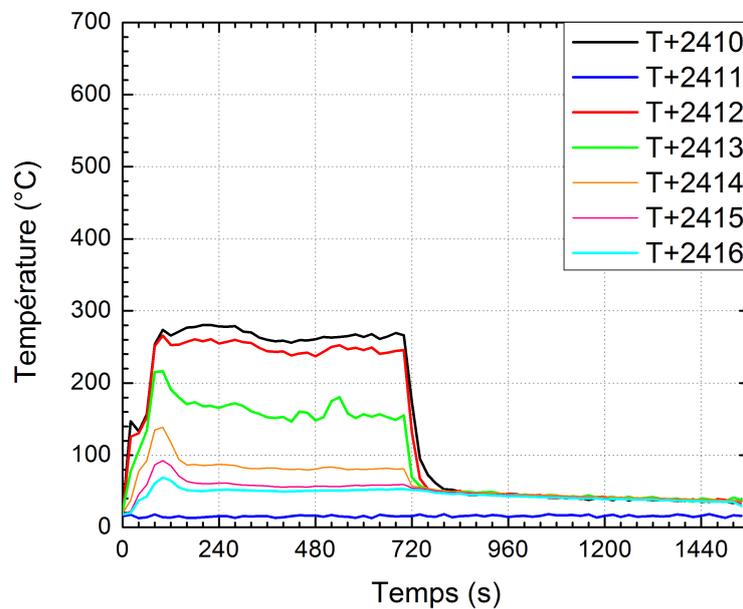


FIG. V.52 – Essai ETun21 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+24

On peut observer sur la figure V.45, comme dans le cas des foyers heptane, une chute des températures au déclenchement de l'aspersion. Celles-ci se stabilisent à environ 60°C.

Les valeurs fournies par le capteur 410 sont les seules à rester légèrement supérieures (aux alentours de 100°C), celui-ci étant situé au-dessus des buses. L'allure est similaire plus en aval (figure V.47), le niveau de température sous aspersion étant homogène, même si l'on s'éloigne du foyer. La même allure se retrouve sur les essais ETun21 et ETun22, conduits avec une vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique (figures V.49, V.50, V.51 et V.52). Le niveau des températures, tant sans qu'avec aspersion, n'est pas supérieur à celui des essais ETun19 et ETun20. Cependant, la couche chaude en phase sèche est plus épaisse : ce sont les valeurs fournies par les capteurs 10 à 14 qui sont regroupées et non plus seulement celles fournies par les capteurs 10 à 13, ce qui représente une augmentation de l'épaisseur de la couche chaude discernable d'environ 30 cm.

L'étude des profils verticaux de température avant et sous aspersion (figure V.53 pour l'essai ETun21) montre là aussi que la température a tendance à s'homogénéiser, lors de la phase sèche, en avançant vers l'aval. Une fois l'aspersion déclenchée, la température s'homogénéise au sein de l'ouvrage, autour de 60 °C. Ce résultat se retrouve sur l'ensemble des essais et n'est donc présenté sur la figure V.53 que pour l'essai ETun21. L'étude du critère de stratification S (figure V.54 pour l'essai ETun19 et figure V.55 pour l'essai ETun21) montre, comme dans le cas des essais sans aspersion, que la stratification des fumées n'est pas établie de manière nette, sauf en extrême aval, lors de la phase sèche. Là encore, une fois l'aspersion déclenchée, la valeur de S chute, indiquant clairement une rupture de la stratification.

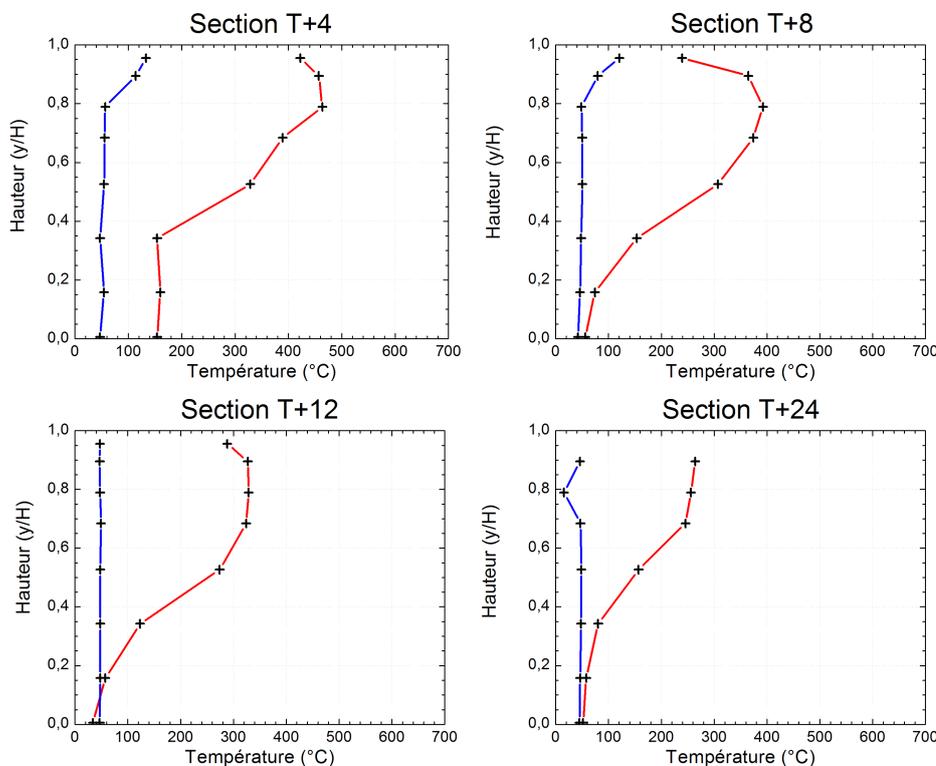


FIG. V.53 – Essai ETun21 - Profils verticaux de température, normés selon la hauteur du tunnel avant aspersion à 600s (—) et pendant l'aspersion à 900s (—)

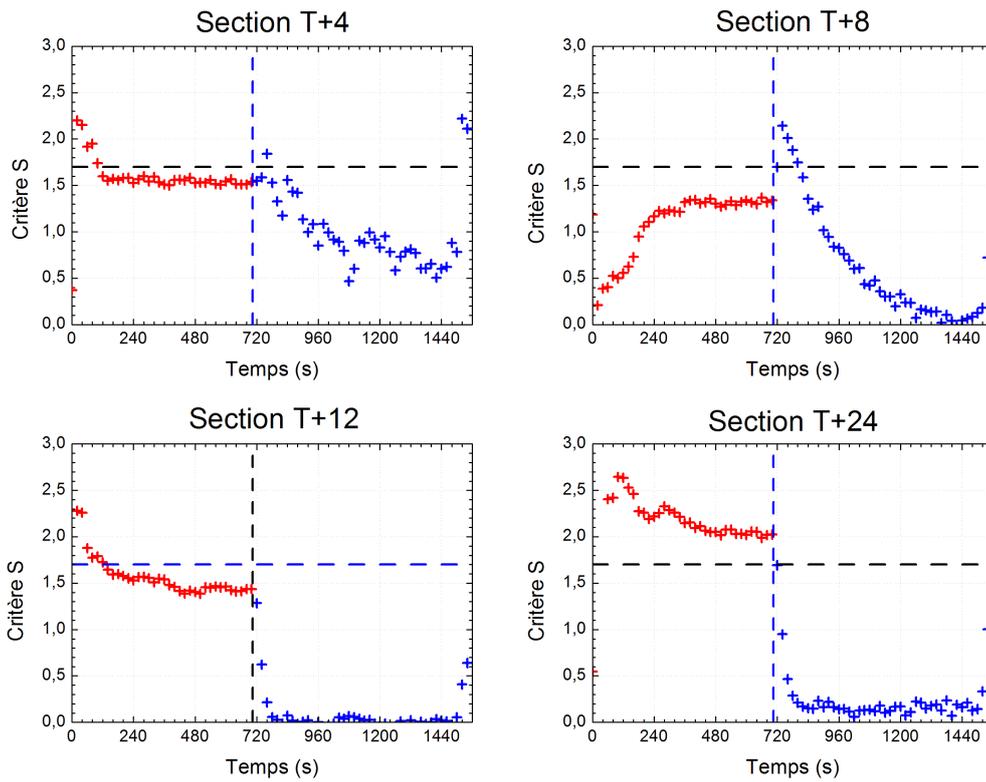


FIG. V.54 – Essai ETun19 - Evolution temporelle du critère S

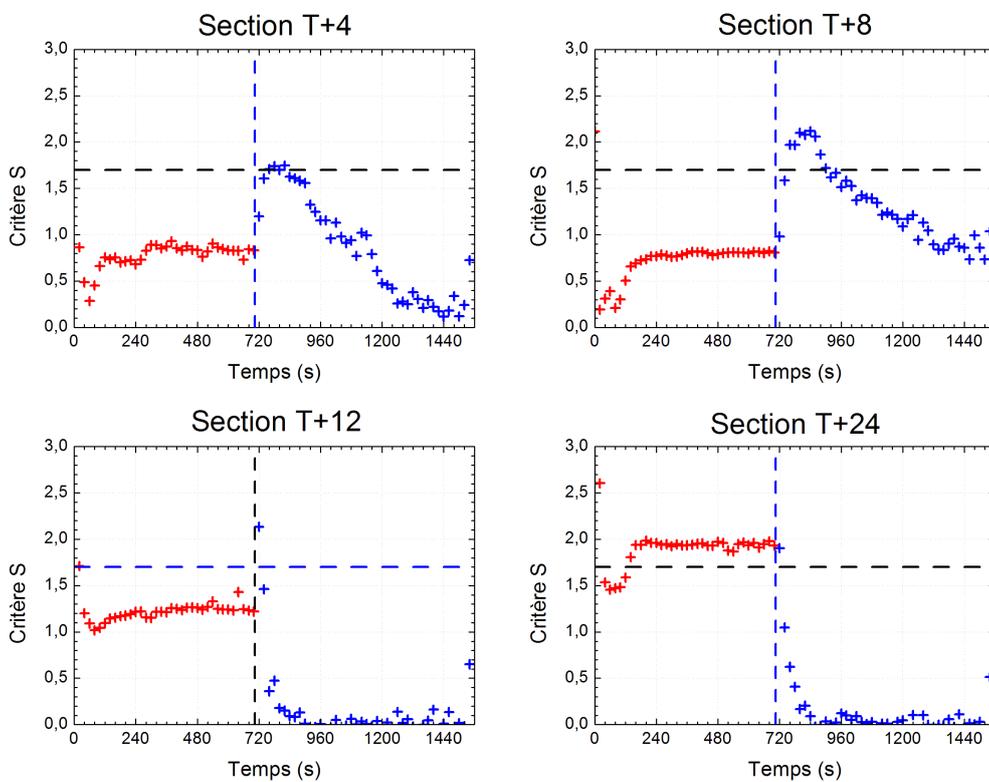


FIG. V.55 – Essai ETun21 - Evolution temporelle du critère S

V.3.4 Flux rayonnés

Les flux rayonnés vers l'aval suivent dans leur évolution en phase sèche la puissance du foyer. Ceci concorde avec les résultats des essais sans aspersion. Ils sont illustrés en figure V.56 pour l'essai ETun19 et en figure V.57 pour l'essai ETun21.

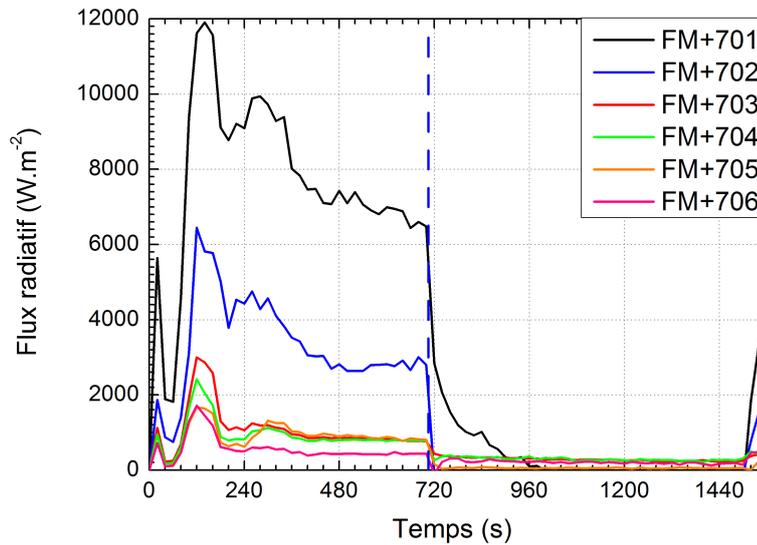


FIG. V.56 – Essai ETun19 - Evolution temporelle des niveaux de flux radiatifs en section FM+7

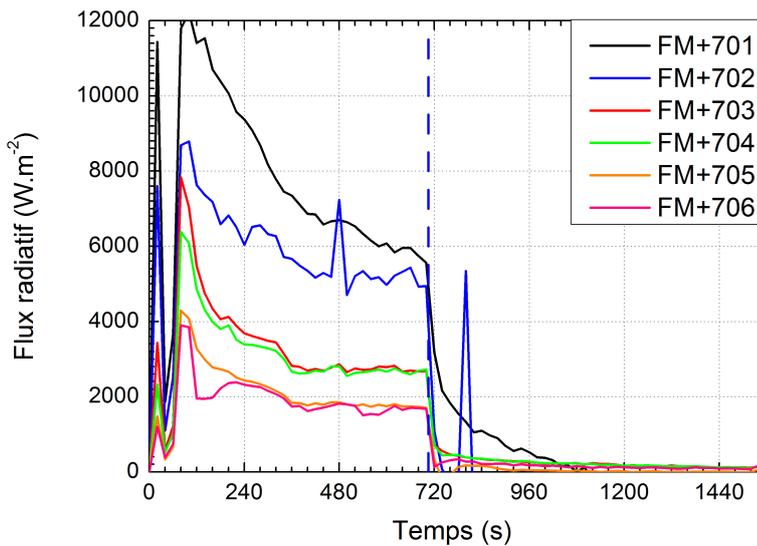


FIG. V.57 – Essai ETun21 - Evolution temporelle des niveaux de flux radiatifs en section FM+7

On peut remarquer que, tout comme pour les températures, les niveaux des flux radiatifs reçus par le capteur 701 (le plus haut du profil) sont similaires dans les deux cas. Cependant, leur répartition selon la hauteur est différente. Capteur pour capteur, les niveaux sont plus élevés lors de l'essai ETun21, ce qui tend à confirmer une flamme plus rayonnante. Ceci confirme les observations faites au chapitre précédent (paragraphe IV.2.3.3).

De même que pour les foyers heptane, les flux rayonnés sont fortement atténués lors de l'aspersion. La puissance du foyer n'étant que peu affectée par le brouillard d'eau, l'effet de rideau d'eau est ici observable, en sus de la faible baisse d'émission du foyer due à sa perte de puissance. Les tableaux V.16 et V.17 récapitulent les résultats de l'évaluation de l'effet de rideau d'eau durant les essais bûchers. On prend ici les valeurs moyennes de puissance avant et après aspersion pour déterminer le flux rayonné vers l'amont par le foyer sous aspersion.

Vitesse inférieure à la vitesse critique		
	ETun19	ETun20
Puissance avant aspersion (kW)	1600	1850
Puissance sous aspersion : P_{moy} (kW)	1200	1300
Chute de puissance	400 (80 %)	550 (70 %)
Flux radiatif moyen avant aspersion ($W.m^{-2}$)	752	1570
Flux radiatif moyen mesuré sous aspersion ($W.m^{-2}$)	192	196
Ecart de flux radiatif $\Delta\dot{q}''_{mes}$ ($W.m^{-2}$)	559 (74 %)	1373 (87 %)
Vitesse supérieure à la vitesse critique		
	ETun21	ETun22
Puissance avant aspersion (kW)	1970	1890
Puissance sous aspersion : P_{moy} (kW)	1250	1305
Chute de puissance	68 %	69 %
Flux radiatif moyen avant aspersion ($W.m^{-2}$)	496	342
Flux radiatif moyen mesuré sous aspersion ($W.m^{-2}$)	59	34
Ecart de flux radiatif $\Delta\dot{q}''_{mes}$ ($W.m^{-2}$)	437 (88 %)	307 (89 %)

TAB. V.16 – Essais bûchers - Atténuation des flux rayonnés mesurés vers l'amont par l'aspersion

Vitesse inférieure à la vitesse critique		
	ETun19	ETun20
Flux radiatif moyen mesuré sous aspersion ($W.m^{-2}$)	192	196
$\Delta\dot{q}''_{Puissance}$ ($W.m^{-2}$)	601	1103
$\Delta\dot{q}''_{RE}$ ($W.m^{-2}$)	410 (68 %)	910 (82 %)
Vitesse supérieure à la vitesse critique		
	ETun21	ETun22
Flux radiatif moyen mesuré sous aspersion ($W.m^{-2}$)	59	34
$\Delta\dot{q}''_{Puissance}$ ($W.m^{-2}$)	275	236
$\Delta\dot{q}''_{RE}$ ($W.m^{-2}$)	216 (75 %)	202 (85 %)

TAB. V.17 – Essais bûchers - Evaluation de l'effet de rideau d'eau

On relève dans le cas des bûchers une atténuation moyenne plus élevée que pour les foyers heptane (82 % contre une moyenne de 75 % pour les essais heptane). Ceci est cohérent car on relève des niveaux de flux mesurés en amont similaires à ceux des essais heptane, bien que la baisse effective de puissance du foyer soit plus faible. On relève également que cette part de chute des flux rayonnés vers l'amont attribuable à l'effet de rideau d'eau semble indépendante de la vitesse de ventilation.

V.4 Essais avec brouillard d'eau - Foyers palettes

Dans le cas des essais avec un foyer d'empilement de palettes, puisque la montée en puissance est plus rapide, on déclenche l'aspersion au bout de $t=300s$.

Essai	Combustible	Puissance [kW]	Vitesse d'écoulement [m.s ⁻¹]
ETun 23	Empilement de Palettes	1500	1,21
ETun 24	Empilement de Palettes	1500	1,24
ETun 25	Empilement de Palettes	1500	2,22
ETun 26	Empilement de Palettes	1500	2,19

TAB. V.18 – Récapitulatif des essais avec brouillard d'eau - Foyer palettes

V.4.1 Puissance du foyer

Au contraire des essais bûchers, on peut constater (figure V.58) que la baisse de puissance lors des essais de foyers palettes est similaire à ceux avec foyers liquides, bien que la rupture au déclenchement de l'aspersion soit moins brutale. Comme dans le cas des essais avec foyers bûchers, l'évaluation quantitative de l'efficacité du brouillard d'eau est rendue difficile par les conditions d'essai. En effet, lors de l'essai de référence ETun06, l'effondrement du foyer à $t=690s$ ne permet pas de comparer les énergies totales déployées par le foyer lors de l'essai. La fin des essais avec aspersion a été décidée par l'opérateur. De plus, de par la difficulté d'obtenir des mesures précises sous aspersion par la pesée, les résultats présentés sont ceux obtenus par la consommation d'oxygène.

On peut cependant remarquer une bonne adéquation des mesures entre l'essai de référence et les essais avec aspersion lors de la phase sèche. De plus, l'efficacité du brouillard d'eau est ici bien plus grande par rapport à un foyer bûcher. L'empilement de palettes a une section frontale inférieure à celle du bûcher ($0,58 m^2$ contre $1,1 m^2$). L'écoulement autour du foyer est facilité. Cependant, l'empilement de palettes est moins dense qu'un bûcher. Le bois n'occupe dans le cas des palettes que 33 % du volume de l'empilement, contre 55 % dans le cas du bûcher. La surface de bois en combustion est bien plus faible dans le cas des palettes et plus ouvert, ce qui permet une meilleure interaction entre les gouttelettes et le bois.

Dans le cas d'une vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique, on peut remarquer que les résultats sont similaires. La baisse de puissance est légèrement plus lente (entre 550 et 600s pour atteindre les 500kW contre 480s dans le cas des essais avec vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique) et la puissance atteinte est plus importante.

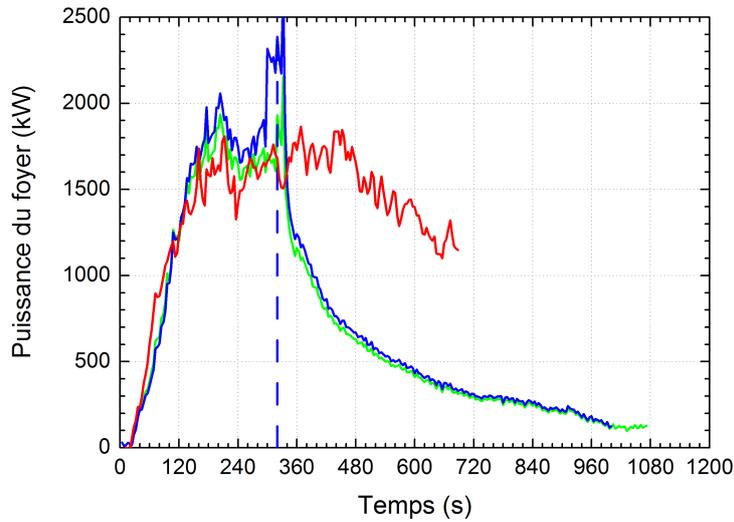


FIG. V.58 – Essais ETun25 et ETun26 - Evolution temporelle de la puissance - vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique : (—) Essai de référence ETun06, (—) Essai ETun25, (—) Essai ETun26

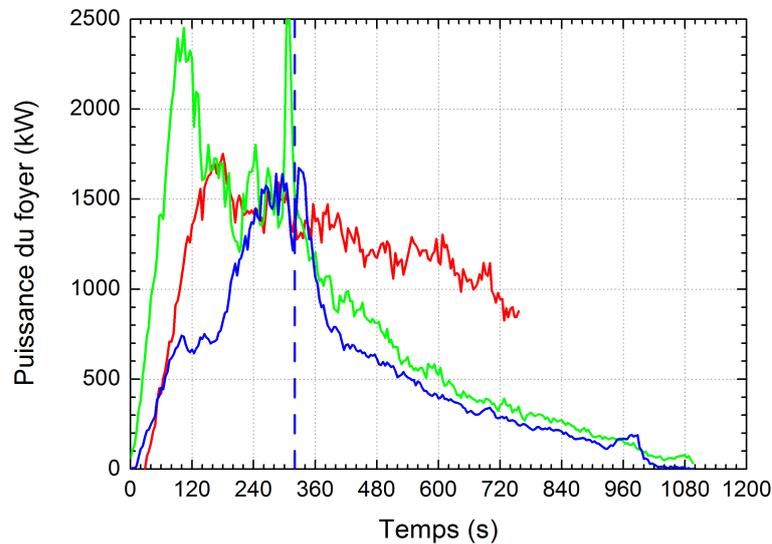


FIG. V.59 – Essais palettes ETun23 et ETun24 - Evolution temporelle de la puissance - vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique : (—) Essai de référence ETun05, (—) Essai ETun23, (—) Essai ETun24

Le tableau V.19 résume les puissances moyennes obtenues lors des essais palettes avec aspersion. La puissance de référence retenue est une moyenne faite sur 10 points de mesure juste avant le déclenchement de l'aspersion. On peut remarquer que la puissance moyenne

absorbée par le brouillard d'eau est plus importante lors des essais avec une vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique. Cette baisse de puissance est déterminée par rapport à la puissance maximale du foyer et ne reflète que l'efficacité globale du brouillard d'eau. Les différences de temps d'arrêt de l'essai ne permettent pas de déterminer plus finement son effet.

Essai	Puissance de Référence (kW)	Vitesse d'écoulement $m.s^{-1}$	Puissance moyenne sous aspersion (kW)	Baisse de puissance due au brouillard d'eau (%)
ETun 23	1520	1,21	505	67 %
ETun 24	1600	1,24	548	65 %
ETun 25	1950	2,22	403	79 %
ETun 26	2011	2,19	410	80 %

TAB. V.19 – Essais Palettes - Puissance moyenne du foyer sous aspersion

Ces résultats semblent indiquer une bonne efficacité du brouillard d'eau sur des foyers à combustible solide ouverts, à contrario du cas des bûchers.

V.4.2 Evaluation de la quantité d'eau utile injectée dans le tunnel

A la différence des foyers bûchers, les mesures de concentration de gaz ne mettent pas en évidence une augmentation aussi élevée et reproductible de la concentration de monoxyde de carbone CO lors de l'aspersion. La figure V.60 en donne l'illustration.

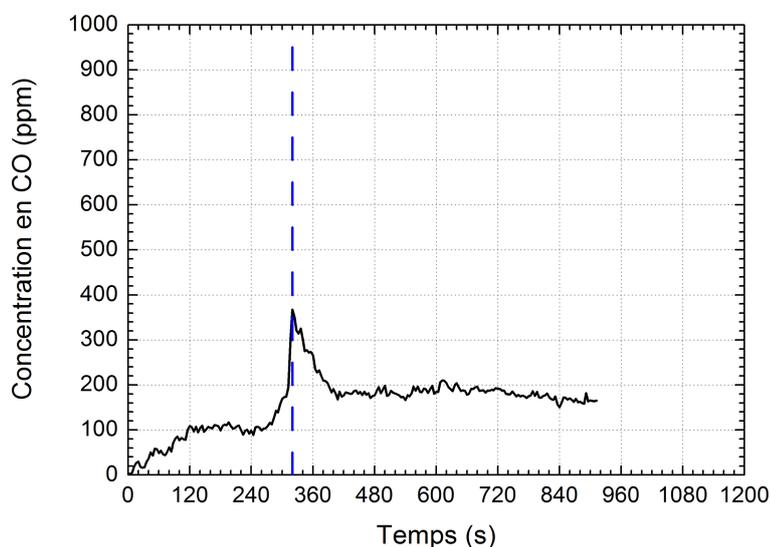


FIG. V.60 – Essai ETun23 - Evolution temporelle de la concentration de monoxyde de carbone

Les pics visible avant aspersion sont dus à l'allumage piloté par l'heptane. De plus, la détermination de la puissance du foyer par consommation d'oxygène est ici satisfaisante,

tandis que les mesures de débit sont toujours difficiles à exploiter en l'état. On peut alors simplement estimer la part d'eau utile du brouillard en attribuant la baisse de puissance du foyer à la vaporisation des gouttelettes, via la chaleur latente de vaporisation de l'eau. On détermine ainsi les valeurs d'efficacité regroupées dans le tableau V.20. Leur évolution est illustrée en figure V.61 pour les essais ETun23 et ETun24 et V.62 pour les essais ETun25 et ETun26.

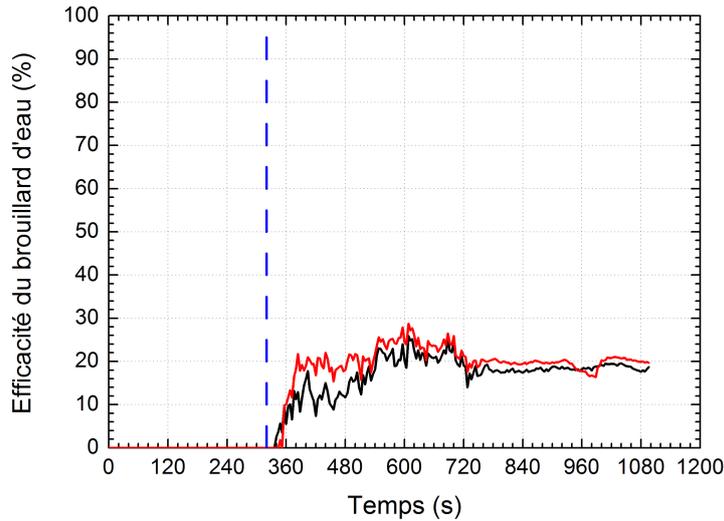


FIG. V.61 – Essai palettes ETun23 et ETun24 - Evolution temporelle de l'efficacité η^{BE} du brouillard d'eau - (—) : Essai ETun23, (—) : Essai ETun24

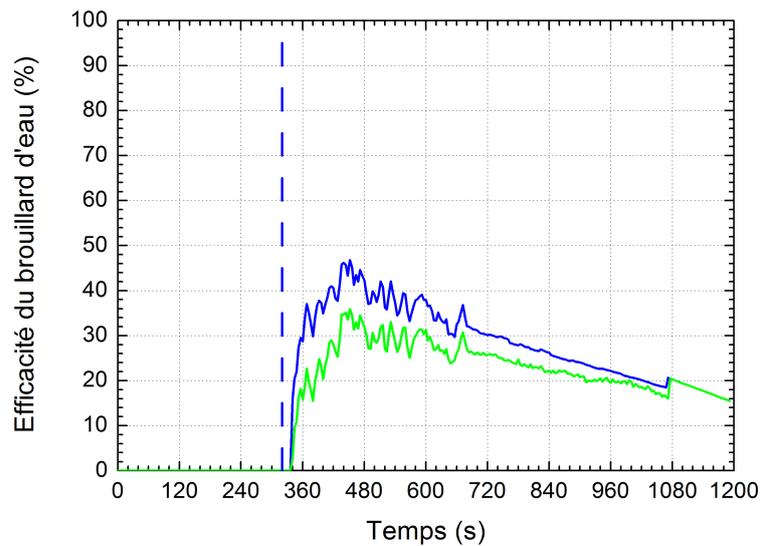


FIG. V.62 – Essai palettes ETun25 et ETun26 - Evolution temporelle de l'efficacité η^{BE} du brouillard d'eau - (—) : Essai ETun25, (—) : Essai ETun26

	ETun23	ETun24	ETun25	ETun26
Vitesse de ventilation (m.s ⁻¹)	1,21	1,24	2.22	2.19
Déclenchement de l'aspersion (s)	300	320	314	324
Durée de l'aspersion (s)	795	612	750	690
Eau injectée dans le tunnel (kg)	1006	770	944	870
Eau <i>utile</i> (kg)	325	245	340	347
Efficacité moyenne	22 %	21 %	31 %	32 %

TAB. V.20 – Foyers palettes - Principaux résultats des essais avec aspersion

On constate une efficacité supérieure à celle des foyers bûchers, mais aussi à celle des foyers heptane. Ces résultats mettent bien en avant l'importance du paramètre de porosité du foyer à combustible solide. On remarque de plus que l'efficacité du brouillard est plus élevée pour une vitesse de ventilation importante (essais ETun25 et ETun26).

V.4.3 Températures

A l'instar des essais bûcher, l'évolution temporelle des niveaux de températures lors des essais à empilement de palettes suit celle de la puissance du foyer (paragraphe V.4.1). On peut constater, là encore, qu'au déclenchement de l'aspersion, les niveaux de température chutent (à environ 40 °C, 100 secondes après le déclenchement du brouillard d'eau). Les figures V.63 et V.67 l'illustrent, respectivement pour les essais ETun24 et ETun25. On observe sur les deux figures que le profil de température en T+4 est similaire à ceux de leur essai de référence respectif (ETun05 et ETun06), indiquant un régime du foyer similaire lors de la phase sèche. Comme nous le verrons par la suite pour la puissance du foyer, le niveau global de température sous aspersion diminue ensuite au cours du temps, jusqu'à la fin de l'essai (figures V.64, V.65 et V.66 pour l'essai ETun24 et V.68, V.69 et V.70 pour l'essai ETun25).

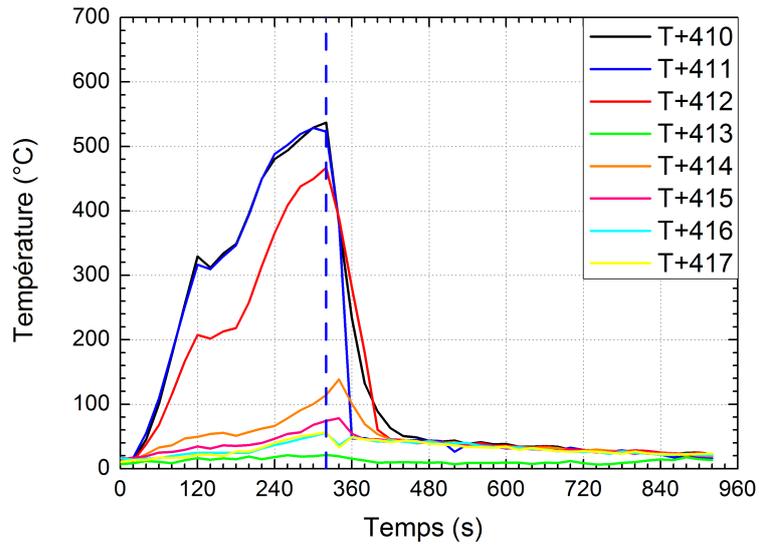


FIG. V.63 – Essai ETun24 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4

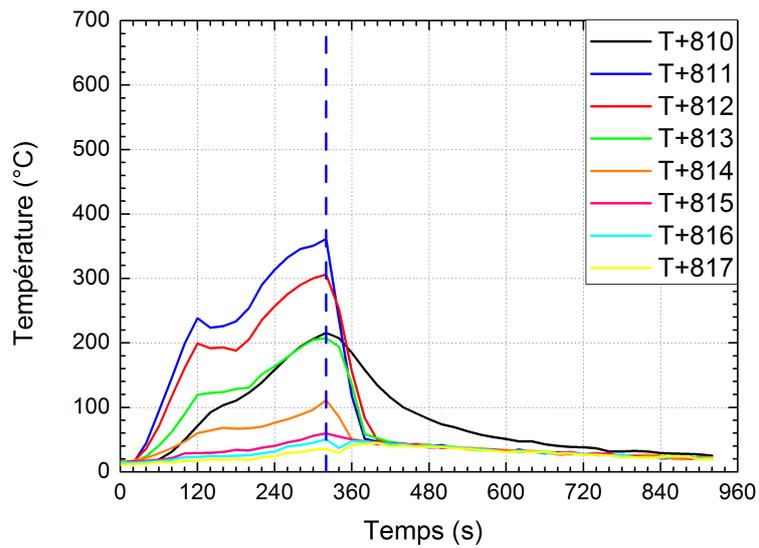


FIG. V.64 – Essai ETun24 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+8

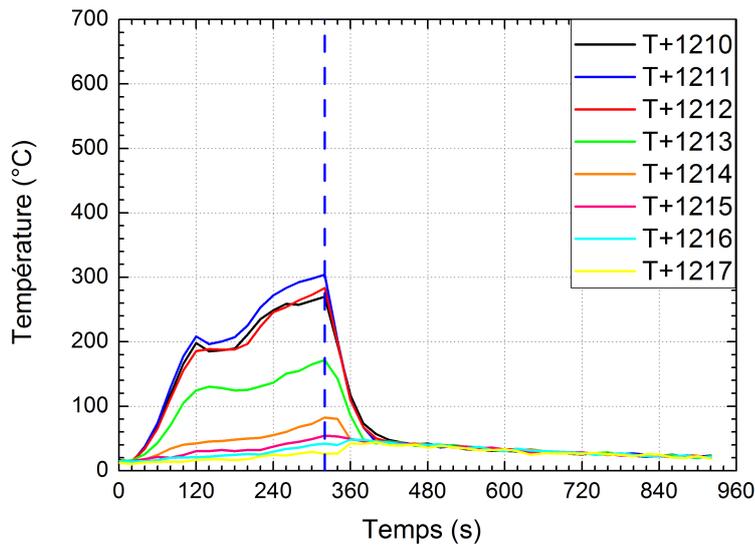


FIG. V.65 – Essai ETun24 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12

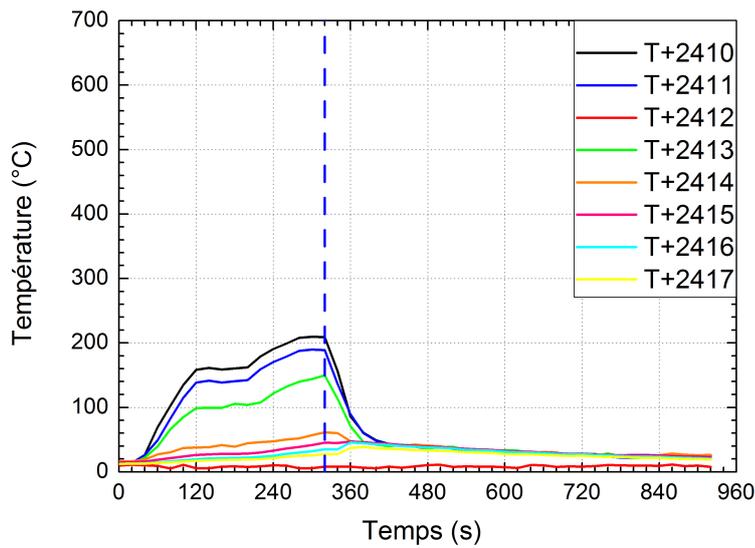


FIG. V.66 – Essai ETun24 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+24

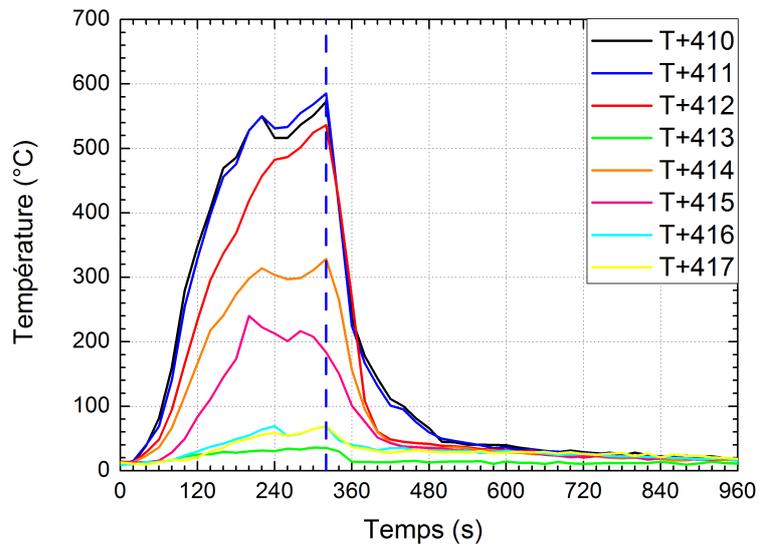


FIG. V.67 – Essai ETun25 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+4

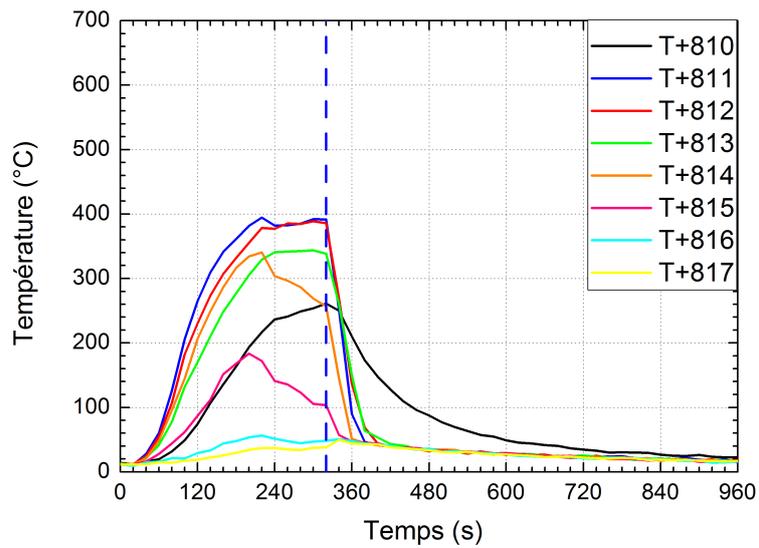


FIG. V.68 – Essai ETun25 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+8

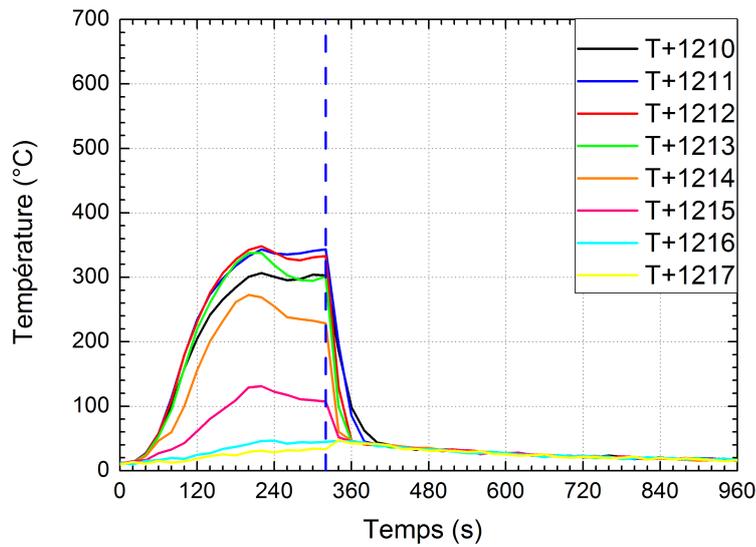


FIG. V.69 – Essai ETun25 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+12

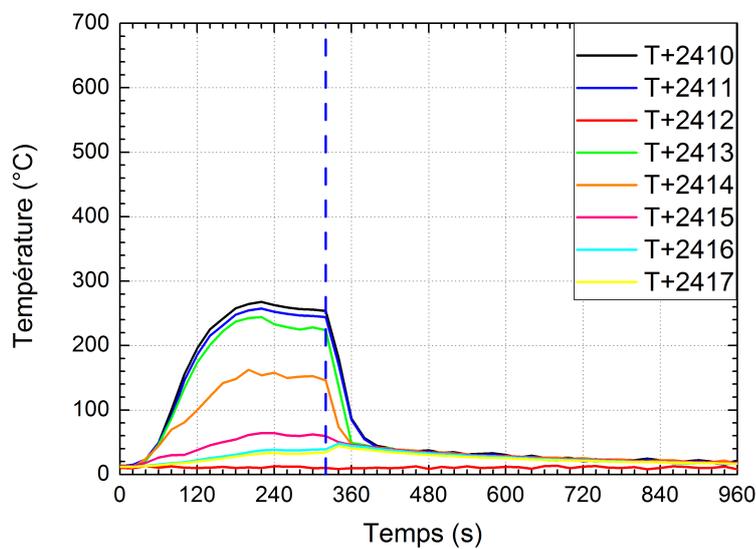


FIG. V.70 – Essai ETun25 - Evolution temporelle des niveaux de température en section T+24

V.4.4 Flux rayonnés

On retrouve aussi sur les résultats de flux rayonnés un comportement cohérent avec celui des températures et de la puissance du foyer. Les figures V.71 et V.72 l'illustrent pour l'essai ETun24, respectivement pour les sections FM-7 et FM+7.

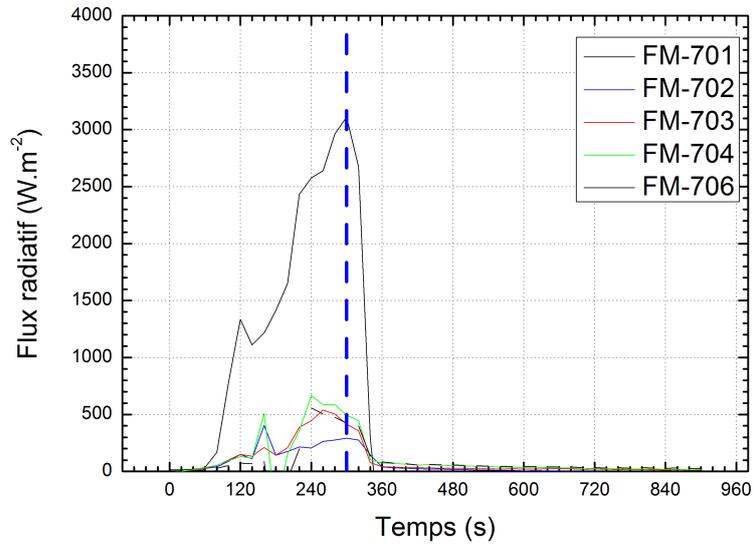


FIG. V.71 – Essai ETun24 - Evolution temporelle des niveaux flux radiatifs en section FM-7

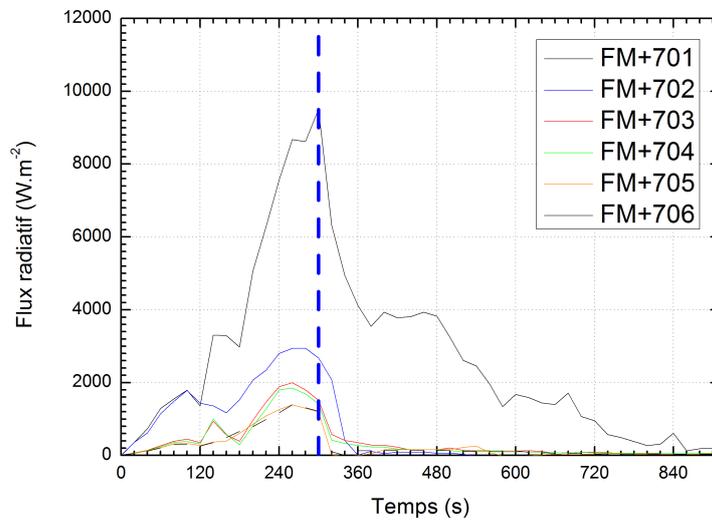


FIG. V.72 – Essai ETun24 - Evolution temporelle des niveaux flux radiatifs en section FM+7

Les flux rayonnés vers l'aval sont fortement atténués, tout comme ceux émis vers l'amont. Cependant, au contraire des foyers bûchers, puisque le brouillard d'eau a un effet sur le foyer, la chute des niveaux des flux rayonnés mesurés à 7 mètres n'est pas imputable uniquement à l'effet de rideau d'eau. Là encore, on détermine d'après ces mesures la part d'atténuation des flux rayonnés attribuable à l'effet de rideau d'eau. Les valeurs obtenues par le calcul sont résumées sur les tableaux V.21 et V.22.

Vitesse inférieure à la vitesse critique		
	ETun23	ETun24
Puissance avant aspersion (kW)	1550	1550
Puissance sous aspersion : P_{moy} (kW)	505	548
Chute de puissance	1045 (68 %)	1002 (65 %)
Flux radiatif moyen avant aspersion ($W.m^{-2}$)	335	390
Flux radiatif moyen mesuré sous aspersion ($W.m^{-2}$)	19	37
Ecart de flux radiatif $\Delta\dot{q}''_{mes}$ ($W.m^{-2}$)	315 (94 %)	351 (90 %)
Vitesse supérieure à la vitesse critique		
	ETun25	ETun26
Puissance avant aspersion (kW)	1970	1890
Puissance sous aspersion : P_{moy} (kW)	1250	1305
Chute de puissance	68 %	69 %
Flux radiatif moyen avant aspersion ($W.m^{-2}$)	710	705
Flux radiatif moyen mesuré sous aspersion ($W.m^{-2}$)	40	30
Ecart de flux radiatif $\Delta\dot{q}''_{mes}$ ($W.m^{-2}$)	670 (94 %)	675 (95 %)

TAB. V.21 – Essais Palettes - Atténuation des flux rayonnés mesurés vers l’amont par l’aspersion

Vitesse inférieure à la vitesse critique		
	ETun23	ETun24
Flux radiatif moyen mesuré sous aspersion ($W.m^{-2}$)	437	437
$\Delta\dot{q}''_{Puissance}$ ($W.m^{-2}$)	110	137
$\Delta\dot{q}''_{RE}$ ($W.m^{-2}$)	90 (82 %)	100 (73 %)
Vitesse supérieure à la vitesse critique		
	ETun25	ETun26
Flux radiatif moyen mesuré sous aspersion ($W.m^{-2}$)	670	675
$\Delta\dot{q}''_{Puissance}$ ($W.m^{-2}$)	146	143
$\Delta\dot{q}''_{RE}$ ($W.m^{-2}$)	106 (79 %)	113 (80 %)

TAB. V.22 – Essais Palettes - Evaluation de l’effet de rideau d’eau

Dans ce cas, on relève une atténuation imputable à l’effet de rideau d’eau cohérente avec celle des bûchers (environ 80 %). Comme dans le cas de ces derniers, la vitesse de ventilation n’a que peu d’influence sur ce résultat.

V.5 Retour en vraie grandeur

A partir des relations de similitude présentées dans le chapitre II, il est possible de déduire les caractéristiques de la configuration vraie grandeur correspondante pour un rapport d’échelle $\frac{l_1}{l_2} = 0,3$. Ces caractéristiques, en terme de débit calorifique du foyer, de vitesse de ventilation, de débit d’injection des buses et de granulométrie du brouillard, sont présentées dans le tableau V.23.

Grandeur	Echelle prototype	Echelle réelle
Débit calorifique	1500 kW	30000 kW
Vitesse d'écoulement	1,2 m.s ⁻¹	2,2 m.s ⁻¹
	2,1 m.s ⁻¹	3,8 m.s ⁻¹
Débit massique d'une buse	91,7 g.s ⁻¹	167,4 g.s ⁻¹
Diamètre des gouttelettes (pic de distribution)	15 μ m	27 μ m

TAB. V.23 – Détermination des caractéristiques des essais menée à l'échelle réelle, suivant les relations de Yu [65] pour le brouillard d'eau

Pour deux structures géométriquement semblables, les champs de température, de vitesse et de concentration, doivent être en similitude en chaque point de coordonnées définies par le rapport d'échelle. Pour des foyers de même nature et en s'assurant de se placer dans des conditions de transferts thermiques aux parois qui n'altèrent pas la démarche, cette similitude est généralement bien respectée (elle a été validée par de nombreuses études, en particulier de désenfumage pour ce type de structure).

Pour ce qui est des effets d'un brouillard d'eau, la démarche doit également conduire à des performances similaires. Toutefois, le retour d'expérience d'essais vraie grandeur avec aspersion de brouillard d'eau est beaucoup plus limité, voire inexistant. Si quelques campagnes d'essais ont bien été menées sur ce thème ces dernières années, avec pour objectif de valider le choix du concept installation fixe de brumisation dans des tunnels routiers spécifiques, les résultats en sont restés le plus souvent confidentiels, car propriété du maître d'ouvrage.

Il se trouve cependant que la société FOGTEC, qui a dimensionné et fourni le système d'aspersion utilisé pour la présente étude (voir chapitre III, page 83), a procédé entre juillet 2004 et septembre 2006, à une campagne d'essais de brumisation sur des feux de tunnel, en vraie grandeur (projet SOLIT) et a tout naturellement accepté d'en communiquer les résultats aux fins de comparaison avec ceux que nous présentons ici.

V.6 Comparaison avec les résultats du projet SOLIT

Le projet SOLIT (*Safety Of Life In Tunnels*) est une campagne d'essais réalisée par la société FOGTEC, à l'initiative du ministère Allemand de l'Economie et de la Technologie, s'inscrivant dans le projet de recherche européen UPTUN (*Upgrading for Tunnels*). Il a consisté en une série d'essais en vraie grandeur, dans le tunnel d'essais de San Pedro Des Anes, situé dans la province des Asturies, en Espagne, avec des foyers calibration de type feu de nappe de fioul de 30 MW partiellement couverts et d'empilement de palettes bachés pour reproduire le chargement d'un camion. La ventilation dans l'ouvrage est obtenue par des accélérateurs assurant une ventilation longitudinale. Un rapport a été produit à la fin de cette série d'essais [81].

V.6.1 Détermination et validation du facteur d'échelle.

Le tunnel utilisé pour cette campagne d'essais est un tunnel de section rectangulaire, d'une largeur de 9,6 m et d'une hauteur de 5,2 m. De par la différence de géométrie de la section par rapport au prototype utilisé dans notre étude, nous prendrons comme

paramètre dimensionnant le diamètre hydraulique D_h . Celui de San Pedro Des Anes est de 6,75 m contre 2,17 pour le prototype. Ceci nous donne un rapport d'échelle s_{SOLIT} prototype-vraie grandeur de :

$$s_{SOLIT} = \frac{D_h^{prototype}}{D_h^{SOLIT}} = 0,32 \quad (V.21)$$

Ce rapport d'échelle est relativement proche de celui utilisé pour la campagne ETun ($s_{ETun} = 0,3$), mais plusieurs remarques sont à faire :

- Le feu de référence de 30 MW est similaire, à l'échelle de notre prototype, à un feu de 1730 kW. Nous considérerons, de par les effets de confinement constatés au chapitre IV de notre étude, que le feu de 1500 kW retenu pour la campagne ETun est en similitude avec le foyer du projet SOLIT.
- Les essais SOLIT ont été menés avec une vitesse de ventilation de 3 m.s⁻¹, ce qui ramené à l'échelle du prototype nous donne 1,7 m.s⁻¹. Si ceci ne correspond pas exactement aux vitesses de ventilations utilisées lors de la campagne ETun, on comparera les résultats avec ceux d'un foyer heptane découvert, réalisé avec une vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique (essai ETun10), à une vitesse de ventilation de 1.45 m.s⁻¹.
- Le délai de déclenchement du brouillard d'eau est différent dans les deux cas : 120 secondes dans le cas de SOLIT, 300 dans le cas d'ETun. Les figures du présent rapport sont présentées de façon à ce que le déclenchement de l'aspersion soit synchrone entre les deux essais.

V.6.2 Correspondance des points de mesure

L'instrumentation sur la campagne SOLIT se compose de 8 sections de mesure, principalement de température (figure V.73). En amont, à 5 mètres du foyer se trouve une section de radiomètres. En aval se trouvent, à 20 m une mesure de visibilité et à 40 m l'ensemble des mesures de concentrations de gaz et de vitesse d'écoulement, afin de déterminer la puissance du foyer. Le nom de la section renseigne sur sa position :

- U : Section située en amont (*Upstream*)
- D : Section située en aval (*Downstream*)

La valeur numérique donne la distance en mètres de la section au foyer.

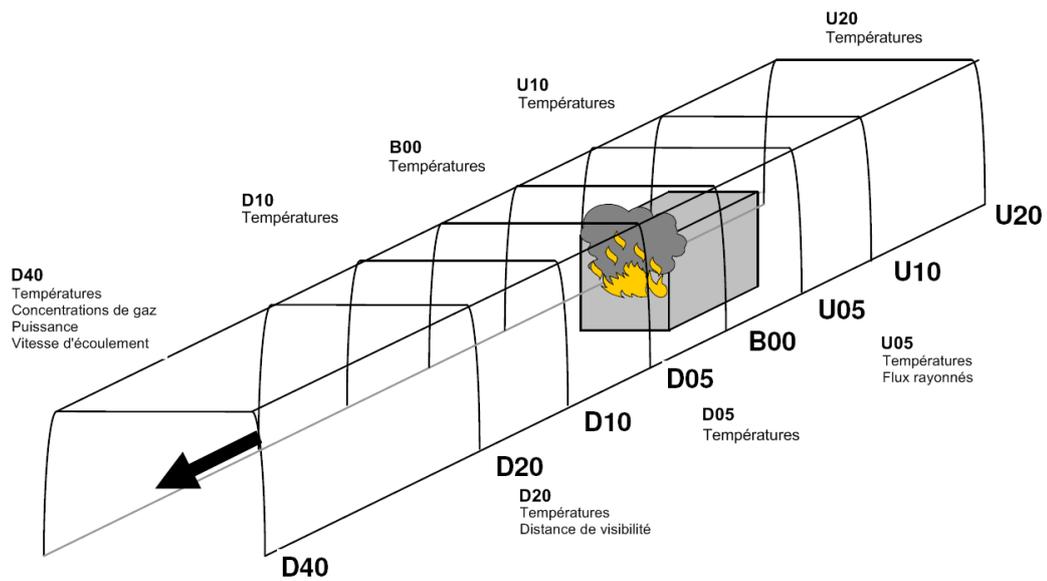


FIG. V.73 – Schéma d'implantation des mesures lors de la campagne SOLIT. Source : [81]

Ramenées à l'échelle du prototype, ces distances ne correspondent pas tout à fait à l'installation de la campagne ETun (tableau V.24).

Section SOLIT	Distance au foyer [m]	Distance au foyer ramenée au prototype [m]	ETun [m]
U20	-20	-6,4	-9
U10	-10	-3,2	-5
U05	-5	-1,6	-3
D05	5	1,6	4
D10	10	3,2	8
D20	20	6,4	12
D40	40	12,8	18

TAB. V.24 – Position des sections de mesure SOLIT ramenées à l'échelle du prototype

Cependant, on peut interpoler la température aux emplacements des sections ETun par celles de SOLIT :

- par les sections D10 et D20 pour la section ETun T+4
- par les sections D20 et D40 pour la section ETun T+8
- par les sections D20 et D40 pour la section ETun T+12

En ce qui concerne la correspondance des capteurs, elle est résumée dans le tableau V.25 (les positions sont ramenées à l'échelle du prototype).

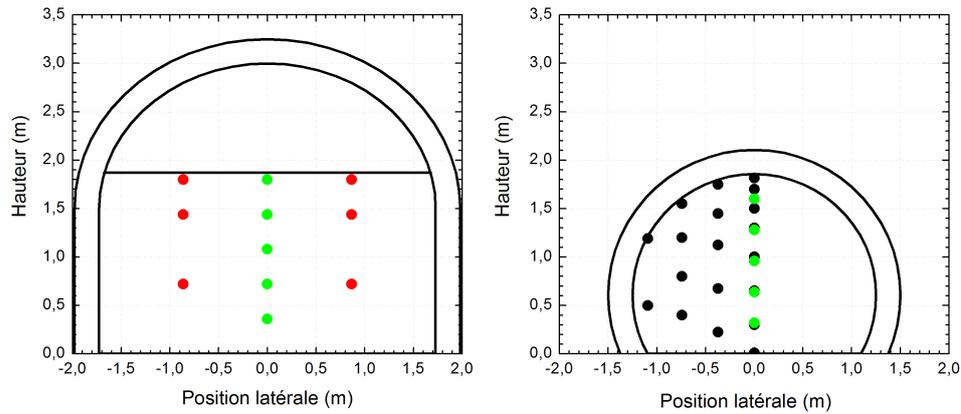


FIG. V.74 – Correspondance des capteurs SOLIT et des capteurs ETun

Capteur SOLIT	Position verticale [m]	Capteur ETun	Position verticale [m]
-	-	-	-
TX-01	0,32	T+X16	0,30
TX-03	0,64	T+X15	0,65
TX-04	0,96	T+X14	1,00
TX-05	1,28	T+X13	1,30
TX-07	1,60	T+X12 et T+X11	1,50 et 1.70

TAB. V.25 – Correspondance des capteurs du plan médian longitudinal entre les campagnes SOLIT et ETun

V.6.3 Dispositif de brouillard d'eau

D'après le document [81], le dispositif de brouillard d'eau se compose de trois rampes, sur lesquelles les buses sont espacées de quatre mètres. Il comporte un système de soupapes permettant une sectorisation du brouillard : le système de pilotage n'activant que les buses situées à proximité de la position détectée du foyer.

Lors de la rédaction de ce mémoire, nous n'avons pu obtenir, pour des raisons de confidentialité, que des données très partielles concernant les caractéristiques du brouillard. Le diamètre des gouttelettes est compris entre 100 et 250 μm , ce qui ramené à l'échelle du prototype correspond à une plage allant de 55 à 140 μm . Le brouillard d'eau n'est donc pas en similitude entre les campagnes ETun et SOLIT, les gouttelettes de cette dernière étant bien plus grosses.

V.6.4 Résultats de puissance

A partir des mesures de vitesse d'écoulement et de concentration de gaz, la puissance du foyer est déterminée de façon similaire au cas de la campagne ETun (paragraphe IV.1.2, page 93). La figure V.75 illustre l'évolution temporelle de la puissance des foyers SOLIT

(ramenée à l'échelle du prototype CSTB en préservant le rapport $\frac{\dot{Q}^2}{l^5}$) et ETun. Là encore, la courbe SOLIT est décalée dans le temps afin que le déclenchement de l'aspersion soit synchrone avec les résultats ETun.

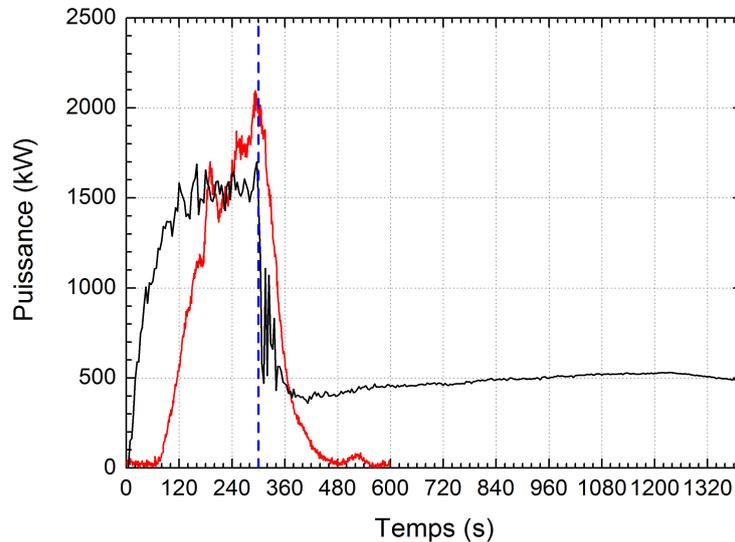


FIG. V.75 – Campagnes SOLIT et ETun - Evolution temporelle des puissances de foyer- (—) : ETun10 et (—) : SOLIT

On observe que la montée en régime du foyer est similaire dans les deux cas (environ 120 secondes), jusqu'à une puissance de 1500 kW. Le foyer SOLIT voit ensuite sa puissance augmenter à nouveau (à $t=240s$ sur la figure V.75) pour atteindre sa puissance de référence vers 1800 kW). Après le déclenchement de l'aspersion, la puissance du foyer SOLIT diminue plus lentement. Ceci est probablement dû aux dimensions réduites du foyer relativement à la section du tunnel par rapport à la campagne ETun. De plus, le foyer est éteint au bout de 300 secondes d'aspersion. La non connaissance des caractéristiques et du mode d'application du brouillard d'eau rend la comparaison avec l'essai ETun10 impossible sous aspersion.

V.6.5 Résultats de température

Au premier point de comparaison (correspondant à la section T+4 à l'échelle du prototype ETun), on peut remarquer une bonne adéquation entre les niveaux de températures au palier de puissance entre les campagnes ETun et SOLIT. On observe des différences d'évolution temporelle au niveau du temps d'allumage (signalé par la ligne discontinue orange sur les figures) et de la montée en puissance, dues respectivement à une durée de phase sans aspersion plus courte pour SOLIT et au combustible différent (figure V.76). Les différents pics de température lors de la phase sans aspersion correspondent aux augmentations de puissance mentionnées précédemment. Comme ce qui a été signalé pour la campagne ETun, on relève une chute brutale des températures au déclenchement de l'aspersion, qui se fait à la même vitesse pour les deux campagnes. Ceci à l'exception du

capteur TE 07 qui est situé dans les cônes d'aspersion, au contraire des capteurs 10, 11 et 12 de la campagne ETun qui étaient au-dessus de la buse d'aspersion et qui montrent donc une température diminuant plus lentement. Au second point de comparaison (correspondant à la section T+8 à l'échelle du prototype ETun), visible sur la figure V.77, on remarque là aussi une bonne cohérence des résultats des deux campagnes, à l'exception du capteur 07 situé sous le plafond qui atteint un niveau de température bien plus élevé que son homologue de la campagne ETun (un pic de 700 °C pour la campagne SOLIT contre un niveau d'environ 300 °C pour la campagne ETun). Cependant, en partie basse du tunnel, l'adéquation entre les deux séries de mesure est satisfaisante. Enfin, plus loin en aval (correspondant à la section T+12 à l'échelle du prototype ETun), on note une grande divergence des résultats en partie haute du tunnel (figure V.78, capteurs SOLIT 07 et 05). Les niveaux atteints lors de la campagne SOLIT sont bien plus élevés, et cet écart s'accroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne du foyer vers l'aval. Ceci peut s'expliquer pour partie par la puissance du foyer, légèrement plus forte dans le cas de SOLIT (1730 kW équivalents à l'échelle du prototype ETun contre 1500 kW pour cette campagne), ainsi que par la surface de voûte échauffée plus importante dans le cas de la campagne SOLIT qui va avoir tendance à accélérer et augmenter l'effet de confinement du tunnel. Toutefois, en partie basse du tunnel les résultats sont cohérents.

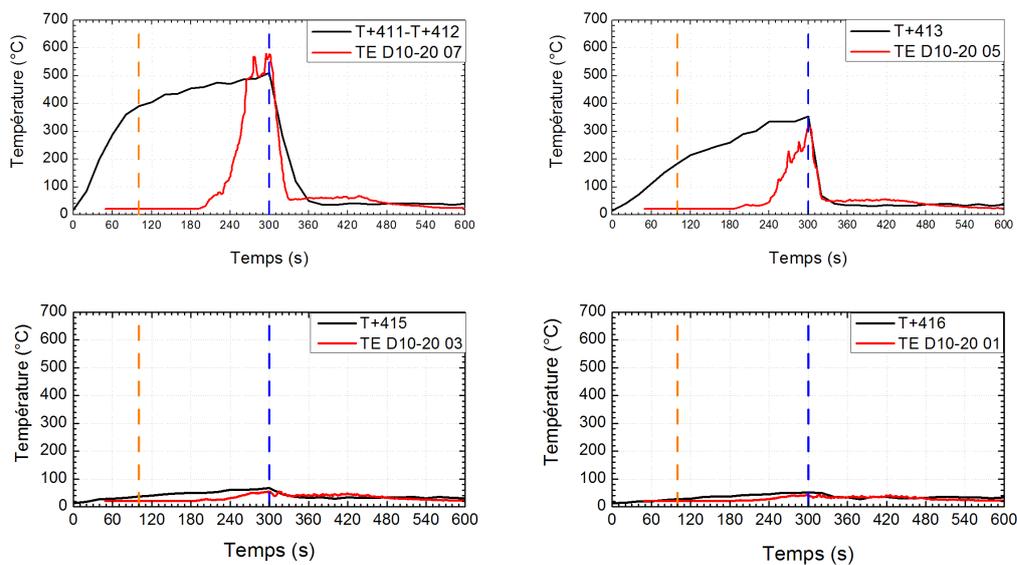


FIG. V.76 – Section ETunT+4 - Comparaison des évolutions temporelles de température de la campagne ETun (—) et SOLIT (—)

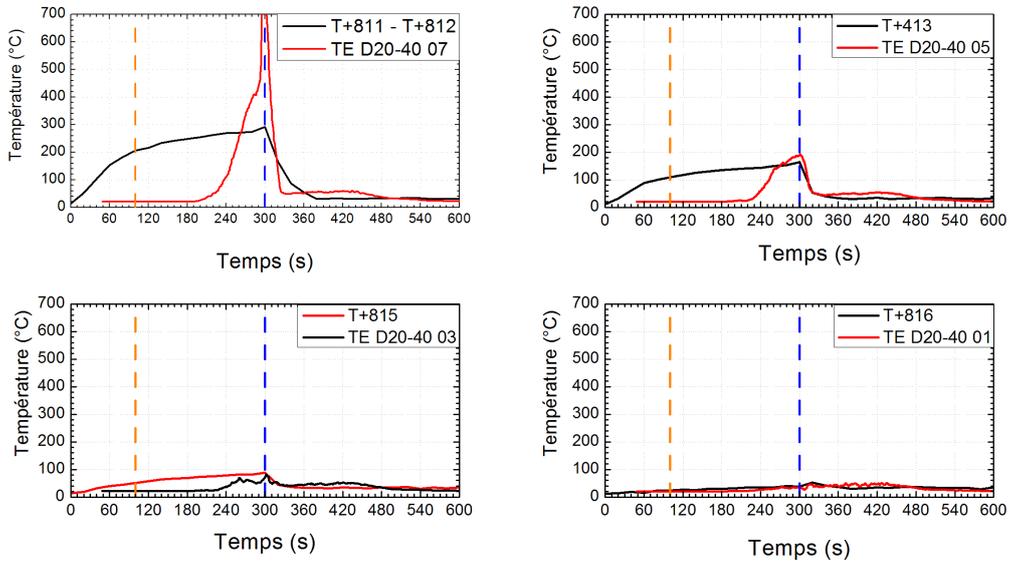


FIG. V.77 – Section ETunT+8 - Comparaison des évolutions temporelles de température de la campagne ETun (—) et SOLIT (—)

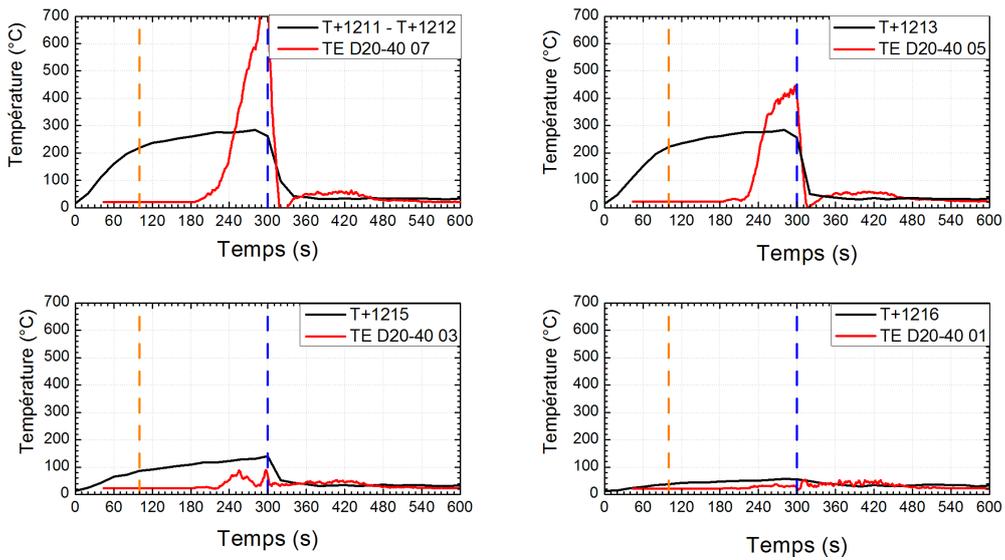


FIG. V.78 – Section ETunT+12 - Comparaison des évolutions temporelles de température de la campagne ETun (—) et SOLIT (—)

V.6.6 Conclusion

Les résultats de ces deux séries d'essais sont cohérents, à tout le moins en ce qui concerne les résultats de température près du foyer. On observe, en évoluant vers l'aval une augmentation de l'écart des niveaux de température entre les campagnes ETun et SOLIT, ceux de cette dernière étant plus élevés (allant jusqu'au double) que ceux mesurés dans le prototype. Les différences de géométrie entre les deux installations (section rectangulaire pour SOLIT et circulaire tronquée pour ETun) peuvent conduire à des écoulements différents, ainsi que la différence de taille relative du foyer par rapport à la section du tunnel.

De plus, les gouttelettes utilisées dans la campagne SOLIT sont plus grosses que celles de la campagne ETun. L'extinction obtenue lors de l'essai de feu de nappe SOLIT est logique, les gouttelettes plus grosses pénétrant plus facilement dans la flamme.

Pour conclure, la comparaison de ces deux campagnes lors de la phase sans aspersion vient conforter la démarche de travail en réduction d'échelle, notamment pour ce qui est de l'échauffement et de l'écoulement des fumées (tout au moins lorsque l'on ne s'éloigne pas trop du foyer). Malheureusement, concernant la phase d'aspersion, les données disponibles sur les essais SOLIT ne sont pas suffisantes pour statuer sur la pertinence de l'approche.

V.7 Synthèse des essais avec aspersion en tunnel

Les essais réalisés avec aspersion constituent le point fort de ce travail.

Différentes configurations ont été mises en œuvre, représentations d'une interaction brouillard d'eau - foyer plus ou moins "directe" : feu de nappe couvert, feu de bûchers présentant une faible porosité, foyers palettes plus aérés, et ce à différentes vitesses de ventilation encadrant la vitesse critique.

Pour les caractéristiques d'aspersion adoptées, fixées à partir de l'expérience de l'installateur, il apparaît que l'activation du système mis en place permet de réduire, dans des proportions importantes (de l'ordre de 65 %), la puissance des feux de nappe ouverts et de la maintenir à ce niveau, à la condition que la vitesse de ventilation ne soit pas trop élevée (inférieure à la vitesse critique). Lorsque cette vitesse est accrue, l'efficacité diminue du fait du soufflage qui tend à avoir un effet opposé.

En revanche, lorsque la surface de combustible est couverte, aucune atténuation significative du débit calorifique du foyer n'est observée, dans la limite de la précision des mesures, et ce quel que soit le niveau de la vitesse de ventilation exploré. Ce résultat est très révélateur de la difficulté pour les gouttelettes d'eau (même pour un brouillard) à venir pénétrer le volume de flamme, pour ce type de configuration.

L'usage d'un combustible liquide *monoespèce* a par ailleurs permis, sur la base d'un bilan aéraulique au sein de l'ouvrage, de déterminer la fraction d'eau *active* injectée. Afin de chercher à optimiser cet aspect quantitatif, des essais de *sectorisation* ont également été menés. Les résultats se sont montrés encourageants puisqu'un taux d'efficacité de 60 % a pu être atteint (signifiant que 60 % de l'eau injectée participe à l'action sur le foyer). Mais il convient de mentionner qu'une aspersion prolongée au-delà du foyer en aval, même si elle accroît sensiblement la consommation en eau, aura un effet de refroidissement notable sur l'écoulement des fumées, bénéfique pour la structure.

Pour ce qui est des essais avec bûchers et palettes, les résultats obtenus sont, de

même, riches d'enseignement. Les bûchers mis en œuvre, peu poreux (55 %), présentent une surface, pour sa grande majorité, peu ou pas accessible au brouillard d'eau, et la chute de puissance obtenue reste limitée. Les empilements de palettes, en revanche, sont bien représentatifs d'un foyer solide suffisamment aéré pour que les gouttelettes réussissent à atteindre les espaces entre les surfaces ou les surfaces elles-mêmes, même très cachées, et y exercent leur action. On atteint des performances équivalentes à celles obtenues avec un foyer liquide ouvert et ces performances apparaissent accrues avec l'intensification de la ventilation, en dépit de l'effet antagoniste attendu de celle-ci. Pour les deux types de foyers solides, la fraction d'eau active a pu être déterminée. Concernant les bûchers, une méthode pour évaluer la modification de régime de combustion du foyer, basée sur les changements au déclenchement de l'aspersion de concentration du monoxyde de carbone et du dioxyde de carbone, a été mise en œuvre. Dans le cas des palettes, la détermination de l'efficacité du brouillard d'eau a été faite directement par l'évaluation du défaut de puissance du foyer.

Le tableau V.26 récapitule les performances en terme d'atténuation de débit calorifique et de rendement $\frac{\text{eau active}}{\text{eau injectée}}$. Cette synthèse comparative permet de remarquer que, par voie de pourcentage, la performance d'atténuation est toujours sensiblement le double de la valeur du rendement. A ce stade de l'étude, ce constat doit toutefois être considéré comme fortuit.

Vitesse de ventilation [-]	Chute de débit calorifique [-]	Efficacité du brouillard d'eau [-]
Foyers heptane découverts		
inférieure à la vitesse critique	65 %	30 %
supérieure à la vitesse critique	33 %	20 %
Foyers heptane découverts - Déclenchement sectorisé de l'aspersion		
supérieure à la vitesse critique	33 %	70 %
Foyers heptane couverts		
supérieure à la vitesse critique	quelques %	quelques %
Foyers bûchers		
inférieure à la vitesse critique	20 %	10 %
supérieure à la vitesse critique	20 %	15 %
Foyers Palettes		
inférieure à la vitesse critique	65 %	20 %
supérieure à la vitesse critique	80 %	32 %

TAB. V.26 – Récapitulatif de la baisse du débit calorifique et de l'efficacité du brouillard d'eau, selon la nature et la configuration du foyer ainsi que selon la vitesse de ventilation

Les mesures de flux rayonnés, côté amont, sont très instructives. Elles montrent un effet de rideau d'eau particulièrement efficace puisque les atténuations mesurées sont, quelles que soient les conditions, toujours de l'ordre de 75 %. L'étude de cet aspect du problème a cependant été volontairement limitée à ce constat de performance "brut" dans la mesure où une analyse et une exploitation fine des résultats doivent faire l'objet d'un travail de thèse spécifique à venir.

Enfin, sur la base des considérations relatives à l'approche réduction d'échelle, développées au chapitre II, nous avons pu déterminer les grandeurs dimensionnantes caractéristiques d'une structure vraie grandeur, en similitude avec le prototype ayant servi de support à la présente étude. De plus, une comparaison avec un essai mené en vraie grandeur a pu être effectuée. Si les caractéristiques précises du brouillard d'eau n'étaient pas accessibles à la date de rédaction de ce mémoire, elle a tout de même permis de mettre en évidence une cohérence des résultats de température et de puissance.

Chapitre VI

Caractérisation des fumées sous aspersion

Sommaire

VI.1 Mesures d'opacimétrie lors des essais avec aspersion	233
VI.1.1 Foyers à combustible liquide	233
VI.1.2 Foyers à combustible solide	236
VI.2 Caractérisation de mélanges fumées/brouillard d'eau, en terme d'interaction avec le rayonnement, à l'échelle laboratoire . . .	239
VI.2.1 Position du problème et mise en œuvre de la méthode	239
VI.2.2 Dispositif expérimental	239
VI.2.3 Résultats des essais AOF	242
VI.2.3.1 Essais sans aspersion	242
VI.2.3.2 Essais avec aspersion	245
VI.2.4 Détermination et analyse des propriétés d'absorption et de dif- fusion du mélange	247
VI.3 Synthèse	251

Caractérisation des fumées sous aspersion

Nous avons vu lors du chapitre I que lors d'un incendie au sein d'un ouvrage tel qu'un tunnel, l'envahissement par les fumées est un élément sécuritaire capital. De plus, nous avons mentionné au chapitre V, qu'en phase avec aspersion, l'injection du brouillard d'eau détruisait leur stratification. La totalité de la section de l'ouvrage est alors remplie par un mélange de fumées et de gouttelettes d'eau, plus ou moins chaud, qui exacerbe les problèmes de visibilité. Il apparaît donc intéressant d'étudier, en sus de l'influence du brouillard d'eau sur le seul foyer, son impact sur les fumées, en terme de caractéristiques optiques. Compte tenu de cet intérêt, souligné avec insistance par les Services de Secours, les mesures d'opacité réalisées en phase d'aspersion au sein du tunnel sont analysées séparément et de manière plus spécifique. Ensuite, une approche, qui reste encore de niveau exploratoire, est proposée pour caractériser de façon plus fondamentale l'interaction rayonnement visible - fuméesensemencées de gouttelettes d'eau, à partir d'une méthodologie originale.

Notons qu'à ce jour, à notre connaissance, aucune étude systématique sur le sujet n'a été publiée en littérature ouverte.

VI.1 Mesures d'opacimétrie lors des essais avec aspersion

VI.1.1 Foyers à combustible liquide

Du fait de la déstratification des fumées consécutive au déclenchement de l'aspersion, on peut s'attendre à ce que la présence des gouttelettes d'eau contribue à l'opacification du milieu. Cependant, lorsqu'on compare les niveaux de visibilité obtenus pour l'essai ETun09 (figure VI.1), mené avec une vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique, on remarque que le brouillard d'eau diminue effectivement la visibilité en partie basse du tunnel, alors qu'elle l'accroît en partie haute. Ce résultat se retrouve pour l'essai ETun12 (figure VI.2). Au déclenchement de l'aspersion, la brusque chute de visibilité est due à l'injection verticale du brouillard d'eau qui tend à chasser les fumées vers le bas. Même si, lorsque la phase humide se prolonge, l'ensemble de la section du tunnel est envahie par le brouillard, l'écart entre les niveaux de visibilité se maintient (environ 40 % dans le cas d'une vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique) jusqu'à la fin de l'essai. Dans le cas de l'essai ETun12, l'écart est moins important et plus variable, mais la visibilité au niveau du sol reste inférieure à celle mesurée plus en hauteur. Il est à remarquer que dans

le cas de cet essai, l'évolution de la visibilité en partie haute est semblable à l'inverse de l'évolution de la puissance (figure V.11, page 172).

L'observation des résultats de visibilité des essais avec sectorisation (essais ETun27 et ETun28, tous les deux menés avec une vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique), permet de retrouver des évolutions semblables à celles de l'essai ETun12 (réalisé dans les mêmes conditions de ventilation, mais avec l'intégralité de la rampe d'aspersion déclenchée). Lors de la phase sèche, les niveaux de visibilité sont similaires entre les deux essais quel que soit l'opacimètre considéré. En revanche, lors de la phase d'aspersion, on remarque que, si au cours de l'essai ETun27 la visibilité est, à l'instar de l'essai ETun12, plus faible dans la partie basse du tunnel (figure VI.3), ce n'est pas le cas pour l'essai ETun28 (figure VI.4). Dans le premier cas, le premier secteur aval est déclenché (voir figure V.28) et le brouillard des buses de ce secteur est injecté dans les fumées. Lors de l'essai ETun28, seul le secteur amont est déclenché, ce qui fait que les gouttelettes sont injectées dans l'écoulement d'air frais avant que celui-ci n'atteigne le foyer.

La répercussion des variations de puissance sous aspersion est, dans le cas des deux essais de sectorisation, clairement discernable sur les mesures de visibilité. On remarque que lorsque le seul secteur amont est déclenché, la visibilité est semblable à l'essai de référence sans aspersion (essai ETun02) : le défaut maximum de visibilité est surtout localisé à partir de l'opacimètre situé en partie haute du tunnel. Ce n'est que dans le cas où le secteur aval est lui aussi activé (essai ETun27), que la visibilité baisse plus dans la partie basse du foyer, bien que les visibilités obtenues par les deux opacimètres restent proches.

Hormis dans le cas de l'essai ETun28, lors duquel seul le secteur amont est déclenché, cette répartition verticale de visibilité est due aux fumées, rabattues par les gouttelettes, qui elles aussi ont tendance à se concentrer en partie basse de l'écoulement.

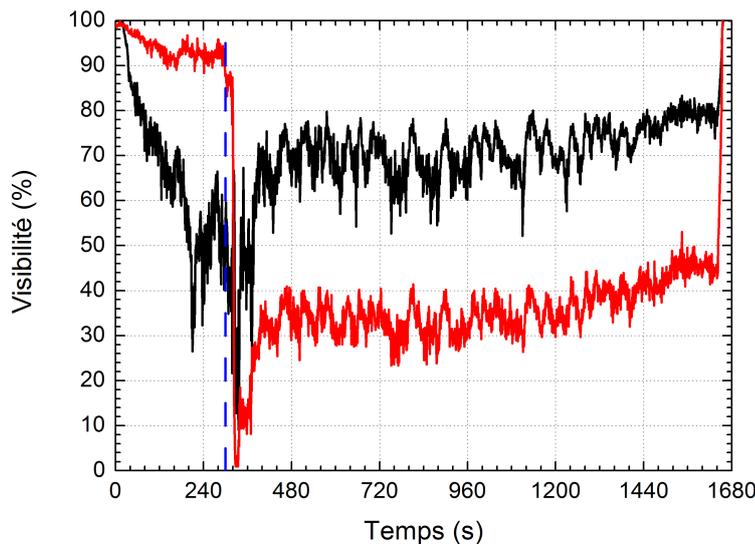


FIG. VI.1 – Essai Etun09 - Evolution de la visibilité en section S+23 : (—) : à 50 cm du sol et (—) : à 50cm du plafond

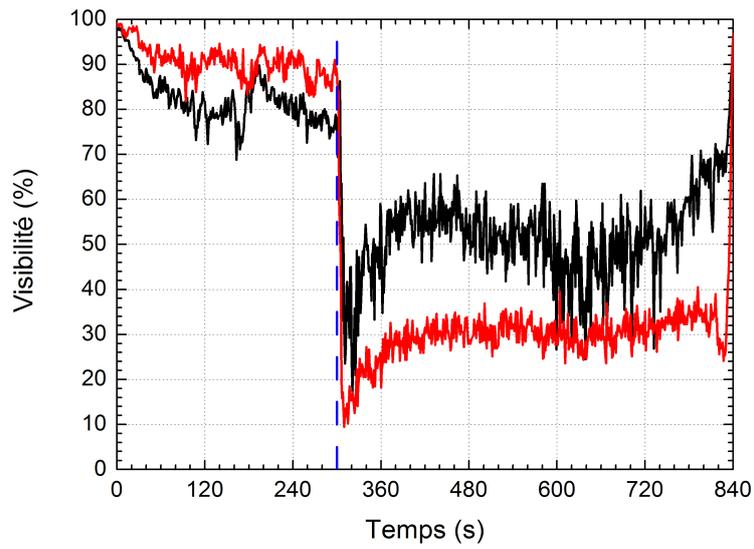


FIG. VI.2 – Essai Etun12 - Evolution de la visibilité en section S+23 : (—) : à 50 cm du sol et (—) : à 50cm du plafond

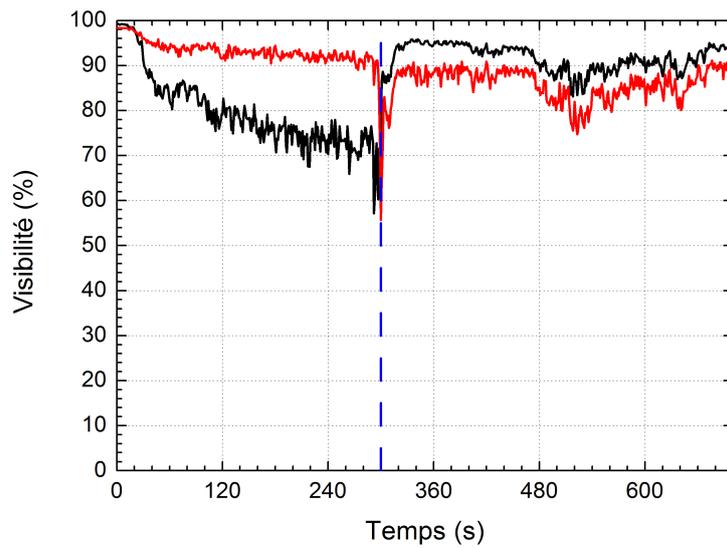


FIG. VI.3 – Essai Etun27 - Evolution de la visibilité en section S+23 : (—) : à 50 cm du sol et (—) : à 50cm du plafond

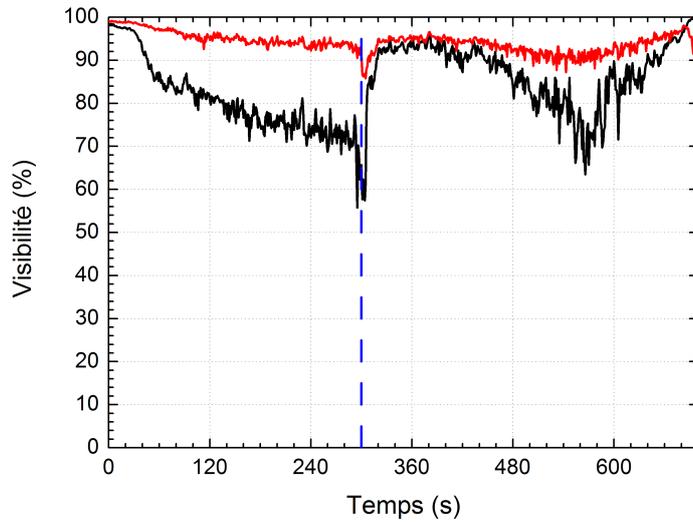


FIG. VI.4 – Essai Etun28 - Evolution de la visibilité en section S+23 : (—) : à 50 cm du sol et (—) : à 50cm du plafond

VI.1.2 Foyers à combustible solide

Dans le cas des foyers à combustible solide, on constate tout d'abord le même résultat concernant la phase sèche que celui évoqué au chapitre IV pour les essais de référence : les fumées émises par le foyer ne font que très légèrement chuter la visibilité. La baisse de visibilité visible au début de l'essai correspond à la combustion de l'heptane servant à l'allumage du bûcher. Lors de la phase d'aspersion, on relève la même tendance que celle évoquée au paragraphe précédent. La visibilité en partie basse du tunnel devient plus faible que celle mesurée plus haut. Ceci est illustré par la figure VI.5 pour l'essai ETun19, lors duquel la vitesse de ventilation est inférieure à la vitesse critique et sur la figure VI.6 pour l'essai ETun21, lors duquel elle est supérieure à la vitesse critique. Cette chute de visibilité est donc essentiellement due au brouillard d'eau. On peut aussi remarquer que la baisse de visibilité est plus importante lorsque la vitesse de ventilation est inférieure à la vitesse critique. Dans le cas où elle est supérieure, les niveaux de visibilité restent tout d'abord aux alentours de 80 %, avant de diminuer progressivement au cours de la phase humide.

En ce qui concerne les essais avec foyers d'empilements de palettes (figures VI.7 et VI.8), l'évolution de la visibilité est similaire, là aussi, lors de la phase sèche, bien que d'un niveau légèrement plus élevé pour l'essai ETun24 (vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique). Pour ce dernier (figure VI.7), une fois l'aspersion déclenchée, la visibilité diminue pour les deux hauteurs de mesure aux alentours de 10 %, mais son niveau en partie haute augmente ensuite, reflétant globalement l'évolution de puissance du foyer sous aspersion. En partie basse, elle reste cependant très basse, ne dépassant pas 20 % de la visibilité initiale. Dans le cas où la vitesse de ventilation est supérieure à la vitesse critique, on relève une évolution temporelle des niveaux de visibilité similaire à ceux des essais bûchers menés avec une vitesse de ventilation inférieure à la vitesse critique : ils

restent globalement constants lors de toute la phase d'aspersion, entre 50 et 65 % pour l'opacimètre haut, avec un écart d'environ 30 % de visibilité entre les deux mesures. Là encore, la visibilité mesurée sous aspersion est plus élevée en partie haute du tunnel.

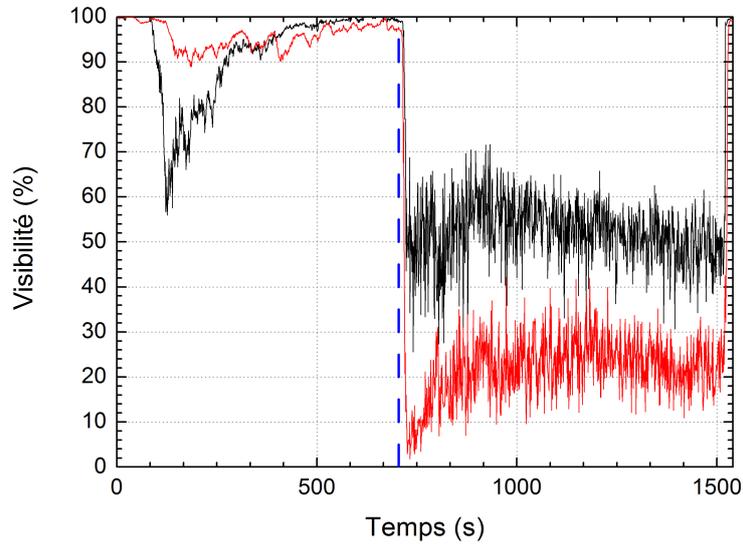


FIG. VI.5 – Essai Etun19 - Evolution de la visibilité en section S+23 : (—) : à 50 cm du sol et (—) : à 50cm du plafond

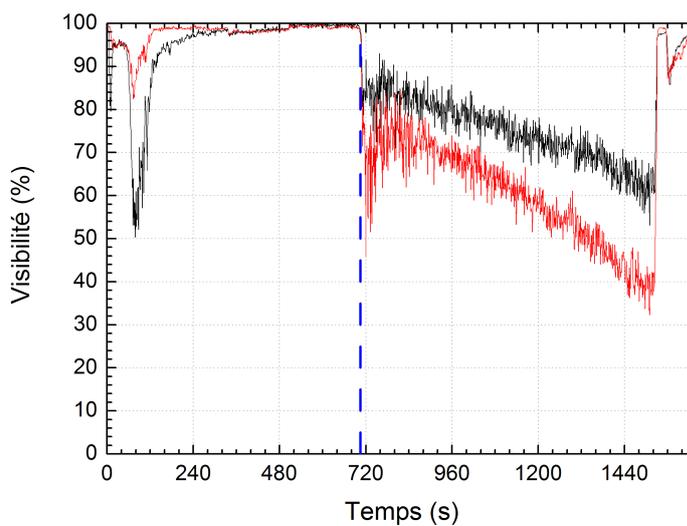


FIG. VI.6 – Essai Etun21 - Evolution de la visibilité en section S+23 : (—) : à 50 cm du sol et (—) : à 50cm du plafond

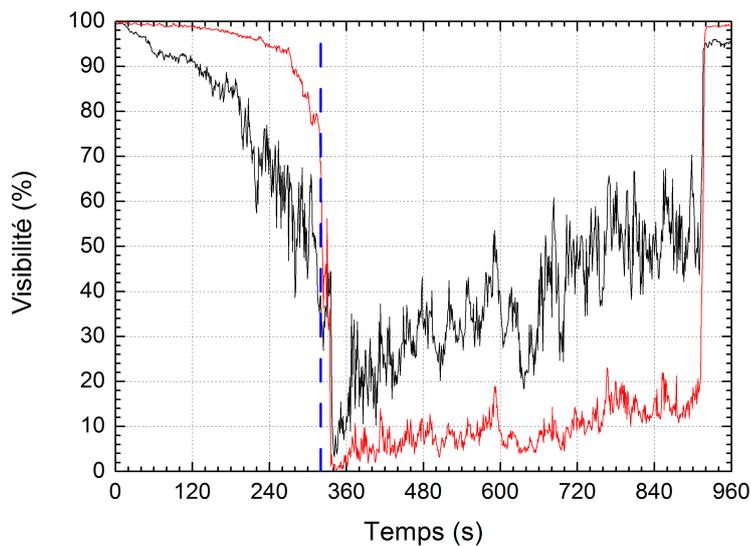


FIG. VI.7 – Essai Etun24 - Evolution de la visibilité en section S+23 : (—) : à 50 cm du sol et (—) : à 50cm du plafond

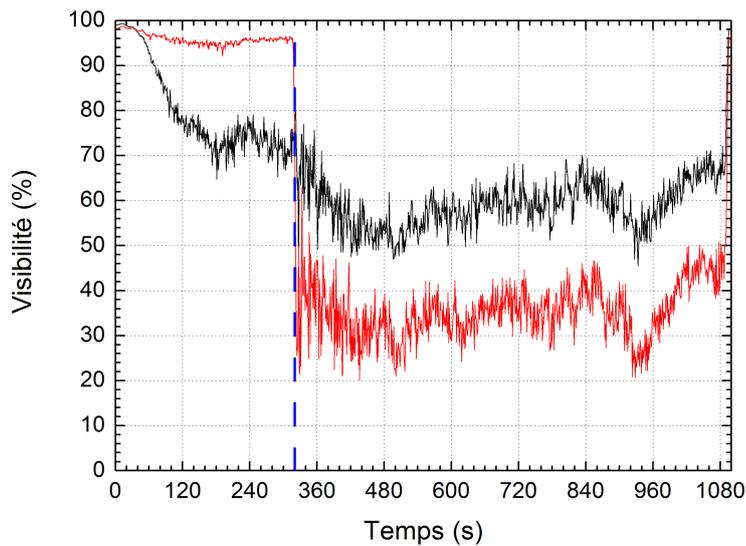


FIG. VI.8 – Essai Etun25 - Evolution de la visibilité en section S+23 : (—) : à 50 cm du sol et (—) : à 50cm du plafond

VI.2 Caractérisation de mélanges fumées/brouillard d'eau, en terme d'interaction avec le rayonnement, à l'échelle laboratoire

VI.2.1 Position du problème et mise en œuvre de la méthode

La caractérisation d'un milieu gazeux chargé en particules, en terme d'interaction avec le rayonnement, peut se faire, nous l'avons vu, à partir des mesures d'atténuation de ce rayonnement. Cette atténuation est la conséquence de phénomènes d'absorption et de diffusion. La grandeur la plus commune caractérisant la propriété d'un tel milieu est le coefficient d'extinction K_{ext} , fonction de la longueur d'onde de rayonnement considérée.

En fait, les gaz n'interfèrent de façon significative avec le rayonnement que dans le domaine infrarouge et dans des fenêtres de longueur d'onde bien spécifiques à chaque espèce. Dans le domaine de rayonnement visible (0,4 - 0,8 μm), qui seul nous intéresse ici, l'atténuation n'est due qu'aux espèces particulières : particules de suies et gouttelettes d'eau.

L'interaction rayonnement - particules peut être analysée à partir de la théorie de Mie [82] qui décrit, de manière rigoureuse, l'interaction d'un rayonnement électromagnétique avec des obstacles sphériques. Le détail de cette théorie, ancienne et très usitée, peut être appréhendé à partir de nombreux ouvrages de base et n'est donc pas repris ici. Tous les calculs présentés plus loin, mettant à profit cette théorie, ont été effectués à l'aide du logiciel MATLAB, en utilisant les fonctions présentées dans [83]. Les mesures d'atténuation qui nous intéressent peuvent être définies comme suit.

Pour les seules fumées, l'atténuation du rayonnement sera due à l'absorption des particules de suies. En effet, la taille des particules de suies (de l'ordre de 50 - 70 nm) est très petite devant la longueur d'onde (400 - 800 nm) et, dans ces conditions, l'effet de diffusion qui leur est attribuable peut être considéré comme négligeable (approximation dite de Rayleigh de la théorie de Mie). On pourra écrire :

$$K_{ext,\lambda} = K_{abs,\lambda} \quad (\text{VI.1})$$

Pour un mélange fumées - brouillard d'eau, l'atténuation sera due à l'absorption des particules de suies, à l'absorption et à la diffusion des gouttelettes d'eau, et on pourra écrire :

$$K_{ext,\lambda} = K_{abs,s,\lambda} + K_{abs,g,\lambda} + K_{dif,g,\lambda} \quad (\text{VI.2})$$

L'indice "s" se réfère aux propriétés des particules de suies, et l'indice "g" se réfère à celles des gouttelettes d'eau.

Nous avons donc cherché à mettre en œuvre un dispositif expérimental, permettant de réaliser de telles mesures dans le domaine de longueur d'onde visible.

VI.2.2 Dispositif expérimental

La mise en œuvre du dispositif a consisté à réaliser un banc expérimental permettant d'injecter le brouillard au sein des fumées, sans altérer le foyer en lui-même, afin de

s'assurer que le changement de leurs propriétés d'atténuation soit dû au brouillard et non à une modification du régime de combustion.

Le dispositif consiste en une hotte, sous laquelle est placée un foyer heptane (cuve de 15 cm de diamètre), dont la masse est suivie en cours d'essai par un peson. Grâce aux forces d'entraînement dues au foyer, les fumées que celui-ci émet sont collectées par la hotte et dirigées ensuite vers une section de cheminée circulaire où l'écoulement est stabilisé (figure VI.10). Au-dessus de la cheminée, quatre rayons lasers de différentes longueurs d'onde traversent la colonne de fumée, réduisant le pas de mesure du coefficient d'extinction au diamètre de la cheminée (12 cm) (figures VI.12 et VI.11). L'intensité lumineuse de chaque rayon est mesurée par une cellule receptrice, équipée d'un filtre de longueur d'onde adaptée afin de s'affranchir du parasitage par la lumière ambiante. Ces quatre sources lumineuses sont :

- un laser argon opérant à 488 nm
- un laser hélium-néon opérant à 543 nm
- un laser hélium-néon opérant à 633 nm
- une diode laser opérant à 780 nm

A ceci est ajouté une sonde Pitot, associée à un thermocouple, permettant de déterminer le débit volumique des fumées.

Le brouillard d'eau est injecté directement au-dessus de la flamme visible, au niveau de la base de la cheminée de la hotte. La buse est fixée sur un support incliné de 60 °. La buse injecte l'eau sous forme d'un cône. Afin d'éviter qu'une partie du brouillard ne soit émise en direction du foyer et ne retombe sur la nappe ou le peson, une plaque d'acier est placée sous la buse, inclinée comme elle, afin de couper le jet. On diminue ainsi la quantité d'eau injectée sous forme brouillard, mais on évite de perturber le foyer avec le brouillard d'eau. Une collerette a été fixée sous la hotte, afin de s'assurer que l'eau qui se dépose sur les parois de celle-ci ne retombe pas elle non plus dans le foyer ou ne perturbe la mesure de pesée.

Ce brouillard d'eau est généré par un injecteur bifluide, réglé pour délivrer un débit massique d'eau de $3,5 \text{ g.s}^{-1}$. La distribution de taille des gouttelettes correspondante est illustrée sur la figure VI.9. Le maximum est obtenu pour la valeur $30 \mu\text{m}$. Nous considérerons par la suite que le brouillard est monodisperse, composé de gouttelettes de ce diamètre.

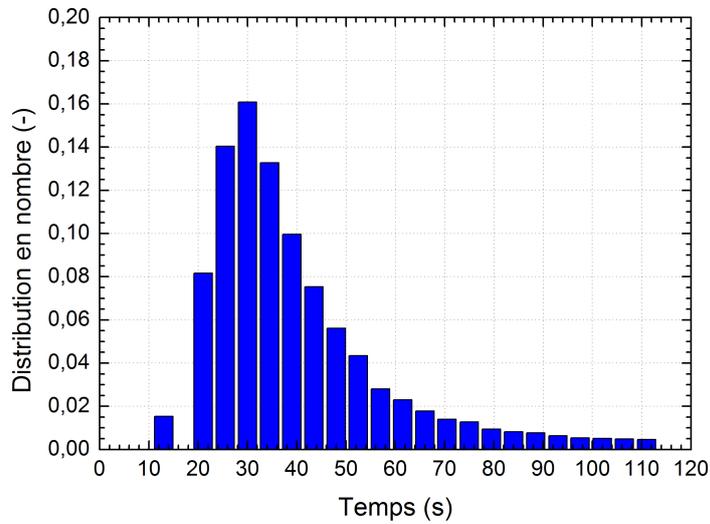


FIG. VI.9 – Distribution de taille en nombre de gouttelettes de la buse utilisée

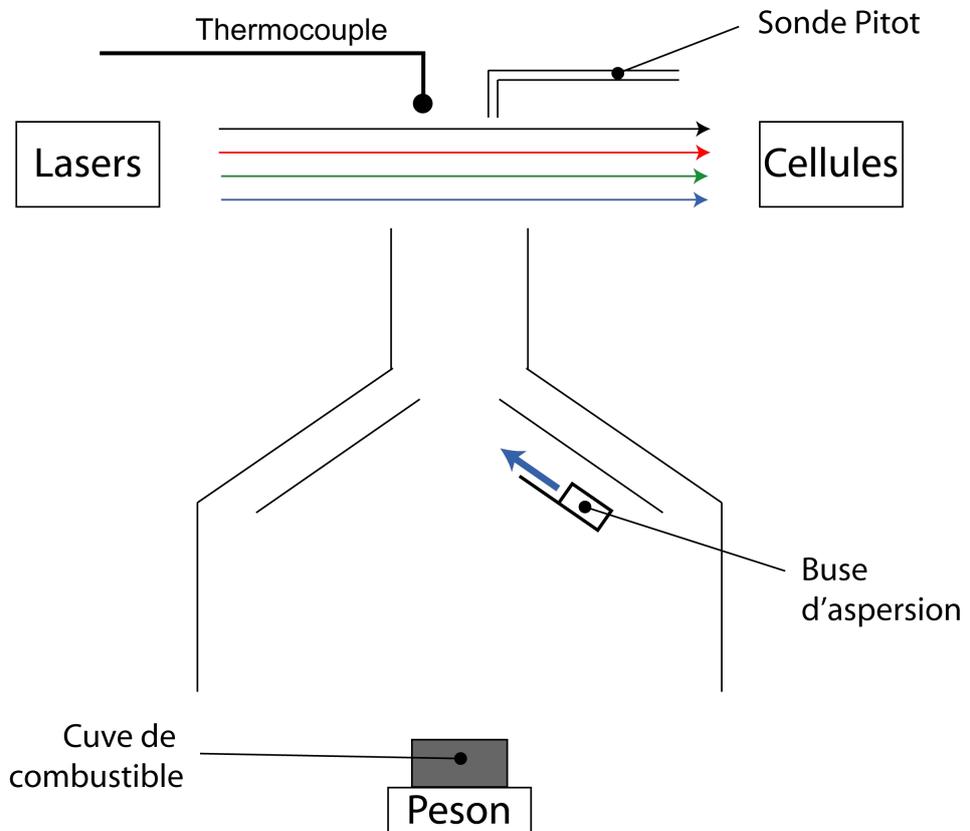


FIG. VI.10 – Schéma du dispositif de caractérisation des fumées

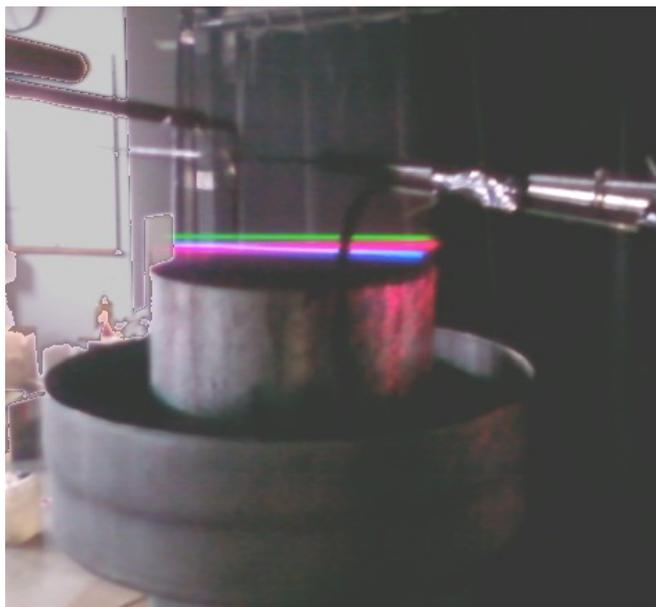


FIG. VI.11 – Vue de la zone de mesure



FIG. VI.12 – Vue du foyer en phase sèche

Cette série d'essais est appelée essais AOF (Analyse Optique des Fumées). Pour chaque cas (avec ou sans aspersion), trois essais ont été réalisés. Les résultats présentés ci-après sont des moyennes de ces trois essais.

VI.2.3 Résultats des essais AOF

VI.2.3.1 Essais sans aspersion

L'évolution temporelle des coefficients d'extinction obtenus lors des essais secs est présentée sur la figure VI.13.

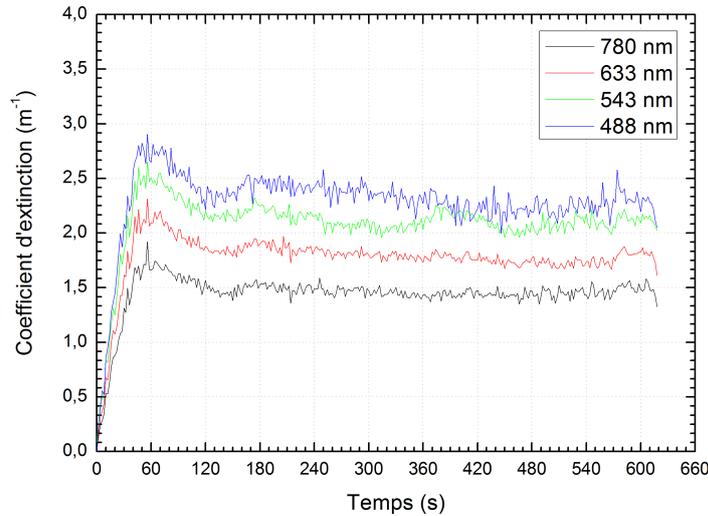


FIG. VI.13 – Essais AOF sans brouillard d'eau - Evolution temporelle du coefficient d'extinction - Cuve de diamètre 150 mm - (—) : $\lambda = 780\text{nm}$, (—) : $\lambda = 633\text{nm}$, (—) : $\lambda = 543\text{nm}$, (—) : $\lambda = 488\text{nm}$

On observe, qu'une fois le foyer en régime établi, le coefficient d'extinction est quasi-constant, ne présentant qu'une faible décroissance régulière. La "bosse" visible au début de l'essai est due à un phénomène de bouffée de fumées se formant lorsque le foyer monte en puissance. Les premières fumées froides stagnent sous la hotte. Lorsque celle-ci est suffisamment échauffée, les forces de flottabilité du panache sont suffisantes pour entrainer la totalité des fumées dans le conduit.

Le coefficient d'extinction qui est, comme nous venons de le voir, un coefficient d'absorption dû aux suies, varie en raison inverse de la longueur d'onde. Il peut s'exprimer, selon la théorie, sous la forme :

$$K_{ext,\lambda} = \frac{B f_v}{\lambda^p} \quad (\text{VI.3})$$

avec :	$K_{ext,\lambda}$	$[\text{m}^{-1}]$	Coefficient d'extinction à la longueur d'onde λ
	B_λ	$[-]$	Facteur fonction des indices optiques des particules
	f_v	$[-]$	Fraction volumique de suies
	λ	$[\text{m}]$	Longueur d'onde
	p	$[-]$	Exposant en théorie égal à 1

On vérifie sur les essais que la valeur moyenne de cet exposant p est de 0,96. Ceci vérifie bien que l'effet de la diffusion est négligeable devant celui de l'absorption, donc que l'hypothèse stipulant que le paramètre de taille $\beta = \frac{\pi d}{\lambda}$ est petit est bien vérifiée (approximation de Rayleigh).

Notons que le coefficient d'extinction est une grandeur extensive, liée à un volume de fumée contenant une concentration de particules, et que sa seule donnée ne peut être suffisante pour caractériser la fumée produite par combustion d'un matériau. Pour ce faire, on peut définir le rendement en particules de suies ε_p (représentant la fraction de la masse du combustible consommé convertie en suies) comme il vient :

$$\varepsilon_p = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_c} \quad (\text{VI.4})$$

avec ε_p [-] Rendement en particules de suies
 \dot{m}_p [kg.s⁻¹] Débit massique de particules de suies
 \dot{m}_c [kg.s⁻¹] Débit massique de combustible

Le débit massique de particules de suies \dot{m}_p est défini par :

$$\dot{m}_p = \dot{V} \cdot f_v \cdot \rho_p \quad (\text{VI.5})$$

avec : \dot{V} [m³.s⁻¹] Débit volumique des fumées
 f_v [-] fraction volumique des particules de suies
 ρ_p [kg.m⁻³] masse volumique des particules de suies

On retient communément pour la valeur de la masse volumique des particules de suies $\rho_p = 1800 \text{ kg.m}^{-3}$. A partir de la relation VI.3, on peut déterminer la fraction volumique de ces particules si l'on connaît le facteur B_λ . Celui-ci est fonction des indices optiques des suies :

$$B_\lambda = \frac{36\pi n_1 n_2}{(n_1^2 - n_2^2 + 2)^2 + 4n_1^2 n_2^2} \quad (\text{VI.6})$$

Les indices optiques n_1 et n_2 varient en fonction de la longueur d'onde. De nombreuses valeurs sont disponibles dans la littérature. Chang et Charalampopoulos [84] sont néanmoins les seuls à les avoir exprimés directement en fonction de la longueur d'onde :

$$n_1 = 1.811 + 0.1263 \ln(\lambda) + 0.027 \ln(\lambda)^2 + 0.0417 \ln(\lambda)^3 \quad (\text{VI.7})$$

$$n_2 = 0,5821 + 0,1213 \ln(\lambda) + 0,2309 \ln(\lambda) - 0,01 \ln(\lambda)^3 \quad (\text{VI.8})$$

Le tableau VI.1 montre que les valeurs obtenues pour les quatre longueurs d'onde qui nous intéressent sont proches.

Longueur d'onde	
[nm]	[-]
488	4,7126
543	4,5021
633	4,2834
780	4,1288

TAB. VI.1 – Valeurs du facteur B pour les longueurs d'onde utilisées dans le présent travail

A partir des relations VI.3, VI.4 et VI.5, on peut exprimer le rendement en particules de suies en fonction des grandeurs mesurées sur le banc d'essai et du facteur B :

$$\varepsilon_p = \frac{\rho_p K_{e,\lambda} \dot{V}}{B_\lambda \dot{m}_c} \quad (\text{VI.9})$$

Le tableau VI.2 présente les valeurs de rendement ainsi obtenues. Cette grandeur est intrinsèque au combustible et donc indépendante des conditions dans lesquelles il a été déterminé.

Essai	SEC01	SEC02	SEC03
ε_p (%)	3,6	4,07	3,62
ε_p moyen (%)	3,76		

TAB. VI.2 – Valeurs du rendement en particules de suies ε_p pour les essais sans aspersion

Ces valeurs présentent un accord tout à fait satisfaisant avec celle généralement admise dans la littérature, qui est de l'ordre de 5 %.

VI.2.3.2 Essais avec aspersion

La cuve utilisée dans le cadre de cette étude est de petit diamètre. Une des craintes exprimées avant les essais concernait la possible chute de gouttelettes sur le foyer, si l'entraînement du panache n'était pas suffisant. La mesure de perte de masse a permis de suivre la puissance du foyer, afin de pouvoir constater la chute ou non de gouttelettes dans le feu ou sur le plateau de mesure du peson. On peut vérifier, par exemple en comparant les puissances déterminées pour les essais SEC03 et BE02, illustrées sur la figure VI.14, que l'introduction du brouillard d'eau ne perturbe aucunement le foyer.

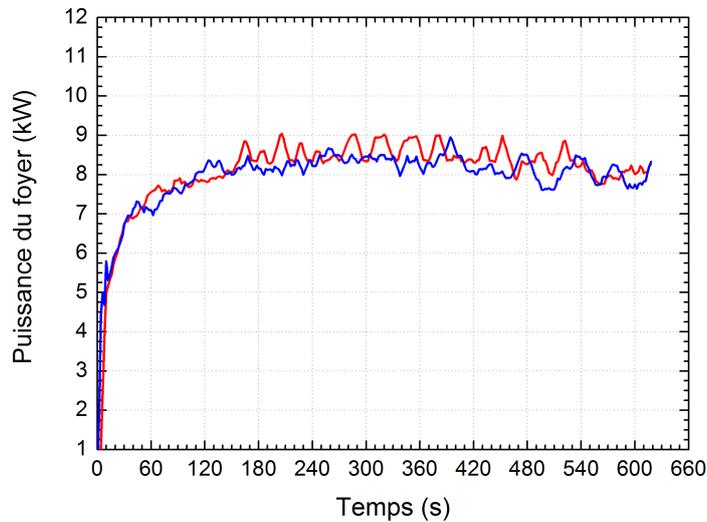


FIG. VI.14 – Essais AOF-SEC03 et BEO2 - Puissance du Foyer - (—) : Essai 150SEC03, (—) : Essai 150BE02

En traçant l'évolution temporelle du coefficient d'extinction pour chaque longueur d'onde (figure VI.15), on peut remarquer une nette augmentation du coefficient d'extinction due à l'activation du brouillard d'eau. Cette augmentation est logique car les gouttelettes présentes dans les fumées absorbent et diffusent la lumière. Le tableau VI.3 récapitule les écarts mesurés de coefficient d'extinction ΔK_{ext} entre la phase sèche et la phase humide, pour chaque longueur d'onde. On est assuré de la présence de gouttelettes d'eau dans le mélange, car la température au niveau du point de mesure est inférieure à 100 °C (figure VI.16).

Longueur d'onde	ΔK_{ext}
[nm]	[m ⁻¹]
780	0,30
633	0,30
543	0,35
488	0,40

TAB. VI.3 – Essais AOF - Ecart du coefficient d'extinction mesurés entre la phase sèche et la phase humide

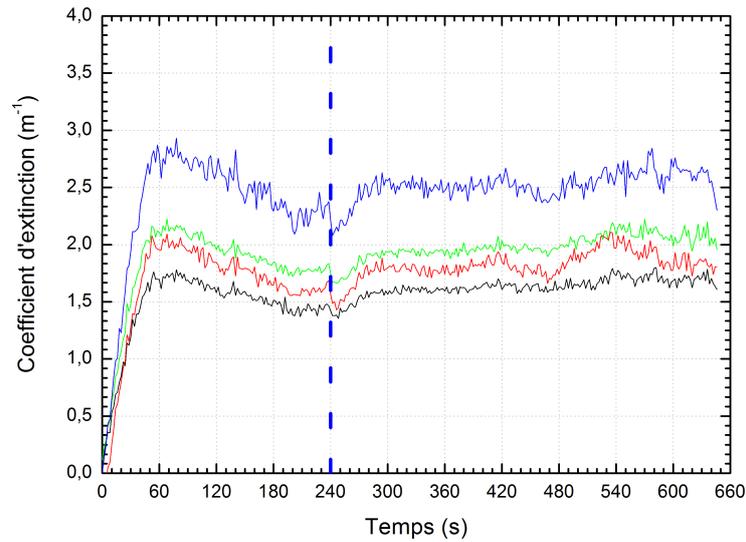


FIG. VI.15 – Essais AOF150 avec brouillard d’eau - Evolution temporelle du coefficient d’extinction - (—) : $\lambda = 780\text{nm}$, (—) : $\lambda = 633\text{nm}$, (—) : $\lambda = 543\text{nm}$, (—) : $\lambda = 488\text{nm}$

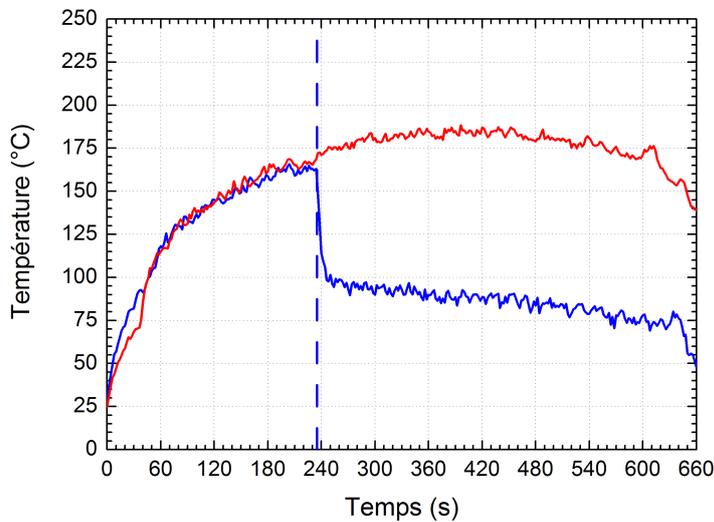


FIG. VI.16 – Essais AOF - Evolution temporelle de la température au point de mesure - (—) : Essais 150SEC, (—) : Essais 150BE

VI.2.4 Détermination et analyse des propriétés d’absorption et de diffusion du mélange

Nous avons vu au paragraphe précédent que pour un mélange fumées - brouillard d’eau, l’atténuation du rayonnement est due à la somme de l’absorption des particules de

suies et de l'absorption et de la diffusion des gouttelettes d'eau (relation VI.2).

Toutefois, la cellule mesurant le rayonnement après atténuation présente une certaine surface et récupère donc une partie de l'énergie diffusée hors direction du rayonnement incident (voir figure VI.17) lorsque la diffusion avant est importante (ce qui peut être le cas avec des gouttelettes d'eau aux longueurs d'onde considérées). L'extinction mesurée par le détecteur $(P_{ext})_{mes}$ doit donc être corrigée de ce taux de récupération. Ainsi, si on considère, dans un premier temps, le cas d'une particule isolée de rayon a , impacté par un rayon de longueur d'onde λ , la relation d'extinction peut s'écrire :

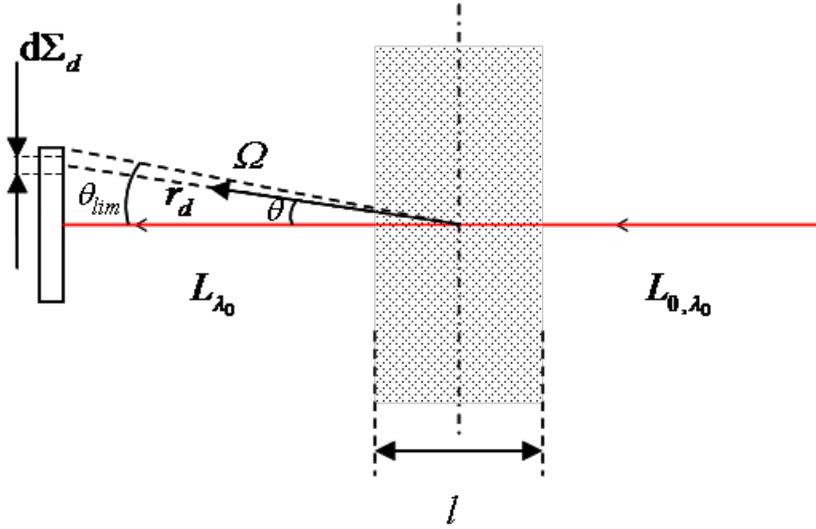


FIG. VI.17 – Schéma de principe de la mesure de l'atténuation de rayonnement

$$(P_{ext})_{\lambda} = (P_{ext})_{mes} + P_{dif,\lambda}(\Sigma_d) \quad (\text{VI.10})$$

$P_{dif,\lambda_0}(\Sigma_d)$ est la puissance diffusée sur le détecteur qui s'exprime par :

$$P_{dif,\lambda}(\Sigma_d) = \iint_{\Sigma_d} L_{dif,\lambda}(\Omega) d\Sigma_d \quad (\text{VI.11})$$

$L_{dif,\lambda}(\Omega)$ est la luminance de l'onde diffusée en un point du détecteur. En fait, pour une particule, Van de Hulst [85] a montré que :

$$L_{dif,\lambda}(\Omega) = \frac{\pi a^2 Q_{dif,a,\lambda} \Phi_{a,\lambda}(\Omega) L_{0,\lambda}}{4\pi r_d^2} \quad (\text{VI.12})$$

$\Phi_{a,\lambda}(\Omega)$ étant la fonction de phase. De plus, par définition :

$$(P_{ext})_{\lambda} = L_{0,\lambda} \pi a^2 Q_{abs,a,\lambda} + L_{0,\lambda} \pi a^2 Q_{dif,a,\lambda} \quad (\text{VI.13})$$

donc

$$(P_{ext})_{\lambda} = L_{0,\lambda} \left[\pi a^2 Q_{abs,a,\lambda} + \pi a^2 Q_{dif,a,\lambda} \left(1 - \frac{\iint_{\Sigma_d} L_{dif,\lambda}(\Omega) d\Sigma_d}{L_{0,\lambda} \pi a^2 Q_{dif,a,\lambda}} \right) \right] \quad (\text{VI.14})$$

En définissant la grandeur $R_{a,\lambda}$ telle que :

$$R_{a,\lambda} = \frac{\int \int_{\Sigma_d} L_{dif,\lambda}(\Omega) d\Sigma_d}{L_{0,\lambda} \pi a^2 Q_{dif,a,\lambda}} \quad (\text{VI.15})$$

on peut écrire :

$$(P_{ext})_\lambda = L_{0,\lambda} [\pi a^2 Q_{abs,a,\lambda} + \pi a^2 Q_{dif,a,\lambda} (1 - R_{a,\lambda})] \quad (\text{VI.16})$$

$R_{a,\lambda}$ quantifie l'énergie diffusée sur la cellule par rapport à l'énergie diffusée dans toutes les directions. Lorsque $R_{a,\lambda}$ vaut 0, la valeur de la puissance d'extinction mesurée est égale à la valeur de la puissance d'extinction réelle. Quand $R_{a,\lambda}$ vaut 1, la valeur de la puissance d'extinction mesurée est la valeur de la puissance d'absorption. Son expression peut être précisée, en introduisant dans la relation VI.15 l'écriture de $L_{dif,\lambda}(\Omega)$ (relation VI.12). Ceci donne :

$$R_{a,\lambda} = \frac{\iint_{\Sigma_d} \Phi_{a,\lambda}(\Omega) d\Sigma_d}{4\pi r_d^2} \quad (\text{VI.17})$$

or

$$d\Sigma_d = 2\pi r_d^2 \sin(\theta) d\theta \quad (\text{VI.18})$$

donc on peut écrire $R_{a,\lambda}$ sous la forme :

$$R_{a,\lambda} = \int_0^{\theta_{lim}} \Phi_{a,\lambda} \sin(\theta) d\theta \quad (\text{VI.19})$$

avec : θ_{lim} [rad] Angle de vue maximum du détecteur sur la particule

En prenant en compte ce phénomène de récupération, la relation VI.2 devient :

$$K_{ext,\lambda} = K_{abs,s,\lambda} + K_{abs,g,\lambda} + K_{dif,g,\lambda} (1 - R_{a,\lambda}) \quad (\text{VI.20})$$

Les coefficients d'absorption et de diffusion peuvent être exprimés respectivement en fonction de l'efficacité énergétique d'absorption ($Q_{abs,\lambda}$) et de diffusion ($Q_{dif,\lambda}$) des obstacles considérés. En appliquant ceci aux gouttelettes d'eau, on peut écrire :

$$K_{abs,g,\lambda} = \pi a^2 \cdot N_g \cdot Q_{abs,g,\lambda} \quad (\text{VI.21})$$

$$K_{dif,g,\lambda} = \pi a^2 \cdot N_g \cdot Q_{dif,g,\lambda} \quad (\text{VI.22})$$

avec : N_g [m^{-3}] Densité numérique de gouttelettes d'eau

Pour un brouillard monodisperse donné, on peut écrire :

$$\frac{K_{abs,g,\lambda}}{K_{dif,g,\lambda}} = \frac{\pi a^2 \cdot N_g \cdot Q_{abs,g,\lambda}}{\pi a^2 \cdot N_g \cdot Q_{dif,g,\lambda}} = \frac{Q_{abs,g,\lambda}}{Q_{dif,g,\lambda}} \quad (\text{VI.23})$$

Sous l'hypothèse que la diffusion indépendante est vérifiée, ce qui est le cas ici, la relation VI.20 peut alors s'écrire comme :

$$K_{ext,\lambda} = K_{abs,s,\lambda} + K_{dif,g,\lambda} \left(1 - R_{a,\lambda} + \frac{Q_{abs,g,\lambda}}{Q_{dif,g,\lambda}} \right) \quad (VI.24)$$

Dans ce cas, les efficacités énergétiques d'absorption et de diffusion $Q_{abs,g,\lambda}$ et $Q_{dif,g,\lambda}$ sont indépendantes de la densité numérique de gouttelettes et de l'épaisseur du milieu chargé et peuvent être calculées d'après la théorie.

La concentration de particules de suies et de gouttelettes étant inconnues, la mesure du coefficient d'extinction à une seule longueur d'onde λ_0 ne suffit donc pas pour déterminer la part d'absorption due aux suies et la part de diffusion attribuable aux gouttelettes. Il est nécessaire pour ceci de faire intervenir une mesure d'extinction effectuée à une seconde longueur d'onde λ_1 . De plus, il est nécessaire pour fermer le système d'avoir une relation entre les mesures à ces deux longueurs d'onde. Dans notre cas, nous utiliserons les rapports de coefficients d'absorption des suies et de diffusion des gouttelettes donnés par la théorie de Mie :

$$\frac{K_{abs,s,\lambda_0}}{K_{abs,s,\lambda_1}} = \frac{Q_{abs,s,\lambda_0}}{Q_{abs,s,\lambda_1}} \quad (VI.25)$$

$$\frac{K_{dif,g,\lambda_0}}{K_{dif,g,\lambda_1}} = \frac{Q_{dif,g,\lambda_0}}{Q_{dif,g,\lambda_1}} \quad (VI.26)$$

En combinant la relation VI.24 appliquée à deux longueurs d'onde λ_0 et λ_1 et les rapports VI.25 et VI.26, nous pouvons déterminer les coefficients de diffusion des gouttelettes et d'absorption des suies, par exemple pour la longueur d'onde λ_0 :

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{dif,g,\lambda_0} = \frac{K_{ext,\lambda_1} + \frac{Q_{abs,s,\lambda_1}}{Q_{abs,s,\lambda_0}} K_{ext,\lambda_0}}{\frac{Q_{abs,s,\lambda_1}}{Q_{abs,s,\lambda_0}} \left[1 - R_{\lambda_0} + \frac{Q_{abs,g,\lambda_0}}{Q_{dif,g,\lambda_0}} \right] + \frac{Q_{dif,g,\lambda_1}}{Q_{dif,g,\lambda_0}} \left[1 - R_{\lambda_1} + \frac{Q_{abs,g,\lambda_1}}{Q_{dif,g,\lambda_0}} \right]} \\ K_{abs,s,\lambda_0} = \left[1 - R_{\lambda_0} + \frac{Q_{abs,g,\lambda_0}}{Q_{dif,g,\lambda_0}} \right] K_{dif,g,\lambda_0} - K_{ext,\lambda_0} \end{array} \right.$$

Les calculs ont été effectués pour les longueurs d'onde 633 et 780 nm, longueurs d'onde pour lesquelles les deux sources offraient une stabilité et une fiabilité maximum. Cependant, l'ensemble des mesures est ici effectué dans le spectre visible. L'écart limité entre les différentes longueurs d'onde ne permet pas de s'affranchir totalement des erreurs de mesures. On détermine alors, pour la longueur d'onde 633 nm le coefficient de diffusion des gouttelettes selon le raisonnement présenté au-dessus. On utilise ensuite la relation VI.24 pour calculer le coefficient d'absorption des suies. On peut ensuite calculer, avec les relations VI.25, les coefficients d'absorption des suies et de diffusion des gouttelettes pour les longueurs d'onde utilisées. Le tableau VI.4 récapitule l'ensemble des données calculées ou mesurées lors de ce raisonnement.

Grandeurs	Unité	Longueurs d'onde			
		488 nm	543 nm	633 nm	780 nm
$Q_{abs,s}$	[-]	$5,1 \cdot 10^{-1}$	$4,2 \cdot 10^{-1}$	$3,4 \cdot 10^{-1}$	2,8
$Q_{abs,g}$	[-]	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
$Q_{dif,g}$	[-]	2,087	2,074	2,118	2,115
R_λ	[-]	0,170	0,167	0,162	0,154
K_{ext}	$[m^{-1}]$	2,30	2,10	2,00	1,45
$K_{abs,s}$	$[m^{-1}]$	0,55	0,45	0,37	0,28
$K_{dif,g}$	$[m^{-1}]$	2,34	1,98	1,94	1,33
$K_{abs,s}$ SEC	$[m^{-1}]$	2,20	2,00	1,80	1,35

TAB. VI.4 – Résultat des calculs des efficacités énergétiques et du facteur R_λ , du coefficient d'absorption des suies et du coefficient de diffusion des gouttelettes sous phase d'aspersion et du coefficient d'absorption des suies lors des essais sans aspersion

On peut constater une importante baisse de la part d'atténuation attribuable aux seules suies, ce qui pourrait être significatif de l'apparition de phénomènes de coagulation ou d'agglomération lorsque suies et gouttelettes d'eau se trouvent mélangées. Cette tendance concorde avec les résultats obtenus par Richard et coll. [39] à partir de mesures effectuées dans une flammeensemée de gouttelettes d'eau.

VI.3 Synthèse

Ce type d'investigation n'a pas été poussé plus avant faute de temps et de moyens à lui consacrer. Toutefois, sur la base de ces premiers résultats, la démarche apparaît prometteuse et mérite certainement d'être développée. Peut être pourrait-elle même justifier d'une étude véritablement spécifique.

L'une des difficultés majeure s'avère être la définition d'un volume de mesure bien caractérisable. En effet, en l'état actuel de la procédure expérimentale, l'ensemencement des fumées par le brouillard d'eau n'est pas obtenu dans des conditions suffisamment bien maîtrisées pour conduire à des mesures offrant toute la garantie de précision indispensable à l'analyse qui en est faite. De plus, l'utilisation d'une gamme de longueur d'onde plus étendue permettrait d'augmenter la fiabilité des résultats.

Troisième partie

Conclusion

Conclusion

Le présent travail a été consacré à l'étude de l'impact du brouillard d'eau pour la lutte contre le feu dans un tunnel ventilé longitudinalement. Il a été pour cela articulé autour d'une campagne expérimentale réalisée en réduction d'échelle, afin de pouvoir faire varier différents paramètres : nature du combustible (liquide ou solide) et intensité de la ventilation. En termes d'analyse, il a été axé sur l'influence de l'aspersion sur la puissance du foyer ainsi que sur les problèmes de stratification des fumées. Son objectif a été d'apporter des éléments de réflexion sur les conditions dans lesquelles l'aspersion de brouillard d'eau peut permettre (ou non) d'augmenter la protection des usagers, des services de secours et de la structure de l'ouvrage.

La campagne comporte deux types d'essais : ceux de référence et de brumisation. Les essais dits de référence, donc sans aspersion, conduits aux fins de comparaison, afin de juger de l'efficacité de la brumisation, ont pu être mis à profit pour apporter une contribution à la caractérisation de la stratification de l'écoulement des fumées, pour des conditions de ventilation encadrant la vitesse critique. Ces conditions sont en effet celles qui peuvent être exploitées lorsque l'on veut mettre en place une stratégie d'évacuation des usagers à partir de la gestion de la ventilation. Les résultats obtenus constituent ainsi une base de données qui vient enrichir les acquis dans ce domaine. En outre, ils viennent confirmer les potentialités offertes par les études en réduction d'échelle, avec foyers réels en respect de similitude, pour la caractérisation aéraulique d'un ouvrage.

Mais ce sont les essais de brumisation qui constituent le cœur du présent travail. Compte tenu de la complexité des interactions brouillard d'eau - foyer - vitesse de ventilation, mais aussi des échanges thermiques avec les parois, l'ambition s'est limitée à une appréciation de l'efficacité du brouillard d'eau en terme d'aptitude à freiner le développement des foyers et à le contenir à des niveaux de débit calorifique compatibles avec une intervention des Services de Secours dans des conditions de tenabilité admissibles.

Tous les résultats présentés ont été obtenus à partir d'une installation fixe de brumisation, dimensionnée sur la base du retour d'expérience de l'installateur pour une configuration de structure de la taille de celle du prototype. Ils concernent donc l'action d'un brouillard d'eau, de débit et de distribution de taille donnés, sur les trois types de foyers, le seul paramètre variable étant la vitesse de ventilation appliquée.

Les enseignements que l'on peut en tirer sont les suivants :

- Le brouillard d'eau montre une bonne efficacité vis-à-vis d'un feu de nappe. Dans les conditions de travail présentées, il peut contenir la puissance de 30 à 60 % de celle qui serait la sienne une fois stabilisé, suivant que la vitesse de ventilation est inférieure ou supérieure à la vitesse critique. Le rendement en eau *active*, déterminé sur la base d'un bilan aéraulique, apparaît par ailleurs très encourageant. Mais l'optimisation du système passe bien entendu par une sectorisation de l'aspersion.

- Dans le cas d'un foyer couvert, le brouillard d'eau n'a pas (ou seulement très peu) d'effet. Il apparaît donc que pour des vitesses de ventilation encore limitées (autour de la vitesse critique), les gouttelettes ne sont pas entraînées jusqu'au foyer. La capacité, souvent mise en avant, que pourraient avoir de fines gouttelettes à "contourner" des obstacles et à mieux venir pénétrer les flammes (par comparaison avec les gouttes beaucoup plus grosses générées par les systèmes d'eau pulvérisée - sprinkler - par exemple), n'est pas mise en évidence ici.
- Pour ce qui est des foyers bûchers, on se retrouve dans une situation pratiquement similaire. Les gouttelettes n'arrivent pas (ou très peu) à pénétrer l'empilement de baguettes de bois et l'efficacité est très faible.
- En revanche, avec les foyers palettes les éléments constitutifs sont beaucoup plus aérés et on retrouve une capacité à diminuer la puissance du feu de l'ordre de 60 %, voisine de celle observée pour certaines configurations de feux de nappe.

L'analyse de tous ces résultats et constats ne fait que confirmer que l'efficacité d'un brouillard d'eau dépend de l'aptitude de ses gouttelettes à pénétrer les zones de flamme, voire à atteindre les surfaces en combustion pour les foyers braisants. De plus, ces essais ont mis en évidence que la connaissance de la puissance du foyer au cours de l'intervention du brouillard d'eau est une donnée essentielle. Si sa détermination par mesure de perte de masse du foyer a la vertu d'être facilement mise en œuvre et robuste, l'analyse de la consommation d'oxygène au cours de l'expérience est à la fois pertinente et plus représentative en ce qui concerne non seulement le débit calorifique du foyer, mais également de changements de régime de combustion, notamment dans le cas des foyers à combustible solide. Néanmoins, cette mesure nécessite une évaluation fine des débits de mélanges gazeux au sein de l'appareil expérimental et est donc plus ardue à mettre en œuvre. Par ailleurs, l'adjonction d'une métrologie ou d'une méthode pour déterminer la répartition de l'eau du brouillard entre ruissellement, évacuation par la ventilation et action sur le foyer permettrait une quantification plus précise et fiable de l'action et du rendement en eau du système d'aspersion.

Il convient également de montrer que l'un des intérêts offerts et non des moindres par les études en réduction d'échelle est la reproductibilité très satisfaisante des résultats. Ainsi, par exemple, on constate que l'écart entre deux essais réalisés dans les mêmes conditions est inférieur à 15 % en moyenne sur l'essai.

D'un point de vue très appliqué, une installation fixe sous voûte, délivrant des jets dirigés selon une seule direction (vers le bas) peut donc se révéler d'une efficacité qui n'est pas optimale. Ainsi, un opérateur entraîné utilisant un appareil portatif de brumisation dont il pourra orienter le jet à sa guise, viendra à bout des flammes très rapidement. Une solution innovante pour les installations fixes, déjà avancée par certains, pourrait donc être un positionnement des buses en configuration de type portique, pour une attaque plus multidirectionnelle.

Qualitativement, ces résultats et constats ne sont pas fonction de la réduction d'échelle. Toutefois, l'un des objectifs étant de démontrer la pertinence des approches en similitude, il était intéressant de la valider à partir d'une confrontation avec des résultats de tests en vraie grandeur. Les essais SOLIT pouvaient en être l'opportunité dans la mesure où le rapport d'échelle avec le prototype était voisin de celui choisi pour l'étude et que l'un de ces essais avait été effectué avec un foyer également en similitude. Malheureusement, il n'a pas été possible d'avoir connaissance des caractéristiques détaillées des buses.

Mais l'un des effets mis en évidence, certainement le plus notable, a été l'effet de rideau d'eau. Dans la configuration considérée, des atténuations de rayonnement thermique de l'ordre de 75 % ont été mesurées, confirmant les potentialités offertes par les brouillards d'eau, en terme de protection, tant des structures que des personnes.

Enfin, les résultats obtenus sous aspersion ont mis en évidence dans tous les cas, une destratification des fumées, celles-ci étant plus ou moins chargées en gouttelettes d'eau. L'opacification du milieu qui en découle est un problème important qui suscite des interrogations et craintes. A partir des mesures d'opacité effectuées au cours des tests, est apparu la nécessité de mieux caractériser ce type de milieu, afin d'apporter des réponses permettant de s'affranchir de toute appréciation subjective. Une approche expérimentale originale a été élaborée en ce sens. Les premiers résultats auxquels elle a conduit sont prometteurs et ouvrent les perspectives d'une étude ultérieure plus spécifique sur le sujet.

Mais, quoi qu'il en soit, une recommandation à l'usage des opérationnels s'impose : le déclenchement du système d'aspersion doit faire l'objet d'une intégration à la stratégie globale d'intervention au sein de l'ouvrage.

Ainsi, une activation du brouillard tôt après la déclaration du feu permet de le contrôler et d'éviter l'agression, tant de la structure que des équipements et des véhicules, mais peut mettre en danger des usagers potentiellement encore présents. Si les conditions sont létales pour eux mais encore tenables pour les services de secours et de lutte contre l'incendie, alors le choix de l'activation de l'aspersion ne repose plus que sur le risque supplémentaire qu'il fait potentiellement encourir à ces derniers. Si les conditions deviennent intenable pour les services de secours et de lutte contre l'incendie, l'activation de l'aspersion reste le seul moyen actif de lutte contre le feu. Ce choix s'impose donc naturellement pour chercher à préserver l'ouvrage et limiter la propagation des flammes. Dans ce cas, il paraît préférable d'activer l'aspersion sur une plus grande étendue afin d'attaquer le foyer et de limiter son extension en protégeant les véhicules non encore touchés, ainsi que pour éviter d'endommager la structure du tunnel, dont la fragilisation peut faire courir un risque aux services de secours lors de leur intervention ou lors de la remise en condition de l'ouvrage.

Dans ces deux cas de figure, afin de réduire le risque, on peut avancer qu'une aspersion localisée majoritairement au niveau du foyer constitue un soutien pour la lutte contre le feu, sans trop dégrader les conditions environnantes, et limite le risque de destratification globale des fumées dans le tunnel.

Enfin, si les conditions de stratification peuvent être maintenues sans activation du brouillard d'eau, et dans le cas où l'évolution du foyer reste dans la plage prévue lors de la conception, c'est aux services de secours de décider de l'activation ou non de l'aspersion, compte tenu des observations faites in situ, notamment de leur constat que tous les usagers ont évacué. Ce constat est toutefois impossible à faire si les fumées ne sont pas stratifiées. Dans cette situation pénalisante (et qui en principe devrait être évitée dans le cas de présence des usagers), on peut raisonnablement avancer que l'aspersion, localisée au niveau du foyer, a tout de même des chances d'améliorer des conditions de tenabilité déjà dégradées. La reconnaissance par les services de secours et de lutte contre l'incendie présents sur les lieux est déterminante pour permettre de localiser le foyer et guider la mise en œuvre de l'aspersion.

Bibliographie

- [1] *Les interventions en cas d'incendie en tunnel, synthèse des réflexions d'un groupe de travail organisé par la Direction de la Défense et de la Sécurité Civile.* Direction de la Défense et de la Sécurité Civile, 1999.
- [2] Centre d'Etude des Tunnels. *Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers - Fascicule 4 - Les études spécifiques des dangers (ESD).* 2003.
- [3] Drysdale D. *An introduction to fire dynamics*, page 12. John Wiley Sons, second edition, 1999.
- [4] Mawhinney J.R. Water mist fire suppression systems for marine applications : a case study. In *IMAS 94 - Fire safety on ships*, 1994.
- [5] Ravigururajan T.S. and Beltran M.R. A model for attenuation of fire radiation through water droplets. *Fire Safety Journal*, 15 :171, 1989.
- [6] Coppalle A., Nedelka D., and Bauer B. Fire protection : Water curtains. *Fire Safety Journal*, 20 :241, 1993.
- [7] Dembele S. *Modélisation et étude expérimentale des transferts de chaleur par rayonnement dans un rideau d'eau diphasique. Application à la protection incendie d'installations industrielles à risques.* Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1998.
- [8] Dembele S., Delmas A., and Sacadura J.F. Shielding fire thermal radiation by water sprays curtains : some improvements in radiative transfer modelling. In *Industrial Fires 3, EUR 17477 EN, Riso, Denmark*, pages 175–183, 1996.
- [9] Dembele S., Delmas A., and Sacadura J.F. A method for modelling the mitigation of hazardous fire thermal radiation by water spray curtains. *Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer*, 115 :746, 1997.
- [10] Pretrel H. *Etude du comportement thermodynamique de pulvérisation liquides sous l'effet du rayonnement infrarouge : Application à la protection incendie par rideau d'eau.* Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1997.
- [11] Collin A. *Transferts de chaleur couplés rayonnement-conduction-convection. Application à des rideaux d'eau soumis à une intense source radiative.* Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2006.

- [12] Collin A., Boulet P., Parent G., and Lacroix D. Numerical simulation of a water spray - radiation attenuation related to spray dynamics. *International Journal of Thermal Sciences*, 46 :856, 2006.
- [13] Boulet P., Collin A., and Parent G. Heat transfer in a water spray curtains under the effect of a strong radiative source. *Fire Safety Journal*, 41 :15, 2006.
- [14] Parent G., Boulet P., Gauthier P., Blaise J., and Collin A. Experimental investigation of radiative transmission through a water spray. *Journal of Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer*, 97 :126, 2006.
- [15] Consalvi J.L., Porterie B., and Loraud J.C. Dynamic and radiative aspects of fire-water mist interaction. *Combustion Science and Technology*, 176 :721, 2004.
- [16] Mawhinney J.R., Dlugogorski B.Z., and Kim A.K. A closer look at the fire extinguishing properties of water mist. In *Fire Safety Science - Proceedings of the Fourth International Symposium*, page 47, 1994.
- [17] Kim M.B., Jang Y.J., and Yoon M.O. Extinction limit of a pool fire with a water mist. *Fire Safety Journal*, 28 :295, 1997.
- [18] Grosshandler W., Lowe D., Notarianni K., and Rinkinen W. *Protection of data processing equipment with fine water sprays*. NISTIR 5514, 1995.
- [19] Tamanini F. The application of water sprays to the extinguishment of crib fires. *Combustion Science and Technology*, 14 :17, 1976.
- [20] Mawhinney J.R. Engineering criteria for water mist fire suppression systems. In *Proceedings of the Water Mist Fire Suppression Workshop*, 1993.
- [21] Mesli B. *Etudes expérimentales sur l'extinction par brouillards d'eau des flammes turbulentes de prémélanges stabilisées entre deux jets opposés*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2000.
- [22] Zheng R., Bray K. N.C., and Rogg B. Effect of sprays of water and nacl-water solution on the extinction of laminar premixed methane-air counterflow flames. *Combustion Science and Technology*, 126 :389, 1997.
- [23] Kim H.T. Inhibition effectiveness of dry chemical in methane/air flames. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 9 (1) :1, 1992.
- [24] Xiaomeng Z., Guangxuan L., and Bo C. Improvement of water mist's fire-extinguishing efficiency with mc additive. *Fire Safety Journal*, 41 :39, 2006.
- [25] Braidech M.M., Neale J.A., Matson A.F., and Dufour R.E. The mechanism of extinguishment of fire by finely divided water. *Underwriters Laboratories Inc. for the National Board of Fire underwriters*, page 73, 1955.
- [26] Rabash D.J. The extinction of fires by water sprays. *Fire Research Abstract Review*, 4 :223, 1962.

- [27] Rabash D.J., Rogowski Z.W., and Stark G.W. Mechanisms of extinction of liquid fires with water sprays. *Combustion and Flame*, 4 :223, 1959.
- [28] Vincent C.G and Howard W.B. Hydrocarbon mist explosions - part 2 : Prevention by water fog. *Journal of Loss Prevention*, 10 :55, 1976.
- [29] Lugar J.R. *Preliminary test results on fine water mist fire protection systems study*. David W. Taylor Naval Ship RD Center, Maryland, 1979.
- [30] Lugar J.R. *States report of fine water mist fire protection*. David W. Taylor Naval Ship RD Center, Maryland, 1980.
- [31] Kokkala M.A. Extinction of liquid pool fires with sprinklers and water sprays. In *Valtion Tekniseh Tutkimuskeskus Statens Teniska Forskningscentral (Technical Research Center of Finland)*, Espoo, 1989.
- [32] Dlugogorski B.L. and Kim A.K. Private communication. In *National Fire Laboratory, National Research Council Canada*, 1994.
- [33] Jones A. and Thomas G.O. The action of water sprays on fires and explosions : a review of experimental work. *Transactions IchemE*, 71 :71, 1993.
- [34] Kim M.B., Jang Y.J., and Kim J.K. Burning rate of a pool fire with downward-directed sprays. *Fire Safety Journal*, 27 :37, 1996.
- [35] Ndubizu C.C., Ananth R., Tatem P.A., and Motevalli V. On water mist fire suppression mechanisms in a gaseous diffusion flame. *Fire Safety Journal*, 31 :253, 1998.
- [36] Ndubizu C.C., Ramagopal A., and Tatem P.A. The effects of droplet size and injection orientation on water mist suppression of low and high boiling point liquid pool fires. *Combustion Science and Technology*, 157 :63, 2000.
- [37] Downie B., Polymeropoulos C., and G. Gogos. Interaction of a water mist with a buoyant methane diffusion flame. *Fire Safety Journal*, 24 :359, 1995.
- [38] Mesli B., Quilgars A., Chauveau C., and Gökalp I. Extinction limits of opposed jet turbulent premixed methane air flames with water mist. In *Fire Safety Science - Proceedings of the Sixth International Symposium*, page 445, 2000.
- [39] Richard J., Garo J.P., Souil J.M., Vantelon J.P., and Lemmonier D. Addition of water mist on a small-scale liquid pool fire. Effect on radiant heat transfer at the surface. *Proc. Combust. Inst.*, 29 (1) :377, 2002.
- [40] Richard J., Garo J.P., Souil J.M., and Vantelon J.P. On the determination of soot and droplet concentration and velocity fields during the addition of a water mist on a liquid pool fire at laboratory scale. In *Fire Safety Science - Proceedings of the Seventh International Symposium*, page 507, 2002.
- [41] Richard J., Garo J.P., Souil J.M., and Vantelon J.P. On the flame structure at the base of a pool fire interacting with a water mist. *Experimental Thermal and Fluid Science Journal*, 27 (4) :439, 2003.

-
- [42] Richard J., Garo J.P., Souil J.M., Vantelon J.P., and Knorre V.G. Chemical and physical effects of water vapour addition on diffusion flames. *Fire Safety Journal*, 38 :569, 2003.
- [43] Back G.G. An overview of water mist suppression systems technology. In *Halon Alternatives Technical Working Conference, Albuquerque*, 1994.
- [44] Mawhinney J.R. and Richardson J.K. A review of water mist fire suppression research and development. *Fire Technology*, 33(1) :54, 1997.
- [45] Liu Z. and Kim A.K. A review of water mist fire suppression systems. fundamental studies. *Journal of Fire Protection Engineering*, 10(3) :32, 2000.
- [46] Mawhinney J.R. and Back G.G. *Water mist suppression systems technology*. The SFPE Handbook of fire protection engineering, third edition, 2002.
- [47] Gant G., Brenton J., and Drysdale D. Fire suppression by water sprays. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26 :79, 2000.
- [48] Alpert R.L. Numerical modelling of interaction between automatic sprinkler sprays and fire plumes. *Fire Safety Journal*, 9 :157, 1985.
- [49] Nam S. Development of a computational model simulating the interactions between a fire plume and a sprinkler spray. *Fire Safety Journal*, 26 :1, 1996.
- [50] Nam S. Numerical simulations of the penetration capability of sprinkler sprays. *Fire Safety Journal*, 32 :307, 1999.
- [51] Novozhilov V., Harvie D.J.E., Kent J.H., Apte V.B., and Pearson D. A computational fluid dynamics study of wood fire extinguishment by water sprinkler. *Fire Safety Journal*, 29 :259, 1997.
- [52] Novozhilov V. A computational fluid dynamics modeling of compartment fires. *Progress in Energy and Combustion Science*, 27 :611, 2001.
- [53] Prasad K., Li C., Kailasanath K., Ndubizu C., and Ananth R. Numerical modeling of water mist suppression of methane-air diffusion flame. *Combustion Science and Technology*, 132 :325, 1998.
- [54] Prasad K., Patnaik G., and Kailasanath K. A numerical study of water-mist suppression of large scale compartment fires. *Fire Safety Journal*, 37 :569, 2002.
- [55] Prasad K., Li C., and Kailasanath K. Simulation of water mist suppression of small scale methanol liquid pool fires. *Fire Safety Journal*, 33 :185, 1999.
- [56] Nmira F. *Modélisation et simulation numérique de l'interaction entre un feu et un brouillard d'eau*. Thèse de doctorat, Université de Provence, Marseille, 2007.
- [57] Nmira F., Consalvi J.L., Fernandez Pello A.C., and Porterie B. A numerical study of water mist mitigation of tunnel fires. *Fire Safety Journal*, 2008.
-

- [58] Thomas P.H. Modeling of compartment fires. *Fire Safety Science - Proceedings of the Seventh International Symposium*, page 181, 1983.
- [59] Williams F.A. Scaling mass fires. *Fire Research Abstracts and Reviews*, 11 :1, 1969.
- [60] Hottel M.C. Fire modeling. the use of models in fire research. *National Academy of Sciences - NRC Warhington DC*, 786 :32, 1961.
- [61] Heskestad G. Physical modeling of fire. *Journal of Fire and Flammability*, 6 :253, 1975.
- [62] Heskestad G. Modeling of enclosure fires. In *Proc. Combust. Inst.*, volume 14, page 1021, 1973.
- [63] Quintiere J.G. Scaling applications in fire research. *Fire Safety Journal*, 15 :3, 1989.
- [64] Heskestad G. Scaling the interaction of water sprays and flames. *Fire Safety Journal*, 37 :535, 2002.
- [65] Jayaweera T. and Yu H.Z. Scaling of fire cooling by water mist under low drop reynolds number conditions. *Fire Safety Journal*, 43 :63, 2008.
- [66] Yu H.Z., Zhou X., and Ditch B. Experimental validation of froude-modelling-based physical scaling of water mist cooling of enclosure fires. In *Fire Safety Science - Proceedings of the 9th International Symposium*, page 553, 2008.
- [67] Vauquelin O. and Telle D. Definition and experimental evaluation of the smoke confinement velocity in tunnel fires. *Fire Safety Journal*, 40 :320, 2005.
- [68] Vantelon J.P., Guelzim A., Quash D., Doan Kim Son, Gabay D., and Dallest D. Investigation of fire-induced smoke movement in tunnels and stations : an application to the paris metro. In *Fire Safety Science - Proceedings of the Third International Symposium*, page 907, 1991.
- [69] Guelzim A., Souil J.M., Vantelon J.P., Doan Kim Son, Gabay D., and Dallest D. Modeling of a reverse layer of fire induced smoke in tunnel. In *Fire Safety Science - Proceedings of the Fourth International Symposium*, page 277, 1994.
- [70] Saito N. and Yamada T. and Sekizawa A. and Yanai E. and Watanabe Y. and Miyazaki S. Experimental study on fire behaviour in a wind tunnel with a reduced scale model. *Safety in Road and Rail Tunnels, 2nd International Conference, Grenade*, pages 303–310, 1995.
- [71] DiNenno P.J. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, chapter 3, page 14. Society of Fire Protection Engineers.
- [72] DiNenno P.J. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, chapter 3, page 24. Society of Fire Protection Engineers.
- [73] Newman J.S. Experimental evaluation of fire-induced stratification. *Combustion and Flame*, 57 :33, 1984.

- [74] Ponticq X. *Etudes sur les systèmes fixes d'aspersion d'eau en tunnel*, pages 136–140. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon 1, 2008.
- [75] Thornton W.M. The relation of oxygen to the heat of combustion of organic compounds. *Philos. Mag.*, 33, 1917.
- [76] Curtat M. *Traité du Physique du bâtiment : Tome 3 - Physique du feu pour l'ingénieur*, page 692. CSTB.
- [77] Thomas P.H. Movement of smoke in horizontal corridors against an air flow. *Institution of fire engineers quarterly*, 30 :45, 1970.
- [78] Danziger N.H. and Kennedy W.D. Longitudinal ventilation analysis for the glenwood canyon tunnels. In *4th International Symposium on the Aerodynamics Ventilation of Vehicle Tunnels*, page 169, 1982.
- [79] Harmathy T.Z. Experimental study on the effect of ventilation on the burning of piles of solid fuels. *Combustion and Flame*, 31 :259, 1978.
- [80] Casalé E. *Projet RGCU - Incendie en tunnel - Rapport de synthèse*.
- [81] Kratzmeir S. and Starke H. *Safety of Life in Tunnels - Research Report*. 2007.
- [82] Mie G. Beiträge zur optik trüber medien, speziell kolloidaler metallösungen. *Ann. Phys. Leipzig*, 25 :377, 1908.
- [83] Mätzler C. *MATLAB Functions for Mie Scattering and Absorption - Research Report No 2002-08*, June 2002.
- [84] Chang H. and Charalampopoulos T. T. Determination of the wavelength dependence of refractive indices of flame soot. In *Proc. Roy. Soc. Lond.*, page 577, 1990.
- [85] Van de Hulst H.C. *Multiple light scattering, Vol 1 et 2*. Academic, New York, 1981.

RESUME :

Cette étude s'inscrit dans la recherche d'une meilleure maîtrise des feux en tunnel à partir d'installations fixes type brouillard d'eau.

Ce travail essentiellement expérimental s'est appuyé sur des essais réalisés en réduction d'échelle. Les paramètres d'étude sont : le type de foyer (feu de nappe, bûchers et empilements de palettes), la vitesse de ventilation longitudinale (inférieure ou supérieure à la vitesse critique), le déclenchement ou non d'un système de brouillard d'eau ainsi que la sectorisation de celui-ci.

A son terme, cette étude a permis d'analyser les effets de l'aspersion sur la puissance intrinsèque du foyer, la stratification des fumées et la tenabilité thermique dans l'ouvrage. Une discussion sur les stratégies d'application de la ventilation en cas d'incendie en tunnel et son couplage avec l'aspersion a également été menée, montrant une nette amélioration de l'efficacité du brouillard lorsque la vitesse de ventilation est faible, et ce en dépit de l'augmentation de puissance du foyer due à l'effet de confinement de l'ouvrage.

De plus, un travail de réflexion et de synthèse sur les relations de similitude à respecter lors d'une étude de ce type en réduction d'échelle a été conduit, que ce soit concernant l'aérodynamique, la puissance du foyer ou les caractéristiques du brouillard d'eau.

Enfin, une étude annexe sur l'influence d'un brouillard d'eau sur l'opacité des fumées a été réalisée, quantifiant l'extinction optique des fumées chargées en gouttelettes d'eau.

ABSTRACT :

This mostly experimental study is based on tests conducted in small scale. The study parameters are : the type of fuel (pool fire, wood crib and pallet stacks), the ventilation velocity (below and above the critical velocity), the triggering or not of the water mist system and its dividing in sectors.

In the end, this study provided information on the effect of sprinkling on the intrinsic heat release rate of the fire, the smoke stratification and the thermal tolerable zones in the tunnel. By analysing the ventilation strategy and its linkage with the sprinkling, a clear improvement of the efficiency of the water mist at low ventilation speed has been demonstrated, and this despite the increase of heat release rate due to the confinement.

Moreover, a part of this work has been devoted to reasoning on a synthesis of the scale relations for the gas flow, fire's heat release rate and water mist characteristics, relations that have to be respected when using a small scale apparatus.

Eventually a research has been conducted on the influence of a water mist on the opacity of smoke, quantifying the optical extinction of the smokes loaded with water droplets.

MOTS CLEFS :

- Brouillard d'eau
- Incendie
- Tunnel
- Similitude
- Stratification
- Opacimétrie